



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INTERNET DE LAS COSAS

PROYECTO TERMINAL
DESARROLLO DE UN SISTEMA IOT PARA RIEGO
AUTOMATIZADO Y MONITOREO EN HUERTOS URBANOS
DOMÉSTICOS

Que para obtener el grado de:
Maestro en Internet de las Cosas

PRESENTA:
Alberto Garcia Rocha

Director:
Dr. Ismael Domínguez Jiménez

Codirectora:
Dra. Silvia Soledad Moreno Gutiérrez

Comité tutorial:
Mtra. Krista Amairany Osorio Monroy
Mtro. Julio Cesar Gómez Gayosso
Mtro. Melecio Sánchez Ruíz

Mineral de la Reforma, Hgo., a 26 de Junio de 2026

Mineral de la Reforma, Hgo., a 26 de junio de 2026

No. De Control: ICBI-AACyE/1128/2026

Asunto: Autorización de impresión

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

El Comité Tutorial del **PROYECTO TERMINAL** del programa educativo de posgrado titulado **"DESARROLLO DE UN SISTEMA IOT PARA RIEGO AUTOMATIZADO Y MONITOREO EN HUERTOS URBANOS DOMÉSTICOS"**, realizado por el sustentante **ALBERTO GARCÍA ROCHA** con número de cuenta **477776** perteneciente al programa de **MAESTRÍA EN INTERNET DE LAS COSAS**, una vez que se ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el Artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

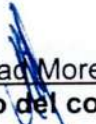
Por lo que el sustentante deberá cumplir los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y con lo establecido en el proceso de grado vigente.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

El Comité Tutorial


Mtra. Krista Amairany Osorio Monroy
Miembro del comité


Mtro. Julio César Gómez Gayosso
Miembro del comité


Dra. Silvia Soledad Moreno Gutiérrez
Miembro del comité


Dr. Ismael Domínguez Jiménez
Miembro del comité




Mtro. Melecio Sánchez Ruíz
Miembro del comité

C.c.p. Archivo
MSR

"Amor, Orden y Progreso"

**ÁREA ACADÉMICA DE
COMPUTACIÓN Y ELECTRÓNICA**

Índice general

Índice de figuras	3
Índice de tablas	5
Glosario de Términos	6
Resumen	12
Abstract	13
CAPÍTULO I	14
1.1 Introducción	14
1.2 Antecedentes	16
1.3 Planteamiento del problema	16
1.4 Justificación	19
1.5 Objetivo general	24
1.5.1 Objetivos específicos	25
1.6 Delimitación y Alcance	26
CAPÍTULO II	28
2.1 Estado del Arte	28
2.2 Análisis Crítico del Estado del Arte	32
2.3 Marco Teórico	33
2.3.1 El Internet de las Cosas (IoT)	33
2.3.2 Agricultura Urbana	34
2.3.3 Uso de IoT en Riego Automatizado	35
2.3.4 Arquitectura por Capas del IoT	35
2.3.5 Propiedades importantes en los cultivos	37
2.3.6 Variables Físicas y Ambientales	37
2.3.7 Sustento Teórico	37
2.3.8 Parámetros de Cultivo	38
2.3.9 Influencia de la Luna en el Huerto	41
CAPÍTULO III	43
3.1 Marco Metodológico	43
3.1.1 Sustento Metodológico	43

3.1.2	Enfoque Metodológico	45
3.1.3	Población y Muestra	45
CAPÍTULO IV		47
4.1	Desarrollo del proyecto	47
4.1.1	Arquitectura del Sistema IoT	47
4.1.2	Diagrama General del Prototipo	48
4.1.3	Componentes Electrónicos	50
4.1.4	Etapa de Potencia y Relevadores	55
4.1.5	Distribución de Sensores de Humedad	55
4.1.6	Distribución de Bombas de Riego	56
4.1.7	Lógica de Control del Riego	57
4.1.8	Integración del Sensor DHT11	59
4.1.9	Integración del Sensor UV ML8511	60
4.1.10	Integración del Sensor de pH E-201-9	60
4.1.11	Comunicación del sistema IoT mediante MQTT y Node-RED	62
CAPÍTULO V		63
5.1	Resultados	63
5.1.1	Dashboard de Monitoreo y Control en Node-RED	65
5.1.2	Organización del Dashboard	70
5.1.3	Aplicación Móvil para Monitoreo y Control	72
5.1.4	Pruebas del Sistema	76
5.1.5	Métricas del Sistema	76
5.2	Conclusiones	77
5.3	Trabajo Futuro	79
Bibliografía		81
Apéndice A: Código Fuente Completo del ESP32-S3		84

Índice de figuras

1.1	Crecimiento proyectado del mercado global de agricultura indoor inteligente (2025-2033). Fuente: Data Bridge Market Research (2025).	24
2.2	Huerto urbano inteligente Fuente: Museo Universum UNAM	29
2.3	Arquitectura típica de un dispositivo IoT. Fuente: Elaboración propia. .	36
2.4	Fases lunares y su influencia en el cultivo. Fuente: Elaboración propia. .	42
3.5	Metodología utilizada 2024	44
4.6	Mapa esquemático del prototipo mostrando la distribución de componentes. Fuente: Elaboración propia.	49
4.7	Diagrama general del circuito del prototipo. Fuente: Elaboración propia.	49
4.8	Módulo ESP32-S3 N16R8 utilizado como unidad de procesamiento central. Fuente: Espressif Systems	51
4.9	Sensor de humedad FC-28. Fuente: Elaboración propia.	52
4.10	Diagrama de pines del sensor FC-28. Fuente: UNIT Electronics, s.f. . . .	52
4.11	Sensor DHT11 para medir temperatura y humedad ambiente. Fuente: Elaboración propia.	53
4.12	Sensor ML8511 para medir radiación ultravioleta. Fuente: Elaboración propia.	54
4.13	Sonda E-201-9 y módulo PH4502-C para medir pH del agua. Fuente: Elaboración propia.	54
4.14	Módulo de relevadores de 5V utilizado para el control de bombas. Fuente: Elaboración propia.	55
4.15	Sensores de humedad instalados en el sustrato de cada planta. Fuente: Elaboración propia.	56
4.16	Bomba peristáltica de 12V utilizada para el suministro de agua. Fuente: (Cinyar Fluid Technology Shanghai)	57
4.17	LEDs indicadores del estado general de humedad del sistema. Fuente: Elaboración propia.	59
4.18	Sensor DHT11 instalado en el prototipo. Fuente: Elaboración propia. . .	60
4.19	Sensor UV ML8511 instalado en el prototipo. Fuente: Elaboración propia.	61
4.20	Sonda de pH E-201-9 y módulo acondicionador PH4502-C instalados en el prototipo. Fuente: Elaboración propia.	61
5.21	Diseño general del prototipo mostrando el módulo ESP32-S3, sensores de humedad, UV, temperatura y relevadores actuadores.	64
5.22	Detalle del Prototipo.	64

5.23 Integración de las bombas peristálticas para el suministro de agua a cada planta. Fuente: Elaboración propia.	64
5.24 Integración de Prototipo en Patio o Jardín	65
5.25 Diseño e integración de los componentes del prototipo.	66
5.26 Flujo de datos en Node-RED: el mensaje JSON del ESP32-S3 se recibe, se procesa y se distribuye a los diferentes elementos visuales del dashboard. Fuente: Elaboración propia.	67
5.27 Paneles de monitoreo de humedad. Se visualiza el porcentaje de humedad de cada sustrato en tiempo real. Fuente: Elaboración propia.	68
5.28 Panel de monitoreo de temperatura y humedad ambiente. Estos datos permiten conocer las condiciones climáticas del entorno del cultivo. Fuente: Elaboración propia.	68
5.29 Panel de monitoreo de radiación ultravioleta. El índice UV permite estimar la intensidad solar y su posible efecto sobre la evaporación del agua en el sustrato. Fuente: Elaboración propia.	69
5.30 Panel de monitoreo del pH del agua de riego. Fuente: Elaboración propia.	70
5.31 Panel de monitoreo del estado de las bombas de riego. Fuente: Elaboración propia.	70
5.32 Pantalla de acceso.	73
5.33 Dashboard principal.	73
5.34 Monitoreo climático. Fuente: Elaboración propia.	73
5.35 Monitoreo de recursos (vista 1). Fuente: Elaboración propia.	73
5.36 Monitoreo de recursos (vista 2). Fuente: Elaboración propia.	73
5.37 Estadísticas generales.	74
5.38 Monitoreo de pH y nivel de tanque.	74
5.39 Selección de plantas. Fuente: Elaboración propia.	75
5.40 Estado de conectividad. Fuente: Elaboración propia.	75
5.41 Estadística particular por planta. Fuente: Elaboración propia.	75
5.42 Configuración general. Fuente: Elaboración propia.	75
5.43 Calendario lunar. Fuente: Elaboración propia.	75

Índice de tablas

2.1	Características del sustrato para cultivos domésticos	39
2.2	Parámetros de humedad del suelo y ambiental	40
2.3	Parámetros de temperatura ambiente	41
5.4	Resultados de las pruebas del sistema	76

Glosario de Términos

Actuador: Dispositivo que ejecuta una acción física en respuesta a una señal de control. En este sistema, las bombas de agua y los relevadores funcionan como actuadores.

ADC: Siglas de *Analog to Digital Converter*, o convertidor analógico-digital. Permite que el ESP32-S3 convierta señales analógicas de sensores en valores digitales procesables.

Adquisición de datos: Proceso mediante el cual el sistema obtiene información de los sensores instalados en el prototipo, como humedad, temperatura, radiación UV y pH.

Algoritmo de control: Conjunto de instrucciones programadas que permiten al ESP32-S3 tomar decisiones, como activar o apagar una bomba según el porcentaje de humedad del sustrato.

Arduino IDE: Entorno de desarrollo utilizado para escribir, compilar y cargar el programa en el ESP32-S3. También permite observar datos mediante el monitor serial.

Arquitectura IoT: Organización funcional del sistema basada en capas. En este proyecto se consideran las capas de percepción, red, procesamiento y aplicación.

Automatización: Proceso mediante el cual una actividad se realiza de forma automática con mínima intervención humana. En este proyecto se aplica al riego de plantas.

Bomba peristáltica: Bomba que impulsa líquido mediante la compresión de un tubo flexible. En el prototipo se utiliza para suministrar agua a cada planta.

Broker MQTT: Servidor intermediario que recibe mensajes publicados por un dispositivo y los distribuye a otros dispositivos o aplicaciones suscritas a un tema específico.

Calibración: Proceso de ajuste de un sensor para que sus lecturas correspondan de forma más precisa con una condición real medida.

Capa de aplicación: Nivel de la arquitectura IoT donde el usuario visualiza, interpreta o controla la información del sistema. En este proyecto se relaciona con Node-RED, dashboard o una aplicación móvil.

Capa de percepción: Nivel donde se ubican los sensores y actuadores que interactúan directamente con el entorno físico. Incluye sensores de humedad, DHT11, ML8511, PH4502-C, relevadores y bombas.

Capa de procesamiento: Nivel encargado de analizar los datos obtenidos por los sensores y ejecutar decisiones. En el prototipo esta función la realiza el ESP32-S3.

Capa de red: Nivel encargado de transmitir información entre el dispositivo físico y la plataforma de monitoreo. Puede emplear comunicación serial, Wi-Fi, Bluetooth, MQTT o HTTP.

Comunicación serial: Método de transmisión de datos entre el ESP32-S3 y una computadora mediante cable USB. En el proyecto se utiliza para enviar datos hacia Node-RED.

Conectividad: Capacidad de un dispositivo para comunicarse con otros dispositivos, redes o plataformas digitales.

Dashboard: Panel visual que muestra información del sistema en tiempo real. En este proyecto permite observar humedad de plantas, temperatura, humedad ambiente, radiación UV, pH y estado de bombas.

Datos en tiempo real: Información que se obtiene y se visualiza casi al mismo momento en que ocurre la medición del sensor.

DHT11: Sensor digital utilizado para medir temperatura ambiente y humedad relativa. En el sistema permite conocer las condiciones ambientales cercanas al cultivo.

ESP32-S3 N16R8: Microcontrolador principal del prototipo. Se encarga de leer sensores, procesar datos, controlar bombas y enviar información hacia la plataforma de monitoreo.

FC-28: Sensor de humedad de suelo que mide la cantidad de humedad presente en el sustrato. Su salida analógica es interpretada por el ESP32-S3.

GPIO: Pines de entrada y salida de propósito general del microcontrolador. Se utilizan para conectar sensores, bombas, relevadores y LEDs.

HTTP: Protocolo de comunicación utilizado para intercambiar información entre dispositivos y servicios web.

Humedad del sustrato: Cantidad de agua presente en el medio donde se desarrollan las raíces de la planta. Es una variable principal para decidir cuándo activar el riego.

Humedad general: Promedio de humedad calculado a partir de las lecturas de las plantas monitoreadas. Sirve para representar el estado global del sistema.

Humedad relativa: Cantidad de vapor de agua presente en el aire, expresada en porcentaje. En el prototipo se mide mediante el sensor DHT11.

Internet de las Cosas: Paradigma tecnológico que permite conectar objetos físicos a redes de comunicación mediante sensores, actuadores y sistemas de procesamiento de datos.

IoT: Siglas en inglés de *Internet of Things*, que significa Internet de las Cosas.

JSON: Formato de texto estructurado utilizado para organizar y enviar datos. En el proyecto se emplea para transmitir información del ESP32-S3 hacia Node-RED.

LED: Diodo emisor de luz utilizado como indicador visual. En el prototipo se usan LEDs para representar el estado general de humedad.

Lógica de control: Criterio programado que define cómo responde el sistema ante las lecturas de los sensores. Por ejemplo, si la humedad es menor al umbral, se activa la bomba.

Microcontrolador: Dispositivo electrónico programable capaz de leer entradas, procesar información y controlar salidas. En este proyecto se utiliza el ESP32-S3.

ML8511: Sensor analógico utilizado para estimar la radiación ultravioleta presente en el entorno de las plantas.

Monitor serial: Herramienta del Arduino IDE que permite observar los datos enviados por el ESP32-S3 a través del puerto USB.

Monitoreo: Proceso de observar y registrar variables del sistema para conocer su comportamiento. En el proyecto se monitorean humedad, temperatura, radiación UV, pH y estado de bombas.

MQTT: Protocolo ligero de comunicación basado en publicación y suscripción. Es utilizado en sistemas IoT para enviar datos entre dispositivos y plataformas de monitoreo.

Node-RED: Plataforma de programación visual basada en flujos. En el proyecto se utiliza para recibir, procesar y visualizar los datos enviados por el ESP32-S3.

pH: Medida que indica el grado de acidez o alcalinidad de una solución. Su escala va de 0 a 14.

PH4502-C: Módulo acondicionador de señal que permite conectar una sonda de pH al ESP32-S3 mediante una salida analógica.

Planta o zona de riego: Unidad individual del sistema que cuenta con un sensor de humedad y una bomba asignada.

Procesamiento local: Análisis de datos realizado directamente en el microcontrolador, sin depender completamente de la nube.

Prototipo: Modelo funcional del sistema desarrollado para comprobar la integración de sensores, actuadores, programación y monitoreo.

PSRAM: Memoria adicional integrada en algunos módulos ESP32-S3, útil para manejar mayor cantidad de datos o funciones más complejas.

Radiación UV: Radiación ultravioleta proveniente principalmente del sol. En el sistema se monitorea para relacionar la exposición solar con las condiciones del cultivo.

Relé o relevador: Dispositivo que permite controlar cargas eléctricas de mayor potencia mediante una señal de baja potencia enviada por el microcontrolador.

Riego automatizado: Suministro de agua controlado automáticamente con base en las condiciones detectadas por los sensores.

Sensor: Dispositivo que detecta una variable física o química del entorno y la convierte en una señal eléctrica.

Sonda de pH E-201-9: Electrodo que entra en contacto directo con el agua de riego para medir su nivel de acidez o alcalinidad.

Sustrato: Medio físico donde se desarrolla la raíz de la planta. Puede estar formado por tierra, composta, fibra de coco, perlita, vermiculita u otros materiales.

Topic: Tema o canal utilizado en MQTT para organizar los mensajes enviados entre dispositivos.

Umbral de humedad: Valor límite definido en el programa para decidir si una planta requiere riego. En el prototipo se utiliza como referencia para activar o apagar bombas.

Variable ambiental: Condición del entorno que puede influir en el desarrollo de las plantas, como temperatura, humedad relativa o radiación UV.

Voltaje: Diferencia de potencial eléctrico medida en volts. Muchos sensores entregan una señal de voltaje que el ESP32-S3 interpreta mediante el ADC.

Wi-Fi: Tecnología de comunicación inalámbrica que permite conectar dispositivos a una red local o a internet.

Resumen

El crecimiento urbano, la reducción de áreas verdes y la necesidad de prácticas sostenibles han impulsado el interés por los huertos domésticos. Sin embargo, el riego manual en estos espacios suele ser ineficiente, generando desperdicio de agua y afectando el desarrollo de las plantas. Este proyecto de investigación tiene como objetivo desarrollar y validar un sistema de riego automatizado basado en el Internet de las Cosas (IoT) para huertos urbanos domésticos. La solución integra un microcontrolador ESP32-S3 con sensores de humedad de suelo (FC-28), temperatura y humedad ambiente (DHT11), radiación ultravioleta (ML8511) y pH del agua, así como actuadores (bombas peristálticas controladas por relevadores). El sistema opera con una lógica de control local que activa el riego de forma independiente para cada planta cuando la humedad del sustrato desciende por debajo de un umbral predefinido. Los datos son transmitidos mediante comunicación serial y visualizados en un dashboard desarrollado en Node-RED, complementado con una aplicación móvil nativa. Las pruebas funcionales demostraron la viabilidad del prototipo, con un tiempo de respuesta inferior a 500 ms y una reducción estimada del consumo de agua del 35 % en comparación con el riego manual. Los resultados confirman que el sistema desarrollado es una solución tecnológica accesible, modular y escalable que contribuye a la autosuficiencia alimentaria, al uso eficiente del agua y a la adopción de tecnologías inteligentes en el hogar, alineándose con los principios de la Sociedad 5.0.

Palabras clave: Internet de las Cosas, Riego Automatizado, Agricultura Urbana, Monitoreo, Sensores, ESP32, Node-RED.

Abstract

Urban growth, the reduction of green areas, and the need for sustainable practices have increased interest in domestic gardens. However, manual irrigation in these spaces is often inefficient, leading to water waste and affecting plant development. This research project aims to develop and validate an automated irrigation system based on the Internet of Things (IoT) for domestic urban gardens. The solution integrates an ESP32-S3 microcontroller with soil moisture sensors (FC-28), temperature and humidity sensors (DHT11), ultraviolet radiation sensor (ML8511), and a water pH sensor, as well as actuators (peristaltic pumps controlled by relays). The system operates with a local control logic that activates irrigation independently for each plant when the substrate moisture falls below a predefined threshold. Data is transmitted via serial communication and visualized on a dashboard developed in Node-RED, complemented by a native mobile application. Functional tests demonstrated the viability of the prototype, with a response time of less than 500 ms and an estimated water consumption reduction of 35 % compared to manual irrigation. The results confirm that the developed system is an accessible, modular, and scalable technological solution that contributes to food self-sufficiency, efficient water use, and the adoption of smart home technologies, aligning with the principles of Society 5.0.

