

Diseño de un sistema invernadero con riego automatizado para plantas ornamentales

Jorge Daniel Lugo Daza

Yeison Imbachi Samboni

Asesor

Nancy Amparo Guaca Girón

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería ECBTI

Ingeniería Electrónica

2026

Resumen

El impacto de la tecnología en el campo colombiano es muy interesante, porque se busca de una u otra forma ayudar al agricultor a que sus cultivos sean mucho más rentables, y que no dependan netamente del clima, lo que le permite al agricultor obtener mejores resultados, reduciendo así trabajos manuales, costos financieros, aumento en la capacidad de producción, volviendo así el trabajo agrícola más rentable y atractivo. Otro rasgo importante de tener en cuenta es que según estudios la población mundial crecerá un 34% para 2050 (Eos, 2022), lo que requiere un mayor rendimiento de los cultivos y optimizar mucho más los recursos naturales, y sumado a esto el constante cambio climático que cada día empeora más.

El uso de tecnologías IoT, junto con actuadores y sensores, permite optimizar el uso de los recursos naturales. Asimismo, se reduce significativamente la tasa de pérdida y se incrementa la productividad. La implementación de sensores proporciona datos más precisos sobre las condiciones climáticas, lo que facilita la toma de decisiones más acertadas.

Las ventajas que se encuentran en las plantas es que, al tener un clima más estable, se mejoraría la eficiencia de producción, simplificar la previsión de riesgos, sería un cultivo más sostenible, mayor calidad de producto lo que podría valer más en el mercado.

Palabras Claves: Invernadero, Clima, Automatización, Riego, ESP32

Abstract

The impact of technology on the Colombian countryside is very interesting because it seeks, in one way or another, to help farmers make their crops much more profitable.

Technology is not solely dependent on the weather, allowing farmers to obtain better results, thereby reducing manual labor, reducing financial costs, and increasing production capacity, making agricultural work more profitable and attractive. Another important factor to consider is that, according to studies, the world's population will grow 34% by 2050 (Eos, 2022), which requires higher crop yields and a much greater optimization of natural resources. Added to this is the constant climate change that is worsening every day.

The use of IoT, actuators, and sensors allows for the optimization of the use of natural resources. The loss rate is much lower or very minimal, and productivity will increase. By using sensors, we have more accurate data on weather conditions, allowing us to make better decisions. The advantages we can find in our cemetery plants are that, by having a more stable climate, production efficiency would be improved, risk prevention would be simplified, cultivation would be more sustainable, and flower quality would be higher, which could be worth more on the market.

Keywords: Greenhouse, Climate, Automation, Irrigation, ESP32

Tabla de contenido

Introducción	12
Generalidades.....	13
Descripción del Problema	13
Planteamiento del Problema.....	13
Justificación y Alcance del Proyecto	15
Objetivos.....	17
Objetivo General	17
Objetivos Específicos.....	17
Metodología	18
Ciclo de Deming PHVA (Planear, Hacer, Verificar y Actuar)	18
<i>Fase Planeación</i>	18
<i>Fase Hacer</i>	18
<i>Fase Verificar</i>	19
<i>Fase Actuar</i>	19
Estado del Arte.....	21
Sistema IoT para Control de Cultivo de Lechugas	21
<i>Objetivos Específicos</i>	21
Invernadero Inteligente (COLINVERTEC).....	22
Mercado de Equipos para Invernadero en Asia Pacifico	23
Automatización en Invernaderos.....	26
Holanda: Líder en Agricultura Sostenible y Eficiente en Invernaderos.....	27

Sistema de Riego Automatizado para un Cultivo de Pequeña Superficie.....	28
Tecnologías de Detección y Automatización en Viveros.	28
Tecnologías de la Industria 4.0 en la Floricultura.....	29
Dispositivo de Medición en Agricultura de Precisión para Rosas.	30
Desarrollo de un Sistema Automatizado para un Invernadero.....	31
Marco Referencial.....	32
Marco Teórico	32
<i>Sistemas Embebidos</i>	32
<i>El Internet de las Cosas (IoT)</i>	32
<i>Invernadero</i>	33
<i>Raspberry Pi</i>	34
<i>Sistema IoT con ESP32 para Riego por Goteo Inteligente y Monitoreo</i>	35
<i>Internet de las Cosas Aplicado a la Agricultura</i>	36
Diseño del Invernadero Automatizado	37
Caracterización del Lugar Piloto y de la Infraestructura Existente.....	37
Infraestructura del Vivero CORSAVIDA	37
Tipos de Plantas a Cultivar y sus Variables de Crecimiento Ideales	44
Componentes IoT del Nuevo Sistema de Riego de Invernadero	46
Arquitectura de la Red.....	47
<i>Sensores</i>	48
<i>Actuadores</i>	49

Controlador.....	49
Diseño de Propuesta Solución al Problema	51
<i>Explicación Diseño</i>	52
<i>Componentes del Prototipo</i>	57
<i>Sensor Humedad de Suelo</i>	60
<i>Diseño del Prototipo</i>	69
<i>Software Utilizado para el Prototipo</i>	70
Nube HiveMQ	71
<i>IoT MQTT Planet</i>	72
<i>Arquitectura General</i>	72
Aplicación de los Principios de la Ingeniería Electrónica en un Invernadero Automatizado con ESP32	75
<i>Principios de Electricidad y Electrónica Básica</i>	75
<i>Electrónica Analógica y Digital</i>	75
<i>Sistemas Digitales y Microcontroladores</i>	75
<i>Sistemas de Control Automático</i>	75
<i>Electrónica de Potencia y Actuadores</i>	76
<i>Comunicación y Monitoreo de Datos</i>	76
<i>Diseño Electrónico, Seguridad y Confiabilidad</i>	76
<i>Ingeniería Electrónica y Sostenibilidad</i>	76
<i>Histéresis en el Sistema de Control</i>	76
<i>Ensamblaje (Conexiones entre ESP32 y los Componentes):</i>	79

<i>Prototipo</i>	79
<i>Plataforma de Gestión</i>	85
Resultados Experimentales	87
Descripción del Prototipo de Laboratorio	87
Resultados de Monitoreo de Variables Climáticas	87
Resultados del Sistema de Control.....	88
Resultado de la Comunicación y Visualización IoT	88
Resultado de la Etapa de Potencia.....	89
Discusión.....	90
Análisis del Desempeño del Sistema de Control	90
Conclusiones	91
Recomendaciones	93
Referencias.....	95

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Mejoras en la Eficiencia Agrícola Mediante IoT</i>	24
Tabla 2 <i>Variables Climáticas</i>	48
Tabla 3 <i>Tabla Comparativa de Microprocesadores</i>	50
Tabla 4 <i>Rangos Óptimos de Variables</i>	52
Tabla 5 <i>Comparación de Sensor de Temperatura</i>	58
Tabla 6 <i>Comparación de Sensor Humedad de Suelo</i>	60
Tabla 7 <i>Comparativa de funciones de relé y contactor</i>	69
Tabla 8 <i>Comparación de Plataforma de Monitoreo</i>	69
Tabla 9 <i>Comparación Brokers MQTT</i>	70
Tabla 10 <i>Comparación entre Arduino Uno, Raspberry pi y ESP32 para la Automatización del Invernadero</i>	74

Lista de Figuras

Figura 1	<i>Ubicación Geográfica del Invernadero de Estudio</i>	16
Figura 2	<i>Invernadero Semillero</i>	38
Figura 3	<i>Encendido del Sistema de Riego</i>	39
Figura 4	<i>Motobomba para Impulsar el Agua</i>	40
Figura 5	<i>Sistema de Recolección de Agua</i>	40
Figura 6	<i>Sistema de Riego Dentro del Vivero</i>	41
Figura 7	<i>Riego por Medio de Manguera Manualmente</i>	42
Figura 8	<i>Instalaciones del Invernadero</i>	43
Figura 9	<i>Arquitectura de la Red del Sistema</i>	47
Figura 10	<i>Diseño de Propuesta Solución</i>	55
Figura 11	<i>Diseño 3D Instalaciones del Invernadero</i>	55
Figura 12	<i>Sensor de Humedad Relativa y Temperatura DHT 22</i>	59
Figura 13	<i>Sensor Capacitivo De Humedad De Suelo</i>	61
Figura 14	<i>Lámpara Radiación Infrarroja 250W 110V Infra V E27</i>	62
Figura 15	<i>Placa ESP32</i>	64
Figura 16	<i>Motor Bomba de Agua</i>	65
Figura 17	<i>Ventilador Axial 14 Succión 110v 1600 Rpm</i>	66
Figura 18	<i>Módulo de 4 Relés 5 VCC 10 A (Montado)</i>	68
Figura 19	<i>Logo de la Nube de HiveMQ</i>	71
Figura 20	<i>Diagrama de Flujo</i>	78
Figura 21	<i>Circuito de Conexiones Eléctricas</i>	79
Figura 22	<i>Prototipo Invernadero</i>	79
Figura 23	<i>Implementación de Sensor Humedad Suelo</i>	80
Figura 24	<i>Implementación Sensor DHT22</i>	81

Figura 25 <i>Implementación Actuador Ventilación</i>	81
Figura 26 <i>Implementación Actuador - Calefacción</i>	82
Figura 27 <i>Implementación Actuador - Bomba de Agua</i>	82
Figura 28 <i>Implementación ESP32</i>	83
Figura 29 <i>Implementación de Relé</i>	83
Figura 30 <i>Implementación de Baterías</i>	84
Figura 31 <i>Implementación de Pantalla LCD</i>	84
Figura 32 <i>Plataforma de Gestión</i>	85

Lista de Apéndices

Apéndice A <i>Código ESP32</i>	102
Apéndice B <i>Video Sustentación</i>	103
Apéndice C <i>Diagrama de Flujo Algoritmo de Control</i>	104

Introducción

La falta de garantías en cultivos ornamentales, sumada a los constantes cambios climáticos, ha generado la búsqueda de soluciones tecnológicas que optimicen los procesos agrícolas. En este contexto, los invernaderos automatizados representan una alternativa eficiente para garantizar una producción controlada, sostenible y de alta calidad durante todo el año.

Un invernadero automatizado integra sensores, actuadores y sistemas de control para regular variables críticas como la temperatura, la humedad, la iluminación y el riego, asegurando así condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas. Mediante la implementación de tecnologías como microcontroladores, sistemas embebidos, comunicación de datos y energías renovables, es posible reducir el uso de recursos, minimizar el error humano y aumentar la productividad en el cultivo de flores ornamentales.

El presente proyecto tiene como objetivo diseñar un sistema de invernadero automatizado capaz de monitorear y controlar de forma precisa las condiciones internas, mediante el uso de una arquitectura tecnológica adecuada para la gestión eficiente de las variables del entorno. Es importante precisar que el alcance del trabajo corresponde al nivel de diseño, validado mediante un prototipo de laboratorio; por tanto, no constituye una implementación a escala real en el invernadero piloto. El prototipo desarrollado permite verificar el funcionamiento del sistema bajo condiciones controladas, sentando las bases para una futura implementación en campo.

El desarrollo de este sistema no solo busca ofrecer una solución técnica viable desde la ingeniería, sino también aportar a la transformación de la agricultura, demostrando cómo la ingeniería electrónica puede responder a las necesidades actuales.

Generalidades

Descripción del Problema

El presente proyecto se enmarca en el diseño de sistemas automatizados aplicados a la agricultura, específicamente en el desarrollo de soluciones tecnológicas para el monitoreo y control de variables ambientales en cultivos ornamentales.

En este contexto, se abordan aspectos relacionados con la automatización, el uso de sensores, actuadores y sistemas de control, con el propósito de mejorar la eficiencia en los procesos de producción agrícola y optimizar el uso de los recursos naturales.

Este enfoque permite integrar conocimientos de la ingeniería electrónica para dar respuesta a problemáticas reales del sector agrícola, contribuyendo al desarrollo de prácticas más sostenibles y tecnificadas.

Planteamiento del Problema

En la vereda Santa Rosa, ubicada en las afueras de la ciudad de Popayán Cauca, un agricultor dedicado al cultivo de flores ornamentales como lirios, rosas, crisantemos, margaritas, pensamientos y claveles, enfrenta serias dificultades en el proceso de germinación y producción de sus plantas. Estas dificultades se deben principalmente a las variaciones climáticas propias de la región, las cuales generan condiciones inestables de temperatura dentro del invernadero, afectando negativamente el desarrollo óptimo de los cultivos.

Según estudios de la FAO (2021), las variaciones climáticas no solo alteran la productividad de los cultivos agrícolas, sino que también exigen la adopción de soluciones tecnológicas que permitan adaptar los sistemas de producción a estas nuevas condiciones. El control ambiental en invernaderos especialmente de variables como la temperatura, es fundamental para garantizar la calidad y el rendimiento de cultivos sensibles como las flores ornamentales.

Actualmente, el control de temperatura en el invernadero mencionado se realiza de forma manual, lo que limita la capacidad de respuesta ante cambios súbitos del clima. Esta situación repercute en la eficiencia del proceso de cultivo, disminuye la calidad del producto final y genera pérdidas económicas.

Por ello, se propone el diseño de un sistema automatizado para el control térmico del invernadero, utilizando sensores y actuadores gestionados por un controlador. Esta solución busca mantener condiciones ambientales óptimas para la germinación y crecimiento de las plantas, aumentando la productividad y reduciendo la dependencia del control humano.

Justificación y Alcance del Proyecto

El desarrollo de un sistema automatizado para el control climático en invernaderos de flores ornamentales en la vereda Santa Rosa, Popayán Cauca, responde a necesidades de orden sociocultural, económico, ambiental y tecnológico que se articulan de manera complementaria. Desde el ámbito cultural, la floricultura en esta región no es únicamente una actividad productiva, sino una práctica arraigada en la identidad de las comunidades rurales que fortalece lazos comunitarios y la autoestima colectiva (Gómez & Pérez, 2019); la integración de tecnologías modernas permite que los productores locales adopten herramientas innovadoras sin desplazar sus saberes tradicionales, potenciándolos como agentes de cambio (Rodríguez et al., 2020). En lo económico, las variaciones climáticas frecuentes en la zona generan pérdidas significativas que limitan la capacidad de reinversión de los pequeños productores; la automatización del control de temperatura, humedad y riego estabiliza las condiciones del cultivo, lo que según la FAO (2021) puede incrementar la productividad hasta en un 30%, abriendo posibilidades de acceso a mejores mercados y optimización del tiempo y los recursos (Torres & López, 2022). Desde la perspectiva ambiental, el control preciso de estas variables reduce el desperdicio de recursos hídricos y disminuye la dependencia de agroquímicos al favorecer el crecimiento de plantas en condiciones óptimas que fortalecen su resistencia natural (García & Martínez, 2023), alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y las recomendaciones de la FAO (2021) frente al cambio climático y la escasez hídrica (IPCC, 2022); el uso de componentes de bajo consumo energético contribuye además a reducir la huella de carbono del sistema. Desde la ingeniería, el proyecto representa una aplicación concreta de sensores de precisión, sistemas de control y módulos de comunicación inalámbrica (Wi-Fi, LoRa, Bluetooth) que permiten la gestión en tiempo real del cultivo con protocolos de seguridad para la protección

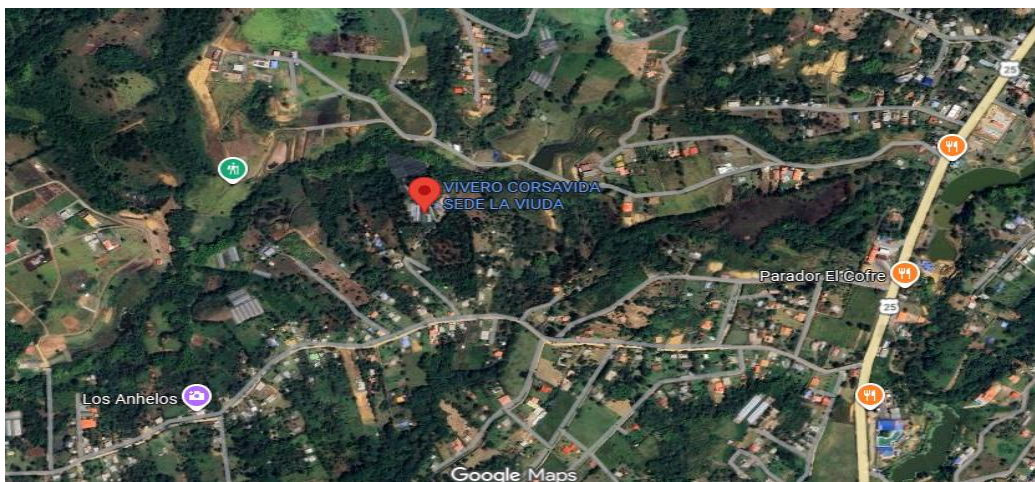
de datos en entornos IoT (Martínez & Vargas, 2023; Rodríguez et al., 2020), consolidando un modelo replicable de transferencia tecnológica para contextos rurales de la región.

En cuanto al alcance, el diseño propuesto está dirigido al invernadero ubicado en la vereda Santa Rosa, a las afueras de Popayán, dedicado al cultivo de flores ornamentales.

