



Automated Monitoring System for Hydroponic Crops: Integration of Smart Sensors and IoT Connectivity for Urban Agriculture



David J. Fuentes, Ingeniero de Telecomunicaciones¹ , Franco J. Claros, Técnico Electrónico² ,
^{1,2}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, c25670@utp.edu.pe, U22212743@utp.edu.pe

Abstract– This article presents the design and implementation of an automated monitoring system for hydroponic crops based on smart sensors and IoT connectivity. An ESP32 microcontroller is used as the processing unit, collecting data from pH, electrical conductivity (EC), dissolved oxygen (DO), temperature, and oxidation-reduction potential (ORP) sensors. The information is transmitted in real time via the MQTT protocol to a cloud server and viewed through the MyMQTT application, facilitating remote monitoring of the system.

The process includes sensor calibration with reference standard solutions, using specific tolerances for each parameter, ensuring measurement stability and accuracy. The results show that the system's implementation improves operational efficiency, reduces water and nutrient use during the first 35 days, and minimizes manual intervention. Furthermore, an estimated cost reduction was observed compared to equivalent commercial systems. This proposal represents a sustainable, economical, and scalable solution for urban agriculture, aligned with the principles of automation and smart agriculture.

Keywords: IoT, MQTT, ESP32, automation, hydroponics.

Sistema Automatizado de Monitoreo para Cultivos Hidropónicos: Integración de Sensores Inteligentes y Conectividad IoT para la Agricultura Urbana

David J. Fuentes, Ingeniero de Telecomunicaciones¹ , Franco J. Claros, Técnico Electrónico² ,
^{1,2}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, c25670@utp.edu.pe, U22212743@utp.edu.pe

Resumen— Este artículo presenta el diseño e implementación de un sistema automatizado de monitoreo para cultivos hidropónicos, basado en sensores inteligentes y conectividad IoT. Se utiliza un microcontrolador ESP32 como unidad de procesamiento, el cual recopila datos de sensores de pH, conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD), temperatura y potencial de reducción-oxidación (ORP). La información es transmitida en tiempo real mediante el protocolo MQTT a un servidor en la nube y visualizada a través de la aplicación MyMQTT, facilitando la supervisión remota del sistema.

El proceso incluye la calibración de sensores con soluciones estándar de referencia, empleando tolerancias específicas para cada parámetro, lo que garantiza la estabilidad y precisión de las mediciones. Los resultados obtenidos evidencian que la implementación del sistema mejora la eficiencia operativa, reduce el uso de agua y nutrientes durante los primeros 35 días, y minimiza la intervención manual. Además, se observó una reducción estimada de costos frente a sistemas comerciales equivalentes. Esta propuesta representa una solución sostenible, económica y escalable para la agricultura urbana, alineada con los principios de automatización y agricultura inteligente.

Palabras clave: IoT, MQTT, ESP32, automatización, hidroponía.

I. INTRODUCCIÓN

La implementación de tecnologías IoT en cultivos hidropónicos ha demostrado ser una solución eficaz para optimizar la gestión de recursos y aumentar la eficiencia productiva en entornos agrícolas urbanos. Estudios recientes evidencian que estos sistemas permiten automatizar el monitoreo de variables críticas como el pH, la conductividad eléctrica (CE) y el oxígeno disuelto (OD), lo que reduce el desperdicio de agua y nutrientes, y garantiza condiciones estables para el desarrollo vegetal. Por ejemplo, en un sistema de fertirrigación inteligente, se logró una reducción del 50 % en el consumo de agua y un 30 % en el uso de fertilizantes, incrementando la productividad agrícola entre un 20 % y un 30 % [1].

El uso de microcontroladores como el ESP32, desarrollado por la empresa Espressif Systems, ha sido fundamental para el

desarrollo de sistemas embebidos de bajo costo en aplicaciones de automatización y monitoreo. El ESP32 es un microcontrolador de 32 bits con arquitectura dual core, que integra de manera nativa conectividad Wi-Fi y Bluetooth, permitiendo la comunicación inalámbrica sin necesidad de módulos externos adicionales. Su bajo consumo energético, alta capacidad de procesamiento y múltiples interfaces de comunicación (como I2C, SPI, UART y ADC) lo convierten en una plataforma versátil y eficiente para proyectos IoT [11] [14].