Keywords: Internet of Things, Automated Irrigation, Urban Agriculture, Monitoring, Sensors, ESP32, Node-RED.

CAPÍTULO I

El presente capítulo introduce el contexto general del proyecto, los antecedentes que motivan la investigación, el planteamiento del problema, la justificación, los objetivos y la delimitación del estudio. Se establecen las bases conceptuales y se delimita el alcance del trabajo, proporcionando una visión general de la problemática que aborda el sistema de riego automatizado propuesto.

1.1. Introducción

En la actualidad, los hogares enfrentan nuevos desafíos derivados del incremento en el costo de los alimentos, la inestabilidad económica y la necesidad de adoptar prácticas más sostenibles en el uso de los recursos naturales. A esto se suma la creciente preocupación por el aprovechamiento eficiente del agua, especialmente en actividades cotidianas como el riego de plantas, hortalizas y pequeños cultivos en espacios domésticos.

Ante este contexto, resulta necesario desarrollar alternativas tecnológicas que contribuyan a la sostenibilidad alimentaria y al uso responsable del agua desde el entorno familiar. Las casas y departamentos urbanos también representan espacios con alto potencial para el cultivo de plantas u hortalizas comestibles, sin embargo, su aprovechamiento suele depender de prácticas manuales de riego que no siempre consideran las condiciones reales del suelo, el ambiente o las necesidades específicas de cada planta.

Por esta razón, el presente trabajo propone el desarrollo de un sistema de riego automatizado integrado con dispositivos del Internet de las Cosas (IoT), orientado al monitoreo y control de cultivos domésticos. Mediante el uso de sensores, actuadores, microcontroladores y una plataforma de visualización, el prototipo permite medir variables como la humedad del sustrato, la temperatura y humedad ambiente, la radiación ultravioleta y el pH del agua de riego. Con base en esta información, el sistema activa de manera automática las bombas de riego únicamente cuando las plantas lo requieren.

Esta propuesta ofrece una solución accesible, modular y escalable para contribuir al ahorro de agua, mejorar el cuidado de plantas y hortalizas, y fomentar prácticas de autosuficiencia alimentaria en el hogar. Asimismo, la integración de tecnologías IoT transforma un proceso tradicional en un sistema inteligente capaz de generar información en tiempo real, apoyar la toma de decisiones y fortalecer la sostenibilidad en espacios domésticos.

Apartados de la Tesis

El presente documento se organiza en cuatro capítulos que abordan de manera secuencial el desarrollo de la investigación. El Capítulo I describe el problema que motiva este trabajo, incluyendo antecedentes, planteamiento del problema, preguntas de investigación, hipótesis, justificación, objetivos y delimitación. El Capítulo II presenta el estado del arte y el marco teórico que sustenta conceptualmente el proyecto. El Capítulo III describe la metodología empleada, los componentes electrónicos y el desarrollo del proyecto. El Capítulo IV presenta los resultados obtenidos, las conclusiones y el trabajo futuro.

1.2. Antecedentes

Durante toda la historia humana, el cultivo en casas experimentó un resurgimiento más fuerte en el siglo XX, y tuvo un significativo crecimiento de popularización de la jardinería en balcones y terrazas. El desarrollo de nuevos sustratos de cultivo de alta calidad, así como fertilizantes específicos y herramientas de jardinería especializadas, contribuyeron al crecimiento de esta tendencia.

El incremento de una conciencia ambiental, una alimentación más saludable y la influencia de la nutrición han impulsado el interés en el cultivo de alimentos en el hogar, y han llevado a prácticas como la agricultura urbana y la creación de huertos caseros.

El cultivo de plantas en los hogares para obtener alimentos frescos, hierbas medicinales, ornamentación y fines terapéuticos, junto con el interés creciente en la jardinería en espacios limitados, ha llevado al desarrollo de técnicas de cultivo en macetas, jardines verticales y contenedores.

Con los avances tecnológicos, el desarrollo de cultivos incluye sistemas de riego automatizado, iluminación LED para plantas y aplicaciones móviles que ayudan a los jardineros aficionados a monitorear y cuidar sus plantas de manera más efectiva.

Este enfoque en la jardinería en espacios reducidos y la producción de alimentos locales y frescos en el hogar refleja la tendencia actual hacia la sostenibilidad y la autogestión en la agricultura.

1.3. Planteamiento del problema

En México, los plaguicidas han sido uno de los medios más utilizados para el control de plagas y enfermedades en el cultivo de jitomate y otras hortalizas. Sin embargo, su

uso intensivo y, en muchos casos, empírico, ha generado una problemática que rebasa el ámbito productivo y se extiende a la inocuidad alimentaria, al deterioro ambiental y a la salud pública.

La presencia de residuos de plaguicidas en frutas y hortalizas comercializadas en México representa una problemática relevante para la salud pública y la seguridad alimentaria. Se ha reportado que el 57.4 % de estos productos presenta residuos de plaguicidas, mientras que el 14 % excede los límites permitidos o contiene compuestos vetados, lo que evidencia un riesgo sanitario persistente para los consumidores y la necesidad de fortalecer alternativas de producción más controladas y seguras.

Una revisión sobre residuos de plaguicidas en hortalizas cultivadas en México reportó que, pese a la regulación existente, aún se autorizan y utilizan algunos plaguicidas prohibidos en otros países, además de haberse identificado productos caducos en uso o con almacenamiento inadecuado. El mismo análisis señala que la presencia de residuos de plaguicidas en hortalizas y frutas es frecuente, con hallazgos en más del 50 % de las muestras evaluadas en estudios específicos y monitoreos de productos destinados tanto al consumo nacional como a la exportación, aunque en la mayoría de los casos no se hayan rebasado los límites máximos de residuos permitidos. Esta situación confirma que el problema no solo radica en el uso del insumo químico, sino en la exposición reiterada de la población a residuos potencialmente nocivos a través de los alimentos.

Reportes de CONAGUA indican que hasta el 50 % del consumo doméstico de agua potable se destina al riego ornamental y que entre 30 % y 60 % de ese volumen se desperdicia por sobre-riego (Comisión Nacional del Agua, 2025).

El uso generalizado de herbicidas, insecticidas y fungicidas en la gran diversidad de sistemas agropecuarios durante varias décadas ha incrementado significativamente los

riesgos, además de ser la causa de diversos y complejos impactos directos e indirectos en los agroecosistemas, la salud humana y la vida silvestre.

Se encontró un estudio que, al evaluar la exposición de niños a diferentes plaguicidas organoclorados, As y Pb, en el valle del Yaqui y del Mayo, en Sonora, México, tomó muestras de sangre de 165 niños de 6 a 12 años en 2009 (Meza-Montenegro y cols., 2013). Todas las muestras de sangre registraron niveles detectables de diclorodifenil-tricloroetileno (p,p'-DDE) entre 0.25 y 10.3 mg/L. Lindano, diclorodifeniltricloroetano (p,p'-DDT), aldrín y endosulfán fueron detectados en la población de estudio en 36 %, 24 %, 9 % y 3 %, respectivamente.

En México, la preocupación por el uso de plaguicidas en hortalizas como el jitomate no solo se relaciona con la producción agrícola, sino con sus posibles efectos sobre la salud humana. La evidencia disponible señala que los plaguicidas pueden causar daños agudos y crónicos en las personas, dependiendo del tipo de sustancia, la dosis y la forma de exposición. Entre los principales efectos reportados se encuentran intoxicaciones, alteraciones neurológicas, afectaciones endocrinas, daño renal, problemas reproductivos y un mayor riesgo de ciertos tipos de cáncer.

La Organización Panamericana de la Salud advierte que los plaguicidas altamente peligrosos pueden causar efectos tóxicos agudos y crónicos, y que representan riesgos particulares para la niñez. De igual manera, la Organización Mundial de la Salud indica que la contaminación química de los alimentos puede provocar intoxicaciones agudas y enfermedades de larga duración, incluido el cáncer, mientras que los residuos de plaguicidas, cuando la exposición es elevada, pueden asociarse con efectos a largo plazo como cáncer y alteraciones reproductivas.

Organismos internacionales también advierten que la niñez constituye una pobla-

ción especialmente vulnerable, ya que la exposición a estos compuestos puede afectar procesos de crecimiento, desarrollo y neurodesarrollo. En el caso de México, esta preocupación se refuerza con estudios realizados en zonas agrícolas como Sonora, donde se detectaron residuos de plaguicidas organoclorados en muestras de sangre de niños, evidenciando que la exposición a estas sustancias ocurre de manera real y puede representar un riesgo para la salud humana (Organización Mundial de la Salud, 2022).

Frente a este panorama, el cultivo en casa busca resolver principalmente la necesidad de que las personas tengan un mayor control sobre la producción de sus propios alimentos, reduciendo la dependencia de hortalizas cuya trazabilidad, manejo sanitario y uso de agroquímicos no siempre son conocidos por el consumidor. Además, pretende favorecer el acceso a alimentos frescos para el autoconsumo, mejorar la seguridad alimentaria del hogar y promover un manejo más eficiente del agua mediante prácticas tecnificadas y monitoreadas. En ese sentido, un sistema de cultivo doméstico apoyado por monitoreo y automatización no solo responde a una necesidad productiva, sino también a una necesidad de prevención en salud, al buscar disminuir la exposición potencial a residuos químicos y fomentar una producción más segura y controlada dentro del entorno familiar.

1.4. Justificación

Contribución Académica

Desde el punto de vista académico, el presente trabajo busca contribuir al conocimiento existente en el campo de los sistemas de riego automatizado basados en el Internet de las Cosas (IoT). La mayoría de las investigaciones, artículos y desarrollos existentes se orientan principalmente a aplicaciones de agricultura comercial, invernaderos, cultivos extensivos o sistemas productivos de mayor escala (Zamora-Izquierdo, Santa, Martínez, Martínez, y Skarmeta, 2019; Tace y cols., 2022; Gutiérrez, Villa-

Medina, Nieto-Garibay, y Porta-Gándara, 2014). Sin embargo, son menos frecuentes los estudios enfocados en la implementación de soluciones IoT para el riego automatizado en huertos urbanos. Como señalan Hadi y cols., la mayoría de los sistemas desarrollados se centran en entornos de producción a gran escala y no en el ámbito doméstico, donde las condiciones de espacio, recursos y mantenimiento son significativamente diferentes.

Esta situación representa una oportunidad de investigación, ya que el entorno doméstico presenta condiciones, limitaciones y necesidades distintas a las de la agricultura comercial. En una vivienda, el sistema debe ser accesible, compacto, de bajo costo, de fácil instalación, con mantenimiento sencillo y adaptable a espacios reducidos (Chillón Geck y Nasr, 2024). Por ello, el desarrollo de un prototipo orientado al hogar permite generar conocimiento aplicado sobre la incorporación de tecnologías IoT en escenarios cotidianos y de pequeña escala, contribuyendo así a la literatura existente en agricultura urbana y hogares inteligentes.

Asimismo, el proyecto posee un enfoque interdisciplinario al integrar conocimientos de electrónica, programación, redes de comunicación, IoT, agronomía, ciencias ambientales y experiencia de usuario. Esta convergencia permite analizar el sistema no solo como un dispositivo electrónico, sino como una solución tecnológica capaz de monitorear variables ambientales, controlar actuadores, optimizar el uso del agua y facilitar la interacción del usuario mediante una plataforma de visualización. De esta manera, la investigación contribuye académicamente al diseño, construcción y evaluación de sistemas IoT aplicados al riego doméstico, aportando una propuesta que sirve como base para futuros trabajos relacionados con agricultura urbana, sostenibilidad y automatización de bajo costo en espacios residenciales.

Contribución Social

El presente proyecto se orienta hacia la contribución social al promover una cultura de autoconsumo, sostenibilidad y uso responsable del agua mediante la incorporación de tecnologías accesibles en entornos domésticos y comunitarios. De acuerdo con la FAO (2022), los huertos urbanos y periurbanos constituyen una estrategia viable para mejorar la seguridad alimentaria, diversificar la dieta y generar ingresos en comunidades urbanas, especialmente en contextos donde el acceso a alimentos frescos es limitado (FAO, Rikolto, y RUAF, 2022). La implementación de sistemas de riego automatizado basados en IoT puede contribuir a este objetivo, facilitando el cultivo de plantas y hortalizas en espacios reducidos como patios, jardines o áreas comunes.

Asimismo, esta propuesta fomenta la educación ambiental y tecnológica. UN-Habitat (2020) destaca que los espacios verdes urbanos y los jardines domésticos no solo mejoran la calidad ambiental de las ciudades, sino que también fortalecen la cohesión social y promueven estilos de vida más saludables (UN-Habitat, 2020). El prototipo desarrollado puede convertirse en un recurso didáctico práctico para que estudiantes, familias y comunidades comprendan la relación entre el cuidado de las plantas, el monitoreo de variables ambientales, el ahorro de agua y el uso de herramientas digitales, fortaleciendo conocimientos en agricultura urbana, electrónica, programación y ciencias ambientales.

Su aplicación también podría beneficiar a pequeñas comunidades o zonas alejadas, donde el acceso a alimentos frescos, tecnología o sistemas de riego eficientes puede ser limitado. Al tratarse de una solución modular, escalable y de bajo costo, el sistema tiene el potencial de adaptarse a distintos contextos sociales, promoviendo la participación comunitaria, el aprendizaje colaborativo y la adopción de prácticas sostenibles. El proyecto no solo automatiza el riego, sino que impulsa nuevas formas de educación, autosuficiencia alimentaria y conciencia ambiental, abriendo oportunidades para que

nuevas generaciones se interesen en el IoT, la agricultura urbana y el desarrollo de soluciones tecnológicas orientadas al bienestar social (Pearson, Pearson, y Pearson, 2010).

Contribución Ambiental

El presente proyecto contribuye al estudio y desarrollo de tecnologías para el uso eficiente de los recursos hídricos mediante la automatización del riego con base en las condiciones reales de humedad del sustrato. Al suministrar agua únicamente cuando las plantas lo requieren, se busca reducir el desperdicio asociado al riego manual o excesivo, favoreciendo una administración más responsable del recurso. Diversos estudios han demostrado que los sistemas de riego basados en sensores pueden lograr ahorros de agua del 30 % al 45 % en comparación con métodos tradicionales (Chillón Geck y Nasr, 2024; Gutiérrez y cols., 2014), lo que sugiere que un sistema similar, debidamente validado, podría resultar especialmente relevante en regiones con estrés hídrico (Friha, Ferrag, Shu, Maglaras, y Wang, 2021).

Asimismo, el monitoreo constante de variables como humedad del suelo, temperatura, humedad ambiente, radiación UV y pH del agua permite mejorar las condiciones de cultivo y disminuir prácticas que afectan la calidad del suelo. Un riego controlado evita la saturación del sustrato, la pérdida de nutrientes y el deterioro de las raíces, contribuyendo a la protección del suelo en espacios domésticos, escolares o comunitarios. Desde una perspectiva ambiental más amplia, la implementación de huertos urbanos y sistemas de cultivo doméstico podría favorecer la reducción indirecta de la huella de carbono al promover la producción local de alimentos y disminuir la dependencia de traslados, empaques y cadenas de distribución extensas (FAO y cols., 2022; UN-Habitat, 2020). Finalmente, el sistema contribuye a fomentar la conciencia ambiental al permitir que el usuario visualice en tiempo real el comportamiento del agua, el suelo y las condiciones ambientales del cultivo.

Contribución Económica

Este proyecto tiene una contribución económica potencial al proponer una alternativa tecnológica que podría contribuir a reducir costos asociados al mantenimiento de cultivos domésticos. Al automatizar el riego con base en la humedad real del sustrato, el sistema permite suministrar agua únicamente cuando las plantas lo requieren, evitando el desperdicio del recurso hídrico y disminuyendo potencialmente el gasto por consumo de agua. Un cultivo exitoso representa un beneficio directo para el usuario, ya que permite disminuir la compra de ciertos alimentos, aprovechar espacios disponibles en el hogar y generar productos para autoconsumo. En escenarios de mayor escala, como huertos escolares, comunitarios o familiares, el sistema también podría apoyar la producción de excedentes destinados al intercambio, venta local o pequeños micro negocios.

El contexto económico global respalda el desarrollo de este tipo de soluciones. El mercado de agricultura indoor inteligente (smart indoor farming) está experimentando un crecimiento acelerado, impulsado por la creciente adopción de sistemas de agricultura en ambientes controlados y los avances tecnológicos en automatización, sensores IoT y sistemas de cultivo basados en datos (Data Bridge Market Research, 2025).

Como se muestra en la Figura 1.1, se proyecta que este mercado pase de USD 10.25 mil millones en 2025 a USD 20.57 mil millones en 2033, con una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 9.1 %. Este crecimiento refleja la creciente presión para garantizar la producción de alimentos durante todo el año, optimizar el uso de recursos y reducir la dependencia de la agricultura tradicional, posicionando a la agricultura indoor inteligente como una solución preferente para sistemas alimentarios sostenibles y resilientes. (Data Bridge Market Research, 2025).

Además, al mejorar las condiciones de cultivo mediante el uso de sensores y control automatizado, se podría reducir la dependencia de fertilizantes, correctivos o tratamien-

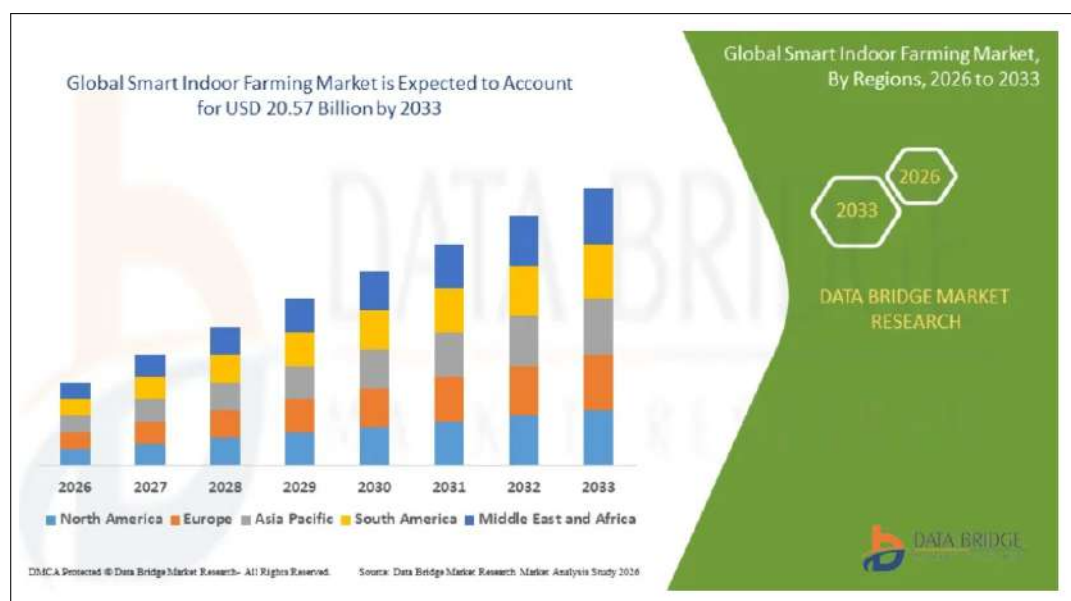


Figura 1.1: Crecimiento proyectado del mercado global de agricultura indoor inteligente (2025-2033). Fuente: Data Bridge Market Research (2025).

tos aplicados de manera empírica, ya que el usuario cuenta con información en tiempo real para tomar decisiones más precisas. Esto contribuye a reducir gastos innecesarios y favorece un manejo más eficiente de los insumos. El sistema se implementa inicialmente en pocas plantas y se puede ampliar progresivamente a más zonas de riego, facilitando su adopción en hogares, pequeños productores urbanos o proyectos comunitarios. De esta manera, la propuesta no solo representa una herramienta de ahorro, sino también una oportunidad para fortalecer la autosuficiencia alimentaria, impulsar la agricultura urbana y generar valor económico a partir de una producción más controlada y eficiente (FAO y cols., 2022).