Dicha ubicación se muestra en la Figura 1.

Figura 1

Ubicación Geográfica del Invernadero de Estudio



Nota. Adaptado de Google Maps (Google, 2026).

El resultado es una propuesta técnica documentada que sienta las bases para una eventual implementación, y que puede servir como punto de partida para futuras iniciativas que busquen integrar tecnología moderna en los procesos agrícolas tradicionales de la zona.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar un sistema de automatización inteligente para un invernadero que se encuentra en la vereda Santa Rosa a las afueras de la ciudad de Popayán Cauca, en el cual se busca cultivar diferentes tipos de flores de cementerio con alto índice de calidad.

Objetivos Específicos

Realizar un estudio comparativo de las tecnologías disponibles para el control y monitoreo de variables como temperatura, agua, humedad del suelo y del aire, de un invernadero.

Realizar el diseño del sistema de monitoreo, indicando el tipo de sensores y demás hardware necesario para la visualización en tiempo real de las variables en el invernadero inteligente.

Documentar y validar la aplicabilidad del sistema.

Metodología

Ciclo de Deming PHVA (Planear, Hacer, Verificar y Actuar)

Se requiere de un orden lógico para llevar a cabo los procesos de una manera ordenada, para lo cual se emplea el ciclo de calidad PHVA que consta de las siguientes fases: (planear, hacer, verificar y actuar)

Fase Planeación

Objetivo: Definir los requisitos y el alcance del diseño del invernadero.

Actividades. Especificar las funciones del invernadero (por ejemplo, control automático de temperatura, agua, humedad del suelo y del aire).

Definir las condiciones climáticas del sitio, con el fin de establecer los parámetros óptimos para el crecimiento del cultivo.

Planificar las herramientas a usar: software de diseño de circuitos, simuladores, entornos de programación y software de visualización.

Fase Hacer

Objetivo: Desarrollar el diseño del sistema electrónico del invernadero.

Actividades. Identificar los componentes electrónicos necesarios, tales como sensores para la medición de variables ambientales y actuadores para el control de las condiciones del sistema.

Diseñar los esquemáticos electrónicos (conexión de sensores, actuadores y microcontrolador).

Programar el firmware básico para simular el comportamiento del sistema.

Se deberá contar con un software de visualización (Dashboard) que se representa como una interfaz gráfica en donde el usuario puede validar el estado en tiempo real del invernadero, las gráficas deben ser claras y fáciles de entender, donde se debe ver las estadísticas básicas requeridas de las actividades.

Realizar validaciones en el prototipo del sistema de riego.

En esta fase se diseñó el sistema electrónico utilizando la plataforma proteus 8, donde se establecieron las conexiones eléctricas de los componentes. Posteriormente, en el entorno de desarrollo Arduino IDE se programó el código fuente para el funcionamiento de la tarjeta ESP32. Para la visualización del funcionamiento del sistema se realizó un prototipado con los sensores reales, con actuadores que ayudaron a verificar el correcto funcionamiento del sistema, además por medio de la plataforma IoT MQTT Panel se realiza el proceso de monitoreo en tiempo real de las condiciones climáticas del invernadero.

Fase Verificar

Objetivo: Validar que el diseño cumple con los requisitos establecidos.

Actividades. Revisar esquemas de diseño para detectar errores.

Ejecutar el sistema para verificar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones.

Comparar resultados de las pruebas en el prototipo con los requisitos iniciales.

En esta fase se verificó el correcto funcionamiento del sistema mediante el desarrollo del prototipo. Se comprobó que los sensores de temperatura, humedad del aire y del suelo respondieron adecuadamente a diferentes condiciones simuladas, activando los actuadores correspondientes, como alarmas visuales, control de temperatura y el sistema de riego. Asimismo, se validó la correcta visualización de los datos en la interfaz desarrollada en IoT MQTT Panel. Los resultados obtenidos fueron comparados con los requisitos definidos en la fase de planeación, evidenciando que el sistema cumple con las condiciones establecidas.

Fase Actuar

Objetivo: Mejorar el diseño basado en los resultados de la verificación.

Actividades. Corregir errores identificados en los esquemas o en la implementación del prototipo.

Optimizar el diseño para reducir costos, consumo energético o complejidad.

Actualizar la documentación para reflejar los cambios.

Con base en la fase de verificación se corrigieron errores de histéresis para evitar activaciones bruscas en los actuadores, especialmente en la bomba de agua cuando la temperatura se encontraba en valores límite. Asimismo, la implementación de un dashboard en el teléfono móvil que permite la visualización de datos en tiempo real de las lecturas de los sensores.

Estado del Arte

Sistema IoT para Control de Cultivo de Lechugas

El estudio titulado “*Diseño de un sistema IoT para el monitoreo y control del cultivo de lechugas en un invernadero*” de Berrios Gómez (2022), analiza cómo el cultivo de lechugas se ve afectado significativamente por las heladas agronómicas, especialmente durante el invierno, cuando las temperaturas descienden a niveles que dañan el tejido vegetal. Este fenómeno representa una amenaza constante para los agricultores, reduciendo la producción y generando pérdidas económicas.

Para contrarrestar estos efectos, el autor propone el diseño de un sistema IoT (Internet de las Cosas) que permita el monitoreo y control del cultivo de lechugas en un invernadero, garantizando condiciones ambientales adecuadas en todo momento.

El sistema incluye sensores que registran en tiempo real variables como la temperatura, la humedad relativa y la humedad del suelo, cuyos datos son accesibles mediante una aplicación móvil con una interfaz sencilla para el usuario.

Objetivos Específicos

Identificar los niveles óptimos de temperatura, humedad relativa y humedad del suelo requeridos para un cultivo de lechugas saludable y eficiente.

Seleccionar los equipos electrónicos adecuados (sensores, microcontroladores, actuadores, módulos de comunicación, etc.) que conformarán el sistema IoT.

Implementar un prototipo funcional del sistema IoT, que permita validar su eficacia en condiciones reales dentro de un invernadero.

Este proyecto no solo busca proteger el cultivo de plantas ornamentales frente a condiciones climáticas adversas, sino también mejorar la productividad agrícola mediante el uso de tecnologías accesibles y modernas, contribuyendo al desarrollo económico de la

región y al incremento de los ingresos de las familias que dependen directa e indirectamente de esta actividad.

La implementación de un sistema automatizado permite mejorar la eficiencia y optimizar el uso de recursos como el agua, la energía y la mano de obra. En el caso del recurso hídrico, la aplicación de métodos de riego como el goteo o la microaspersión contribuye a reducir pérdidas y mejorar la distribución del agua. En cuanto al consumo energético, el sistema opera únicamente cuando es necesario, evitando el desperdicio de recursos.

Asimismo, la automatización reduce la necesidad de intervención manual en las labores de monitoreo y riego, lo que permite que el personal sea reasignado a otras actividades productivas dentro del proceso agrícola, aumentando así la eficiencia operativa.

Invernadero Inteligente (COLINVERTEC)

(Colviveros Datos sobre el viverismo en Colombia y el mundo, s. f.).

En la actualidad, el sector floricultor ha experimentado un crecimiento significativo, impulsado por la implementación de diversas innovaciones en métodos de siembra, cultivo y técnicas afines. Este avance continuo ha permitido a las empresas mejorar constantemente los estándares de calidad y otros aspectos relacionados, garantizando la satisfacción del cliente con el producto final. Un ejemplo destacado de esta evolución es la adopción de invernaderos, o áreas debidamente planificadas, equipadas y seguras, que han demostrado ser métodos altamente eficientes para la producción agrícola. Estas instalaciones emergen como una opción destacada que merece una revisión detallada desde una perspectiva ingenieril, ofreciendo un control más preciso y eficiente del proceso de siembra.

Colombia ocupa el cuarto lugar en producción de flores a nivel de Latinoamérica, con un poco más de 8.500 Ha. que es el 15% del área total de la región y toda su área también está representada en flores de corte. La producción está en los departamentos de

Cundinamarca con el 67% del total, es decir 5.700 Ha., Antioquía, con 2.700 Ha., 32% del total, Boyacá con el 0,7%; Risaralda con el 0,5% y Caldas con el 0,3% del área. Los cultivos principales que tiene Colombia son rosas, con 3.300 Ha. o sea el 39% del total, hortensias, con 1.500 Ha. (el 18%); clavel con 1.360 Ha., (16%); pompón, con 865 Ha. (10%); alstroemeria, con 300 Ha. (3,5%); y otras áreas de diversificación con 1.174 Ha., o sea, el 14%. Las exportaciones de Colombia son de alrededor de 1.400 millones de dólares, es decir, el 31% del total de la región de América Latina. Colombia genera aproximadamente 140.000 empleos directos de los cuales 60% son mujeres (Colviveros, s. f.).

El proyecto resalta una mejora significativa en la calidad y productividad del cultivo, ya que el sistema automatizado permite controlar con precisión variables críticas como la temperatura y el riego, reduciendo el estrés de las plantas y la variabilidad en su crecimiento.

En términos de calidad, esto se traduce en un producto final más uniforme, resistente y de mayor valor en el mercado, lo cual constituye un factor clave para mantener su competitividad. Asimismo, se maximiza el rendimiento por área, debido a que la estabilización de las condiciones micro climáticas favorece un desarrollo más eficiente del cultivo.

Mercado de Equipos para Invernadero en Asia Pacifico

(Market Data Forecast, 2025)

De acuerdo con Market Data Forecast (2025), en países como Japón y Corea del Sur, las colaboraciones público-privadas han acelerado el desarrollo de invernaderos inteligentes equipados con sistemas de control climático basados en inteligencia artificial (IA) y soluciones de cosecha automatizada. Estas iniciativas, junto con inversiones estratégicas, están desempeñando un papel fundamental en la expansión del mercado de equipos para invernaderos en la región de Asia Pacífico.

El desarrollo tecnológico no se limita a economías avanzadas, ya que en países como India e Indonesia han surgido startups que ofrecen kits de invernaderos inteligentes a bajo costo, orientados a pequeños agricultores. En este contexto, el aumento de la conectividad y la alfabetización digital favorece la integración de tecnologías inteligentes, consolidándose como una importante oportunidad de crecimiento para la industria regional.

A continuación, se presenta una tabla que resume las principales aplicaciones del Internet de las Cosas (IoT) en el sector agrícola, destacando su impacto en la eficiencia productiva, el uso de recursos y la optimización de procesos en diferentes áreas.

Tabla 1

Mejoras en la Eficiencia Agrícola Mediante IoT

Área de aplicación	Descripción	Mejora de la eficiencia	Referencias
Monitoreo de suelos	Los sensores de IoT miden la humedad del suelo, la temperatura y los niveles de nutrientes. Estos datos permiten a los agricultores aplicar agua y fertilizantes con precisión cuando y donde se necesitan, reduciendo el desperdicio y aumentando el rendimiento de los cultivos.	Aumento del 20% en el rendimiento de los cultivos y una reducción del 30% en el uso de agua mediante sistemas de monitoreo de suelos basados en IoT.	Kim et al. (2019, 2020) y Kim y Lee (2022)
Monitoreo climático	Al utilizar IoT para monitorear y controlar los entornos de invernaderos, los agricultores pueden mejorar el crecimiento de los cultivos y reducir el consumo de energía.	Los sistemas de control climático basados en IoT en invernaderos aumentaron el rendimiento de los cultivos en un 15% y redujeron los costos de energía en un 10%.	Farooq et al. (2022)

Área de aplicación	Descripción	Mejora de la eficiencia	Referencias
Monitoreo de la salud animal	La detección temprana de problemas de salud permite realizar intervenciones oportunas, mejorando el bienestar y la productividad animal.	Los sistemas de monitoreo ganadero basados en IoT redujeron las tasas de mortalidad en un 10% y aumentaron la producción de leche en un 5%.	Berckmans (2014)
Trazabilidad y Control de Calidad	Los dispositivos IoT rastrean las condiciones de almacenamiento y transporte de productos agrícolas, garantizando que permanezcan frescos y seguros para el consumo.	Los sistemas de gestión de la cadena de suministro habilitados para IoT redujeron las pérdidas poscosecha en un 15% y mejoraron los tiempos de entrega en un 20%.	Wolfert et al. (2017)
Uso del agua	Los sistemas IoT optimizan el uso del agua, lo que genera ahorros sustanciales de recursos.	Los sistemas de riego inteligentes basados en IoT ahorran hasta un 30% más de agua en comparación con los métodos de riego tradicionales.	Ayaz et al. (2019)
Aumento del rendimiento	La tecnología IoT mejora la gestión de cultivos, lo que genera mayores rendimientos.	Las técnicas de agricultura de precisión que utilizan IoT dan como resultado un aumento del 20% en el rendimiento de los cultivos en promedio en comparación con la agricultura tradicional.	Zhang et al. (2018)
Eficiencia laboral	IoT agiliza las operaciones agrícolas a través de la automatización y el monitoreo en tiempo real, reduciendo los costos laborales y mejorando la productividad.	Los sistemas de automatización e IoT reducen la necesidad de mano de obra, reduciendo los costos laborales hasta en un 30%.	Li Niu (2020)

Área de aplicación	Descripción	Mejora de la eficiencia	Referencias
Costos operativos	IoT reduce los costos operativos mediante la automatización y el monitoreo en tiempo real.	La tecnología IoT ayuda a optimizar la asignación de recursos y reducir el desperdicio, lo que lleva a una reducción del 15–20% en los costos operativos generales.	Mahdavinejad et al. (2018)

Nota. Tomado de Cómo la tecnología de Internet de las cosas mejora la eficiencia agrícola, por Duguma, L.A., y Bai, X. (2025). *Artificial Intelligence Review*, 58(63). <https://doi.org/10.1007/s10462-024-11046-0>

Como se observa en la tabla 1, la implementación de tecnologías IoT en la agricultura genera mejoras significativas en múltiples dimensiones, tales como el incremento del rendimiento de los cultivos, la optimización del uso del agua y la reducción de costos operativos. Asimismo, se evidencia que la automatización y el monitoreo en tiempo real permiten una gestión más eficiente de los recursos, contribuyendo a la sostenibilidad y competitividad del sector agrícola.

En este sentido, el uso de estas tecnologías representa una oportunidad clave para modernizar los sistemas productivos, especialmente en contextos donde se busca mejorar la eficiencia y reducir el impacto ambiental.

Automatización en Invernaderos

El documento titulado “*Automatización en invernaderos: Maximizando la producción con tecnología de punta*” (Innovación Industrial. s.f.) señala que la tecnología aplicada en un invernadero de Almería ha logrado resultados destacables en productividad y sostenibilidad. A continuación, se resumen los principales objetivos específicos observables en esta implementación tecnológica:

- Optimizar el control climático: Ajustar automáticamente parámetros como la temperatura, la humedad y la iluminación para adaptarse a las necesidades del cultivo de tomates cherry.
- Mejorar la eficiencia en el uso de recursos: Reducir el consumo de agua y energía mediante sistemas automatizados y sensores inteligentes que regulan el entorno del cultivo.
- Incrementar la productividad y calidad del cultivo: A través de las condiciones ambientales gestionadas automáticamente, se elevan los niveles de producción y se asegura una mejor calidad del fruto.
- Fomentar la sostenibilidad agrícola: Al minimizar el impacto ambiental (menor uso de recursos, optimización de insumos), el invernadero sirve como modelo de agricultura sostenible.

Holanda: Líder en Agricultura Sostenible y Eficiente en Invernaderos

La agricultura sostenible y eficiente de Holanda, también conocida como Países Bajos, se ha consolidado como un modelo de referencia a nivel mundial. Actualmente, este país se posiciona como uno de los principales exportadores de productos agrícolas, a pesar de no contar con condiciones geográficas especialmente favorables.

Este caso resulta relevante, ya que demuestra que es posible desarrollar una agricultura altamente productiva independientemente de las limitaciones climáticas y territoriales. El éxito de los Países Bajos se fundamenta en la inversión en ciencia y tecnología, así como en la optimización de los recursos utilizados en los sistemas de cultivo (Paraled, 2021).

Gracias al desarrollo tecnológico impulsado por la Universidad e Investigación de Wageningen (WUR), reconocida como “Food Valley”, el país ha logrado implementar un modelo de agricultura sostenible y económicamente eficiente, caracterizado por:

- La reducción de hasta un 90% en el uso de agua.
- La eliminación casi total del uso de pesticidas químicos.
- Un incremento del 28% en el rendimiento de los cultivos de hortalizas.
- Una optimización del uso de energía.
- Una disminución del 29% en el uso de fertilizantes.

Estos resultados han sido posibles gracias a la implementación de tecnologías avanzadas, como sistemas de control de variables ambientales en invernaderos (humedad, temperatura, intercambio de aire e inyección de CO₂), así como el uso de herramientas innovadoras como tractores autónomos, drones de monitoreo e iluminación LED, consolidando a esta nación como un referente en la agricultura moderna.

Sistema de Riego Automatizado para un Cultivo de Pequeña Superficie

De acuerdo con Márquez Díaz et al. (2024), los cultivos de pequeña superficie representan una tendencia emergente orientada a promover la autosostenibilidad, así como prácticas agrícolas responsables que contribuyan a la reducción de la huella ecológica y al consumo de alimentos frescos y locales.