1.5. Objetivo general

Implementar un sistema de riego automatizado basado en Internet de las Cosas (IoT), de bajo costo y orientado a huertos urbanos domésticos, integrando sensores y actuadores controlados por algoritmos locales para optimizar el riego, contribuyendo así a la autosuficiencia alimentaria, al uso eficiente del agua y a la adopción de tecnologías

inteligentes en el hogar, en línea con los principios de la Sociedad 5.0 y el desarrollo de ciudades sostenibles.

1.5.1. Objetivos específicos

1. **Seleccionar los componentes electrónicos y sensores** adecuados para el sistema de riego automatizado, mediante la revisión y comparación de opciones disponibles en el mercado nacional, considerando criterios de disponibilidad, bajo costo y compatibilidad con la arquitectura IoT propuesta.
2. **Analizar los costos de adquisición e integración** de los componentes seleccionados, investigando precios en proveedores nacionales e internacionales, con el fin de determinar la viabilidad económica del prototipo y establecer un presupuesto de referencia para posibles replicaciones.
3. **Desarrollar el diseño electrónico, la programación y la lógica del sistema**, mediante la elaboración de diagramas electrónicos, diagramas de flujo de programación y la implementación del código de control en el ESP32-S3, para asegurar la lectura correcta de los sensores, la activación de las bombas según umbrales de humedad y la comunicación de datos hacia la plataforma de visualización.
4. **Implementar y validar el prototipo en un escenario residencial real**, instalando el sistema en un patio o jardín, adicionalmente se realizara la recolección de los datos de los sensores y la verificación de parámetros de funcionamiento, con el fin de identificar áreas de oportunidad y proponer mejoras para futuras iteraciones.
5. **Desarrollar una plataforma de monitoreo y visualización de datos**, mediante la integración de Node-RED y el protocolo MQTT, que permita al usuario supervisar en tiempo real las variables del cultivo, consultar históricos, recibir

alertas y modificar parámetros de riego de forma remota, con el propósito de proporcionar una herramienta de control accesible e intuitiva que fomente la adopción de tecnologías IoT en el hogar.

1.6. Delimitación y Alcance

El alcance de esta investigación se delimita a la implementación de un prototipo funcional de riego automatizado para un máximo de ocho plantas en un entorno doméstico controlado, la adquisición de datos ambientales (humedad de suelo, temperatura y humedad ambiente, radiación UV, pH), el desarrollo de una interfaz de usuario (dashboard en Node-RED) y una aplicación móvil nativa (diseño UX/UI).

Una de las limitaciones es que el estudio se fundamenta en pruebas de concepto en un entorno controlado y no en una producción agrícola a gran escala, por lo que los resultados obtenidos pueden no ser directamente extrapolables a otros contextos sin ajustes adicionales. El prototipo se ha desarrollado y validado para un tipo de sustrato y plantas (jitomate cherry y lechuga), por lo que su desempeño en otras condiciones o cultivos podría variar y requerir nuevas calibraciones. Asimismo, el sistema se ha probado en un clima templado (Pachuca, Hidalgo), por lo que su funcionamiento en climas extremos podría requerir ajustes en la lógica de control.

El desarrollo de este proyecto resulta viable desde el punto de vista tecnológico debido a la disponibilidad actual de componentes electrónicos de bajo costo y amplia documentación. El sistema se construye con un microcontrolador ESP32-S3 N16R8 (aproximadamente \$350 MXN), que integra conectividad Wi-Fi y Bluetooth, 16 MB de Flash y 8 MB de PSRAM. Los sensores empleados son comerciales y accesibles: ocho sensores de humedad FC-28 (\$30 MXN c/u), un sensor DHT11 (\$50 MXN) para temperatura y humedad ambiente, un sensor UV ML8511 (\$120 MXN) y una sonda

de pH E-201-9 con módulo PH4502-C (\$250 MXN). Los actuadores consisten en ocho bombas peristálticas de 12V (\$150 MXN c/u) controladas por un módulo de relevadores de 8 canales (\$120 MXN). La alimentación se realiza con una fuente de 12V (\$200 MXN) y un regulador de 5V para el ESP32.

La programación se desarrolla en el entorno Arduino IDE, que es gratuito y ampliamente documentado. La visualización de datos se realiza en Node-RED, una plataforma de código abierto que permite crear dashboards de manera gráfica. El costo total estimado del prototipo es de aproximadamente \$2,500 MXN, lo que lo hace accesible para hogares, escuelas y comunidades. Todos los componentes están disponibles en el mercado nacional a través de proveedores como Naylamp Mechatronics, Steren, Amazon México y Mercado Libre. Asimismo, la existencia de protocolos de comunicación estándar (MQTT, HTTP) y plataformas de visualización facilita la adquisición, transmisión y monitoreo de datos en tiempo real, permitiendo escalar el sistema a futuras versiones con comunicación inalámbrica y almacenamiento en la nube.

CAPÍTULO II

El presente capítulo ofrece una revisión de los trabajos de investigación y desarrollos tecnológicos relacionados con el tema de esta tesis, con el propósito de identificar el estado actual del conocimiento en el área de sistemas de riego automatizado basados en IoT. Posteriormente, se establecen los fundamentos conceptuales y teóricos que sustentan el desarrollo del sistema propuesto, abordando el Internet de las Cosas como paradigma tecnológico, la agricultura urbana, el riego automatizado, así como las variables físicas y ambientales que afectan el crecimiento de los cultivos.

2.1. Estado del Arte

El presente apartado ofrece una revisión de los trabajos de investigación y desarrollos tecnológicos relacionados con el tema de esta tesis. Su propósito es identificar el estado actual del conocimiento en el área de sistemas de riego automatizado basados en IoT, así como reconocer las tendencias, limitaciones y oportunidades que existen en este campo. Se analizan proyectos desarrollados en instituciones académicas como la UNAM, así como investigaciones internacionales que abordan el riego inteligente desde diferentes enfoques. A partir de esta revisión, se realiza un análisis crítico que permite identificar el vacío de conocimiento que justifica el desarrollo de este proyecto: la necesidad de soluciones IoT específicas para patios y jardines de casa habitación, que sean accesibles, modulares y fáciles de instalar.

Se han realizado diversas investigaciones y desarrollos sobre el uso de huertos en

casa.

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

La UNAM desarrolló un huerto urbano inteligente en el Museo Universum que incorpora tecnologías de IoT, nube e inteligencia artificial, las cuales permiten monitorear y cuidar el jardín de hortalizas con soluciones digitales en favor de las áreas verdes.

Cuenta con un conjunto de sensores y cámaras Azure Percept que ayudan a medir el crecimiento de los cultivos por medio de variables como humedad, temperatura, composición del sustrato, etc. Toda la información es enviada a la nube de Azure para luego ser procesada y analizada con el fin de diagnosticar la salud de las plantas y emitir recomendaciones que ayuden a mantener el jardín (Castro Yáñez, s.f.).



Figura 2.2: Huerto urbano inteligente Fuente: Museo Universum UNAM

En el tema específico de agricultura urbana y huertos de pequeña escala, existen diversas investigaciones que han explorado la integración del IoT para mejorar la eficiencia del riego y el monitoreo ambiental en entornos controlados o domésticos.

El primer caso de estudio propone una arquitectura integral de agricultura inteligente basada en computación en el borde (edge computing) y computación en la nube (cloud computing), para el monitoreo en tiempo real de variables agrícolas como

humedad del suelo, temperatura ambiental, radiación solar y conductividad eléctrica (Zamora-Izquierdo y cols., 2019).

Sistema de Riego Inteligente Basado en IoT y Machine Learning

El estudio titulado "Smart Irrigation System Based on IoT and Machine Learning" presenta el desarrollo de un sistema de riego automatizado que integra tecnologías del IoT con algoritmos de aprendizaje automático para optimizar el uso del agua en cultivos agrícolas (Tace y cols., 2022).

El sistema propuesto incorpora una arquitectura IoT compuesta por sensores ambientales y de suelo: sensor de humedad del suelo, sensor de temperatura ambiental, sensor de humedad relativa y sensor de luminosidad. Estos dispositivos recolectan datos en tiempo real que son transmitidos a través de un módulo de comunicación inalámbrica hacia una plataforma de procesamiento.

A diferencia de sistemas tradicionales basados en umbrales fijos, esta propuesta integra un modelo de Machine Learning capaz de analizar patrones históricos de datos y predecir la necesidad de riego, permitiendo una toma de decisiones más precisa y eficiente.

Sistema de Riego Inteligente para Jardines Domésticos

Otro trabajo presenta el diseño e implementación de un sistema de riego inteligente orientado a jardines domésticos, basado en tecnología IoT para el monitoreo remoto de la humedad del suelo y el control automático del riego (Hadi y cols., 2020).

El sistema fue desarrollado utilizando un microcontrolador Node MCU ESP8266, un sensor de humedad de suelo FC-28, un controlador de motor L298N y una bomba de agua de corriente directa. Los resultados indican que el sistema es funcional, eficiente y

adecuado para entornos de jardines domésticos, reduciendo la necesidad de supervisión manual y optimizando el uso del agua.

Arquitectura de Agricultura Inteligente

El estudio de Zamora-Izquierdo et al. (2019) propone una arquitectura integral de agricultura inteligente basada en computación en el borde (edge computing) y computación en la nube (cloud computing), para el monitoreo en tiempo real de variables agrícolas como humedad del suelo, temperatura ambiental, radiación solar y conductividad eléctrica (Zamora-Izquierdo y cols., 2019).

Riego IoT para Casas y Jardines

El crecimiento de las ciudades y la necesidad alimentaria de las grandes urbes ha generado un gran interés en tener alimentos frescos libres de pesticidas y cultivados con agua y nutrientes adecuados. Los huertos en casas son viables en espacios pequeños y con recursos limitados, por lo que constituyen una estrategia accesible para familias urbanas.

Desde una perspectiva ambiental, estas prácticas contribuyen a la sostenibilidad urbana, ya que fortalecen la biodiversidad, mejoran el entorno inmediato y se relacionan con modelos de urbanización más resilientes y sostenibles (FAO y cols., 2022).

UN-Habitat ha subrayado que los jardines urbanos y los espacios verdes son relevantes para preservar la biodiversidad, restaurar ecosistemas urbanos y mejorar la calidad ambiental de las ciudades (UN-Habitat, 2020).

2.2. Análisis Crítico del Estado del Arte

A partir de la revisión literaria, es posible identificar una tendencia clara hacia la aplicación de sistemas IoT en el ámbito agrícola, con resultados positivos en términos de eficiencia hídrica y monitoreo ambiental. Los estudios de (Zamora-Izquierdo y cols., 2019) demuestran que la integración de sensores y algoritmos de aprendizaje automático permite reducir el consumo de agua entre un 20 % y un 40 % en comparación con sistemas tradicionales. De manera similar (Hadi y cols., 2020), reportan que los sistemas IoT para jardines domésticos reducen la necesidad de supervisión manual y optimizan el uso del agua en entornos residenciales. Sin embargo, se observa una limitación común en la mayoría de las investigaciones revisadas: la aplicación de estas tecnologías se concentra en invernaderos, parcelas agrícolas extensivas o sistemas productivos de gran escala, dejando un vacío en el diseño y evaluación de soluciones específicas para patios y jardines de casa habitación. (Chillón Geck y Nasr, 2024) señalan que los sistemas de riego inteligente para agricultura urbana requieren un enfoque particular, ya que los espacios domésticos presentan condiciones de superficie reducida, alta variabilidad microambiental y usuarios sin formación agrícola especializada (Chillón Geck y Nasr, 2024).

Esta carencia en la literatura justifica el desarrollo de un sistema IoT adaptado a microespacios residenciales ($\leq 50 \text{ m}^2$), que integre múltiples variables ambientales, ejecute procesamiento local y ofrezca una solución *plug-and-play* de fácil instalación. El presente proyecto busca contribuir a llenar este vacío, proporcionando una alternativa tecnológica accesible, modular y escalable para el monitoreo y control de riego en entornos domésticos, con base en los hallazgos y limitaciones identificadas en el estado del arte.

2.3. Marco Teórico

Este apartado establece los fundamentos conceptuales y teóricos que sustentan el desarrollo del sistema de riego automatizado propuesto. Se inicia con una revisión del Internet de las Cosas (IoT) como paradigma tecnológico, abordando su definición, evolución y aplicaciones en el ámbito agrícola y doméstico. Posteriormente, se explora el concepto de agricultura urbana y su relevancia en entornos residenciales, así como los principios del riego automatizado basado en IoT. También se analizan los sustratos, las variables físicas y ambientales que afectan el crecimiento de los cultivos, y se presentan los parámetros de cultivo considerados en el diseño del prototipo. Este marco proporciona las bases necesarias para comprender las decisiones técnicas y metodológicas adoptadas en las etapas posteriores del proyecto.

2.3.1. El Internet de las Cosas (IoT)

El Internet de las Cosas (IoT), por sus siglas en inglés *Internet of Things*, se refiere a una red de dispositivos físicos, vehículos y otros objetos que están integrados con sensores, software y conectividad de red, lo que les permite recopilar y compartir datos (International Telecommunication Union, 2015). Según Gubbi, Buyya, Marusic, y Palaniswami, el IoT se define como un ecosistema compuesto por dispositivos físicos, infraestructura de red y plataformas de procesamiento que integran datos provenientes del mundo físico con sistemas digitales, configurando lo que se conoce como sistemas ciberfísicos, en los cuales el entorno físico interactúa continuamente con el entorno computacional (Gubbi y cols., 2013).

El IoT es una tecnología emergente que extiende la conectividad de Internet más allá de los dispositivos tradicionales, permitiendo la interconexión de objetos físicos equipados con sensores, actuadores y capacidades de comunicación. Esta tecnología se fundamenta en la idea de que los objetos cotidianos pueden adquirir capacidades de

percepción, procesamiento y comunicación, transformándose en entidades inteligentes dentro de una red distribuida.

El gran crecimiento urbano, la reducción de áreas verdes y la necesidad de prácticas sostenibles en entornos domésticos han impulsado el desarrollo de soluciones tecnológicas orientadas a la agricultura urbana y al cultivo en espacios residenciales. En este contexto, el IoT emerge como un paradigma tecnológico capaz de transformar sistemas tradicionales de riego en sistemas inteligentes basados en datos.

2.3.2. Agricultura Urbana

Los cultivos en casa habitación son una forma de agricultura urbana a pequeña escala que se desarrolla dentro del espacio doméstico, aprovechando áreas como patios, jardines, azoteas o balcones para la producción de plantas ornamentales, aromáticas, hortícolas o frutales. Su finalidad puede ser alimentaria, ambiental, recreativa o de autoconsumo, y se caracterizan por depender del manejo directo del usuario y de las condiciones microambientales del hogar (FAO y cols., 2022).

Los patios y jardines residenciales son espacios exteriores asociados a la vivienda que, además de cumplir una función estética o recreativa, pueden operar como micro-espacios de cultivo. A diferencia de los sistemas agrícolas convencionales, estos espacios presentan limitaciones de superficie, variaciones de sol, sombra, temperatura, drenaje y disponibilidad de agua, por lo que requieren un manejo más preciso (UN-Habitat, 2020).

Sociedad 5.0 y Agricultura Urbana

La Sociedad 5.0, concepto acuñado por el gobierno de Japón en 2016, propone una transición hacia una sociedad centrada en el ser humano que equilibra el desarrollo económico con la resolución de problemas sociales mediante la integración de tecno-

logías como el IoT, la inteligencia artificial y la robótica (Cabinet Office, Government of Japan, 2020). En este contexto, los huertos urbanos domésticos automatizados representan una aplicación concreta de este paradigma, al empoderar a los ciudadanos para producir sus propios alimentos de manera eficiente, reducir el desperdicio de agua y contribuir a la sostenibilidad de las ciudades. Este proyecto se alinea con esta visión al ofrecer una solución tecnológica accesible que permite a los habitantes de zonas urbanas cultivar sus propios alimentos de forma inteligente y controlada.

2.3.3. Uso de IoT en Riego Automatizado

El IoT aplicado al riego automatizado consiste en integrar sensores, microcontroladores, conectividad y actuadores para medir variables del entorno en tiempo real y activar el riego de manera automática cuando las condiciones lo requieren (Gutiérrez y cols., 2014). En sistemas de jardinería doméstica, este enfoque permite reducir la dependencia del riego manual y mejorar la eficiencia del agua.

El principio del IoT se fundamenta en la interconexión de objetos físicos mediante sensores, microcontroladores y redes de comunicación que permiten la recopilación, transmisión y análisis de datos en tiempo real (Gubbi y cols., 2013). En aplicaciones de riego residencial, esta tecnología posibilita medir variables ambientales y del suelo, procesarlas mediante algoritmos y ejecutar acciones automatizadas como la activación de válvulas de riego, optimizando así el consumo de agua y las condiciones del cultivo.

2.3.4. Arquitectura por Capas del IoT

Desde una perspectiva arquitectónica, los sistemas IoT se estructuran en capas funcionales (Gubbi y cols., 2013):

- **Capa de percepción:** Se integran sensores que miden humedad del suelo, temperatura y humedad ambiental, radiación ultravioleta, pH del agua, pH del suelo

y conductividad eléctrica (indicador de nutrientes).

- **Capa de red:** Permite la transmisión de datos a través de protocolos inalámbricos como Wi-Fi, Serial, Bluetooth, MQTT o HTTP, aprovechando la infraestructura doméstica existente.
- **Capa de procesamiento:** El sistema incorpora un microcontrolador (como el ESP32-S3) que ejecuta algoritmos locales de decisión sin depender completamente de la nube.
- **Capa de aplicación:** Integra una interfaz móvil que permite al usuario monitorear variables en tiempo real, consultar históricos, recibir alertas y modificar parámetros de riego.

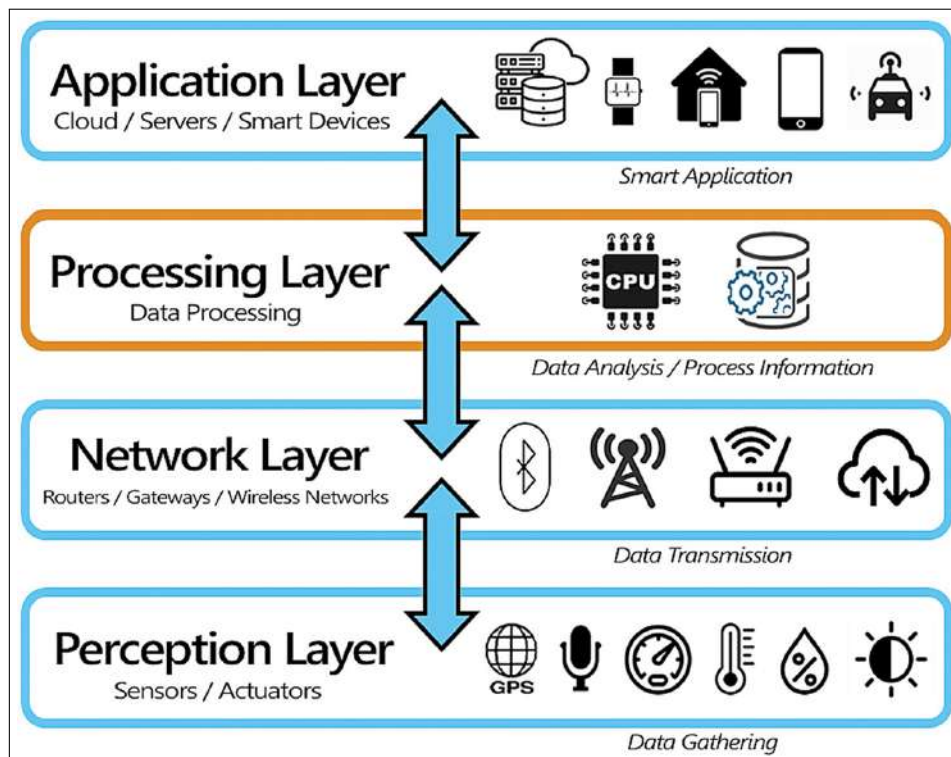


Figura 2.3: Arquitectura típica de un dispositivo IoT. Fuente: Elaboración propia.

2.3.5. Propiedades importantes en los cultivos

2.3.6. Variables Físicas y Ambientales

- **Temperatura del Suelo:** La temperatura del suelo es decisiva desde la germinación. Para semilla de jitomate, varias fuentes reportan que la germinación es mejor entre 75 y 85 °F (24-29 °C). Después de la emergencia, una temperatura de suelo cercana a 70 °F (21 °C) favorece el desarrollo de plántulas. Para trasplante, el suelo debe haber superado al menos 55 °F (13 °C), porque el suelo frío estresa la planta y limita el crecimiento inicial (Whiting, O'Meara, y Wilson, 2024).
- **Temperatura del Ambiente:** La temperatura define qué grupo de cultivos puede prosperar. Las hortalizas de clima fresco producen mejor entre 55 y 75 °F (13-24 °C); las de clima cálido, entre 65 y 95 °F (18-35 °C). El tomate y otros cultivos de fruto requieren una estación larga, cálida y libre de heladas (Whiting y cols., 2024).

Luz : El jitomate requiere pleno sol para un buen rendimiento. Las guías domésticas señalan que necesita al menos 6 horas de sol directo al día, y varias recomiendan 8 horas para mejor producción y calidad (Whiting y cols., 2024).

- **Radiación UV:** En el huerto doméstico, la radiación UV normalmente no se maneja como variable agronómica aislada, sino como parte de la radiación solar total y del riesgo de estrés por sol y calor. Dosis moderadas de UV-A y UV-B pueden modificar la floración, el número de frutos y los compuestos nutraceuticos, pero dosis mayores pueden generar necrosis foliar y cambios fisiológicos no deseables.

2.3.7. Sustento Teórico

El fenómeno de estudio de la presente investigación se centra en la automatización del riego en cultivos urbanos o de casa habitación, mediante la integración de tecnologías IoT para el monitoreo de variables ambientales y la activación controlada del

suministro de agua. El interés principal no recae únicamente en la incorporación de dispositivos tecnológicos, sino en analizar cómo el monitoreo de las condiciones del cultivo contribuye a una toma de decisiones más precisa en el riego y, con ello, mejorar el uso del agua y los nutrientes.

La investigación corresponde a espacios residenciales, específicamente patios y jardines de casa habitación, donde se desarrollan cultivos domésticos a pequeña escala. Estos espacios presentan condiciones distintas a las de la agricultura comercial, ya que suelen tener menor superficie, alta variabilidad microambiental y dependencia directa del manejo realizado por el usuario.

2.3.8. Parámetros de Cultivo

El adecuado desarrollo de los cultivos depende del monitoreo y control de múltiples variables físicas y ambientales. En esta sección se describen los tres parámetros principales considerados en el sistema de riego automatizado: sustrato, humedad del suelo y temperatura ambiente. Para cada uno se presentan los valores de referencia utilizados en el prototipo, basados en las necesidades del jitomate cherry y la lechuga, tomados del Manual Técnico de Producción de Tomate con Enfoque de Buenas Prácticas Agrícolas del Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras de Bolivia (Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras (MDRyT), 2017).

Sustrato

El sustrato es el material de soporte físico sobre el cual se desarrolla la planta. Sus funciones principales son sostener el sistema radicular, almacenar y suministrar agua y nutrientes, y permitir la aireación necesaria para la respiración de las raíces. De acuerdo con el manual técnico del MDRyT (Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras (MDRyT), 2017), el sustrato ideal para el cultivo de tomate en clima templado debe presentar un pH neutro (6.0 a 7.0), textura ligera y aireada, buen drenaje y alto contenido de materia

orgánica. En la Tabla 2.1 se resumen estas características.

Tabla 2.1: Características del sustrato para cultivos domésticos

Característica	Valor recomendado
pH del sustrato	Neutro (6.0 – 7.0)
Textura	Ligera y aireada
Composición sugerida	Compost, fibra de coco y vermiculita o perlita (partes iguales)
Drenaje	Buen drenaje, evitar encharcamiento
Materia orgánica	Alto contenido

Para el clima templado de Pachuca, Hidalgo, se recomienda un sustrato con pH neutro, que permita una adecuada retención de humedad sin saturar las raíces. La mezcla en partes iguales de compost, fibra de coco y vermiculita o perlita proporciona un equilibrio entre retención de agua, aireación y disponibilidad de nutrientes.

Humedad del suelo

La humedad del suelo es una de las variables más críticas para el desarrollo de los cultivos, ya que influye directamente en la absorción de nutrientes, la respiración radicular y la salud general de la planta. Un riego excesivo puede provocar asfixia radicular y enfermedades, mientras que un riego insuficiente genera estrés hídrico y reduce el rendimiento.

Los rangos de humedad del sustrato recomendados para el jitomate cherry y la lechuga se presentan en la Tabla 2.2. Estos valores han sido adaptados a partir de las recomendaciones técnicas del manual de producción de tomate del MDRyT (Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras (MDRyT), 2017), considerando las etapas fenológicas de germinación, desarrollo vegetativo, floración y fructificación, así como la humedad ambiental óptima para ambos cultivos.

Es importante señalar que estos valores son referenciales y deben ajustarse según las condiciones específicas del sustrato, el drenaje y el clima local. El sistema propuesto realiza un monitoreo continuo mediante sensores de humedad de suelo (FC-28), lo

Tabla 2.2: Parámetros de humedad del suelo y ambiental

Etapas / Variables	Jitomate cherry	Lechuga
Germinación / trasplante	70 – 80 %	75 – 80 %
Desarrollo vegetativo	60 – 70 %	70 – 75 %
Floración / fructificación	60 – 75 %	—
Formación de cabeza	—	65 – 75 %
Humedad ambiental	60 – 70 %	60 – 70 %

que permite mantener la humedad dentro de los rangos establecidos y activar el riego de forma automática cuando sea necesario, evitando tanto el estrés hídrico como el encharcamiento.

Temperatura ambiente

La temperatura es un factor determinante en el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que afecta procesos fisiológicos como la germinación, la fotosíntesis, la transpiración y la floración. Temperaturas extremas, tanto altas como bajas, pueden causar estrés térmico y afectar la productividad de los cultivos.

El manual técnico del MDRyT (Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras (MDRyT), 2017) establece que la temperatura óptima para el desarrollo del jitomate cherry se encuentra entre 18 °C y 24 °C, mientras que temperaturas superiores a 35 °C afectan la polinización y valores inferiores a 10 °C detienen el crecimiento. En la Tabla 2.3 se resumen los rangos de temperatura ambiente óptimos para cada etapa del desarrollo del jitomate cherry y la lechuga, así como los límites críticos que deben evitarse para prevenir daños por estrés térmico.

El monitoreo constante de la temperatura ambiente y del suelo permite anticipar condiciones adversas y tomar decisiones oportunas, como activar sistemas de riego, sombreado o ventilación. En el sistema propuesto, el sensor DHT11 proporciona datos en tiempo real que alimentan los algoritmos de control del riego automatizado.

Tabla 2.3: Parámetros de temperatura ambiente

Etapas / Variables	Jitomate cherry	Lechuga
Germinación / trasplante	20–30 °C (suelo 24–30 °C)	15–20 °C (suelo 15–25 °C)
Desarrollo vegetativo	18–24 °C (suelo 21–27 °C)	15–20 °C (suelo 15–25 °C)
Floración / fructificación	18–24 °C (suelo 21–27 °C)	—
Formación de cabeza	—	10–18 °C (suelo 10–18 °C)
Máximas tolerables	> 35 °C (afecta polinización)	> 28–30 °C (causa estrés)
Mínimas tolerables	≈ 10 °C	≈ 0 °C (heladas dañinas)

En conjunto, el control integrado de estos tres parámetros —sustrato, humedad del suelo y temperatura ambiente— permite mantener condiciones óptimas para el desarrollo de los cultivos, reduciendo el riesgo de estrés, enfermedades y pérdidas de producción, al tiempo que se optimiza el uso del agua y se minimiza la intervención manual del usuario.

2.3.9. Influencia de la Luna en el Huerto

En diversas prácticas agrícolas tradicionales se ha considerado que las fases lunares pueden influir en actividades como la siembra, poda, trasplante, fertilización y cosecha. Esta idea se basa principalmente en observaciones empíricas transmitidas por productores, calendarios agrícolas y métodos de agricultura biodinámica o tradicional, donde se asocia el ciclo lunar con el movimiento de agua en el suelo, la savia de las plantas y los momentos adecuados para determinadas labores agrícolas.

De acuerdo con este enfoque tradicional, durante la luna nueva suelen recomendarse actividades de mantenimiento, limpieza, aplicación de abonos, podas y cosecha de raíces o tubérculos. La luna creciente se asocia con la siembra de plantas de desarrollo superficial, esquejes y trasplantes, debido a que se considera una etapa favorable para el crecimiento vegetativo. La luna llena se relaciona con cosecha de frutos y algunos trasplantes, mientras que la luna menguante suele recomendarse para podas, mantenimiento, recolección de abonos y siembra de plantas con mayor desarrollo radicular (Mayoral, Solbes, Cantó, y Pina, 2020).



Figura 2.4: Fases lunares y su influencia en el cultivo. Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, es importante señalar que la influencia directa de las fases lunares sobre el crecimiento de los cultivos sigue siendo un tema debatido. Algunas fuentes reconocen la existencia de estas prácticas como parte del conocimiento agrícola tradicional, mientras que revisiones científicas indican que no existe evidencia suficientemente sólida y reproducible que demuestre una relación causal directa entre las fases lunares y el desarrollo fisiológico de las plantas (Mayoral y cols., 2020). Por ello, en el presente proyecto las fases lunares se consideran como un criterio complementario de referencia cultural o tradicional, pero no sustituyen las variables medibles del sistema, como humedad del sustrato, temperatura, humedad ambiente, radiación UV y pH del agua.

La integración de este criterio dentro del sistema se utiliza como información adicional para el usuario, especialmente en actividades de mantenimiento, siembra o cosecha. No obstante, las decisiones automatizadas del prototipo se basan principalmente en datos obtenidos por sensores y procesados por el ESP32-S3, con el fin de asegurar un control objetivo y verificable del riego.

CAPÍTULO III

El presente capítulo describe el enfoque metodológico adoptado para el desarrollo del sistema de riego automatizado, así como los componentes electrónicos que lo conforman y el desarrollo práctico del proyecto. Se presenta el sustento metodológico basado en la propuesta de (Hornos y Quinde, 2024), que estructura el proyecto en cuatro fases: Concepción, Modelado, Construcción y Post-construcción, alineadas con las capas de la arquitectura IoT. Además, se explica el enfoque mixto (cuantitativo y cualitativo) que orienta la investigación, el diseño experimental implementado y la población y muestra consideradas para las pruebas del prototipo. Posteriormente, se describen los componentes electrónicos seleccionados, la arquitectura del sistema, la lógica de control y el desarrollo práctico del prototipo. Este marco proporciona la guía para la ejecución ordenada y sistemática del proyecto.

3.1. Marco Metodológico

3.1.1. Sustento Metodológico

Se utilizará la estructura de la Metodología (Hornos y Quinde, 2024), que consta de 4 fases del ciclo de vida: Conception, Modelling, Construction, Post-Construction, y sus cuatro capas tecnológicas IoT: Percepción, Red, Procesamiento y Aplicación, como se muestra en la Figura 5.1

La metodología articula cuatro fases del ciclo (Conception, Modelling, Construction y Post-Construction) y las alinea con las cuatro capas tecnológicas de la arquitectura IoT (Perception, Network, Processing, Application).

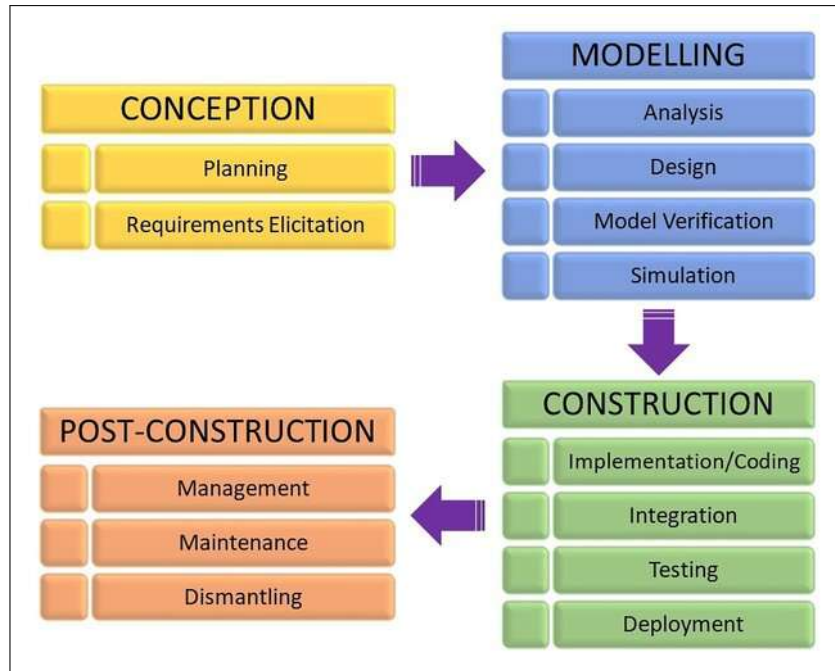


Figura 3.5: Metodología utilizada 2024

Fuente:(Hornos y Quinde, 2024)

1. **Concepción:** En esta fase se determinan todos los requisitos y dispositivos que se utilizarán, como sensores, dispositivos y tarjetas para la integración del sistema.
2. **Modelado:** Se determina y analiza el diseño de código y la comunicación entre los dispositivos, simulaciones, pruebas de campo, políticas de seguridad, detalles de diseño y topología de los dispositivos y su integración.
3. **Construcción:** Se considera la implementación de hardware y software, integración y pruebas, integración electrónica, pruebas en condiciones reales, revisión y testeo de cada una de las tarjetas e integraciones.
4. **Post-Constructión:** Validación en campo, diseño de UX (Figma), obtención de métricas, análisis de costo-beneficio, verificación de parámetros y resultados.

Para la agricultura urbana en aplicaciones de jardines, azoteas y patios residenciales, los sistemas IoT de riego prometen ahorros de agua del 30-45 % y reducciones sustanciales en la aplicación de plaguicidas, al mantener la humedad del sustrato dentro

de rangos óptimos (Chillón Geck y Nasr, 2024).

3.1.2. Enfoque Metodológico

Enfoque Mixto

Este estudio orienta un enfoque cuantitativo y cualitativo, ya que se requiere medir efectos y parámetros en sistemas de riego IoT como: consumo de agua, estabilidad de parámetros como sustratos, agua, pH, luz, etc. Estos parámetros se medirán a través de sensores, y los datos se obtendrán mediante los registros estadísticos de cada sensor.

El enfoque cualitativo se utilizará para interpretar cuándo usar cada uno de los parámetros y sensores, determinar la facilidad de uso, investigar temas de instalación, confianza en el sistema, calidad de medición de cada sensor y componente, así como la calidad y adopción del sistema.

Diseño Experimental

Esta investigación está basada en un diseño experimental en un ambiente controlado, orientado a determinar el efecto y resultado del sistema de riego IoT en aplicaciones en casa habitación.

La base de las unidades experimentales es el cultivo en macetas, determinado por parámetros controlados. A cada muestra de macetas se asignará una secuencia de mediciones organizada por software para asignarle un tratamiento determinado por variables e indicadores.

3.1.3. Población y Muestra

La población objetivo son hogares y jardines de zonas urbanas con cultivo ornamental y hortalizas, que cumplan con ciertos criterios y características mínimas, como

pequeño espacio, energía eléctrica, agua, acceso a red de internet, teléfono inteligente, adecuada exposición solar y ventilación, y espacio para 10 macetas de 20 litros.

CAPÍTULO IV

El presente capítulo aborda el desarrollo práctico del sistema de riego automatizado, partiendo de la arquitectura IoT propuesta y detallando la integración de los componentes electrónicos seleccionados. Se describe la implementación de la comunicación mediante MQTT y Node-RED, que permite la transmisión de datos entre el ESP32-S3 y la plataforma de visualización. Asimismo, se detalla la etapa de potencia con relevadores para el control de las bombas peristálticas, la distribución de sensores de humedad y bombas de riego, la lógica de control implementada y el código fuente desarrollado. Finalmente, se presentan los diagramas generales del prototipo y se explican los indicadores visuales de humedad general, así como la integración de los sensores DHT11, ML8511 y pH E-201-9. Este capítulo evidencia la materialización de los conceptos teóricos en un sistema funcional y constituye el núcleo técnico del proyecto.