En este contexto, se identifica como principal problemática la falta de automatización en los sistemas de riego, lo que genera desperdicio de agua y afecta el desarrollo adecuado de las plantas debido a un suministro hídrico ineficiente.

Como solución, los autores proponen la implementación de sistemas de riego automatizados basados en tecnologías IoT, que permiten optimizar el uso del agua y mejorar las condiciones de crecimiento del cultivo.

Tecnologías de Detección y Automatización en Viveros.

El estudio titulado “*Tecnologías de detección y automatización para la producción de cultivos ornamentales en viveros: estado actual y perspectivas futuras*” (Mahmud, Zahid, & Das, 2023) analiza el papel de la automatización en la industria de viveros e invernaderos. Esta industria contribuye con cerca de \$14 mil millones en ventas anuales a la economía

estadounidense. Esta industria produce más de 2000 especies de plantas ornamentales, cubriendo la mayoría de las plantas ornamentales de los EE. UU. Los viveros son, en general, operaciones al aire libre donde las plantas crecen en el suelo o en contenedores. Los invernaderos son típicamente ambientes cerrados donde las condiciones de crecimiento (por ejemplo, iluminación, temperatura, humedad e irrigación) pueden controlarse. El rápido aumento de los costos de producción debido al mayor gasto en mano de obra, la dificultad para obtener mano de obra calificada y la aplicación inadecuada de los recursos agrícolas son preocupaciones crecientes para la industria ornamental.

La identificación de sensores adecuados y el desarrollo de algoritmos son tareas necesarias que dependen principalmente de las características del cultivo y el suelo, así como de las necesidades operativas. En la mayoría de los casos, una tecnología automatizada es específica para una operación muy en particular en un cultivo determinado. Por lo tanto, evaluar el rendimiento de sensores y algoritmos para diferentes cultivos en una industria en especial proporciona información para su selección general, al tiempo que se desarrolla tecnología para una operación de producción específica.

Tecnologías de la Industria 4.0 en la Floricultura

El estudio titulado “*The Role of Industry 4.0 Technologies in the Export Flower Industry*” (2025), analiza como el crecimiento en la demanda de flores frescas ha impulsado a las empresas a incorporar innovaciones tecnológicas que mejoren la eficiencia, la sostenibilidad y la competitividad del sector. En este contexto, las tecnologías asociadas a la Industria 4.0, como el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial (IA), las redes de sensores inalámbricos, la robótica y la cadena de bloques (blockchain), presentan un alto potencial para transformar la floricultura.

La implementación de estas tecnologías ha sido ampliamente estudiada en el ámbito agrícola, especialmente en relación con IoT, IA y sistemas automatizados. Por ejemplo, la

inteligencia artificial se emplea para optimizar la gestión del agua, mientras que el análisis de grandes volúmenes de datos (Big Data), integrado con IoT, permite identificar patrones y mejorar el uso de los recursos. Asimismo, las redes de sensores inalámbricos facilitan la recopilación de datos en tiempo real, contribuyendo a una gestión más eficiente y a la reducción de riesgos en la producción agrícola. Finalmente, el uso de plataformas en la nube fortalece el acceso a la información y permite realizar análisis avanzados para la toma de decisiones.

Dispositivo de Medición en Agricultura de Precisión para Rosas.

En los últimos años, la agricultura de precisión ha emergido como un enfoque innovador para mejorar la eficiencia y sostenibilidad en la producción agrícola. Esta metodología se basa en la medición precisa y en tiempo real de diversos parámetros ambientales y del cultivo, utilizando tecnología avanzada como sensores, sistemas de comunicación y análisis de datos. En este contexto, el uso de dispositivos diseñados específicamente para la medición de variables clave en los cultivos se ha convertido en una herramienta esencial para optimizar el rendimiento agrícola. Un ejemplo relevante es el estudio de Beltrán Chusán, et al. (2022), quienes diseñaron e implementaron un dispositivo para la medición y comunicación de parámetros en el cultivo de rosas. En su investigación, los autores presentaron un dispositivo capaz de monitorizar factores como la temperatura, humedad, pH del suelo y otras condiciones ambientales que influyen en el crecimiento de las plantas. Este dispositivo no solo permite obtener datos precisos sobre el estado del cultivo, sino que también facilita la comunicación de estos parámetros en tiempo real, permitiendo a los agricultores tomar decisiones informadas y rápidas.

La implementación de estos dispositivos en el campo agrícola permite una gestión más eficiente de los recursos, optimizando el uso de agua, fertilizantes y otros insumos, lo que contribuye a reducir costos y minimizar el impacto ambiental. La capacidad de integrar

sensores con sistemas de comunicación también mejora la capacidad de monitoreo remoto, lo que es especialmente útil en cultivos a gran escala o en áreas con condiciones difíciles.

El desarrollo y diseño de estos dispositivos enfrenta diversos retos, entre ellos la integración adecuada de los sensores, la precisión de las mediciones y la fiabilidad del sistema en condiciones de cultivo, como lo destacan los autores. Sin embargo, la investigación también subraya el potencial de la tecnología para transformar la agricultura, especialmente en sectores especializados como el cultivo de flores, donde los parámetros ambientales juegan un papel fundamental en la calidad del producto final.

Desarrollo de un Sistema Automatizado para un Invernadero

De acuerdo con Aguado da Costa (2012), el desarrollo de un sistema automatizado para un invernadero propone un enfoque tecnológico orientado a optimizar la gestión de los recursos y mejorar la productividad de los cultivos bajo condiciones controladas. El autor presenta un sistema que integra diversos componentes tecnológicos como sensores, controladores, actuadores y sistemas de comunicación, permitiendo monitorear y regular parámetros clave como la temperatura, la humedad, la iluminación y los nutrientes de manera automatizada.

Este enfoque facilita la optimización de las condiciones ambientales dentro del invernadero, reduce el consumo de recursos y disminuye la intervención manual, garantizando un entorno más controlado para el desarrollo de los cultivos. Uno de los principales aportes del estudio es la implementación de un sistema de control automático que permite gestionar de manera eficiente variables como el riego, la ventilación y la iluminación, promoviendo así una agricultura más sostenible.

Además, el trabajo resalta la flexibilidad de estos sistemas, los cuales pueden adaptarse a diferentes tipos de cultivos y tamaños de invernadero, permitiendo una personalización de los procesos según las necesidades específicas de producción.

Marco Referencial

Marco Teórico

Sistemas Embebidos

Los sistemas embebidos, también conocidos como sistemas integrados, son sistemas informáticos diseñados para realizar una función específica o un conjunto limitado de funciones dentro de un sistema mayor. Estos sistemas se encuentran incorporados en diversos dispositivos electrónicos y equipos, como electrodomésticos, dispositivos médicos, automóviles y sistemas de control industrial. Generalmente, los sistemas embebidos están compuestos por sensores, actuadores y unidades de procesamiento que permiten automatizar procesos mediante la recolección y análisis de datos. A partir de la información capturada por los sensores, el sistema toma decisiones que activan o desactivan actuadores con el fin de controlar determinadas variables. Además, estos sistemas pueden ser gestionados de manera remota a través de tecnologías de comunicación, facilitando su supervisión y control en tiempo real (Pérez Monsalve, 2019).

El Internet de las Cosas (IoT)

Consiste en una red de dispositivos físicos, vehículos, electrodomésticos y otros objetos integrados con tecnología, sensores y software que les permite conectarse e intercambiar datos entre sí a través de Internet. Estos dispositivos pueden variar desde simples sensores de temperatura hasta complejas máquinas industriales. podría ser una herramienta clave para transformar la industria agrícola, una encuesta realizada por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), estimó que se espera que la población mundial alcance los 9.730 millones de habitantes para 2050. Se espera que se requieran más tierras de cultivo y agua para satisfacer las futuras demandas de alimentos a nivel mundial. Además, otros desafíos, como los cambios inesperados en el clima, la falta de mano de obra y la escasez de agua, aumentan la presión sobre los

agricultores y ganaderos. Los desafíos que enfrenta la agricultura tradicional y la agricultura de invernadero necesitan un cambio fundamental para desarrollar alimentos sostenibles y ecológicos. (Sánchez et al., 2023)

Invernadero

El invernadero es una estructura metálica que puede ser cubierta con diferentes tipos de materiales como plástico, cristal entre otros materiales traslúcidos que varían en calidad y costo de montaje, pero como todos tiene la finalidad de simular las condiciones climáticas adecuadas para el crecimiento y desarrollo de las plantas que se hallan en su interior de tal manera que su producción sea de alta calidad. El invernadero gracias a su material de cubierta aprovecha la radiación solar para calentar los objetos que hay en su interior; estos a su vez, emiten radiación infrarroja, con longitud de onda mayor que la solar por lo que no pueden atravesar vidrios a su regreso quedando atrapados y produciendo el calentamiento.

A continuación, se nombra los diferentes tipos de invernadero:

Tradicional o Colombiano. Es el más utilizado en la floricultura. Se construye típicamente con elementos de madera o una combinación de metal y madera, suele tener techos de dos aguas o en forma de capilla.

Tipo Túnel. Es un invernadero pequeño que no tiene paredes rectas, su estructura es totalmente curva desde el punto de fijación hasta la cumbre.

Los invernaderos tipo túnel están especialmente diseñados para pequeñas superficies y cultivos de pequeño tamaño. (Novagric, 2024).

Tipo Capilla o Multicapilla. Se caracteriza por la forma de su cubierta formada por arcos curvos semicirculares y por su estructura metálica.

El invernadero de capilla está pensado para todo tipo de climas. (Novagric, 2024).

Tipo Túnel Gótico y Doble Ventilación Cenital. Es una modificación del invernadero tipo túnel, con mayor altura general y mejores áreas de ventilación en el techo (cenital, que es la apertura de la parte más alta para la salida de aire caliente).

Presenta ventajas como mayor inercia térmica (mejor retención de temperatura) en comparación con el tradicional, menores costos de mantenimiento estructural y un mejor comportamiento de los flujos del aire. (Novagric, 2024).

Invernadero Tropical o Asimétrico. Utilizado en regiones tropicales. Se distingue por una geometría asimétrica (un lado de la cubierta más inclinado que el otro) o con aperturas específicas.

Presenta ventajas como que la ventilación se resuelve a través de aperturas en el centro o en los arcos estructurales del techo, optimizando el manejo de altas temperaturas. (Novagric, 2024).

Con base en lo visto anteriormente y teniendo en cuenta el clima de la ciudad de Popayán, que es un clima templado, en su mayoría época del año un clima frío. Partiendo de estas condiciones el tipo de invernadero más recomendable es un tipo capilla o dos aguas asimétrico / simétrico, ya sea en estructura metálica galvanizada o en madera.

Raspberry Pi

La automatización de invernaderos ha evolucionado significativamente con el uso de tecnologías embebidas, siendo la Raspberry Pi una de las plataformas más utilizadas debido a su bajo costo, portabilidad y capacidad de procesamiento. Esta tarjeta permite implementar sistemas de control ambiental que regulan variables como temperatura, humedad, iluminación y riego, esenciales para mantener condiciones óptimas de cultivo (Arshad et al., 2020).

La plataforma ofrece distintas familias de productos: computadoras de placa única (SBC) de alto rendimiento, modelos compactos tipo Zero de bajo consumo, módulos de cómputo para aplicaciones industriales, y microcontroladores Pico orientados al control en

tiempo real (Raspberry Pi, 2025). Para este proyecto se considera la Raspberry Pi 3, que integra un procesador ARM Cortex-A53 de cuatro núcleos a 1,2 GHz, 1 GB de RAM, conectividad Wi-Fi y Bluetooth incorporadas, y cuatro puertos USB, características que la hacen adecuada para gestionar la lógica de control y comunicación del sistema propuesto (López Aldea, 2017).

Sistema IoT con ESP32 para Riego por Goteo Inteligente y Monitoreo

El agotamiento de los recursos hídricos y la necesidad de prácticas agrícolas sostenibles requieren soluciones tecnológicas innovadoras. Este estudio desarrolla un sistema inteligente de riego por goteo y monitoreo climático basado en IoT para invernaderos utilizando el microcontrolador ESP32. La metodología implementa sensores DHT11 para temperatura y humedad, GUVVA-S12SD para radiación UV, sensores capacitivos de humedad del suelo y HC-SR04 para medición del nivel del agua. Los datos en tiempo real se muestran en una pantalla LCD y se transmiten a Arduino Cloud, lo que permite el monitoreo y control remoto. Las pruebas de campo mostraron una reducción del 35% en el consumo de agua en comparación con los métodos tradicionales, mejorando las condiciones ambientales de los cultivos y reduciendo los costos operativos (Correa-Quiroz et al., 2025).

Características: El ESP32 cuenta con un procesador de doble núcleo Xtensa LX6 que funciona a hasta 240 MHz, lo que permite una multitarea eficiente y un procesamiento en tiempo real.

Esta arquitectura permite que el microcontrolador maneje múltiples operaciones simultáneamente, lo que lo hace ideal para aplicaciones de robótica, automatización e IoT.

Incluye aceleración de hardware para funciones criptográficas y operaciones de punto flotante, mejorando la seguridad y la eficiencia computacional.

El ESP32 también admite la gestión dinámica de la energía, lo que reduce el consumo de energía en dispositivos que funcionan con baterías. Con Wi-Fi 802.11 b/g/n incorporado,

el ESP32 proporciona conectividad a Internet perfecta para aplicaciones basadas en la nube, monitoreo remoto y automatización del hogar inteligente.

También es compatible con Bluetooth 4.2, incluido el Bluetooth clásico y el Bluetooth Low Energy (BLE), lo que permite una comunicación eficiente con dispositivos móviles, wearables y periféricos.

El ESP32 puede operar Wi-Fi y Bluetooth simultáneamente, lo que lo hace ideal para aplicaciones que requieren múltiples conexiones inalámbricas, como automatización industrial y sistemas de monitoreo médico (Proculus Technologies, s.f.)

Internet de las Cosas Aplicado a la Agricultura

La implementación y desarrollo de tecnologías IoT en el sector agricultor define de manera frecuente tres capas: capa de percepción (captura), capa de red (transporte) y capa de aplicación (implementación). La capa de percepción se refiere a los componentes de hardware y software asociados a la tecnología IoT, que agrupa elementos tales como sensores, actuadores, transceptores, sistemas embebidos, tecnologías de radiofrecuencia y diferentes elementos de monitoreo. Por su parte, la capa de red integra elementos que permiten la transferencia de información que proviene de determinados componentes de la capa de percepción e incorpora diferentes protocolos de comunicación, que se aplican mediante redes de telecomunicaciones y nodos de sensores. Por último, la capa de aplicación es referida como la implementación de los desarrollos IoT mediante sistemas expertos o que implica algoritmos inteligentes para la toma de decisiones en los cultivos. (Tovar Soto et al., 2019).

Diseño del Invernadero Automatizado

Caracterización del Lugar Piloto y de la Infraestructura Existente

El Vivero de Plantas CORSAVIDA, aunque su actividad principal no se enfoca en plantas ornamentales, sino en árboles forestales y frutales, cuenta con amplias instalaciones destinadas al crecimiento de diferentes tipos de cultivos. Este se encuentra ubicado en la vereda Santa Rosa, perteneciente al municipio de Cajibío, Cauca, en cercanías de la ciudad de Popayán.

El Vivero está localizado cerca de la vía internacional Panamericana, en el tramo comprendido entre Popayán y Piendamó, específicamente en una zona conocida como el parador La Fresa, sobre una vía terciaria que conduce hacia el humedal lago El Bolsón. La zona presenta una altitud aproximada de 1760 metros sobre el nivel del mar y una temperatura que oscila entre los 14 °C y los 24 °C.

Infraestructura del Vivero CORSAVIDA

En el diseño planteado se propone como lugar piloto el vivero CORSAVIDA, cuenta con unas instalaciones muy amplias, en donde el 75% de sus instalaciones son en madera, los invernaderos son fabricados en guadua forrados con poli sombra y algunos otros solo cuentan con el techo en poli sombra sin estar cubierto a los costados, como se muestra en la figura 2, y el otro 25% su estructura es tubo de aluminio forrado en poli sombra negra.

Figura 2*Invernadero Semillero*

Nota. Invernadero tipo cubierta.

El sistema de riego actual del Vivero es completamente manual, careciendo de mecanismos de control sobre el uso del agua y sin considerar las condiciones específicas en las que se encuentran los cultivos. Asimismo, no se dispone de un sistema de monitoreo de las variables climáticas, por lo que las decisiones relacionadas con el riego se basan en la observación directa y en estimaciones empíricas registradas manualmente.

En algunos cultivos se emplean surtidores que se activan al encender la bomba de agua; sin embargo, en otros casos se utilizan mangueras para realizar el riego de manera manual, lo que evidencia la falta de estandarización y automatización en el proceso.

Como se muestra en la Figura 3, el sistema de riego inicia con el encendido manual de la motobomba, la cual permite distribuir el agua a las diferentes áreas del Vivero. La Figura 4 presenta la motobomba utilizada para impulsar el agua, elemento fundamental en el proceso de

riego. En la Figura 5 se observa el sistema de recolección de agua, el cual constituye la fuente principal para el abastecimiento hídrico.

Figura 3

Encendido del Sistema de Riego



Nota. Instrumento de encendido.

Figura 4

Motobomba para Impulsar el Agua



Nota. Maquinaria para el almacenamiento del agua.

Figura 5

Sistema de Recolección de Agua



Nota. Sistemas de recolección de agua.

Por su parte, la Figura 6 muestra el sistema de riego implementado dentro del Vivero, mientras que la Figura 7 evidencia el riego manual mediante mangueras en ciertas áreas de cultivo. Finalmente, la Figura 8 presenta una vista general de las instalaciones, donde se identifican las zonas de cultivo y las estructuras de protección con polisombra.

Figura 6

Sistema de Riego Dentro del Vivero



Nota. Perspectiva de instalación de sistemas de riego en el invernadero.

Figura 7*Riego por Medio de Manguera Manualmente*

Nota. Sistema de riego manual en caso de ausencia de energía.

El Vivero de Plantas CORSAVIDA cuenta con una infraestructura destinada a la producción de especies forestales, frutales y, en menor medida, ornamentales. Sus instalaciones incluyen áreas de cultivo al aire libre, zonas cubiertas con polisombra y sistemas básicos para el suministro de agua, como lo muestra en la figura 8, lo que permite el desarrollo de diferentes tipos de plantas bajo condiciones parcialmente controladas.

El Vivero dispone de un sistema de riego basado en el uso de una motobomba que impulsa el agua hacia diferentes zonas de cultivo. En algunos sectores se emplean surtidores, mientras que en otros el riego se realiza de forma manual mediante mangueras, lo que evidencia la existencia de prácticas mixtas en la gestión del recurso hídrico.

Figura 8

Instalaciones del Invernadero



Nota. Modelo de Instalación de Invernadero.

En cuanto a las especies cultivadas, el Vivero se enfoca principalmente en la producción de plantas forestales y frutales, las cuales requieren condiciones específicas de riego, temperatura y humedad para su adecuado desarrollo. Estas especies son destinadas a clientes como agricultores locales, proyectos de reforestación y programas de producción agrícola, lo que resalta la importancia de garantizar condiciones adecuadas para su crecimiento.

El Vivero ha desarrollado sus actividades durante varios años, consolidándose como un proveedor local de material vegetal, lo que evidencia la necesidad de optimizar sus procesos productivos mediante la incorporación de tecnologías que mejoren la eficiencia en el uso de los recursos.

En este sentido, y conforme a la metodología planteada, se realizó un levantamiento de información que permitió identificar las condiciones actuales de la infraestructura, los sistemas

de riego existentes, las prácticas operativas y las necesidades del Vivero, constituyendo una base fundamental para el diseño de la propuesta de automatización.

Tipos de Plantas a Cultivar y sus Variables de Crecimiento Ideales

Lirios (*Lilium spp.*)

- Temperatura: 18–24 °C
- Humedad del suelo: 60–70 % capacidad de campo
- Humedad relativa ambiente: 70–80 %
- pH del suelo: 5.5–6.8
- Luz: ≥ 6 h sol directo o $200\text{--}400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (invernadero)
- Conductividad eléctrica (CE): $1.2\text{--}1.8 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$
- Requerimiento hídrico: 400–600 mm/ciclo
- Altitud/clima: templado; óptimo $< 2\ 500$ m s. n. m.

DryGair (s.f.).

Rosas (*Rosa spp.*)

- Temperatura: 17–25 °C
- Humedad del suelo: 60–80 % capacidad de campo
- Humedad relativa ambiente: 60–80 %
- pH del suelo: 5.7–6.3
- Luz: 6–8 h sol directo o $400\text{--}600 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
- CE: $1.5\text{--}2.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$
- Requerimiento hídrico: 700–900 mm/año
- Altitud/clima: óptimo 1 800–2 800 m s. n. m. (flor cortada)

Díaz Patiño, L. F. (2012).

Crisantemos (*Chrysanthemum spp.*)

- Temperatura: 10–22 °C

- Humedad relativa ambiente: 60–70 %
- Humedad de suelo: 50-60%
- pH del suelo: 5,5–6,5
- Luz: de 13 a 14 horas en floración
- CE: 1.8–2.5 dS·m⁻¹
- Requerimiento hídrico: 500–700 mm/ciclo
- Altitud/clima: templado–frío moderado

(Prieto et al., 2021)

Margaritas Ornamentales (Asteraceae)

- Temperatura: 15–24 °C
- Humedad del suelo: 50–70 % capacidad de campo
- Humedad relativa ambiente: 60–75 %
- pH del suelo: 6.0–7.2
- Luz: ≥ 6 h sol directo
- CE: 1.0–2.0 dS·m⁻¹
- Requerimiento hídrico: 400–600 mm/ciclo
- Altitud/clima: templado

Brickell, C., Baum, B., & Hetterscheid, W. (2009). FAO.

Pensamientos (Viola × wittrockiana)

- Temperatura: 15–21 °C
- Humedad del suelo: 50–70 % capacidad de campo
- Humedad relativa ambiente: 65–75 %
- pH del suelo: 5.6–6.5
- Luz: 12–14 h o 250–400 μmol·m⁻²·s⁻¹
- CE: 1.0–1.5 dS·m⁻¹

- Requerimiento hídrico: 300–500 mm/ciclo
- Altitud/clima: templado–frío, tolera heladas leves

Thissen (2021).

Claveles (*Dianthus caryophyllus*)

- Temperatura:
- Día: 20–25 °C
- Noche: 15–18 °C
- Humedad del suelo: 50–65 % capacidad de campo
- Humedad relativa ambiente: 60–70 %
- pH del suelo: 6.5–7.5
- Luz: ≥ 6 h sol directo o $500\text{--}700 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
- CE: $1.5\text{--}2.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$
- Requerimiento hídrico: 600–800 mm/ciclo
- Altitud/clima: templado seco

Nayak. (2025).

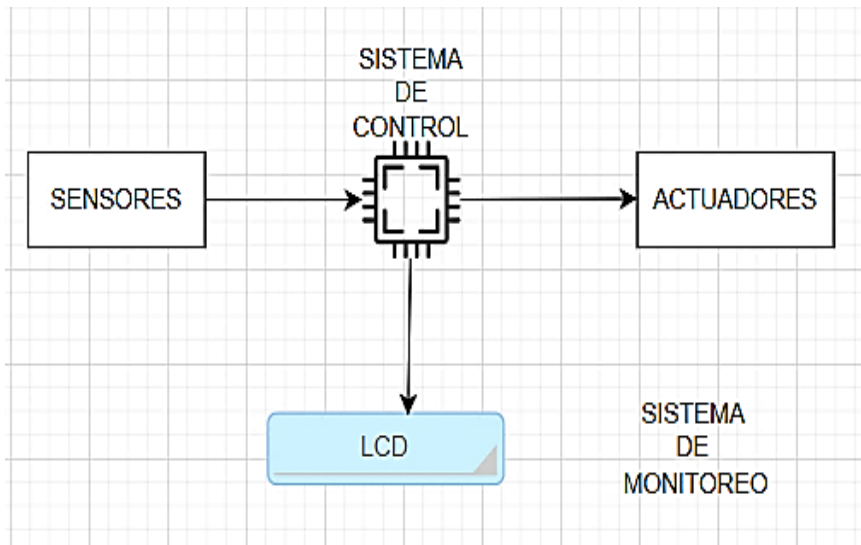
Componentes IoT del Nuevo Sistema de Riego de Invernadero

Para cumplir con las funciones de gestión y control del nuevo sistema de riego inteligente se deben integrar distintos elementos, de los cuales existen varias opciones de implementación, pero se han seleccionado los más adecuados teniendo en cuenta las necesidades del lugar piloto, ya que para los dueños del invernadero lo más importante es poder tener un control total del clima dentro de las instalaciones.

Arquitectura de la Red

Figura 9

Arquitectura de la Red del Sistema



Nota. Modelo de la estructura del sistema de monitoreo.

La arquitectura del sistema se basa en la adquisición de datos mediante sensores, el procesamiento de la información en un controlador y la ejecución de acciones a través de actuadores (ver figura 9). Esta estructura permite el monitoreo en tiempo real y la toma de decisiones automatizadas para mantener condiciones óptimas en el invernadero.

Tabla 2*Variables Climáticas*

Variable	Rango óptimo	Sensor asociado	Actuador asociado	Función en el sistema
Temperatura	15–25 °C	Sensor de temperatura	Ventilador / Luces	Regular la temperatura interna
Humedad del suelo	40–60 % capacidad de campo	Sensor de humedad del suelo	Bomba de agua	Controlar el riego
Humedad ambiental	70–80 %	Sensor de humedad	Ventilador	Mantener condiciones ambientales
Iluminación	≥ 6 h o 200–400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	Sensor de luz	Luces LED	Optimizar el crecimiento de las plantas

Nota. Tabla de relación de variables de temperatura y funcionamiento del sistema.

La Tabla 2 presenta las principales variables que deben ser monitoreadas y controladas dentro del sistema de invernadero automatizado, así como los rangos óptimos requeridos para el adecuado desarrollo de los cultivos. A partir de estas variables, se determinan los sensores y actuadores necesarios para garantizar el control eficiente de las condiciones ambientales.

Sensores

Los sensores serán parte fundamental del sistema ya que se encargan de recolectar datos de las diferentes variables que se monitorean en el entorno de trabajo y estos se envían a un controlador lo que ayuda a optimizar recursos y brindar el ambiente requerido por las plantas.

Sensor de Humedad. El sensor de humedad permite medir la humedad en el ambiente y permite ser monitoreada por medio de un sistema de control, para este diseño se utilizará un sensor de humedad capaz de entregar medidas precisas en tiempo real por medio de señales digitales.

Sensor de Temperatura. El sensor de temperatura le permitirá al nuevo sistema monitorear y controlar la temperatura dentro del invernadero gracias a los datos que este ofrece por medio de señales ya sea digitales o analógicas que interpretará el sistema de control.

Actuadores

Los actuadores son elementos fundamentales en un invernadero automatizado, ya que permiten convertir señales de control (eléctricas, electrónicas o digitales) en acciones físicas que regulan las condiciones del ambiente interno. Su función es ejecutar las órdenes emitidas por el sistema de control, garantizando que las plantas crezcan en un entorno óptimo.

Bomba de Agua. La bomba de agua cumple la función de actuador controlado por señales eléctricas que provienen de un controlador en donde su función es activarse cuando se requiere regar las plantas del invernadero

Ventilador. El ventilador funcionará como sistema de enfriamiento en el ambiente dentro del invernadero el cual puede operar en conjunto con el sistema de riego si las condiciones en las que se encuentre la planta lo requieren, de otra forma cumplirá su función de manera independiente.

Luces. En el invernadero las luces realizan la función de aumentar la temperatura y luminosidad con el fin de mantener las plantas en óptimas condiciones este proceso también será controlado por medio de una tarjeta de control que trabaja bajo condiciones precisas.

Controlador

El controlador constituye el núcleo del sistema automatizado, ya que recibe la información proveniente de los sensores, la procesa y genera las señales necesarias para activar los actuadores.

Tabla 3*Tabla Comparativa de Microprocesadores*

Tarjeta	Procesador	RAM	Puertos	Conectividad	Almacenamiento	Usos más comunes
Raspberry pi 3	Broadcom BCM2837, Quad-core ARM Cortex-A53 1.2 GHz.	1 GB LPDDR 2.	4 USB 2.0, 1 HDMI, 40 pines GPIO	Wi-Fi 802.11n, Bluetooth 4.2.	microSD.	Educación, centros multimedia, servidores, IoT, controladores de robots.
Arduino uno	ATmega328P.		14 entradas/salidas digitales, 6 entradas analógicas.	No incluye conectividad inalámbrica nativa (requiere módulos adicionales como Wi-Fi o Bluetooth).	32 KB de memoria flash.	Sensores, actuadores, proyectos educativos, prototipos rápidos.
ESP32 DevKit V1	Dual-core ARM Cortex-M3/M4.	520 KB SRAM.	34 pines GPIO, ADC, PWM, I2C, UART, SPI.	Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth 4.2.	Flash de 4 MB.	Aplicaciones IoT, comunicación inalámbrica, sistemas embebidos conectados a la nube.

Nota. Conceptos técnicos de los microprocesadores.

A partir del análisis comparativo presentado en la Tabla 3, se selecciona la plataforma ESP32 como controlador principal del sistema, debido a su estabilidad, bajo costo y facilidad de implementación.

A diferencia de otras alternativas como Raspberry Pi y Arduino, el ESP32 presenta una arquitectura más adecuada para sistemas de control en tiempo real, lo que reduce riesgos asociados a fallos del sistema y garantiza un funcionamiento confiable en entornos agrícolas.

Su amplia disponibilidad en el mercado y facilidad de mantenimiento lo convierten en una solución viable para el lugar piloto, donde se requiere una tecnología accesible y eficiente.

Diseño de Propuesta Solución al Problema

El diseño propuesto contempla la implementación de un prototipo de laboratorio de un entorno real de invernadero, permitiendo evaluar el comportamiento del sistema ante diferentes condiciones ambientales. Este sistema tiene la capacidad de adaptarse a cambios en las variables monitoreadas, garantizando un control eficiente de las condiciones internas.

Para el desarrollo del sistema, se establecen tres variables principales de control, consideradas fundamentales para el adecuado crecimiento de las plantas: temperatura, humedad relativa del ambiente y humedad del suelo. Estas variables permiten mantener condiciones óptimas dentro del invernadero y optimizar el uso de los recursos.

El control de la temperatura es esencial para los procesos fisiológicos de las plantas, como la floración y fructificación. Por su parte, la humedad relativa del ambiente influye directamente en el desarrollo de enfermedades como hongos cuando es elevada, o en la reducción del crecimiento cuando es baja. Asimismo, la humedad del suelo permite determinar el momento adecuado para activar el sistema de riego, evitando tanto el déficit como el exceso hídrico en el cultivo (Intagri, s. f.).

Las especies por monitorear presentan condiciones climáticas similares, lo que permite establecer un rango de operación común dentro del sistema, facilitando la implementación de una configuración única para el control de las variables.

Tabla 4*Rangos Óptimos de Variables*

Variable	Rango óptimo	Sensor asociado	Actuador asociado	Condición de activación
Temperatura	15–25 °C	Sensor de temperatura	Ventilador / Luces	> 25 °C: activar ventilación / < 15 °C: activar luz
Humedad ambiental	70–80 %	Sensor de humedad	Ventilador	> 80 %: activar ventilación
Humedad del suelo	40–60 %	Sensor de humedad del suelo	Bomba de agua	< 40 %: activar riego

Nota. Optimización del sistema.

La tabla 4 resume las variables a monitorear, los rangos óptimos de operación y las condiciones bajo las cuales se activan los actuadores del sistema. Esta relación permite establecer una lógica de control automatizada que garantiza la estabilidad de las condiciones ambientales dentro del invernadero.

A partir de esta configuración, el sistema es capaz de tomar decisiones en tiempo real, activando o desactivando los actuadores según los valores registrados por los sensores, lo que contribuye a mejorar la eficiencia del proceso productivo y a reducir el uso innecesario de recursos.

Explicación Diseño

El diseño del sistema se basa en una arquitectura de control centralizada, en la cual un microcontrolador ESP32 actúa como unidad principal de procesamiento. A esta se integran sensores encargados del monitoreo de variables climáticas como la temperatura, la humedad del suelo y la humedad relativa del ambiente, a través de sus entradas analógicas y digitales. Para la visualización local de la información, se incorpora una pantalla LCD 16x2, la cual permite observar en tiempo real los valores registrados por los sensores.

En el proceso de diseño, se consideraron diferentes alternativas de plataformas de control, tales como Raspberry Pi, ESP32 y Arduino. Sin embargo, la selección final del ESP32 se fundamenta en su capacidad de procesamiento, con capacidad Wi-Fi, Bluetooth, que lo hace un dispositivo muy llamativo ya que su control puede llegar a realizarse desde el celular sin tener la necesidad de adquirir un computador, además su bajo costo, su bajo consumo eléctrico y capacidad de operar en tiempo real sin depender de un sistema operativo, son características que lo hacen adecuado para aplicaciones de automatización en entornos agrícolas.

El control de las condiciones climáticas se realiza mediante tres actuadores principales, los cuales operan de forma independiente y están diseñados para garantizar la estabilidad eléctrica del sistema:

Bomba de Agua. Es la encargada del sistema de riego por aspersión. Su funcionamiento emplea un sistema de doble etapa: un relé que recibe la señal lógica de 3v del ESP32 y un contacto industrial. Esta configuración es fundamental para aislar la electrónica de control de cargas inductivas del motor, protegiendo el microcontrolador de picos de corriente y sobrecargas, ya que los motores de bombas tienen una corriente de arranque muy altas.