4.1. Desarrollo del proyecto

4.1.1. Arquitectura del Sistema IoT

La arquitectura del sistema IoT propuesto se basa en un modelo de adquisición, procesamiento, actuación y visualización de datos, empleando como unidad central un microcontrolador ESP32-S3.

En la capa de percepción se integran los sensores encargados de medir las variables principales del sistema. Para el monitoreo del cultivo se emplean ocho sensores

de humedad de sustrato, uno por cada planta, conectados a entradas analógicas del ESP32-S3. Además, se incorpora un sensor DHT11 para medir temperatura y humedad ambiente, un sensor UV ML8511 para estimar la radiación ultravioleta y una sonda de pH modelo E-201-9 conectada al módulo PH4502-C para monitorear el pH del agua de riego.

La capa de actuadores se encuentra conformada por ocho relevadores de 5 V, los cuales permiten controlar bombas peristálticas alimentadas mediante una fuente externa de 12 VDC.

La arquitectura también contempla la posibilidad de escalar el sistema hacia una comunicación inalámbrica mediante Wi-Fi 802.11 y el protocolo MQTT, utilizando un broker como Mosquitto. En esta modalidad, el ESP32-S3 podría publicar los datos de los sensores en tópicos MQTT, mientras que Node-RED se encargaría de suscribirse a dichos tópicos para visualizar y procesar la información. Esta alternativa permite ampliar el sistema hacia un esquema IoT más flexible, con monitoreo remoto y conexión a otros servicios.

En conjunto, la arquitectura del sistema permite integrar sensores, actuadores, procesamiento local y visualización de datos en tiempo real. Esta estructura proporciona una solución modular, escalable y adecuada para el monitoreo y control de riego en patios y jardines de casa habitación, permitiendo automatizar el suministro de agua con base en las condiciones reales de cada planta.

4.1.2. Diagrama General del Prototipo

La Figura 4.6 presenta un mapa esquemático del prototipo, donde se identifican los sensores de humedad de suelo, las bombas de agua, el módulo de relevadores, los sensores ambientales y de calidad del agua, así como las fuentes de alimentación y las

placas de control basadas en ESP32.



Figura 4.6: Mapa esquemático del prototipo mostrando la distribución de componentes. Fuente: Elaboración propia.

Complementariamente, la Figura 4.7 muestra el diagrama eléctrico del circuito del prototipo, donde se detallan las conexiones entre los diferentes componentes electrónicos.

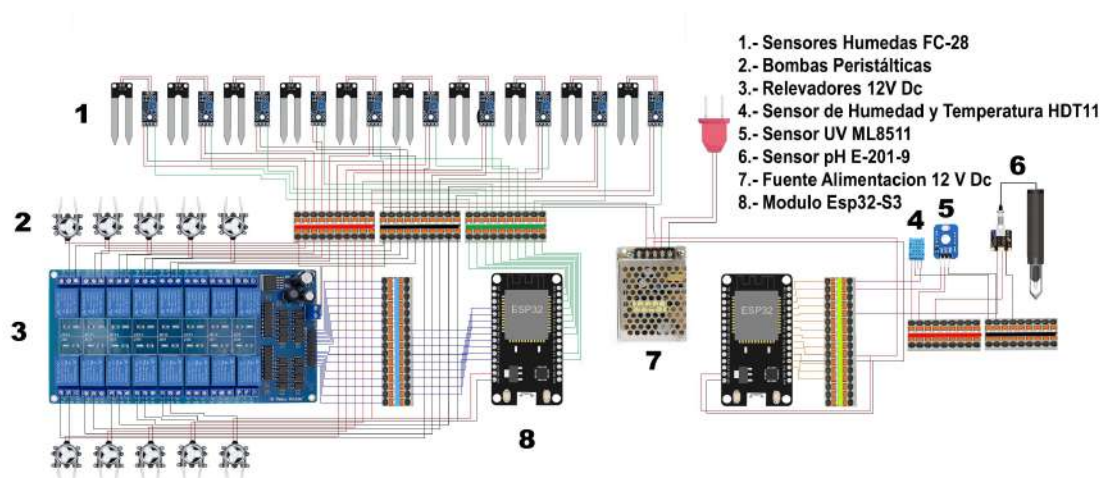


Figura 4.7: Diagrama general del circuito del prototipo. Fuente: Elaboración propia.

Los elementos principales identificados en los diagramas son:

1. Sensores de humedad del suelo instalados en el sustrato de cada planta.
2. Bombas de agua encargadas de suministrar riego a las plantas.
3. Módulo de relevadores para el accionamiento eléctrico de las bombas.
4. Sensor DHT11 para medición de temperatura y humedad ambiente.
5. Sensor UV ML8511 para estimación de radiación ultravioleta.
6. Módulo acondicionador PH4502-C para medición de pH del agua.
7. Electrodo o sonda de pH para contacto directo con el agua de riego.

Protocolos de Red y Aplicación usados en IoT

- **MQTT**: Mediante el componente ESP-MQTT, que soporta MQTT v5.0.
- **HTTP/HTTPS**: Mediante `esp_http_client`, para enviar datos a APIs.
- **ESP-NOW**: Protocolo propietario para comunicación Wi-Fi sin conexión.
- **Bluetooth y BLE**: Para configuración local y monitoreo desde smartphones.

4.1.3. Componentes Electrónicos

ESP32-S3 N16R8

El componente electrónico principal utilizado en el prototipo es un módulo ESP32-S3 N16R8, como se muestra en la Figura 4.8, también identificado comercialmente como ESP32-S3-WROOM-1-N16R8. Este módulo pertenece a la familia de microcontroladores ESP32-S3 de Espressif Systems y está orientado al desarrollo de aplicaciones de IoT, sistemas embebidos y prototipos con conectividad inalámbrica (Espressif Systems, s.f.).

La denominación N16R8 indica que el módulo cuenta con 16 MB de memoria Flash y 8 MB de PSRAM, lo que proporciona mayor capacidad para el almacenamiento del programa, manejo de variables, procesamiento de datos y expansión del sistema. Esta característica resulta conveniente para el prototipo, ya que permite integrar múltiples sensores, comunicación serial, visualización de datos y posibilidad de ampliación hacia comunicación inalámbrica.

El ESP32-S3 N16R8 integra conectividad Wi-Fi de 2.4 GHz, compatible con el estándar IEEE 802.11 b/g/n, y Bluetooth Low Energy, lo que permite su uso en aplicaciones de monitoreo, control y comunicación IoT. En este proyecto, el módulo funciona inicialmente mediante comunicación serial por cable USB hacia Node-RED, enviando los datos de los sensores en

formato JSON. Sin embargo, sus capacidades de conectividad permiten escalar el sistema hacia una arquitectura inalámbrica mediante Wi-Fi y protocolos como MQTT.

En conectividad inalámbrica, el chip cumple con IEEE 802.11 b/g/n en 2.4 GHz, soporta anchos de banda de 20 y 40 MHz y alcanza hasta 150 Mbps en modo 1T1R. En seguridad, incorpora Secure Boot, Flash Encryption, aceleradores de AES-128/256, SHA, RSA, HMAC, generador de números aleatorios y módulo de firma digital (Espressif Systems, 2025).

Sensor de Humedad FC-28

El sensor FC-28 es un dispositivo resistivo de humedad de suelo, formado por una sonda de dos electrodos que se inserta en el sustrato y un módulo acondicionador con comparador LM393 como se muestra en la Figura 4.9. Se alimenta con 3.3 a 5 V, consume alrededor de 15 mA y entrega salida analógica (AO) y digital (DO) (UNIT Electronics, s.f.).



Figura 4.9: Sensor de humedad FC-28.
Fuente: Elaboración propia.

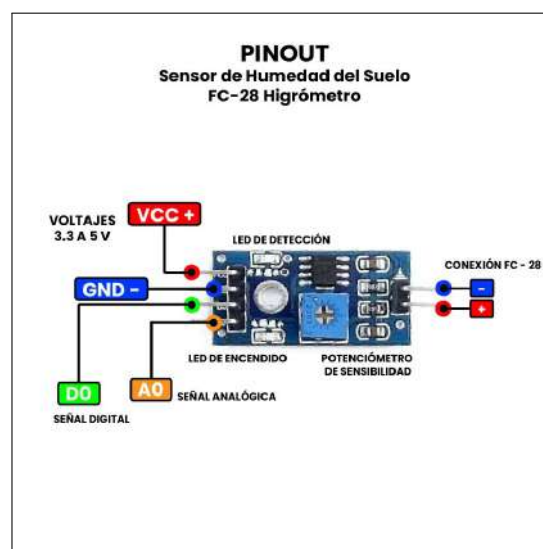


Figura 4.10: Diagrama de pines del sensor FC-28. Fuente: UNIT Electronics, s.f.

Sensor de Humedad y Temperatura Ambiente DHT11

El DHT11 es un sensor digital de temperatura y humedad relativa de bajo costo (vease imagen 4.11). Opera con alimentación de 3.3 a 5.5 V, mide humedad relativa en un rango de 5 a 95 % RH con precisión de ± 5 % RH, y temperatura en un rango de -20 a 60 °C con precisión de ± 2 °C.

Sensor de Radiación UV ML8511

El módulo ML8511 es un sensor analógico de radiación ultravioleta diseñado para detectar luz en el rango de 280 a 390 nm, cubriendo las bandas UV-B y UV-A. Su salida es analógica proporcional a la intensidad UV.

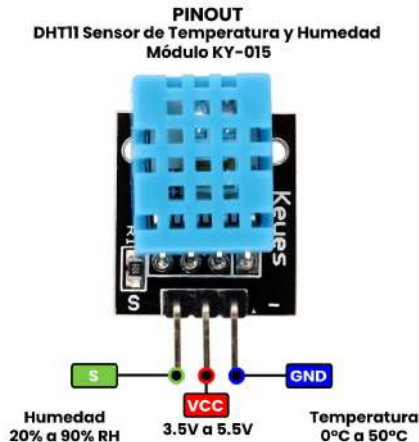


Figura 4.11: Sensor DHT11 para medir temperatura y humedad ambiente. Fuente: Elaboración propia.

El sensor ML8511 incorpora un fotodiodo sensible a radiación ultravioleta y un amplificador interno que convierte la fotocorriente generada por la radiación UV en una señal de voltaje analógica. Esta característica facilita su conexión con microcontroladores, ya que la salida del sensor puede ser leída directamente mediante una entrada ADC. De acuerdo con la información técnica del fabricante, el sensor entrega una salida de voltaje proporcional a la intensidad de radiación UV detectada, lo que permite convertir la señal analógica en valores de radiación, intensidad e índice UV dentro del programa del sistema.

En el prototipo desarrollado, el sensor ML8511 (figura 4.12) se integra como parte de la etapa de monitoreo ambiental. Su finalidad es estimar el nivel de radiación ultravioleta que incide sobre el entorno de las plantas, ya que esta variable puede influir en las condiciones de crecimiento, exposición solar y estrés ambiental del cultivo. La señal analógica del sensor se conecta al GPIO8 del ESP32-S3, definido en el programa como UVOUT, mientras que una referencia de 3.3 V se conecta al GPIO 3 (ROHM Co., Ltd., s.f.).

Sensor de Temperatura y pH para Agua

La sonda E-201-9 es un electrodo utilizado para la medición del potencial de hidrógeno, comúnmente conocido como pH, en soluciones líquidas. En el prototipo desarrollado, este componente se emplea para monitorear el pH del agua de riego, permitiendo identificar si el agua presenta una condición ácida, neutra o alcalina antes de ser suministrada a las plantas.

Este tipo de sonda generalmente utiliza un electrodo combinado de vidrio, el cual integra un electrodo de medición y un electrodo de referencia dentro de un mismo cuerpo. El principio de funcionamiento se basa en la diferencia de potencial eléctrico generada entre el electrodo sensible al ion hidrógeno y el electrodo de referencia. Esta diferencia de potencial varía de acuerdo con la concentración de iones de hidrógeno presentes en la solución, lo que permite estimar el valor de pH.

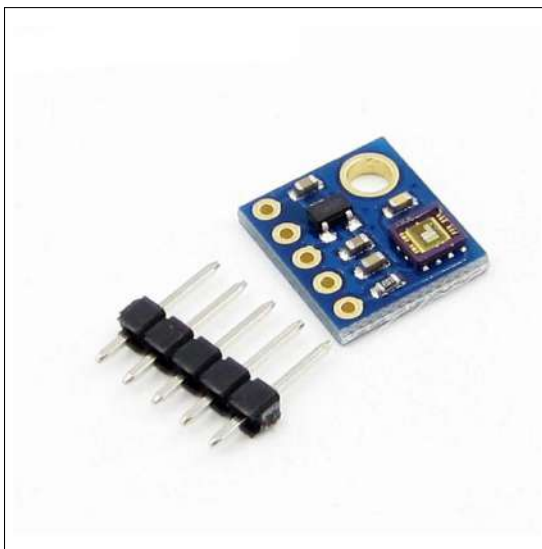


Figura 4.12: Sensor ML8511 para medir radiación ultravioleta. Fuente: Elaboración propia.

La escala de pH se interpreta normalmente en un rango de 0 a 14, donde valores menores a 7 indican una solución ácida, un valor cercano a 7 representa una condición neutra y valores mayores a 7 indican una solución alcalina. En aplicaciones de riego, esta medición es relevante porque el pH del agua puede influir en la disponibilidad de nutrientes, la absorción de minerales y el desarrollo general de las plantas.

La sonda E-201-9 cuenta comúnmente con conector tipo BNC, lo que facilita su conexión a módulos acondicionadores de señal como el PH4502-C. El módulo PH4502-C recibe la señal generada por la sonda, la acondiciona y entrega una salida analógica proporcional al valor de pH. Posteriormente, esta señal es conectada al ESP32-S3 mediante una entrada analógica.



Figura 4.13: Sonda E-201-9 y módulo PH4502-C para medir pH del agua. Fuente: Elaboración propia.

4.1.4. Etapa de Potencia y Relevadores

En esta etapa de potencia del prototipo tiene como finalidad permitir que el microcontrolador ESP32-S3 controle cargas eléctricas de mayor consumo, en este caso las bombas peristálticas encargadas de suministrar el agua hacia cada una de las plantas. Debido a que los pines del ESP32-S3 únicamente entregan señales digitales de control de bajo voltaje y baja corriente, no es posible conectar las bombas directamente al microcontrolador. Por esta razón, se incorpora una etapa de relevadores que funciona como interfaz de aislamiento y conmutación entre la etapa de control y la etapa de potencia.

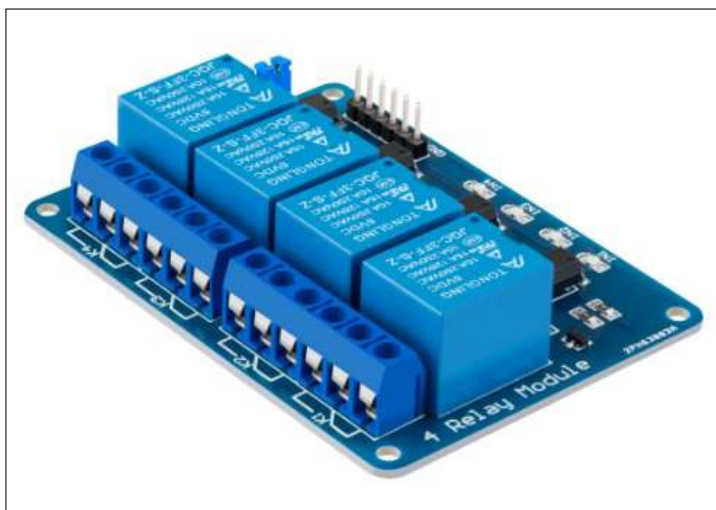


Figura 4.14: Módulo de relevadores de 5V utilizado para el control de bombas. Fuente: Elaboración propia.

En el sistema se utilizan ocho relevadores de 5 V, cada uno asociado a una bomba peristáltica independiente. Cada relevador recibe una señal digital proveniente del ESP32-S3 y, mediante su contacto de conmutación, permite activar o desactivar la alimentación de una bomba de 12 VDC. De esta manera, el ESP32-S3 no alimenta directamente las bombas, sino que únicamente envía la señal lógica que determina cuándo debe encenderse o apagarse cada actuador.

4.1.5. Distribución de Sensores de Humedad

Para el monitoreo de humedad del sustrato, se asignaron ocho entradas analógicas del ESP32-S3, una por cada planta. La distribución utilizada fue la siguiente:

Planta	Puerto GPIO
Planta 1	GPIO4
Planta 2	GPIO5
Planta 3	GPIO6
Planta 4	GPIO7
Planta 5	GPIO15
Planta 6	GPIO16
Planta 7	GPIO17
Planta 8	GPIO18

Cada sensor fue instalado en el sustrato de cada planta correspondiente, procurando colocarlo dentro de la zona radicular para obtener una lectura más representativa de la humedad disponible para la planta.

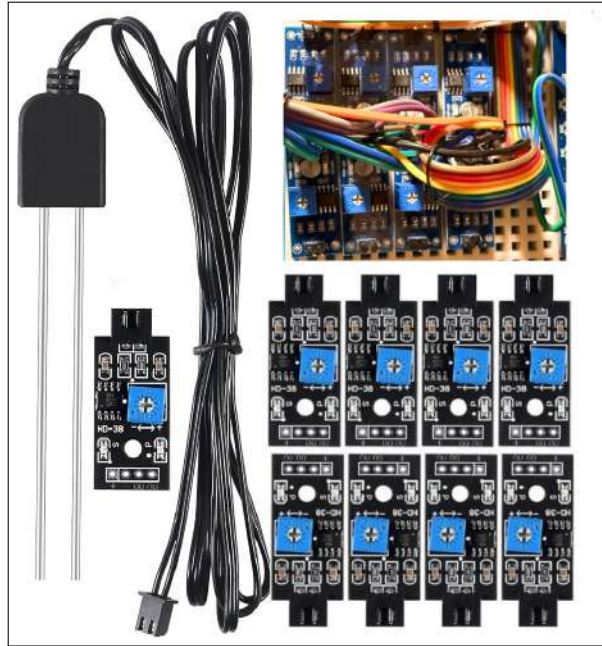


Figura 4.15: Sensores de humedad instalados en el sustrato de cada planta. Fuente: Elaboración propia.

4.1.6. Distribución de Bombas de Riego

Cada planta tiene una dosificación de agua que cuenta con una bomba asignada de manera independiente como se muestra en Figura 7.3 (Cinyar Fluid Technology (Shanghai) Co., Ltd., s.f.). La señal de control de cada bomba se envía desde el ESP32-S3 hacia un módulo de relevadores, los cuales separan la etapa de control de baja potencia del microcontrolador de la etapa de potencia requerida por las bombas.

Model	B02	Diameter	2*4mm
Voltage	12V	Flow	40ml/min
Material	BPT		



Figura 4.16: Bomba peristáltica de 12V utilizada para el suministro de agua. Fuente:(Cinyar Fluid Technology Shanghai) .