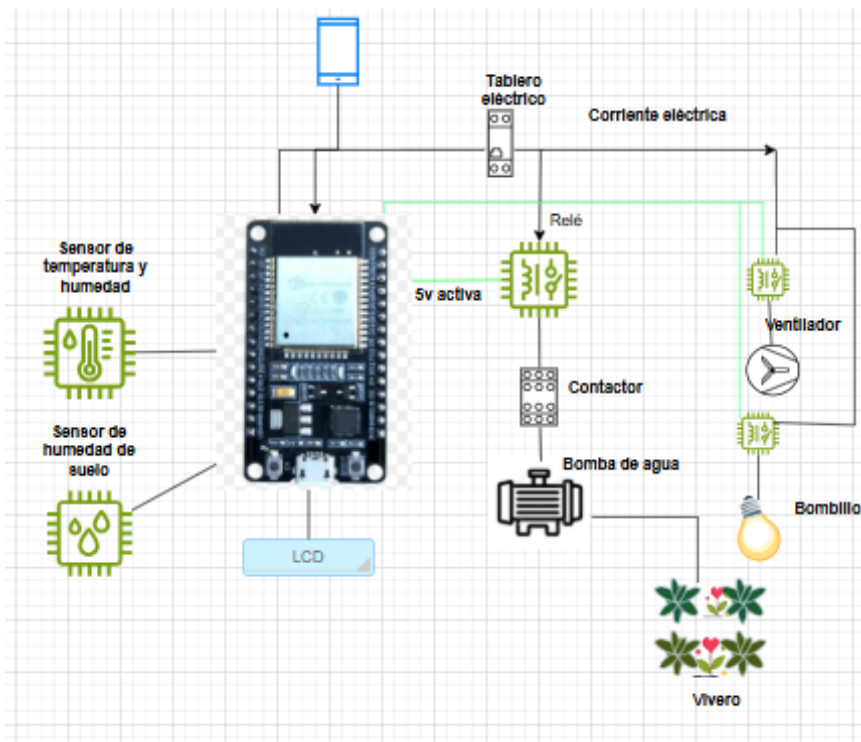
Ventilador. Actúa como el sistema de refrigeración, se activa para la regulación térmica, al igual que la bomba utiliza un relé para gestionar el paso de corriente alterna, así permite que el ESP32 controle dispositivos de alta potencia sin contacto directo.

Lámpara (bombillo). Funciona como el actuador de calefacción, proporcionando energía térmica cuando los sensores detectan temperaturas muy bajas, este sistema también se activa por medio del relé que recibe la señal desde el ESP32.

Monitoreo y Gestión de Datos. Para el sistema de supervisión de las condiciones climáticas del invernadero, se propone el uso de app móvil aprovechando el recurso de Wifi o Bluetooth que trae el ESP32. Existen múltiples herramientas en el mercado que ayudan a la visualización de los datos, entre las herramientas consideradas se tiene Adafruit IO, que es un servicio en la nube de Adafruit para crear proyectos IoT. ThingsBoard CE es una popular plataforma de código abierto orientada al internet de las cosas (IoT); y la app IoT MQTT Panel que permite la visualización de datos y es perfecta para proyectos IoT ya que es compatible con el protocolo MQTT.

Se implementa la app móvil IoT MQTT Panel, la cual es una app móvil gratuita que cumple funciones de monitoreo y control remoto de dispositivos IoT.

El sistema cuenta con un Dashboard interactivo que permite visualizar gráficas de las variables monitoreadas, facilitando la interpretación del comportamiento del invernadero. Es importante destacar que el sistema de control es autónomo, por lo que, en caso de presentarse fallas en la comunicación con el Broker que se aloja en un cluster de HiveMQ y el ESP32, este continuará ejecutando las funciones de control de manera independiente, garantizando la operación continua del sistema.

Figura 10*Diseño de Propuesta Solución*

Nota. Esquema del circuito y funcionamiento.

Figura 11*Diseño 3D Instalaciones del Invernadero*

Nota. Modelo del diseño 3D.

El diseño propuesto integra un sistema de monitoreo y control automatizado que permite regular las condiciones ambientales dentro del invernadero mediante la interacción de sensores, actuadores y un controlador central.

Como se observa en la Figura 10, el sistema está compuesto por un microcontrolador ESP32 que recibe información de los sensores de temperatura, humedad ambiental y humedad del suelo. Estos sensores se encuentran distribuidos estratégicamente dentro del invernadero para garantizar una medición precisa de las variables.

En la Figura 11 se presenta el diseño tridimensional del invernadero, donde se evidencia la disposición física de los componentes del sistema.

Los sensores de temperatura y humedad ambiental se ubican en la parte media del invernadero, suspendidos a una altura representativa del crecimiento de las plantas, con el fin de medir las condiciones reales del entorno. Por su parte, los sensores de humedad del suelo se instalan directamente en la zona de cultivo, en contacto con el sustrato, lo que permite obtener datos precisos sobre el nivel de humedad disponible para las plantas.

En cuanto a los actuadores, la bomba de agua se encuentra conectada al sistema de riego por aspersión, permitiendo la distribución uniforme del agua en toda el área de cultivo. Los ventiladores están ubicados en los laterales del invernadero, favoreciendo la circulación del aire y el control de la temperatura interna. Asimismo, las lámparas (bombillos) se instalan en la parte superior de la estructura, proporcionando iluminación y calor cuando las condiciones ambientales lo requieren.

El sistema de control eléctrico incluye un tablero de distribución y dispositivos de protección, así como relés y contactores que permiten la activación segura de los actuadores a partir de las señales generadas por el ESP32. Esta configuración garantiza el aislamiento entre la etapa de control y la etapa de potencia, protegiendo los componentes electrónicos.

De esta manera, la disposición de los sensores y actuadores dentro del invernadero permite un monitoreo continuo y un control eficiente de las variables ambientales, asegurando condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas y optimizando el uso de los recursos.

Componentes del Prototipo

Sensor de temperatura

Requerimientos

- Debe medir temperatura y humedad
- Debe ser de bajo costo
- Consumo energético bajo
- Compatibilidad con ESP32

Sensores que pueden medir temperatura y humedad

- DHT11
- DHT22
- AHT10
- LM35
- BME280

Tabla 5*Comparación de Sensor de Temperatura*

Criterio	DHT11	DHT22	AHT10	LM35	BME280
Mide temperatura	Si	Si	Si	Si	Si
Mide humedad ambiental	Si	Si	Si	No	Si
Rango de temperatura	0°C a 50°C	-40°C a 80°C	-40°C a 85°C	-55°C a 150°C	-40°C a 85°C
Rango de humedad	20% a 80%	0% a 100%	0% a 100%	-----	0% a 100%
Protocolo de comunicación	Digital one-wire	Digital one-wire	I2C	Analógico	I2C / SPI
Precisión temperatura	±2°C	±0.5°C	±0.3°C	±0.5°C	±1°C
Precisión humedad	±5%	±2%	±2%	-----	±3%
Costo	Muy bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Medio
Disponibilidad en mercado local	Alta	Alta	Media	Alta	Media

Nota. Especificaciones básicas del sensor de temperatura.

Del análisis comparativo se concluye que el sensor DHT22 representa la opción más equilibrada para el proyecto. El DHT11 fue descartado por su menor precisión tanto en temperatura ($\pm 2^\circ\text{C}$) como en humedad ($\pm 5\%$) y su rango de humedad limitado entre 20% y 80%, insuficiente para un entorno de invernadero. El LM35 fue descartado por ser un sensor exclusivamente de temperatura con salida analógica, lo que requeriría un sensor adicional para medir la humedad ambiental, aumentando la complejidad del sistema. El AHT10 y el BME280, aunque ofrecen buenas prestaciones, presentan menor disponibilidad en el mercado local y mayor precio sin ofrecer ventajas significativas frente al DHT22 para el contexto del proyecto. El DHT22 ofrece una precisión de $\pm 0.5^\circ\text{C}$ en temperatura y $\pm 2\%$ en humedad, rango completo de 0% a 100% en humedad y protocolo de comunicación digital de fácil

integración con el ESP32, siendo la alternativa más adecuada en términos de precisión, costo y disponibilidad.

Referencia: DHT 22

- Bajo costo
- Alimentación y E/S de 3 a 5 V
- Consumo máximo de corriente de 2,5 mA durante la conversión (al solicitar datos)
- Ideal para lecturas de humedad del 0 al 100 % con una precisión del 2 al 5 %
- Ideal para lecturas de temperatura de -40 a 80 °C con una precisión de $\pm 0,5$ °C
- Frecuencia de muestreo máxima de 0,5 Hz (cada 2 segundos)

(Andafruit Industries, s. f.)

Figura 12

Sensor de Humedad Relativa y Temperatura DHT 22



Nota Imagen del sensor de humedad.

Sensor Humedad de Suelo

Tabla 6

Comparación de Sensor Humedad de Suelo

Criterio	Resistivo	Capacitivo v1.0	Capacitivo v2.0	FC-28
Principio de medición	Resistencia eléctrica	Capacitancia dieléctrica	Capacitancia dieléctrica	Resistencia eléctrica
Corrosión de electrodos	Alta	Baja	Muy baja	Alta
Señal de salida	Analógica	Analógica	Analógica	Analógica
Compatibilidad con ESP32	Si	Si	Si	Si
Precisión	Baja	Media	Alta	Baja
Estabilidad de la señal	Baja	Media	Alta	Baja
Vida útil	Corta	Media	Larga	Corta

Nota. Especificaciones técnicas del sensor de humedad.

Se seleccionó el sensor capacitivo de humedad del suelo v2.0 frente a las alternativas resistivas como el FC-28 y el sensor resistivo genérico, debido a que su principio de medición por capacitancia dieléctrica elimina el contacto directo entre los electrodos y el suelo, lo que reduce significativamente la corrosión y prolonga la vida útil del sensor. En comparación con la versión capacitiva v1.0, la versión v2.0 presenta mayor estabilidad en la señal de salida y mejor precisión en la medición, características esenciales para garantizar un control confiable del riego en el invernadero.

Sensor Capacitivo De Humedad De Suelo

Características:

Conexiones:

- GND: Tierra (GND 0V)
- VCC: Voltaje de alimentación (3.3V - 5V DC)
- AOUT: Salida analógica

- Especificaciones:
- Voltaje de alimentación: 3.3V - 5V DC
- Corriente operación: 5mA
- Voltaje de la señal de salida: 0 a 5V (Analógico)
- Modelo: capacitive soil moisture sensor v1.2
- Vida útil: 3 años mín.
- Conector: PH2.0-3P
- Incluye: Electrodo y cable jumper hembra
- Dimensiones: 98*23 mm
- Peso: 15 gramos
- Referencia de producto: MOISTURE SENSOR V1.2

Figura 13

Sensor Capacitivo De Humedad De Suelo



Nota. Imagen de sensor de humedad del Suelo.

Luces

Lámpara Radiación Infrarroja 250W 110V Infra V E27

Cuenta con una gran eficiencia para generar y transmitir calor que penetra directamente en las plantas, raíces y la tierra.

- Potencia: 250 W
- Modelo: Infrarrojos
- Base: E27
- Voltaje: 110 V
- Temperatura de color: 2350 K
- Dimensiones: 130 mm de diámetro x 180 mm de longitud
- Marca: Lucmat

Figura 14

Lámpara Radiación Infrarroja 250W 110V Infra V E27



Nota. Imagen de lampara de radiación. Fuente: (MercadoLibre, s. f.)

ESP32

El ESP32 es un microcontrolador versátil y ampliamente utilizado y un sistema en chip (SoC) Wi-Fi) /Bluetooth producido por Espressif Systems.

Un SoC es esencialmente un circuito integrado que toma una única plataforma e integra en ella un sistema electrónico completo, para una aplicación específica. A diferencia de un microcontrolador simple (como Atmega324p Arduino Uno), que ofrece varios periféricos de uso general en lugar de un conjunto específico de herramientas para una aplicación.

En el caso de ESP32, este fue diseñado para ser un SoC IoT con aceleración de hardware Wifi, Bluetooth y criptográfico ya integrada para permitir al usuario acceder a Internet (DeepSea Developments, s.f.).

Especificaciones

- Procesador: Tensilica Xtensa 32bits LX6 hasta 240MHz.
- Wi-Fi: 802.11b/g/n/e/i (802.11n @ 2.4 Ghz hasta 150 Mbit/s).
- Bluetooth: v4.0 BR/EDR y bluetooth Low Energy (BLE).
- Rom:448 KiB.
- SRAM: 520 KiB.
- RTC slow SRAM: 8 KiB.
- RTC fast SRAM: 8 KiB.
- eFuse: 1 Kbit.
- Flash embebida: 0 MiB (ESP32-D0WDQ6, ESP32-D0WD, and ESP32-S0WD chips); 2 MiB (ESP32-D2WD chip); 4 MiB (ESP32-PICO-D4 SIP module).
- Periféricos compatibles: ADC, DAC, I2C, UART, Interfaz CAN 2.0, SPI, I2S, RMI y PWM entre otros.
- Seguridad tipo IEEE 802.11, WFA, WPA/WPA2 y WAPI.

- Encriptación de memoria Flash.
- Criptografía soportada por acelerador de hardware: AES, SHA-2, RSA, ECC, RNG.

- Voltaje de operación: 3.3 V
- Voltaje de entrada recomendado: 5 VDC

Figura 15

Placa ESP32



Nota. Imagen de la Placa.

Motor Bomba de Agua

Requerimientos: Los requerimientos que la bomba debe tener son hidráulicos, eléctricos y de control.

Para el diseño del prototipado se usa un motor de 3v, de voltaje continuo, el mismo motor que usa una bomba de agua de 3v.

El funcionamiento de la bomba depende del ESP32, la bomba debe estar alimentada de manera independiente de los demás equipos. La conexión eléctrica primero debe pasar por un relé que es el que recibe la señal de activación desde el ESP32, esta abre el paso de

corriente hasta un contactor, contacto que se usa para proteger el relé de picos de voltaje muy altos que produce el motor de la bomba de agua al encender evitando dañar el relé y EPS32.

Característica del motor bomba de agua

- Voltaje de funcionamiento: 3v-6v DC
- Voltaje nominal: 5v
- Velocidad sin carga: 13600 r/min
- Corriente sin carga: 0.27 A
- Par de torsión (Torque): 2.92 mN-m (29.8/g.cm)
- Dimensiones: 20x15x25mm

Figura 16

Motor Bomba de Agua



Nota. Imagen de motor bomba de agua. Fuente: Adaptado de Mini motor DC 3–6 V juguete Arduino proyecto, por Mercado Libre (s. f.), <https://www.mercadolibre.com.co/mini-motor-dc-3-6-v-juguete-arduino-proyecto/p/MCO2064872342>

Ventilador

Ventilador Axial 14 Succión 110v 1600 Rpm

- Marca: FM
- Modelo: YWF4E-350
- Función: Extractor
- Materiales: Acero inoxidable
- Alimentación: 110 v
- Salida: si
- Velocidades: 1

Figura 17

Ventilador Axial 14 Succión 110v 1600 Rpm



Nota. Imagen de Ventilador. Fuente: (MercadoLibre, s.f)

Relé

Módulo de 4 relés 5 VCC 10 A (montado).

Es la placa electrónica con pequeños relés conectados por medio de transistores 2N2222 que van directamente a los pines de tu ESP32 se debe conectar de esa manera ya que el voltaje de los pines del esp32 no logra accionar los relés del módulo.

Actúa como un interruptor controlado por medio de una señal de voltaje (5V) y el módulo cierra internamente un contacto para dar paso a la corriente de potencia la cual puede ser de 120 a 250 VAC según su referencia

La placa de relés de 4 canales a 5 V permite controlar cargas de mayor potencia (motores CA/CC, lámparas, electroválvulas, ventiladores, etc.) utilizando señales digitales de ESP32 u otros microcontroladores de 5 V.

Características

- 4 relés independientes
- Activación por señal de 5 V (directa desde pines digitales)
- Aislamiento por optoacopladores
- LEDs indicadores de estado por canal
- Protección contra polaridad inversa
- Pines estándar: VCC, GND, IN1, IN2, IN3, IN4
- Compatible con ESP32, Arduino UNO, Mega, Nano

Especificaciones técnicas

- Voltaje de alimentación: 5 V
- Voltaje de activación: 2.5 a 5 V
- Corriente de disparo: ~5 mA por canal
- Carga máxima por relé:
- 10 a @ 250 V CA

- 10 a @ 30 V CC
- Tipo de contacto: NO / NC / COM
- Tiempo de respuesta: <10 ms

Figura 18

Módulo de 4 Relés 5 VCC 10 A (Montado)



Nota. Imagen de los Relés.

Tabla 7*Comparativa de Funciones de Relé y Contactor***Diseño del Prototipo**

Componente	Función en el sistema	Activación	¿Es obligatorio para el control básico?
Módulo de relés	Activación de contactor para arranque del motor	Activado por transistor 2N2222	Sí, ya que soporta el voltaje de activación que necesita el contactor
Contactor	Soporta la carga eléctrica pesada del motor.	Activado por módulo de relés.	Si, ya que el módulo de relés no soporta la carga que necesita el motor para funcionar mientras que el contactor si tiene la capacidad.
Relé térmico (ABB TF42-38)	Protege el motor para que no se quemara por sobrecarga.	La corriente física / calor del motor.	No, es opcional. El sistema automatizado funciona perfectamente sin él; solo se añade como seguridad para el motor.

Nota. Especificaciones técnicas u funcionales de los Relés.

El prototipo para entregar tendrá las condiciones de simulación del entorno real, y la capacidad del sistema de adaptarse a los diferentes modos de trabajo para lo cual fue programado.

Tabla 8*Comparación de Plataforma de Monitoreo*

Criterio	ThingSpeak	Blynk	Node-RED	IoT MQTT Panel
Protocolo principal	HTTP/MQTT	MQTT/HTTP	MQTT/HTTP	MQTT
Compatibilidad con ESP32	Si	Si	Si	Si
Requiere servidor propio	No	No	Si	No
Plan gratuito funcional	Limitada	Limitado	Si	Si
Configuración del dashboard	Media	Fácil	Compleja	Fácil
Visualización en tiempo real	Si	Si	Si	Si
Requiere programación adicional	No	No	Si	No
Disponible en móvil	No	Si	No	Si
Almacenamiento de datos	Si	Limitado	Depende	No

Nota. Fuentes comparativas del monitoreo.

Software Utilizado para el Prototipo

Con base en el análisis comparativo, se seleccionó la aplicación IoT MQTT Panel como plataforma de visualización y monitoreo, debido a su compatibilidad nativa con el protocolo MQTT, su disponibilidad gratuita, facilidad de configuración del dashboard y acceso desde dispositivos móviles. A diferencia de otras plataformas como ThingSpeak o Blynk, IoT MQTT Panel no requiere programación adicional ni configuración de servidores propios, lo que la convierte en una solución práctica y eficiente para el monitoreo en tiempo real de las variables del invernadero.

Tabla 9

Comparación Brokers MQTT

Criterio	Mosquitto	EMQX	HiveMQ	AWS IoT Core
Tipo de despliegue	Local / servidor propio	Local / nube	Nube (sin servidor)	Nube
Plan gratuito	Si	Si	Si	Limitado
Requiere configuración de servidor	Si	Si	No	No
Escalabilidad	Media	Alta	Alta	Alta
Compatibilidad con ESP32	Si	Si	Si	Si
Seguridad TLS/SSL	Si	Si	Si	Si
Interfaz de administración web	No	Si	Si	Si
Facilidad de implementación	Media	Media	Alta	Baja
Documentación disponible	Amplia	Amplia	Amplia	Amplia

Nota. Especificaciones de comparación de Broker.

Con base en el análisis comparativo, se seleccionó HiveMQ como broker MQTT debido a que opera completamente en la nube sin requerir la configuración ni el

mantenimiento de un servidor propio, lo que simplifica significativamente la implementación del sistema. A diferencia de Mosquitto y EMQX, que requieren infraestructura local, HiveMQ ofrece un plan gratuito completamente funcional con alta disponibilidad.

Nube HiveMQ

HiveMQ es una plataforma Open Source de mensajería empresarial y de datos perimetrales (edge) basada en el protocolo MQTT.

HiveMQ Cloud es un servicio de intermediación MQTT totalmente administrado que ofrece una infraestructura de mensajería confiable, escalable y segura para las aplicaciones de IoT y dispositivos conectados. HiveMQ Cloud se encarga del aprovisionamiento, el escalamiento, los parches de seguridad y la alta disponibilidad.

Figura 19

Logo de la Nube de HiveMQ



Nota. Imagen de la nube usada en el prototipo. Fuente: Adaptada de MQTT Dashboard, por MQTT Dashboard (s. f.), <https://www.mqtt-dashboard.com>

Funciones de la nube de HiveMQ. Permite crear un clúster en pocos pasos y conecta los dispositivos IoT como el ESP32.

No se requiere administración ni instalación del servidor, su plan gratuito es ideal para proyectos de IoT donde la cantidad de tráfico no es tan grande, ya que su plan gratuito incluye 10 GB mensual de tráfico.

En el presente proyecto de invernadero automatizado, HiveMQ fue utilizado como broker MQTT debido a que permite la comunicación en tiempo real entre la ESP32 y las aplicaciones de monitoreo, sin necesidad de instalar ni administrar un servidor propio.

Además, implementa conexiones seguras mediante TLS/SSL, soporta el protocolo MQTT muy utilizado en aplicaciones IoT como en este caso y proporciona acceso remoto a los datos del sistema desde cualquier ubicación con conexión a Internet (HiveMQ, s.f.).

IoT MQTT Planet

Es una aplicación para Android, cuenta con versión gratuita y de pago, permite gestionar y visualizar proyectos IoT basados en protocolo MQTT.

La aplicación soporta MQTT sobre TCP y WebSockets, comunicación segura mediante SSL/TLS, mensajes JSON, actualización en tiempo real mediante suscripción a tópicos y funcionamiento continuo en segundo plano (Kundu, s.f.).

La integración entre HiveMQ Cloud e IoT MQTT Panel permite implementar una arquitectura IoT basada en el modelo publicador-suscriptor (publish/subscribe), donde el ESP32 publica las variables del sistema (temperatura, humedad, nivel de agua y estado de actuadores) en HiveMQ Cloud, mientras que IoT MQTT Panel se suscribe a dichos tópicos para visualizar la información y enviar comandos de control cuando sea necesario. Esta solución facilita el monitoreo remoto, reduce los costos de infraestructura y simplifica el desarrollo del sistema.

Arquitectura General

El sistema se basa en una arquitectura de control centralizada, donde el ESP32 actúa como el cerebro de procesamiento de todo el sistema. Esta unidad recibe datos de la red de

sensores (humedad de suelo, temperatura y humedad ambiental) y comanda la red de actuadores (relés, ventiladores, y bombillos), como se ilustra en la figura anterior.

El Cerebro (ESP32). De acuerdo con los requerimientos de este sistema se elige dispositivo de control el microcontrolador EPS32 desarrollado por Espressif Systems. Este dispositivo integra un microprocesador Tensilica Xtensa LX6 de doble núcleo operando a hasta 240 MHz, conectividad inalámbrica Wi-Fi 802.11 b/g/n y Bluetooth v4.2 BR/EDR y BLE de manera nativa, sin requerir módulos externos adicionales (Espressif Systems, 2023).

Su arquitectura de doble núcleo, en combinación con el sistema operativo en tiempo real FreeRTOS integrado, permite ejecutar tareas de forma paralela: el Core 0 gestiona la comunicación inalámbrica mientras el Core 1 realiza la lectura de sensores y el control de actuadores de manera simultánea y sin interrupciones (Espressif IDF Documentation, 2023). Esto resulta esencial en un sistema de invernadero automatizado donde la temporización de las lecturas ambientales y la activación de actuadores deben ser deterministas.

En cuanto a precisión, el ESP32 incorpora dos convertidores analógico-digital (ADC) SAR de 12 bits con 18 canales de medición, lo que equivale a 4096 niveles de resolución frente a los 1024 niveles (10 bits) del Arduino UNO, proporcionando una fidelidad significativamente mayor en la lectura de sensores analógicos de temperatura, humedad y luminosidad (Espressif Systems, 2023).

Desde el punto de vista energético, el ESP32 dispone de un modo de suspensión profunda (deep sleep) con un consumo de apenas 5–10 μA , lo que lo hace compatible con alimentación mediante panel solar o batería. Estudios en invernaderos reales han medido un consumo diario de 8,91 Wh para nodos basados en ESP32, frente a 78 Wh para sistemas equivalentes con Raspberry Pi (Al-Mahmud et al., 2025).

Finalmente, su amplio ecosistema de librerías compatibles con los sensores más utilizados en agricultura de precisión (DHT22, BME280, MH-Z19, FC-28), junto con su

costo de adquisición inferior a USD \$10 por unidad, lo posicionan como la plataforma óptima para implementaciones IoT en entornos agrícolas controlados (Mamani et al., 2022; Moreno, 2023).

Tabla 10

Comparación entre Arduino Uno, Raspberry pi y ESP32 para la Automatización del Invernadero

Criterio	Arduino Uno	Raspberry pi	ESP32
Tipo de dispositivo	Microcontrolador	Microcomputadora	Microcontrolador
Sistema operativo	No requiere	Requiere sistema operativo (Linux)	No requiere
Adecuación al control de variables físicas	Muy alta	Media	Alta
Control en tiempo real	Muy eficiente y determinístico	No determinístico	Eficiente
Facilidad de adquisición de datos (sensores)	Alta compatibilidad con sensores analógicos	Requiere interfaces adicionales	Alta
Consumo energético	Bajo	Alto	Bajo
Complejidad de implementación	Baja	Alta	Media
Estabilidad para operación continua	Alta	Media	Alta
Conectividad integrada	No	Si	Si
Costo del sistema	Bajo	Medio	Bajo
Adecuación del sistema de invernadero propuesto	Muy alta	Baja	Media

Nota. Especificaciones de la Automatización del Sistema de Riego.

Aplicación de los Principios de la Ingeniería Electrónica en un Invernadero Automatizado con ESP32

En el desarrollo de un invernadero automatizado basado en ESP32, orientado al monitoreo y control de las variables de temperatura, humedad del aire y humedad del suelo, se aplican diversos principios fundamentales de la ingeniería electrónica, los cuales permiten el funcionamiento eficiente y confiable del sistema.

Principios de Electricidad y Electrónica Básica

El sistema requiere una correcta gestión de voltajes, corrientes y potencia eléctrica para la alimentación del microcontrolador, sensores y actuadores. Se aplican la Ley de Ohm y las leyes de Kirchhoff para el diseño del circuito, garantizando condiciones seguras de operación y evitando sobre corrientes que puedan dañar los componentes electrónicos.

Electrónica Analógica y Digital

El proyecto integra señales analógicas, provenientes del sensor de humedad del suelo, y señales digitales, generadas por sensores como el DHT22. El ESP32 utiliza su convertidor analógico-digital (ADC) para procesar estas señales, permitiendo su interpretación y uso en la lógica de control.

Sistemas Digitales y Microcontroladores

El ESP32 funciona como un sistema embebido, encargado de ejecutar algoritmos de control, procesar datos de sensores y generar señales de salida. Se aplican principios de lógica digital, programación y arquitectura de microcontroladores para la toma de decisiones automatizada.

Sistemas de Control Automático

El control de temperatura y humedad se realiza mediante sistemas de control en lazo cerrado, donde las variables medidas se comparan con valores de referencia. En función del error obtenido, el sistema acciona ventiladores, bombas de riego o calefacción manteniendo condiciones ambientales óptimas para el desarrollo óptimo del cultivo.

Electrónica de Potencia y Actuadores

Para el accionamiento de dispositivos de mayor consumo energético se emplean relés, transistores o módulos de potencia, permitiendo el control seguro de cargas eléctricas. Este principio garantiza el aislamiento entre la etapa de control y la etapa de potencia, protegiendo el microcontrolador.

Comunicación y Monitoreo de Datos

El sistema permite la visualización y transmisión de datos mediante el monitor serial, pantallas LCD o módulos de comunicación inalámbrica. Esto aplica principios de comunicación electrónica, facilitando la supervisión del estado del invernadero en tiempo real.

Diseño Electrónico, Seguridad y Confiabilidad

El diseño del circuito considera aspectos como protección eléctrica, estabilidad del sistema y confiabilidad operativa, especialmente debido a las condiciones ambientales del invernadero (humedad y temperatura variables). Estos criterios son fundamentales en la ingeniería electrónica aplicada.

Ingeniería Electrónica y Sostenibilidad

La automatización del invernadero contribuye al uso eficiente de recursos como el agua y la energía, alineándose con principios de sostenibilidad y responsabilidad social, fundamentales en la práctica profesional de la ingeniería electrónica.

Histéresis en el Sistema de Control

Uno de los principios de ingeniería aplicados en el diseño del sistema de control es la histéresis, técnica ampliamente utilizada en sistemas de automatización para evitar conmutaciones innecesarias de los actuadores cuando las variables medidas oscilan cerca de un umbral definido. Sin este principio, el sistema podría activar y desactivar un actuador de forma repetida y continua ante pequeñas variaciones de la señal del sensor, fenómeno

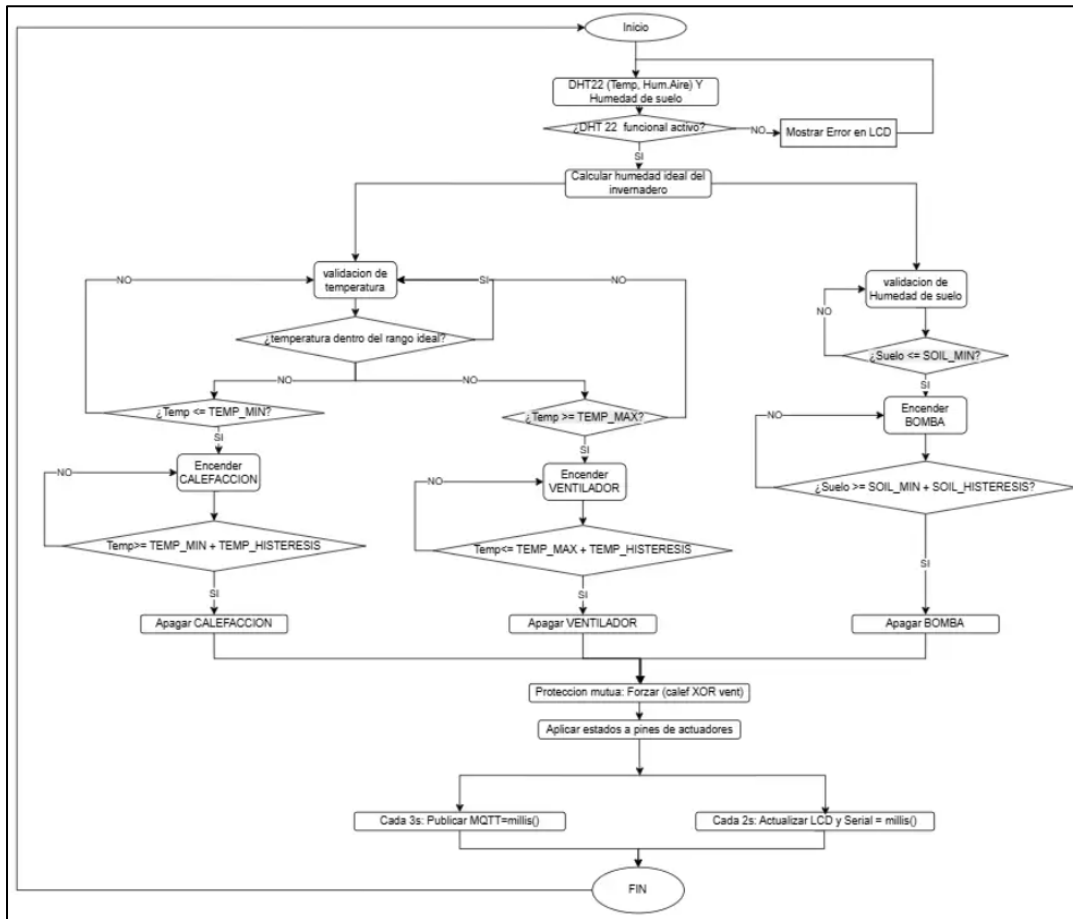
conocido como chattering, lo que reduciría la vida útil de los dispositivos y generaría inestabilidad en el sistema.

En el presente diseño se implementó un margen de histéresis de 1 unidad para cada variable controlada, definiendo umbrales de activación y desactivación distintos de la siguiente manera:

Para la temperatura, cuyo rango óptimo se estableció entre 15°C y 25°C, el ventilador se activa cuando la temperatura supera los 25°C+ histéresis y se desactiva al descender por debajo de 24°C. De igual forma, el sistema de calefacción se activa cuando la temperatura desciende por debajo de 15°C - histéresis y se desactiva al superar los 16°C. Para el sistema de riego la histéresis entra a operar en la desactivación de la bomba esta lo hará cuando el suelo este bien mojado de este modo tendrá un rango de un 10% que tiene la histéresis para mojar bien el terreno.

Figura 20

Diagrama de Flujo

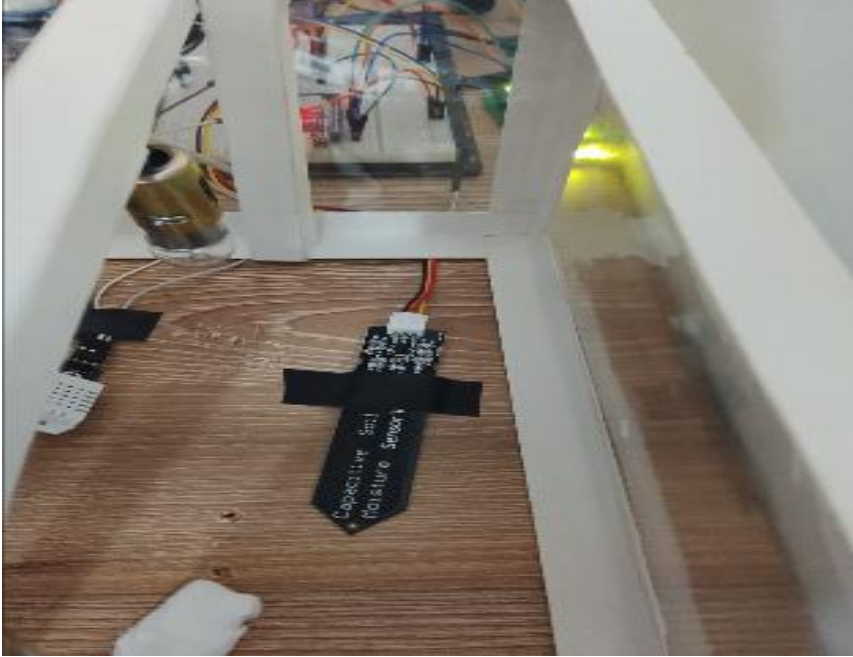


Nota. Diagrama de Flujo del sistema.