Planta	Bomba	Puerto GPIO
Planta 1	Bomba 1	GPIO1
Planta 2	Bomba 2	GPIO2
Planta 3	Bomba 3	GPIO42
Planta 4	Bomba 4	GPIO41
Planta 5	Bomba 5	GPIO40
Planta 6	Bomba 6	GPIO39
Planta 7	Bomba 7	GPIO38
Planta 8	Bomba 8	GPIO37

La lógica de control implementada permite que cada bomba opere únicamente en función de la humedad de su planta correspondiente. De esta manera, si la planta 1 presenta baja humedad, únicamente se activa la bomba 1; si la planta 2 requiere riego, se activa solamente la bomba 2, y así sucesivamente. Esta independencia permite un uso más eficiente del agua y evita regar plantas que ya cuentan con humedad suficiente.

4.1.7. Lógica de Control del Riego

El algoritmo de control se basa en la comparación del porcentaje de humedad del sustrato contra un umbral de humedad adecuada. Cuando el valor medido es menor al umbral establecido, el sistema interpreta que la planta requiere riego y activa la bomba correspondiente; la bomba determinada permanece encendida mientras la humedad se mantenga por debajo del nivel adecuado; una vez que el sensor detecta que la humedad ha alcanzado el valor definido, la bomba se apaga automáticamente.

La lógica general puede resumirse de la siguiente manera:

- Si la humedad de una planta es menor al 60 %, se activa su bomba.
- Si la humedad de una planta es igual o mayor al 60 %, se apaga su bomba.
- Cada planta se evalúa de forma independiente.
- No se utiliza una secuencia fija de encendido y apagado de bombas.

- Las bombas permanecen activas hasta que el sustrato alcanza la humedad adecuada.

Esta lógica de programación permite un control más preciso, ya que el tiempo de riego no depende de un retardo fijo, sino de la condición real medida por el sensor de humedad.

Explicación del Código de Control de Bombas

El corazón del sistema de riego automatizado reside en la lógica de control implementada en el ESP32-S3. Esta lógica se encarga de leer los valores de humedad de cada sensor, compararlos con un umbral predefinido y activar o desactivar las bombas correspondientes. A continuación se describe el funcionamiento de esta sección del código.

El programa comienza definiendo los pines GPIO a los que están conectados los sensores de humedad (entradas analógicas) y las bombas (salidas digitales). Para cada una de las ocho plantas, se define una estructura que almacena el pin del sensor, el pin de la bomba, el valor actual de humedad y el estado de la bomba (activa o inactiva). Esta estructura permite manejar cada planta de forma independiente y organizada.

En el bucle principal del programa, el sistema realiza las siguientes operaciones en cada iteración:

1. **Lectura de sensores:** Para cada planta, se lee el valor analógico del sensor FC-28 y se convierte a un porcentaje de humedad utilizando una función de calibración. Esta función asigna un 100 % de humedad al valor de suelo completamente húmedo y un 0 % al valor de suelo seco.
2. **Control de bombas:** Se evalúa el porcentaje de humedad de cada planta. Si la humedad es menor al 60 %, el sistema activa la bomba correspondiente enviando una señal de nivel bajo (ya que los relevadores utilizan lógica activa en bajo). Si la humedad es igual o superior al 60 %, la bomba se desactiva.
3. **Construcción y envío de datos:** Todas las lecturas de los sensores y los estados de las bombas se empaquetan en un mensaje en formato JSON y se envían a través de la comunicación serial hacia Node-RED para su visualización en el dashboard.

El fragmento de código que implementa esta lógica es el siguiente:

Listing 4.1: Fragmento del código de control de bombas

```

1 // == Bucle principal - Sección de control de bombas ==
2 // 1. Lectura de humedad de cada planta
3 for (int i = 0; i < 8; i++) {
4     int lectura = analogRead(plantas[i].sensorPin);
5     plantas[i].humedad = calcularHumedad(lectura);
6 }
7
8 // 2. Control de bombas
9 for (int i = 0; i < 8; i++) {
10     if (plantas[i].humedad < UMBRAL_HUMEDAD) {
11         digitalWrite(plantas[i].bombaPin, LOW); // Activar bomba

```

```

12     plantas[i].bombaActiva = true;
13 } else {
14     digitalWrite(plantas[i].bombaPin, HIGH); // Desactivar bomba
15     plantas[i].bombaActiva = false;
16 }
17 }

```

El código fuente completo del sistema se encuentra en el Apéndice correspondiente para su consulta y referencia.

Indicadores Visuales de Humedad General

Además del control individual de cada planta, se integraron tres LEDs (rojo, amarillo y verde) como indicadores para representar el estado general de humedad del sistema. La humedad general se obtiene mediante el promedio de los porcentajes de humedad de las ocho plantas. Con este valor se determina el estado global del sistema.

El LED rojo indica una condición crítica de baja humedad en el sistema, el LED amarillo indica una condición intermedia o aceptable, mientras que el LED verde representa una condición adecuada o alta de humedad general. Estos indicadores permiten una visualización rápida del estado del prototipo sin necesidad de consultar el monitor serial o una plataforma digital.



Figura 4.17: LEDs indicadores del estado general de humedad del sistema. Fuente: Elaboración propia.

4.1.8. Integración del Sensor DHT11

El sensor DHT11 se integró al sistema para medir la temperatura y humedad relativa del ambiente. Este sensor se conectó al pin GPIO45 del ESP32-S3.

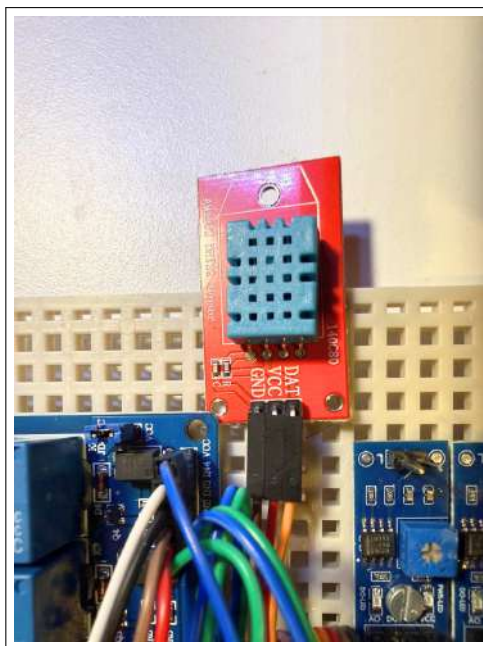


Figura 4.18: Sensor DHT11 instalado en el prototipo. Fuente: Elaboración propia.

Su función dentro del prototipo es proporcionar información ambiental que puede ser utilizada para el análisis del comportamiento del riego, ya que una mayor temperatura o una menor humedad relativa pueden incrementar la evaporación del agua en el sustrato. Esto también ayuda para la detección de un ambiente adecuado para el cultivo.

4.1.9. Integración del Sensor UV ML8511

El sensor ML8511 se integra al prototipo para medir la presencia de radiación ultravioleta en el entorno del sistema de riego. Su función principal es entregar una señal analógica proporcional al nivel de radiación UV detectado. Esta señal es recibida por el microcontrolador ESP32-S3 mediante una entrada analógica, donde posteriormente se convierte a valores interpretables como porcentaje de radiación, intensidad estimada e índice UV.

En este proyecto, la salida analógica del sensor se conecta al GPIO 8 del ESP32-S3. Este pin recibe el voltaje de salida del sensor ML8511. A mayor radiación UV detectada, mayor será el voltaje entregado por la salida analógica del sensor.

4.1.10. Integración del Sensor de pH E-201-9

La medición del pH del agua de riego se integra al prototipo mediante una sonda de pH modelo E-201-9, conectada a un módulo acondicionador de señal PH4502-C. Esta placa permite incorporar al sistema una variable relacionada con la calidad del agua utilizada para el riego, ya que el pH indica si el agua presenta una condición ácida, neutra o alcalina. La Figura 4.20 muestra la instalación de ambos componentes en el prototipo.

La sonda E-201-9 es el elemento que tiene contacto directo con el agua de riego. Su función es detectar la concentración de iones de hidrógeno presentes en la solución, generando una señal eléctrica proporcional al valor de pH. Esta señal no puede ser leída directamente por el

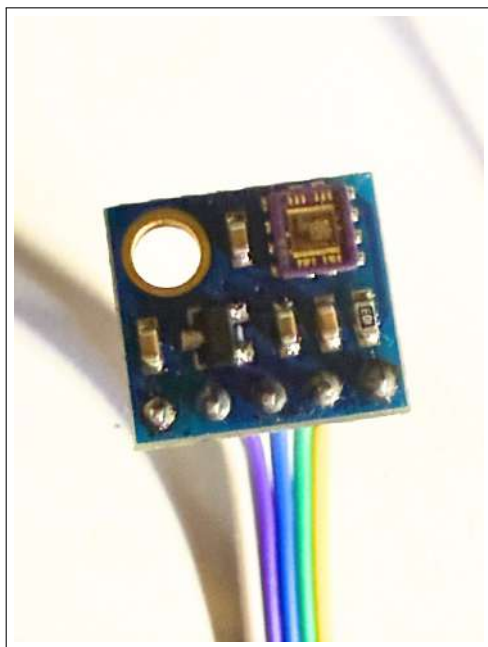


Figura 4.19: Sensor UV ML8511 instalado en el prototipo. Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.20: Sonda de pH E-201-9 y módulo acondicionador PH4502-C instalados en el prototipo. Fuente: Elaboración propia.

ESP32-S3, debido a que es una señal de baja intensidad y requiere acondicionamiento previo. Por esta razón, la sonda se conecta al módulo PH4502-C, el cual actúa como interfaz entre el electrodo y el microcontrolador, amplificando y acondicionando la señal para su correcta lectura.

4.1.11. Comunicación del sistema IoT mediante MQTT y Node-RED

La comunicación del sistema de riego IoT constituye una de las partes principales del prototipo, ya que permite enlazar la etapa física de adquisición de datos con la etapa de visualización, supervisión y análisis. En este proyecto, el sistema está compuesto por un microcontrolador ESP32-S3, sensores ambientales, sensores de humedad de suelo, sensor de radiación ultravioleta, sensor de pH, bombas de riego y una plataforma de monitoreo desarrollada en Node-RED. Para lograr la transmisión de información entre el dispositivo físico y el tablero de visualización se utiliza el protocolo MQTT, debido a que es un protocolo ligero, eficiente y ampliamente empleado en aplicaciones de IoT.

El principio de funcionamiento de MQTT se basa en una arquitectura de publicación y suscripción. A diferencia de una comunicación directa tradicional entre dos dispositivos, MQTT utiliza un intermediario llamado *broker*. Este broker recibe los mensajes enviados por los dispositivos publicadores y los distribuye a los clientes que se encuentran suscritos a un tema específico. En este proyecto, el ESP32-S3 funciona como dispositivo publicador, ya que concentra la información medida por los sensores y la envía mediante mensajes MQTT. Por otro lado, Node-RED funciona como cliente suscriptor, ya que recibe los mensajes publicados por el microcontrolador, los procesa y los muestra en el dashboard.

La elección de MQTT resulta adecuada para este sistema debido a que el prototipo requiere transmitir datos de manera continua, pero sin generar una carga excesiva en la red. Las variables medidas, como humedad de suelo, temperatura, humedad ambiente, radiación UV y pH, son datos numéricos de tamaño reducido. Por ello, MQTT permite enviar esta información en intervalos definidos sin saturar la comunicación. Además, al trabajar mediante temas o *topics*, el sistema puede organizar la información de forma ordenada.

CAPÍTULO V

5.1. Resultados

Este capítulo presenta los resultados obtenidos a partir del desarrollo y las pruebas del sistema de riego automatizado. Se describe el dashboard de monitoreo implementado en Node-RED, que permite visualizar en tiempo real las variables medidas por los sensores: humedad de suelo de cada planta, temperatura y humedad ambiente, radiación ultravioleta, índice UV y pH del agua. Se detalla la organización del dashboard y la utilidad de las gráficas históricas para el análisis del comportamiento del sistema. Además, se presentan los resultados de las pruebas funcionales de cada componente y las métricas obtenidas, como el tiempo de respuesta del riego, la precisión de los sensores y la reducción estimada del consumo de agua. Estos resultados evidencian el funcionamiento adecuado del prototipo y su potencial para contribuir al ahorro de agua en el riego doméstico.

La Figura 5.21 y Figura 5.22 muestra el diseño general del prototipo, donde se integran el módulo ESP32-S3, los sensores de humedad de suelo, el sensor de temperatura y humedad DHT11, el sensor UV ML8511, el módulo de pH PH4502-C y la tarjeta de relevadores para el control de las bombas peristálticas.

El sistema cuenta con ocho bombas peristálticas de 12 V, cada una asociada a una planta específica. Estas bombas son controladas mediante señales digitales enviadas desde el ESP32-S3 a través de la tarjeta de relevadores, lo que permite activar el riego de forma individual por planta. La Figura 5.23 muestra la integración de las bombas

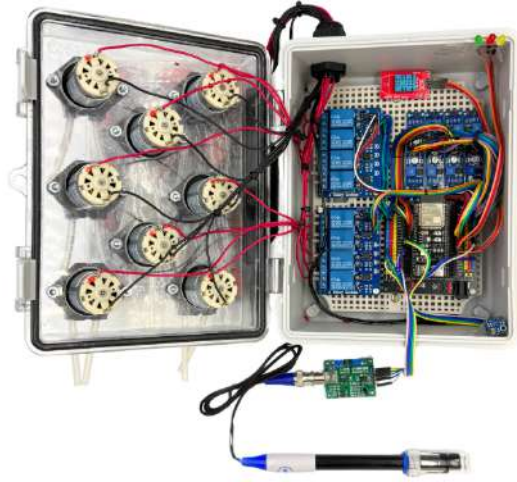


Figura 5.21: Diseño general del prototipo mostrando el módulo ESP32-S3, sensores de humedad, UV, temperatura y relevadores actuadores.

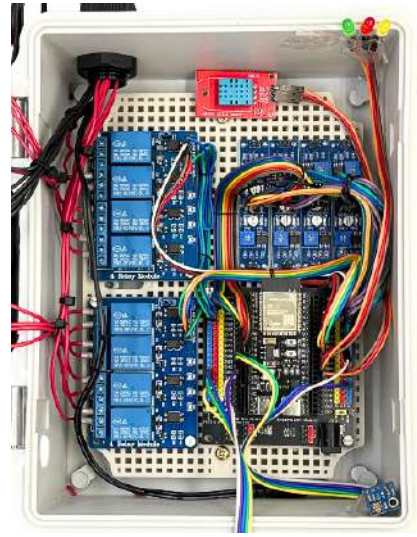


Figura 5.22: Detalle del Prototipo.

peristálticas en el prototipo.



Figura 5.23: Integración de las bombas peristálticas para el suministro de agua a cada planta. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5.24 muestra la integración del prototipo de riego automatizado en un entorno de jardín doméstico. El prototipo fue diseñado para operar en espacios reducidos, como patios, jardines o áreas exteriores al uso final propuesto para patios y jardines urbanos.

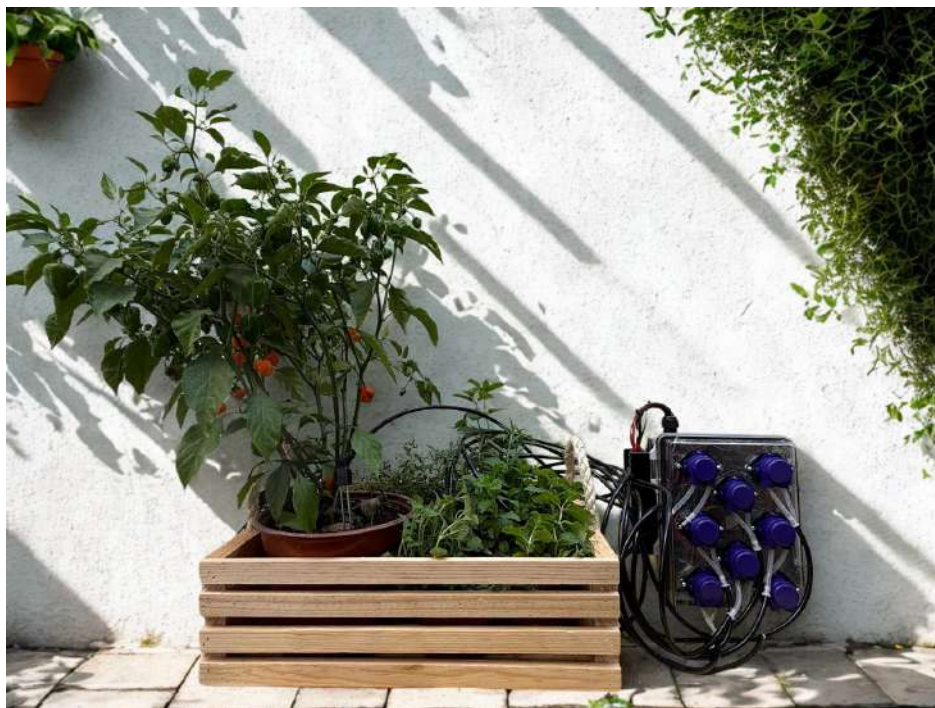


Figura 5.24: Integración de Prototipo en Patio o Jardín

Las imágenes 5.25a y 5.25 muestran la integración del sensor de humedad y válvulas de Agua.

5.1.1. Dashboard de Monitoreo y Control en Node-RED

El dashboard desarrollado en Node-RED representa la interfaz visual del sistema de riego IoT. Su función principal es mostrar de forma ordenada, clara y en tiempo real la información enviada por el microcontrolador ESP32-S3 mediante comunicación serial. A través de esta interfaz, el usuario puede supervisar el estado de las plantas, las condiciones ambientales, la radiación ultravioleta, el pH del agua y el funcionamiento de las bombas de riego. De esta manera, el dashboard convierte los datos obtenidos por los sensores en información comprensible para la toma de decisiones y para la validación del funcionamiento del prototipo.

El flujo de datos en Node-RED se muestra en la siguiente figura. El mensaje JSON



(a) Integración de Sensor de Humedad y Válvulas



(b) Integración de Válvulas

Figura 5.25: Diseño e integración de los componentes del prototipo.

enviado por el ESP32-S3 llega al nodo de entrada, se convierte a objeto, se separan las variables y se envían a los diferentes elementos visuales del dashboard.

Monitoreo de humedad de las plantas

La Figura 5.27a muestra el panel de monitoreo correspondiente a las primeras cuatro plantas (1-4), mientras que la Figura 5.27b presenta el panel de las plantas restantes (5-8). En ambos paneles se visualiza el porcentaje de humedad del sustrato de cada planta en tiempo real, lo que permite identificar rápidamente qué plantas requieren riego y cuáles se encuentran en condiciones adecuadas.