Para una mayor claridad en el mapa ver apéndice C.

Figura 23

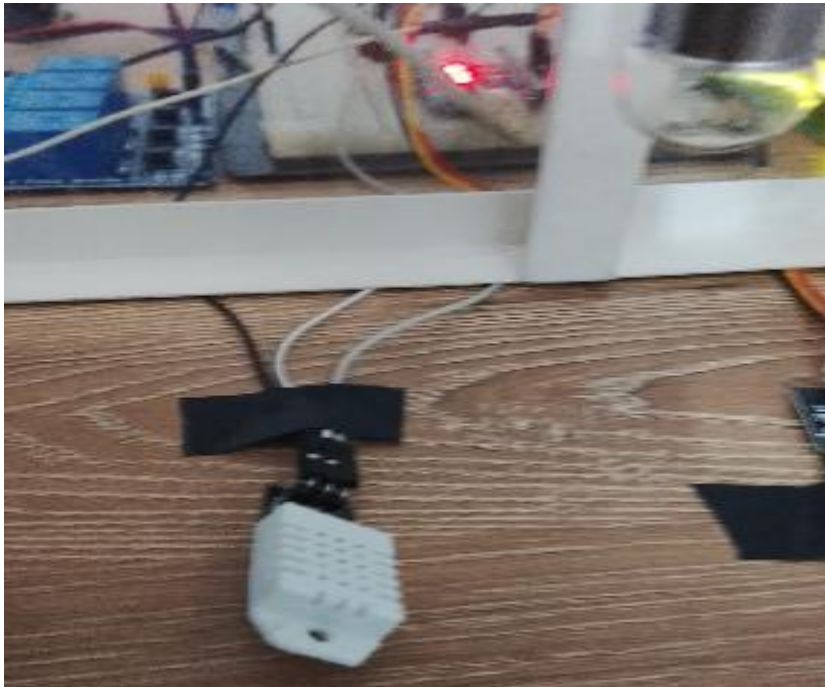
Implementación de Sensor Humedad Suelo



Nota. Instalación del sensor de Humedad del suelo.

Figura 24

Implementación Sensor DHT22



Nota. Conexión y funcionamiento del sensor.

Figura 25

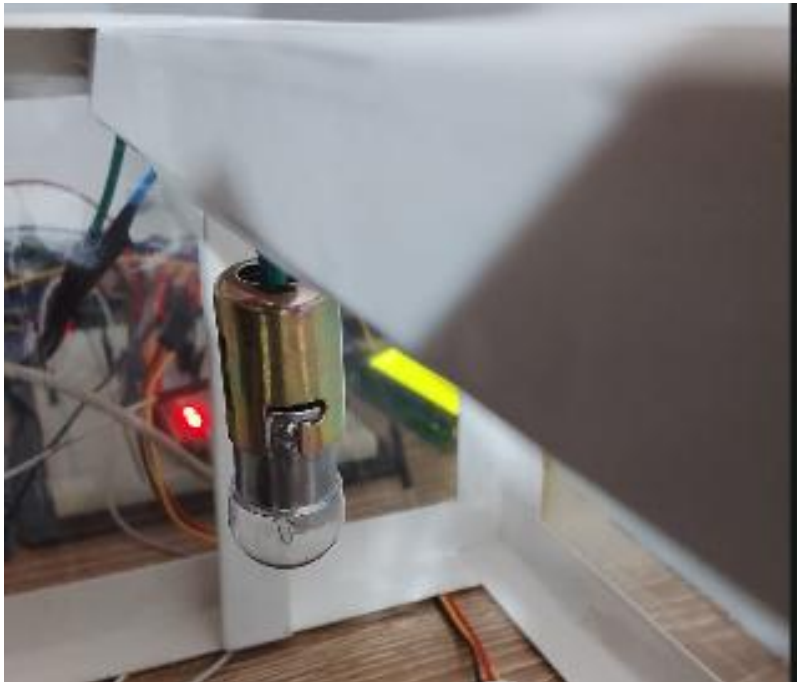
Implementación Actuador Ventilación



Nota. Conexión y funcionamiento del Ventilador.

Figura 26

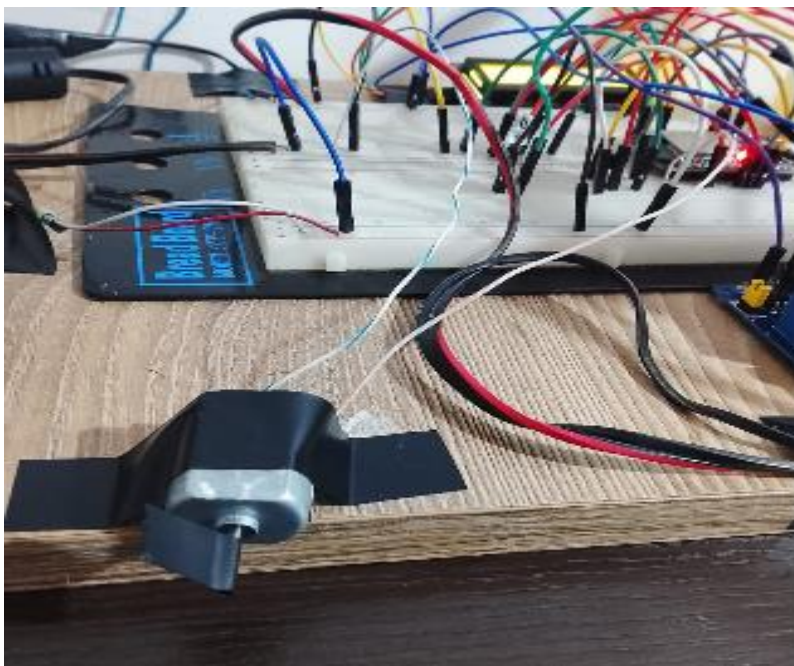
Implementación Actuador - Calefacción



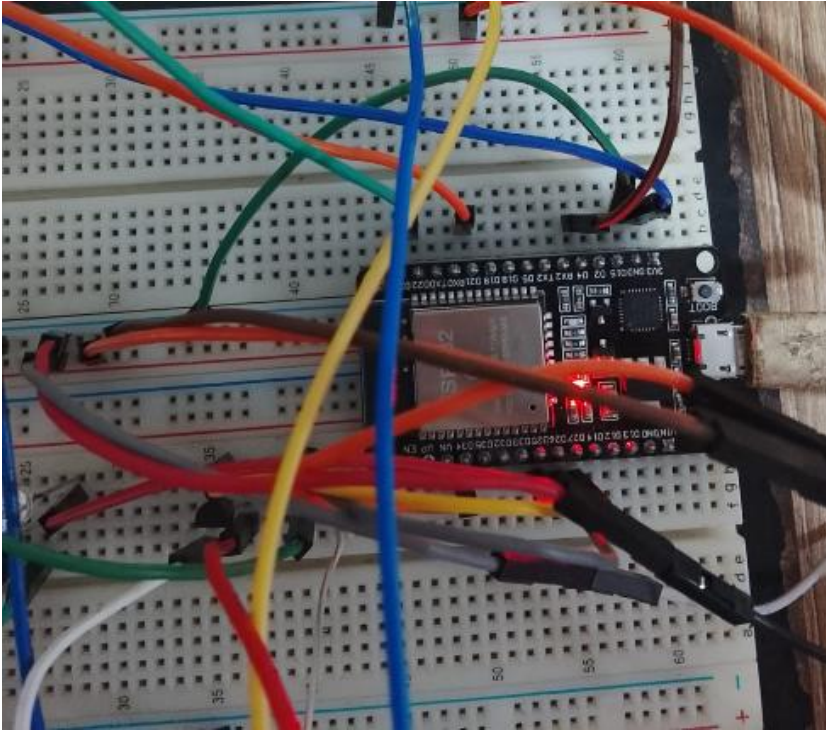
Nota. Conexión del dispositivo de calefacción.

Figura 27

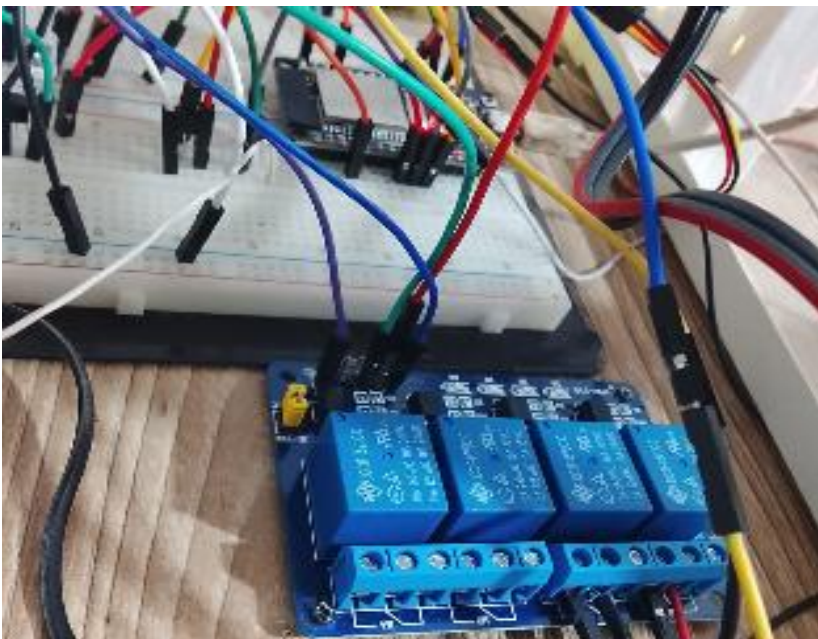
Implementación Actuador - Bomba de Agua



Nota. Conexión y funcionamiento de la bomba de agua.

Figura 28*Implementación ESP32*

Nota. Imagen del circuito.

Figura 29*Implementación de Relé*

Nota. Conexión y funcionamiento del Relé.

Figura 30

Implementación de Baterías



Nota. Funcionamiento de las baterías.

Figura 31

Implementación de Pantalla LCD



Nota. Funcionamiento de la pantalla LCD.

Plataforma de Gestión

Es una plataforma que permite conectar, visualizar y gestionar dispositivos en tiempo real utilizando un bróker centralizado. Son muy utilizados para leer sensores y enviar comandos utilizando el protocolo de comunicación MQTT.

Figura 32

Plataforma de Gestión



Nota. Imagen de la plataforma de funcionamiento. Fuente: De IoT MQTT Panel [Aplicación móvil], por R. Kundu (s. f.), Google Play. Tomado de.

<https://play.google.com/store/apps/details?id=snr.lab.iotmqttpanel.prod>.

El sistema cuenta con un dashboard, como se muestra en la Figura 34, que permite la visualización en tiempo real de las condiciones climáticas del invernadero. En este se incluyen indicadores tipo medidor, los cuales muestran las mediciones de las variables monitoreadas.

Además, los colores asociados a estos indicadores proporcionan una referencia visual del estado del sistema, permitiendo identificar de manera rápida si las condiciones se encuentran dentro de los rangos normales o si existe algún tipo de alerta.

El dashboard incorpora un apartado gráfico que presenta el comportamiento de las variables a lo largo del tiempo, facilitando el análisis de tendencias y la evaluación del desempeño del sistema.

En la parte de en medio se disponen tres indicadores tipo LED, los cuales permiten visualizar el estado de los actuadores, indicando si se encuentran encendidos o apagados. De igual forma.

Resultados Experimentales

Descripción del Prototipo de Laboratorio

Las pruebas del sistema fueron realizadas en un espacio residencial habilitado como ambiente de laboratorio, bajo condiciones controladas que permitieron evaluar el comportamiento del sistema de monitoreo y control diseñado, dado que el alcance del proyecto corresponde a un prototipo de laboratorio, las pruebas no se llevaron a cabo en el invernadero piloto ni bajo condiciones agrícolas reales.

El prototipo consistió en una maqueta de pequeñas dimensiones, construida con el propósito de simular el entorno interno de un invernadero. En su interior se instalaron los sensores de temperatura, humedad ambiental y humedad del suelo, así como los actuadores. Las condiciones ambientales del interior de la maqueta no correspondieron a un cultivo real, ya que las pruebas se realizaron sin plantas, simulando las variables climáticas mediante la interacción natural del entorno y la respuesta del sistema a cambios de condiciones climáticas alteradas, como por ejemplo empleando hielo para simular climas fríos y calentando el sensor DHT22 con las manos simulando altas temperaturas.

La duración total de las pruebas estuvo comprendida en una sesión de más de 2 horas, tiempo durante el cual se verificó el funcionamiento del sistema de adquisición de datos, la lógica de control automático, la activación de los actuadores ante cambios en las variables medidas y la visualización en tiempo real a través del dashboard en la App IoT MQTT Panel.

Resultados de Monitoreo de Variables Climáticas

Temp:13.60,Suelo:41,Hum:76.40,Bomba:OFF,Vent:OFF,Calef:ON

Temp:13.60,Suelo:41,Hum:76.40,Bomba:OFF,Vent:OFF,Calef:ON

Temp:13.50,Suelo:43,Hum:76.40,Bomba:OFF,Vent:OFF,Calef:ON

Temp:13.40,Suelo:40,Hum:76.40,Bomba:OFF,Vent:OFF,Calef:ON

Temp:13.30,Suelo:41,Hum:76.40,Bomba:OFF,Vent:OFF,Calef:ON

Temp:13.10,Suelo:54,Hum:94.30,Bomba:OFF,Vent:OFF,Calef:ON

Temp:13.20,Suelo:54,Hum:96.20,Bomba:OFF,Vent:OFF,Calef:ON

Temp:13.20,Suelo:54,Hum:98.10,Bomba:OFF,Vent:OFF,Calef:ON

Temp:20.40,Suelo:41,Hum:100.00,Bomba:OFF,Vent:OFF,Calef:OFF

Temp:20.50,Suelo:41,Hum:100.00,Bomba:OFF,Vent:OFF,Calef:OFF

Temp:20.40,Suelo:39,Hum:100.00,Bomba:ON,Vent:OFF,Calef:OFF

Resultados del Sistema de Control

El tiempo de respuesta del sistema es inmediato, una vez el sensor realiza la lectura de las variables climáticas y el sistema las registra por fuera de los rangos normales los actuadores se activan de inmediato, el tiempo que dure el actuador prendido depende de lo que demore el sensor en estabilizarse a los rangos definidos. En este caso es importante resaltar el uso de la histéresis configurada que es de 1, el cual funciona de la siguiente manera: la lectura del sensor debe ser de + 1 del límite en el caso de máximo y debe estar más por debajo del límite para el caso de mínimo, para que se active el actuador, de esta manera se evita que los actuadores se prendan apenas lleguen al límite.

Resultado de la Comunicación y Visualización IoT

La comunicación se realiza por medio del protocolo MQTT, este protocolo permite la comunicación entre dispositivos a la nube y la nube a dispositivos como en este caso, donde gracias a que el ESP32 soporta este protocolo es posible conectarse por medio de su modulo wifi de manera remota de la siguiente manera: el ESP32 publica un topic con la ruta de donde está la información, esta viaja por protocolo MQTT hasta la plataforma HiveMQ y de aquí viaja por el mismo protocolo hasta el cliente en este caso la plataforma IoT MQTT Panel. En resumen, el ESP32 y la app nunca se hablan directamente. Los dos se conectan al broker HiveMQ, y HiveMQ hace de puente. Esto es exactamente el patrón publish/subscribe de MQTT.

Resultado de la Etapa de Potencia

Para la etapa de potencia fue de mucha importancia que la alimentación de los actuadores en especial de la bomba de agua se hiciera de manera independiente ya que al arrancar la marcha provoca una caída de voltaje que bloquea el ESP32, esto impide que el actuador arranque de forma normal y puede provocar que el resto del sistema se averíe. Esto ocurre debido a las características de arranque de la bomba, cuya corriente de arranque superaba la capacidad de conmutación del relé utilizado en el prototipo. Esta situación evidencia la necesidad de dimensionar adecuadamente los elementos de conmutación según las especificaciones eléctricas de cada actuador, aspecto que deberá ser corregido en una etapa posterior de implementación.

A pesar de esta situación, la etapa de potencia demostró en términos generales que la arquitectura de control es funcional y que el aislamiento entre el circuito de control y los dispositivos de mayor consumo opera de manera segura, protegiendo al ESP32 de posibles daños por sobretensión o corrientes elevadas.

Discusión

Análisis del Desempeño del Sistema de Control

Se logra verificar que el sistema de control respondió a cada uno de los requerimientos para los cuales estaba configurado, de tal manera que se activaron y se apagaron en el momento preciso y que los sensores respondieron de acuerdo con cada cambio de variación de clima de manera precisa, con lo que se logra comprobar y verificar que el prototipo es completamente viable. Tomando en cuenta que los indicadores corresponden a un prototipo de laboratorio.