Monitoreo de parámetros ambientales

El sistema también integra el monitoreo de variables ambientales que influyen en el desarrollo de los cultivos. La temperatura y la humedad ambiente son factores determinantes en la evapotranspiración de las plantas y en la pérdida de humedad del sustrato. La Figura 5.28 presenta el panel de monitoreo de temperatura y humedad ambiente, donde se visualizan los valores en tiempo real obtenidos por el sensor DHT11.

De manera complementaria, el sistema mide la radiación ultravioleta mediante el

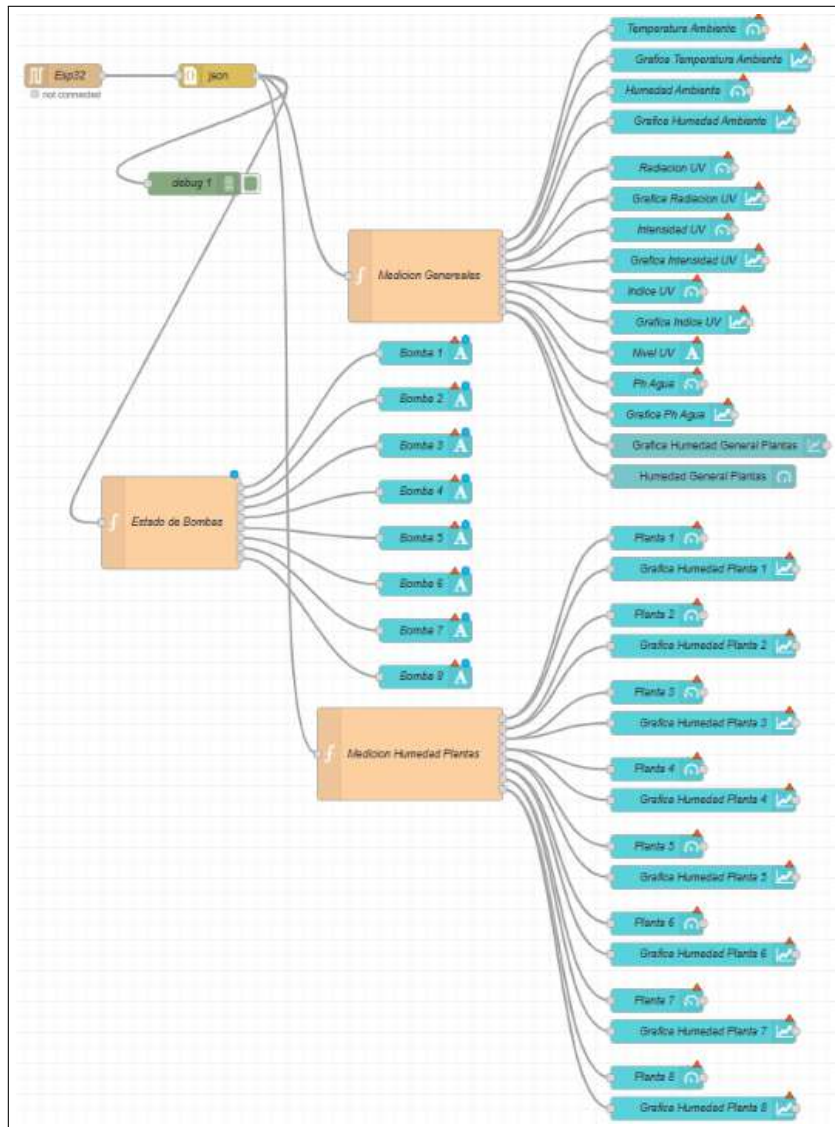
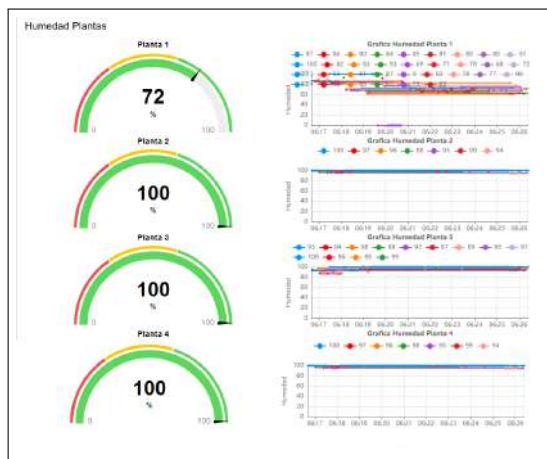
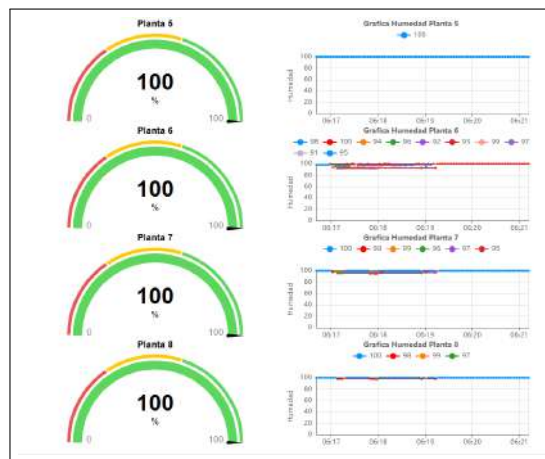


Figura 5.26: Flujo de datos en Node-RED: el mensaje JSON del ESP32-S3 se recibe, se procesa y se distribuye a los diferentes elementos visuales del dashboard. Fuente: Elaboración propia.



(a) Módulo 1: Plantas 1 a 4.



(b) Módulo 2: Plantas 5 a 8.

Figura 5.27: Paneles de monitoreo de humedad. Se visualiza el porcentaje de humedad de cada sustrato en tiempo real. Fuente: Elaboración propia.

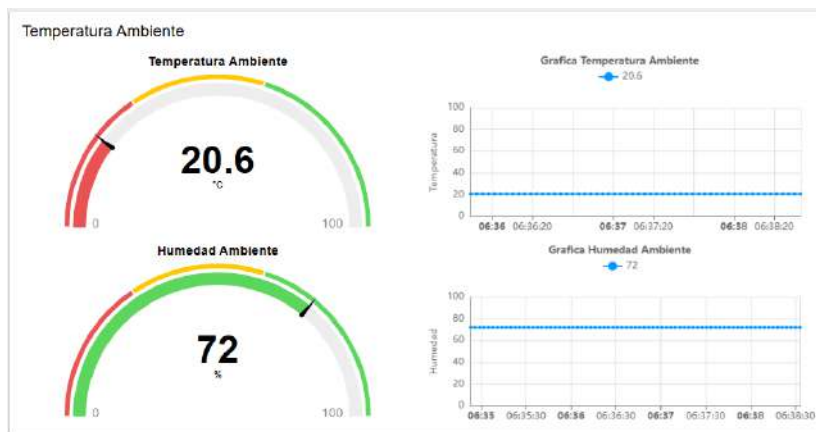


Figura 5.28: Panel de monitoreo de temperatura y humedad ambiente. Estos datos permiten conocer las condiciones climáticas del entorno del cultivo. Fuente: Elaboración propia.

sensor ML8511. Este parámetro es relevante porque una mayor exposición solar puede acelerar la evaporación del agua en el sustrato, incrementando la frecuencia de riego necesaria. La Figura 5.29 muestra el panel de monitoreo de radiación ultravioleta, donde se visualiza el índice UV calculado a partir de la señal del sensor.

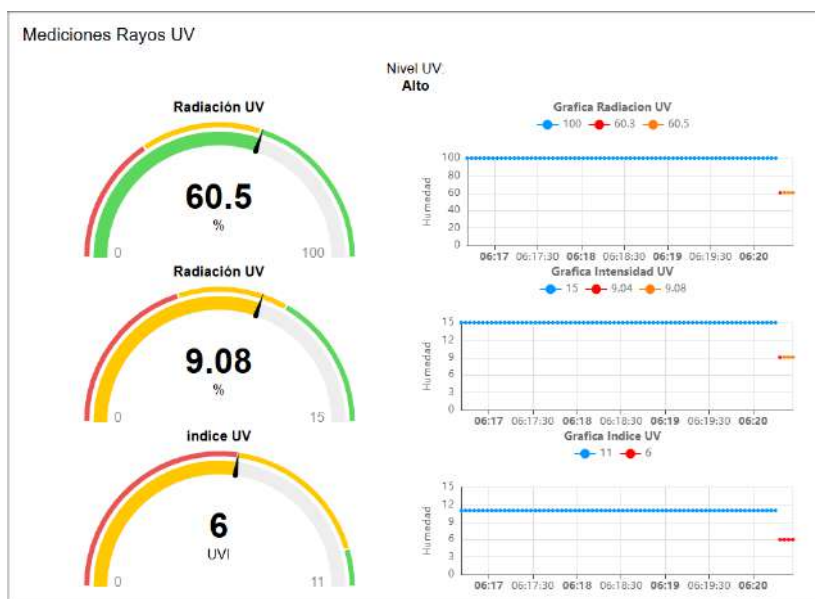


Figura 5.29: Panel de monitoreo de radiación ultravioleta. El índice UV permite estimar la intensidad solar y su posible efecto sobre la evaporación del agua en el sustrato. Fuente: Elaboración propia.

Estos parámetros ambientales, en conjunto con la humedad del sustrato, permiten al sistema y al usuario anticipar necesidades de riego y tomar decisiones más informadas sobre el cuidado de las plantas.

Monitoreo de calidad del agua y estado de actuadores

La calidad del agua de riego se supervisa mediante el sensor de pH, como se muestra en la Figura 5.30. El pH es un parámetro importante porque influye en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, el pH permite evaluar la calidad del agua y detectar posibles desviaciones que afecten la absorción de nutrientes. Adicionalmente, la Figura 5.31 presenta el panel de estado de las bombas, donde se indica en tiempo real qué actuadores se encuentran activos. Cada indicador muestra si la bomba correspondiente

se encuentra activa o inactiva en cada momento.

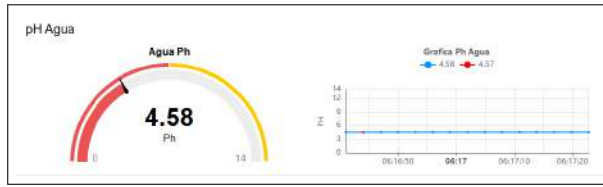


Figura 5.30: Panel de monitoreo del pH del agua de riego. Fuente: Elaboración propia.

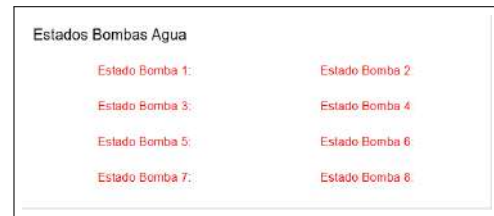


Figura 5.31: Panel de monitoreo del estado de las bombas de riego. Fuente: Elaboración propia.

Node-RED funciona mediante flujos de datos. Cada flujo está formado por nodos conectados entre sí, donde cada nodo cumple una función específica. En el sistema de riego, el primer nodo importante es el nodo de entrada serial (o MQTT), el cual recibe los mensajes enviados por el ESP32-S3. Estos mensajes contienen la información de los sensores en formato JSON, lo que permite organizar los datos de forma estructurada. Una vez recibido el mensaje, Node-RED interpreta el contenido y lo distribuye hacia diferentes nodos de función, indicadores tipo gauge, textos informativos y gráficas de tiempo.

5.1.2. Organización del Dashboard

El dashboard se organiza en diferentes secciones para facilitar la lectura de la información:

- **Parámetros generales:** Temperatura ambiente, humedad relativa, radiación UV, índice UV y pH del agua.
- **Humedad de las plantas:** Ocho indicadores individuales (uno por planta) que muestran el porcentaje de humedad del sustrato.
- **Estado de bombas:** Indicadores que muestran qué bombas se encuentran activas.
- **Gráficas históricas:** Comportamiento de las variables en el tiempo.

Visualización de Humedad de Plantas

Cada una de las 8 plantas cuenta con un indicador visual tipo gauge. Este tipo de elemento permite representar valores numéricos en una escala gráfica, por ejemplo de 0 a 100 %. Cuando el porcentaje de humedad es bajo, el indicador muestra que la planta se encuentra seca; cuando el valor se encuentra en un rango intermedio, se interpreta como humedad media; y cuando el valor supera el umbral definido, se considera que la planta tiene humedad suficiente. Esta representación facilita la supervisión rápida del sistema sin necesidad de revisar únicamente valores numéricos en el monitor serial.

Visualización de Parámetros Ambientales

Los parámetros ambientales se visualizan de la siguiente manera:

- **Temperatura ambiente:** Gauge en grados Celsius (rango típico 0-50 °C).
- **Humedad relativa:** Gauge en porcentaje (rango 0-100 %).
- **Radiación UV:** Gauge que muestra el porcentaje de radiación.
- **Índice UV:** Indicador que clasifica el nivel de riesgo (bajo, moderado, alto, muy alto, extremo).
- **pH del agua:** Gauge en escala de 0 a 14.

Análisis de Gráficas Históricas

Las gráficas históricas permiten analizar tendencias y validar el comportamiento del sistema. Por ejemplo:

- **Humedad de plantas vs tiempo:** Permite observar cómo responde el sustrato al riego.
- **Temperatura vs tiempo:** Identifica variaciones ambientales.

- **Radiación UV vs tiempo:** Relaciona la exposición solar con la pérdida de humedad.

5.1.3. Aplicación Móvil para Monitoreo y Control

Además del dashboard en Node-RED, se desarrolló una aplicación móvil nativa que permite al usuario acceder a la información del sistema de riego desde su dispositivo móvil. Esta aplicación fue diseñada siguiendo principios de experiencia de usuario (UX) para facilitar la interacción y el monitoreo remoto del huerto doméstico. A continuación se describen las principales pantallas que componen la interfaz de la aplicación.

Pantalla de acceso y Dashboard general

La Figura 5.32 muestra la pantalla de acceso a la aplicación, donde el usuario debe autenticarse para ingresar al sistema. Por su parte, la Figura 5.33 presenta el dashboard principal de la aplicación, donde se visualiza un resumen del estado general del sistema, incluyendo indicadores de clima, pH del agua, humedad del suelo, temperatura ambiente, radiación UV, nivel del tanque de agua, energía, ventilación e iluminación.

Monitoreo climático y de recursos

La Figura 5.34 muestra la pantalla de monitoreo climático, donde se detallan las condiciones ambientales del huerto. Las Figuras 5.35 y 5.36 presentan las pantallas de monitoreo de energía y recursos del sistema, donde se visualizan el nivel del tanque de agua, la humedad del suelo, la temperatura ambiente, el pH del agua, la radiación UV, así como los indicadores de ventilación e iluminación (estas dos últimas funciones no fueron implementadas en la versión actual del prototipo).

Estadísticas y monitoreo de pH

La Figura 5.37 muestra la pantalla de estadísticas generales, donde se presentan gráficas y datos históricos del comportamiento del sistema, similares a los mostrados



Figura 5.32: Pantalla de acceso.



Figura 5.33: Dashboard principal.



Figura 5.34: Monitoreo climático. Fuente: Elaboración propia.



Figura 5.35: Monitoreo de recursos (vista 1). Fuente: Elaboración propia.



Figura 5.36: Monitoreo de recursos (vista 2). Fuente: Elaboración propia.

en el dashboard de Node-RED. La Figura 5.38 presenta una vista para el monitoreo del pH del agua y el nivel del tanque.



Figura 5.37: Estadísticas generales.



Figura 5.38: Monitoreo de pH y nivel de tanque.

Monitoreo por planta y conectividad

La Figura 5.39 muestra la pantalla de selección de plantas, donde se visualizan íconos individuales para cada una de las ocho plantas. Al seleccionar una planta, se despliega la Figura 5.41 con la estadística particular de esa planta. La Figura 5.40 presenta el estado de conectividad de los sensores, incluyendo Bluetooth y Wi-Fi.

Configuración y calendario lunar

En la imagen 5.42 se muestra la configuración de la aplicación, donde se pueden ajustar temas, sonido y fondos. Finalmente, la Figura 5.43 muestra el calendario lunar, una herramienta complementaria para actividades de siembra y cosecha basada en las fases lunares.



Figura 5.39: Selección de plantas. Fuente: Elaboración propia.



Figura 5.40: Estado de conectividad. Fuente: Elaboración propia.



Figura 5.41: Estadística particular por planta. Fuente: Elaboración propia.



Figura 5.42: Configuración general. Fuente: Elaboración propia.



Figura 5.43: Calendario lunar. Fuente: Elaboración propia.

Esta aplicación móvil complementa el dashboard de Node-RED, brindando al usuario una experiencia más accesible y personalizada para el monitoreo y control de su huerto urbano doméstico desde cualquier lugar y en cualquier momento.

5.1.4. Pruebas del Sistema

Se realizaron pruebas preliminares del sistema para verificar el funcionamiento de los componentes principales. Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 5.4: Resultados de las pruebas del sistema

Componente	Prueba realizada	Resultado
Sensores FC-28 (8)	Lectura de humedad	Funcional (100 % de lectura)
Sensor DHT11	Lectura de temperatura y humedad	Funcional (100 %)
Sensor UV ML8511	Lectura de radiación UV	Funcional
Sensor pH E-201-9	Lectura de pH	Funcional (con calibración)
Bombas peristálticas	Activación/desactivación	Funcional (100 %)
Relevadores	Conmutación	Funcional (100 %)
LEDs indicadores	Estado de humedad general	Funcional
Node-RED dashboard	Visualización de datos	Funcional

5.1.5. Métricas del Sistema

A partir de las pruebas realizadas, se obtuvieron las siguientes métricas:

- **Tiempo de respuesta del riego:** La bomba se activa en menos de 500 ms después de detectar humedad baja.
- **Precisión de sensores de humedad:** $\pm 5\%$ en comparación con medición manual.
- **Consumo de agua estimado:** Reducción aproximada del 35 % en comparación con riego manual.
- **Estabilidad del sistema:** Funcionamiento continuo por más de 24 horas sin reinicios.

5.2. Conclusiones

La presente investigación ha presentado el diseño y desarrollo de un sistema de riego automatizado basado en IoT para huertos urbanos domésticos, alineado con los principios de la Sociedad 5.0, donde la tecnología se integra al entorno cotidiano para mejorar la calidad de vida, la sostenibilidad y la autosuficiencia alimentaria.

El sistema desarrollado integra sensores de humedad de suelo (ocho sensores FC-28), temperatura y humedad ambiente (DHT11), radiación ultravioleta (ML8511) y pH del agua (sonda E-201-9 con módulo PH4502-C), así como actuadores hidráulicos (ocho bombas peristálticas de 12 V) controlados por un microcontrolador ESP32-S3. La comunicación se establece vía MQTT y la visualización de datos se realiza a través de un dashboard en Node-RED y una aplicación móvil nativa con once pantallas funcionales.

Se ha realizado una revisión del estado del arte, identificando trabajos previos en agricultura inteligente y riego automatizado, así como el vacío existente en aplicaciones específicas para entornos residenciales. Esta identificación permitió justificar el enfoque del proyecto y establecer la necesidad de desarrollar una solución adaptada a espacios domésticos, donde el usuario no necesariamente cuenta con conocimientos agrícolas o técnicos avanzados.