Los principales aportes que se desarrollaron se basan en el uso de la nube de HiveMQ, que es lo que hoy en día se está usando y a lo que se enfoca el futuro, en este caso se utilizó la nube para alojar un clúster gratuito con la comunicación MQTT, el cual se comunica por medio de este protocolo hasta la app móvil que contiene la dashboard de visualización y monitoreo.

Conclusiones

El presente trabajo alcanza el nivel de diseño validado mediante un prototipo de laboratorio, lo que significa que los resultados obtenidos corresponden a pruebas realizadas en condiciones controladas y no a una implementación a escala real en el invernadero piloto. Este alcance delimita el proyecto y establece la base técnica para una futura etapa de implementación en campo.

El diseño del sistema de invernadero automatizado permitió establecer una solución integral basada en el monitoreo y control de variables climáticas críticas como la temperatura, la humedad ambiental y la humedad del suelo. A partir de la definición de rangos óptimos de operación y la selección adecuada de sensores y actuadores, se estructuró una arquitectura de control centralizada capaz de responder de manera eficiente a las condiciones del entorno.

Se determinó que la arquitectura basada en ESP32 representa una solución adecuada para el contexto del lugar piloto, debido a su estabilidad operativa, bajo costo, facilidad de implementación y disponibilidad en el mercado. En comparación con otras plataformas, esta alternativa ofrece ventajas significativas para aplicaciones en entornos agrícolas que requieren operación continua y mantenimiento sencillo.

El sistema diseñado integra de manera efectiva componentes de hardware y software, permitiendo la adquisición, procesamiento y visualización de datos en tiempo real mediante un dashboard implementado en la App IoT MQTT Panel. Esta integración facilita la supervisión de las condiciones del invernadero y la toma de decisiones informadas, contribuyendo a una gestión más eficiente del cultivo.

Asimismo, la incorporación de una etapa de potencia mediante relés y contactores garantiza un funcionamiento seguro de los actuadores, permitiendo controlar dispositivos como bombas de agua, ventiladores y sistemas de iluminación sin comprometer la integridad del sistema electrónico.

El sistema propuesto demuestra la viabilidad de implementar soluciones basadas en Internet de las Cosas (IoT) en entornos agrícolas, logrando automatizar procesos que tradicionalmente se realizaban de forma manual. Esto se traduce en una optimización del uso de recursos como el agua y la energía, así como en la reducción de la intervención humana.

De igual manera, el diseño permite mantener condiciones ambientales estables que favorecen el crecimiento y desarrollo de las plantas, mejorando la calidad del producto final y aumentando la productividad del sistema.

Por último, se valida la aplicabilidad del sistema como una solución escalable y adaptable, ya que su estructura modular permite la incorporación de nuevos sensores y actuadores sin requerir modificaciones significativas en la arquitectura base, lo que lo convierte en una alternativa viable para su implementación en diferentes contextos agrícolas.

Recomendaciones

En una segunda fase del proyecto, se recomienda implementar mejoras orientadas a optimizar el desempeño del sistema y aumentar la productividad del invernadero.

Se sugiere la incorporación de sensores con protocolos de comunicación industrial, los cuales ofrecen mayor precisión, estabilidad y resistencia a condiciones ambientales adversas. Esto permitiría obtener mediciones más confiables y mejorar el control de las variables climáticas, impactando positivamente en el desarrollo de los cultivos.

Se recomienda la evolución del sistema hacia una arquitectura de nube híbrida, donde la información recolectada pueda ser almacenada y procesada en plataformas externas. Esto facilitaría el acceso remoto, el análisis avanzado de datos y la toma de decisiones basadas en información histórica, contribuyendo a una gestión más eficiente del invernadero.

En futuras etapas, se propone la implementación de una arquitectura distribuida tipo maestro-esclavo, que permita integrar múltiples nodos de monitoreo en diferentes áreas del invernadero o en otros cultivos. Esta estrategia permitiría ampliar la cobertura del sistema y optimizar la gestión centralizada de la información.

De igual manera, se recomienda fortalecer el sistema de monitoreo mediante la integración de herramientas de análisis predictivo, las cuales, a partir de los datos históricos, permitan anticipar comportamientos de las variables ambientales y posibles afectaciones en los cultivos, como la aparición de enfermedades o condiciones no óptimas de crecimiento.

Para mejorar la confiabilidad del sistema en entornos rurales, se sugiere la implementación de soluciones de respaldo energético, como sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS) o sistemas fotovoltaicos. Esto garantizaría la continuidad operativa del

sistema, evitando pérdidas de información y asegurando el control permanente de las condiciones del invernadero.

Referencias

- ABB. (s. f.). TF42-38 thermal overload relay (1SAZ721201R1055). ABB Product Catalogue.
<https://new.abb.com/products/es/1SAZ721201R1055/tf42-38>
- ACEBOTT. (2026, 25 de abril). Getting started with ESP32.
<https://acebott.com/es/docs/getting-started-with-esp32/>
- Adafruit Industries. (s. f.). AM2302 (DHT22) temperature-humidity sensor. Adafruit.
<https://www.adafruit.com/product/393>
- Agencia Nacional del Espectro (ANE). (2020, marzo 27). Resolución 105 de 2020: Por medio de la cual se planea y atribuye el espectro radioeléctrico en Colombia. Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.
https://normograma.mintic.gov.co/mintic/compilacion/docs/resolucion_ane_0105_2020.htm
- Aguado da Costa, J. (2012). Desarrollo de un sistema automatizado para un invernadero [Trabajo Fin de Grado, Ingeniería Técnica Industrial, Especialidad en Electrónica Industrial]. Universidad de Valladolid.
<https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/2930/PFC-P-50.pdf>
- Al-Mahmud, A. et al. (2025). Deep learning-driven IoT solution for smart tomato farming. NCBI/PubMed. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC12375779/>
- Arshad, J., Tariq, R., Saleem, S., Rehman, A. U., Munir, H. M., Amiri Golilarz, N., & Saleem, A. (2020). Intelligent greenhouse monitoring and control scheme: An arrangement of sensors, Raspberry Pi based embedded system and IoT platform. *Indian Journal of Science and Technology*, 13(27), 2811–2822.
<https://doi.org/10.17485/IJST/v13i27.311>.
- Beltrán Chusán, J. A., Borja López, J. V., & Brito Collantes, J. A. (2022). Diseño e implementación de un dispositivo para la medición y comunicación de parámetros de

agricultura de precisión en cultivo de rosas [Trabajo de grado]. Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL).

- Benítez López, K. L., Caro Álvarez, M., Vivero Padilla, A., & Muñoz Bossio, H. (2025). Design and construction of an automated greenhouse using Arduino for humidity and temperature control in tropical crops. En *Memorias del Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería (EIEI-ACOFI)*. Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería. <https://doi.org/10.26507/paper.4577>
- Berrios Gómez, S. (2022). Diseño de un sistema IOT para el monitoreo y control del cultivo de lechugas en un invernadero
- Berrios Gómez, S. (2022). Diseño de un sistema IoT para el monitoreo y control del cultivo de lechugas en un invernadero (Tesis de grado, Universidad Privada de Tacna). Repositorio Institucional UPT. <http://hdl.handle.net/20.500.12969/2362>
- Brickell, C., Baum, B., & Hetterscheid, W. (2009). The international code of nomenclature for cultivated plants. International Society for Horticultural Science (ISHS).
- Colviveros. (s. f.). Datos sobre el viverismo en Colombia y el mundo. <https://www.colviveros.org/Colviveros-datos-viverismo.html>
- Congreso de la República de Colombia. (2009). Ley 1341 de 2009: Por la cual se definen principios y conceptos sobre la sociedad de la información y la organización de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC), se crea la Agencia Nacional de Espectro y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial No. 47.426. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=36875>
- Correa-Quiroz, J. J., Toribio-Barrueto, M. A., & Castro-Vargas, C. (2025). IoT system with ESP32 for smart drip irrigation and climate monitoring in greenhouses. *Emerging Science Journal*, 9(3), 1133–1157. <https://doi.org/10.28991/ESJ-2025-09-03-020>

DeepSea Developments. (s.f.). The ESP32 chip explained: Advantages and applications.

<https://www.deepseadev.com/en/blog/esp32-chip-explained-and-advantages/>

Díaz Patiño, L. F. (2012). Manejo técnico del cultivo de rosas bajo invernadero. Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Agrícolas, Colombia.

DryGair. (s.f.). Cómo cultivar lirios – Guía para invernaderos de lirios.

<https://drygair.com/es/blog-es/lirio-invernadero/>

Duguma, AL, Bai, X. Cómo la tecnología de Internet de las cosas mejora la eficiencia agrícola. *Artif Intel Rev* 58, 63 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10462-024-11046-0>

Espressif Systems. (2023). ESP32 Series Datasheet v3.5.

https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf

Espressif Systems. (2024). *ESP32 hardware design guidelines* (Version 3.2).

https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_hardware_design_guidelines_en.pdf

FAO. (2021). Digital technologies in agriculture and rural areas: Status report. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

García, J., & Martínez, L. (2023). Sostenibilidad en la agricultura: Tecnologías para la optimización de recursos. *Revista de Estudios Ambientales*, 15(2), 45-60.

Gómez, A., & Pérez, M. (2019). La agricultura como pilar cultural en comunidades rurales del Cauca. *Journal of Latin American Cultural Studies*, 28(3), 123-139.

Google. (2026). Google Maps [Mapa]. <https://www.google.com/maps>

HiveMQ. (s.f.). HiveMQ Cloud documentation. <https://docs.hivemq.com/hivemq-cloud/index.html>

Infoagro Systems, S.L. (2019). El cultivo del crisantemo. Almería, España

- Innovación Industrial. (s.f.). Automatización en invernaderos: Maximizando la producción con tecnología de punta. <https://innovacionindustrial.net/agroindustria-moderna/automatizacion-invernaderos-maximizando-produccion-tecnologia-punta/>
- Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuícola y Forestal del Estado de México (ICAMEX). (2014). Manual técnico del cultivo del crisantemo. Metepec, México
- Intagri. (s. f.). Principios básicos para el manejo climático de invernaderos. Intagri S.C. <https://www.intagri.com/articulos/horticultura-protegida/%20%20principios-basicos-para-el-manejo-climatico-de-invernaderos>
- International Electrotechnical Commission. (2010). IEC 61010-1:2010 - Safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use – Part 1: General requirements (3rd ed.). IEC.
- IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Kundu, R. (s.f.). IoT MQTT Panel [Aplicación móvil]. Google Play. <https://play.google.com/store/apps/details?id=snr.lab.iotmqttpanel.prod>
- Labcenter Electronics. (2023). Proteus Design Suite user manual. Labcenter Electronics Ltd. <https://www.labcenter.com>
- López Aldea, E. (2017). Raspberry Pi: fundamentos y aplicaciones (1.ª ed.). RA-MA Editorial. <https://elhacker.info/manuales/Hardware/RASPBERRY%20PI%20FUNDAMENTOS%20Y%20APLICACIONES.pdf>
- Mactrónica. (s. f.). Sensor de humedad del suelo capacitivo [Producto]. <https://www.mactronica.com.co/sensor-de-humedad-del-suelo->

capacitivo?srsltid=AfmBOopKOhjKe5yb9CYwTdvePFUwMxmlAZeLto668IjrAZJn
UFYD7ChY

Mahmud, M. S., Zahid, A., & Das, A. K. (2023). Sensing and automation technologies for ornamental nursery crop production: Current status and future prospects. *Sensors*, 23(4), Article 1818. <https://doi.org/10.3390/s23041818>

Mamani, G. et al. (2022). Sistema IoT basado en ESP32 para el control y monitoreo de cultivos en invernadero. *Ingeniería Investiga*, Universidad Privada de Tacna.

Mantilla, F., Mejía, G., & Tascón, D. (2025). The role of Industry 4.0 technologies in the export flower industry: Insights from a systematic literature review and surveys in emerging economies. *Results in Engineering*, 25, 104507. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104507>

Market Data Forecast. (2025). Asia Pacific greenhouse equipment market report | 2024–2029. <https://www.marketdataforecast.com/market-reports/asia-pacific-greenhouse-equipment-market>

Márquez Díaz, J. E., Prieto Moreno, A., Manrique Castro, M. A., & Sánchez Garzón, Óscar A. (2024). Sistema de riego automatizado para un cultivo de pequeña superficie. *Revista Tecnológica - ESPOL*, 36(2), 32-45. <https://doi.org/10.37815/rte.v36n2.1227>

Martínez, P., & Vargas, R. (2023). Aplicaciones de sistemas embebidos en la agricultura de precisión. *Revista de Ingeniería Electrónica*, 18(1), 75-89.

Mercado Libre. (s. f.). Mini motor DC 3–6 V juguete Arduino proyecto. <https://www.mercadolibre.com.co/mini-motor-dc-3-6-v-juguete-arduino-proyecto/p/MCO2064872342>

MercadoLibre. (s. f.). Lámpara infrarroja 250 W E27 2500 K luz cálida/blanca [Producto]. <https://www.mercadolibre.com.co/lampara-infrarroja-250w-e27-2500k-luz-calida-blanca/p/MCO2051714631>

- MercadoLibre. (s. f.). Ventilador axial 14" succión 110 V 1600 RPM [Publicación en línea].
MercadoLibre Colombia. <https://www.mercadolibre.com.co/ventilador-axial-14--succion-110v-1600-rpm/up/MCOU3303423170>
- Moreno, É. (2023). Sistema inteligente de automatización, monitoreo y control de invernaderos mediante ESP32 con aprendizaje automático. ACOFI – EIEI 2023.
- MQTT Dashboard. (s. f.). MQTT Dashboard. <https://www.mqtt-dashboard.com>
- Nayak, A., Pattanaik, A., Samantaray, P., Pradhan, I., Sahoo, R., & Mohanty, S. (2025). Cultivation and Cultural Practices Followed in Carnation (*Dianthus caryophyllus* L.) for Better Production: A Review. *Agricultural Reviews*, 46(4), 612-620.
- Novagric. (2024, julio 23). Invernadero tipo túnel. <https://novagric.com/invernaderos/tipos-de-invernaderos/invernadero-tipo-tunel/>
- Paraled. (2021, 15 de octubre). Holanda: líder en agricultura sostenible y eficiente en invernaderos. <https://www.paraled.cl/blog/holanda-1%C3%ADder-en-agricultura-sostenible-y-eficiente-en-invernaderos>
- Pimentel-Serrano, B. A., Vinueza-Yépez, M. J., y Romero-León, J. C. (2020). Sistema de riego automatizado para un cultivo de pequeña superficie. *Revista Tecnológica*, 33(1), 16–23. <https://doi.org/10.22209/rte.v33n1a2>
- Prieto, D. M., Sánchez Morales, Y., & Espinosa, J. A. (2021). Análisis del cultivo de crisantemo (*Chrysanthemum*) tipo exportación y manejo agronómico para mercados internacionales. Universidad de Cundinamarca.
<https://repositorio.ucundinamarca.edu.co/items/f4ad3b74-39c3-40a2-bbad-f7ee97c436d4>
- Proculus Technologies. (s. f.). ESP32 board guide: Features, applications and how to use it. <https://www.proculustech.com/esp32-board>

- Rodríguez, S., et al. (2020). Apropiación tecnológica en comunidades agrícolas: Un enfoque sociocultural. *Revista de Innovación Tecnológica*, 12(4), 88-102.
- Sánchez, A, Ariza, E, Pardo, J, Mancipe, T, Cadena, H, Sastre, S y Sierra, J. (2023). Sistema de monitoreo remoto para un invernadero inteligente basado en IoT. Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central.
- SD Association. (s. f.). Lost data and SD memory cards: A primer. SD Association.
<https://www.sdcard.org/press/thoughtleadership/lost-data-and-sd-memory-cards-a-primer/>
- Sigma Electrónica. (s.f.). ESP-32. <https://www.sigmaelectronica.net/producto/esp-32/>
- Thissen, J. (2021). Development of safety and sustainability metrics for greenhouses and analysis of selected greenhouse sites in North America (Doctoral dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign). Pérez Monsalve, J. A. (2019). Un invernadero inteligente para optimizar los cultivos. *Revista Universidad EAFIT*, 54(173), 136–139. <https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/5755>
- Torres, R., & López, P. (2022). Impacto económico de la automatización en la agricultura de pequeña escala. *Journal of Agricultural Economics*, 19(1), 33-49.
- Tovar Soto, J. P., Solórzano Suárez, J. D. L. S., Badillo Rodríguez, A., & Rodríguez Cainaba, G. O. (2019). Internet de las cosas aplicado a la agricultura: estado actual. *Lámpsakos*, (22), 86–105. <https://doi.org/10.21501/21454086.3253>.

Apéndices

Apéndice A

Código ESP32

[Repositorio GitHub](#)

Apéndice B

Video Sustentación

Video en YouTube con la explicación detallada del funcionamiento de la propuesta de solución implementada.

Daniel Daza. (2026, junio 9). *video esp32* [Video]. YouTube.

<https://youtu.be/upaVH7C-Umo>

Apéndice C

Diagrama de Flujo Algoritmo de Control

[Enlace de documento drive](#)