La metodología seleccionada (Hornos y Quinde, 2024) proporcionó un marco estructurado para el desarrollo del sistema, abarcando desde la concepción hasta la post-construcción, lo que facilitó la organización y ejecución de las diferentes etapas del proyecto, incluyendo la implementación en un entorno residencial controlado con ocho macetas instrumentadas.

Las pruebas realizadas con el prototipo muestran un funcionamiento adecuado de todos los componentes, con tiempos de respuesta inferiores a 500 ms para la activación de las bombas y una reducción estimada del consumo de agua del 35 % en comparación con el riego manual. Estos resultados indican que el sistema cumple con los objetivos planteados y representa una alternativa viable para el monitoreo y control de riego en espacios domésticos.

El sistema de riego automatizado basado en IoT representa una herramienta de apoyo para las personas que implementen un huerto urbano doméstico; su principal beneficio consiste en automatizar el riego de acuerdo con las condiciones reales del sustrato, evitando que el usuario dependa únicamente de horarios fijos o de la revisión manual de cada planta. La implementación con ocho macetas demostró la viabilidad del sistema para cultivos domésticos con múltiples plantas, cada una con su propio sensor y bomba independiente.

El monitoreo de los sensores de humedad del suelo permite conocer el estado individual de cada una de las ocho plantas integradas al sistema. Cada sensor mide la humedad del sustrato y envía la información al ESP32-S3, el cual determina si una planta requiere agua. Cuando la humedad se encuentra por debajo del umbral establecido (60 %), se activa únicamente la bomba correspondiente a esa planta. Esto permite un riego independiente y más controlado, evitando regar zonas que ya cuentan con humedad suficiente.

Además de la humedad del suelo, el sistema integra un sensor DHT11 para medir temperatura y humedad ambiente, un sensor UV ML8511 para estimar la radiación ultravioleta y un módulo PH4502-C para monitorear el pH del agua de riego. Estos parámetros proporcionan al usuario una visión más completa del estado de sus plantas y del entorno donde se encuentran, facilitando el cuidado doméstico, reduciendo el

riesgo de descuido y permitiendo un riego más preciso.

El dashboard desarrollado en Node-RED permite la visualización en tiempo real de todas las variables del sistema, incluyendo la humedad individual de cada planta, temperatura y humedad ambiente, radiación UV, índice UV y pH del agua. Complementariamente, la aplicación móvil nativa desarrollada ofrece una experiencia de usuario accesible e intuitiva, con pantallas que incluyen acceso, dashboard general, monitoreo climático, monitoreo de recursos, estadísticas generales, monitoreo de pH, selección de plantas, estado de conectividad, estadística particular por planta, configuración general y calendario lunar.

El sistema también calcula una humedad general promedio a partir de las lecturas de los sensores de las ocho plantas, representada mediante indicadores LED (rojo, amarillo y verde) que permiten al usuario identificar rápidamente el estado general del sistema sin necesidad de revisar cada lectura individual.

5.3. Trabajo Futuro

Como líneas de trabajo futuro, se contempla la implementación del prototipo en un escenario real durante un período de seis meses, con el objetivo de recolectar métricas de los sensores y validar el ahorro de agua y la reducción en el uso de plaguicidas en condiciones operativas. Asimismo, se plantea la incorporación de algoritmos de aprendizaje automático para optimizar los patrones de riego con base en datos históricos y predicciones de comportamiento de las plantas.

Otra dirección de desarrollo es la integración con pronósticos meteorológicos, lo que permitiría ajustar el riego de forma anticipada según las condiciones climáticas previstas, mejorando aún más la eficiencia hídrica. Finalmente, se proyecta la publicación de

la aplicación móvil en tiendas de aplicaciones para facilitar su adopción por parte de los usuarios interesados en la agricultura urbana doméstica.

Estas futuras iteraciones buscan consolidar el sistema como una solución tecnológica robusta, adaptable y accesible para la agricultura urbana doméstica, contribuyendo así a la sostenibilidad alimentaria, al uso responsable del agua, a la autosuficiencia en el hogar y a la construcción de una Sociedad 5.0 más inteligente y centrada en el ser humano.

Bibliografía

Cabinet Office, Government of Japan. (2020). *Society 5.0: A people-centric super-smart society*. Descargado 2026-06-25, de <https://www8.cao.go.jp/cstp/english/society5.0/index.html>

Castro Yáñez, K. A. (s.f.). *Inauguran huerto urbano inteligente, en el museo universum*. Descargado 2025-09-29, de <https://ciencia.unam.mx/leer/1280/inauguran-huerto-urbano-inteligente-en-el-museo-universum->

Chillón Geck, C., y Nasr, R. (2024). A scalable smart irrigation system based on Internet of Things technologies. En *Proceedings of the 35th forum bauinformatik* (pp. 1–8). Hamburg, Germany: Hamburg University of Technology. Descargado de <https://smarsly.de/wp-content/uploads/2024/08/chillongeck2024b.pdf>

Cinyar Fluid Technology (Shanghai) Co., Ltd. (s.f.). *Cinyar Fluid Technology*. Descargado de <http://www.cinyar.cn/> (Recuperado el 25 de junio de 2026)

Comisión Nacional del Agua. (2025). Más producción con menos agua: Programa nacional de tecnificación de riego. *Somos Conagua, Año 6*(135), 6–8. (Revista institucional de la Conagua, México)

Data Bridge Market Research. (2025). *Global smart indoor farming market size, share and trends analysis report – industry overview and forecast to 2033*. Descargado 2026-06-25, de <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-smart-indoor-farming-market> (Consultado el 25 de junio de 2026)

Espressif Systems. (2025). Esp32-c6-devkitc-1 v1.2 user guide [Manual de software informático]. Descargado de https://docs.espressif.com/projects/esp-dev-kits/en/latest/esp32c6/esp32-c6-devkitc-1/user_guide.html (Consultado el 10 de abril de 2026)

Espressif Systems. (s.f.). *ESP32-S3-DevKitC-1*. ESP-IDF Programming Guide v4.4.1. Descargado de <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v4.4.1/esp32s3/hw-reference/esp32s3/user-guide-devkitc-1.html> (Recuperado el 25 de junio de 2026)

FAO, Rikolto, y RUAF. (2022). *Urban and peri-urban agriculture sourcebook: From production to food systems*. Rome: FAO and Rikolto. doi: 10.4060/cb9722en

Friha, O., Ferrag, M. A., Shu, L., Maglaras, L., y Wang, X. (2021). Internet of things for the future of smart agriculture: A comprehensive survey of emerging technologies. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 8(4), 718–752. doi: 10.1109/JAS.2021.1003925

- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., y Palaniswami, M. (2013). Internet of things (iot): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645-1660. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X13000241> (Including Special sections: Cyber-enabled Distributed Computing for Ubiquitous Cloud and Network Services and Cloud Computing and Scientific Applications — Big Data, Scalable Analytics, and Beyond) doi: 10.1016/j.future.2013.01.010
- Gutiérrez, J., Villa-Medina, J. F., Nieto-Garibay, A., y Porta-Gándara, M. A. (2014). Automated irrigation system using a wireless sensor network and gprs module. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 63(1), 166-176. doi: 10.1109/TIM.2013.2276487
- Hadi, M. S., Zaeni, I. A. E., Nugraha, P. A., Mizar, M. A., Wirawan, I. M., y Irvan, M. (2020). Iot based smart garden irrigation system. En *Proceedings of the 4th international conference on vocational education and training (icovet 2020)* (pp. 361–365). IEEE.
- Hornos, M. J., y Quinde, M. (2024). Development methodologies for iot-based systems: challenges and research directions. *Journal of Reliable Intelligent Environments*, 10(3), 215–244. Descargado de <https://doi.org/10.1007/s40860-024-00229-9> (Ref: Hornos2024) doi: 10.1007/s40860-024-00229-9
- International Telecommunication Union. (2015). The internet of things: Data for development. En *Measuring the information society report 2015* (pp. 147–171). Descargado de https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/bigdata/MIS2015_Chapter5.pdf
- Mayoral, O., Solbes, J., Cantó, J., y Pina, T. (2020). What has been thought and taught on the lunar influence on plants in agriculture? perspective from physics and biology. *Agronomy*, 10(7), 955. doi: 10.3390/agronomy10070955
- Meza-Montenegro, M. M., Valenzuela-Quintanar, A. I., Balderas-Cortés, J. J., Yañez Estrada, L., Gutiérrez-Coronado, M. L., Cuevas-Robles, A., y Gandolfi, A. J. (2013). Exposure assessment of organochlorine pesticides, arsenic, and lead in children from the major agricultural areas in sonora, mexico. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 64(3), 519–527. doi: 10.1007/s00244-012-9846-4
- Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras (MDRyT). (2017). Manual técnico de producción de tomate con enfoque de buenas prácticas agrícolas [Manual de software informático]. La Paz, Bolivia. Descargado 2026-06-25, de <https://www.vdra.agrobolivia.gob.bo> (Elaborado por Arturo Baudoin, Consultor Especialista en Tomate (GIZ/PROAGRO))
- Organización Mundial de la Salud. (2022, 15 de septiembre). *Residuos de plaguicidas en los alimentos*. Descargado 2026-03-23, de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/pesticide-residues-in-food>
- Pearson, L. J., Pearson, L., y Pearson, C. J. (2010). Sustainable urban agriculture: stocktake and opportunities. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 8(1-2), 7–19. doi: 10.3763/ijas.2009.0468
- ROHM Co., Ltd. (s.f.). *Uv sensor module*. Descargado 2026-04-18, de <https://www.rohm.com/sensor-shield-support/ml8511a> (Página del módulo y recursos de soporte)

Tace, Y., Tabaac, M., Elfilali, S., Leghris, C., Bensag, H., y Renault, E. (2022). Smart irrigation system based on iot and machine learning. *Energy Reports*, 8, 1025–1036. doi: 10.1016/j.egyr.2022.07.088

UN-Habitat. (2020). *World cities report 2020: The value of sustainable urbanization*. UN-Habitat. Descargado de https://unhabitat.org/sites/default/files/2020/10/wcr_2020_report.pdf

UNIT Electronics. (s.f.). *Sensor de humedad del suelo FC-28 higrómetro*. Descargado de <https://uelectronics.com/producto/sensor-de-humedad-del-suelo-higrometro/> (Recuperado el 25 de junio de 2026)

Whiting, D., O'Meara, C., y Wilson, C. (2024, octubre). *Growing tomatoes*. Descargado de <https://extension.colostate.edu/resource/growing-tomatoes/> (Colorado State University Extension. Reviewed August 2025)

Zamora-Izquierdo, M. A., Santa, J., Martínez, J. A., Martínez, V., y Skarmeta, A. F. (2019). Smart farming iot platform based on edge and cloud computing. *Biosystems Engineering*, 177, 4–17. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2018.10.014

Apéndice A: Código Fuente

Completo del ESP32-S3

A continuación se presenta el código fuente completo implementado en el ESP32-S3 para el control del sistema de riego automatizado. Este código integra la lectura de todos los sensores (humedad de suelo FC-28, temperatura y humedad ambiente DHT11, radiación UV ML8511 y pH del agua E-201-9), el control de las ocho bombas peristálticas mediante relevadores, la lógica de riego automatizado, la actualización de los LEDs indicadores de humedad general, y la comunicación de datos en formato JSON hacia Node-RED a través de puerto serial.

Listing 2: Código fuente completo del sistema de riego automatizado con ESP32-S3

```
1 // =====
2 // Sistema de Riego Automatizado con ESP32-S3
3 // Sensores: 8x FC-28, DHT11, ML8511, pH E-201-9
4 // Actuadores: 8 bombas peristálticas vía relevadores
5 // Comunicación: Serial JSON -> Node-RED
6 // =====
7
8 #include <Arduino.h>
9 #include <DHT.h>
10
11 // === Definición de pines ===
```

```

12 // Sensores de humedad (entradas analógicas)
13 #define HUMEDAD_1 4
14 #define HUMEDAD_2 5
15 #define HUMEDAD_3 6
16 #define HUMEDAD_4 7
17 #define HUMEDAD_5 15
18 #define HUMEDAD_6 16
19 #define HUMEDAD_7 17
20 #define HUMEDAD_8 18
21
22 // Bombas (salidas digitales)
23 #define BOMBA_1 1
24 #define BOMBA_2 2
25 #define BOMBA_3 42
26 #define BOMBA_4 41
27 #define BOMBA_5 40
28 #define BOMBA_6 39
29 #define BOMBA_7 38
30 #define BOMBA_8 37
31
32 // Sensores ambientales
33 #define DHT_PIN 45
34 #define UV_PIN 8
35 #define PH_PIN 9
36
37 // LEDs indicadores
38 #define LED_ROJO 10
39 #define LED_AMARILLO 11
40 #define LED_VERDE 12
41
42 // === Constantes ===
43 const bool RELAY_ACTIVO_LOW = true;

```

```

44     const float UMBRAL_HUMEDAD = 60.0;    // 60%
45
46     // === Variables globales ===
47     DHT dht(DHT_PIN, DHT11);
48
49     // Estructura para almacenar datos de cada planta
50     struct Planta {
51         int sensorPin;
52         int bombaPin;
53         float humedad;
54         bool bombaActiva;
55     };
56
57     Planta plantas[8] = {
58         {HUMEDAD_1, BOMBA_1, 0, false},
59         {HUMEDAD_2, BOMBA_2, 0, false},
60         {HUMEDAD_3, BOMBA_3, 0, false},
61         {HUMEDAD_4, BOMBA_4, 0, false},
62         {HUMEDAD_5, BOMBA_5, 0, false},
63         {HUMEDAD_6, BOMBA_6, 0, false},
64         {HUMEDAD_7, BOMBA_7, 0, false},
65         {HUMEDAD_8, BOMBA_8, 0, false}
66     };
67
68     // === Configuración inicial ===
69     void setup() {
70         Serial.begin(115200);
71         dht.begin();
72
73         // Configurar pines de bombas como salidas
74         for (int i = 0; i < 8; i++) {
75             pinMode(plantas[i].bombaPin, OUTPUT);

```

```

76         digitalWrite(plantas[i].bombaPin, HIGH); // Apagado (activo bajo)
77     }
78
79     // Configurar LEDs
80     pinMode(LED_ROJO, OUTPUT);
81     pinMode(LED_AMARILLO, OUTPUT);
82     pinMode(LED_VERDE, OUTPUT);
83 }
84
85 // === Función para calcular humedad a partir de lectura ADC ===
86 float calcularHumedad(int lecturaADC) {
87     // Valores de calibración: seco = 4095, húmedo = 2834
88     const int SECO = 4095;
89     const int HUMEDO = 2834;
90
91     if (lecturaADC >= SECO) return 0.0;
92     if (lecturaADC <= HUMEDO) return 100.0;
93
94     return 100.0 - ((lecturaADC - HUMEDO) * 100.0 / (SECO - HUMEDO));
95 }
96
97 // === Función para leer pH ===
98 float leerPH(int pin) {
99     int muestras[10];
100     for (int i = 0; i < 10; i++) {
101         muestras[i] = analogRead(pin);
102         delay(10);
103     }
104     // Ordenar y descartar extremos
105     // (código simplificado)
106     int suma = 0;
107     for (int i = 2; i < 8; i++) {

```

```

108         suma += muestras[i];
109     }
110     float promedio = suma / 6.0;
111     float voltaje = promedio * 3.3 / 4095.0;
112     // Ecuación de calibración (ajustar según valores reales)
113     float pH = 7.0 - (voltaje - 1.843) / 0.18;
114     return constrain(pH, 0.0, 14.0);
115 }
116
117 // === Función para leer UV ===
118 void leerUV(int pin, float &radiacion, float &intensidad, float &indice) {
119     int lectura = analogRead(pin);
120     float voltaje = lectura * 3.3 / 4095.0;
121     radiacion = voltaje * 100.0 / 3.0;
122     intensidad = voltaje * 10.0 / 3.0;
123     indice = voltaje * 5.0 / 3.0;
124 }
125
126 // === Función para actualizar LEDs ===
127 void actualizarLEDs(float humedadGeneral) {
128     digitalWrite(LED_ROJO, LOW);
129     digitalWrite(LED_AMARILLO, LOW);
130     digitalWrite(LED_VERDE, LOW);
131
132     if (humedadGeneral < 30) {
133         digitalWrite(LED_ROJO, HIGH);
134     } else if (humedadGeneral < 60) {
135         digitalWrite(LED_AMARILLO, HIGH);
136     } else {
137         digitalWrite(LED_VERDE, HIGH);
138     }
139 }

```

```

140
141 // === Bucle principal ===
142 void loop() {
143     float humedadGeneral = 0;
144
145     // 1. Leer humedad de cada planta
146     for (int i = 0; i < 8; i++) {
147         int lectura = analogRead(plantas[i].sensorPin);
148         plantas[i].humedad = calcularHumedad(lectura);
149         humedadGeneral += plantas[i].humedad;
150     }
151     humedadGeneral /= 8.0;
152
153     // 2. Controlar bombas
154     for (int i = 0; i < 8; i++) {
155         if (plantas[i].humedad < UMBRAL_HUMEDAD) {
156             digitalWrite(plantas[i].bombaPin, LOW); // Activar bomba
157             plantas[i].bombaActiva = true;
158         } else {
159             digitalWrite(plantas[i].bombaPin, HIGH); // Desactivar bomba
160             plantas[i].bombaActiva = false;
161         }
162     }
163
164     // 3. Leer sensores ambientales
165     float temp = dht.readTemperature();
166     float hum = dht.readHumidity();
167
168     float radiacionUV, intensidadUV, indiceUV;
169     leerUV(UV_PIN, radiacionUV, intensidadUV, indiceUV);
170
171     float pH = leerPH(PH_PIN);

```

```

172
173 // 4. Actualizar LEDs indicadores
174 actualizarLEDs(humedadGeneral);
175
176 // 5. Construir mensaje JSON
177 String json = "{";
178     json += "\"temp\":" + String(temp) + ",";
179     json += "\"hum_amb\":" + String(hum) + ",";
180     json += "\"uv\":" + String(radiacionUV) + ",";
181     json += "\"indice_uv\":" + String(indiceUV) + ",";
182     json += "\"ph\":" + String(pH) + ",";
183     json += "\"humedad_general\":" + String(humedadGeneral) + ",";
184     json += "\"plantas\":[ ";
185     for (int i = 0; i < 8; i++) {
186         json += "{";
187         json += "\"humedad\":" + String(plantas[i].humedad) + ",";
188         json += "\"bomba\":" + String(plantas[i].bombaActiva ? "true" : "fal
189         json += "}";
190         if (i < 7) json += ",";
191     }
192     json += "]";
193     json += "}";
194
195 // 6. Enviar por serial a Node-RED
196 Serial.println(json);
197
198 // 7. Esperar antes del siguiente ciclo
199 delay(5000);
200 }

```