En el contexto de cultivos hidropónicos, el ESP32 permite la lectura simultánea de múltiples sensores y el procesamiento local de los datos antes de enviarlos a plataformas remotas. Al combinarse con protocolos como MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), diseñado específicamente para la transmisión ligera, rápida y confiable de datos en redes de ancho de banda limitado, se facilita la comunicación eficiente entre sensores, el microcontrolador y las aplicaciones móviles o interfaces de visualización en la nube. Esta arquitectura asegura un monitoreo en tiempo real, estable y escalable, ideal para entornos agrícolas urbanos que requieren control continuo con recursos limitados [14]. En una prueba con 400 plantas de lechuga, se recopilaron más de 6000 registros de temperatura y humedad en cinco meses, de los cuales 5063 fueron validados para el análisis, alcanzando un 89.37 % de precisión en la predicción mediante redes neuronales artificiales [3].

La fiabilidad del sistema también depende de la calibración periódica de los sensores [12]. Se ha demostrado que una calibración mensual con soluciones estándar permite mantener márgenes de error mínimos en las mediciones de pH y CE [4]. Además, el uso de técnicas de control como la inferencia difusa Mamdani ha mejorado significativamente la respuesta del sistema ante fluctuaciones, reduciendo la necesidad de intervención manual. Este método, propuesto por Ebrahim Mamdani en 1975, se basa en la lógica difusa, la cual permite tomar decisiones cuando las variables del sistema no son exactas, sino descritas en términos lingüísticos como “bajo”, “moderado” o “alto” [15].

A través de un conjunto de reglas si-entonces, el controlador analiza las condiciones del entorno (como niveles de pH o CE) y determina la acción más adecuada, logrando un ajuste progresivo y estable. En entornos experimentales, el sistema

logró estabilizar el pH en ciclos de control de 60 segundos, con un margen de error máximo de 91.86 milisegundos en la activación de las bombas dosificadoras [5]. Este tipo de control difuso resulta especialmente útil en aplicaciones agrícolas, donde las condiciones ambientales pueden variar constantemente y los modelos deterministas resultan poco eficientes o inflexibles [6].

Estos hallazgos respaldan el valor de los sistemas de monitoreo basados en IoT para la automatización de cultivos hidropónicos. Su capacidad de recopilar y transmitir datos confiables en tiempo real permite optimizar el uso de insumos y reducir costos operativos asociados a la supervisión constante. Sin embargo, persisten desafíos como la pérdida intermitente de paquetes de datos y la necesidad de mejorar la infraestructura de comunicación para garantizar una disponibilidad plena [7].

En América Latina, donde la agricultura urbana cobra cada vez mayor relevancia, se vuelve clave integrar tecnologías de monitoreo inteligentes. En este contexto, una colaboración entre una empresa brasileño-peruana y la academia ha impulsado el desarrollo de un prototipo de Sistema Automatizado de Monitoreo para Cultivos Hidropónicos, enfocado en zonas urbanas de Lima, Perú, y aplicado a cultivos como lechuga, tomate, espinaca y fresa. A partir de la necesidad de optimizar el monitoreo en sistemas hidropónicos urbanos, la presente investigación tiene como objetivo general:

OG: Implementar un sistema de monitoreo IoT para cultivos hidropónicos, garantizando la fiabilidad y precisión en la medición de variables clave como pH, CE, ORP y OD.

Para alcanzar este objetivo general, se plantean los siguientes dos objetivos específicos:

- OE1: Evaluar la precisión y estabilidad de las mediciones tras la calibración de los sensores integrados en el sistema.
- OE2: Analizar la efectividad del protocolo MQTT en la gestión y visualización de datos en tiempo real.

II. METODOLOGÍA

Esta investigación es de tipo aplicada, cuantitativa, no experimental y transversal. Se implementa un Sistema de Monitoreo IoT basado en sensores, un ESP32 y el protocolo MQTT, definido como la variable independiente. La variable dependiente corresponde a las mediciones hidropónicas, evaluando la precisión y estabilidad de parámetros como pH, CE, OD, temperatura y ORP.

A. Selección de equipamiento para la implementación

Para la implementación del sistema de monitoreo hidropónico, se seleccionó un ESP32-WROOM-32D por su

conectividad Wi-Fi y Bluetooth, capacidad de procesamiento de doble núcleo y compatibilidad con protocolos de comunicación como I2C y UART, esenciales para la adquisición y transmisión de datos en tiempo real.

Los sensores de Atlas Scientific fueron elegidos por su alta precisión en la medición de pH, conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD), temperatura y potencial de reducción-oxidación (ORP), parámetros fundamentales en hidroponía. La alimentación del sistema se gestiona mediante un regulador DC-DC TPS562209DDCT, que convierte 12V a 3.3V, garantizando estabilidad en los componentes electrónicos.

Para la transmisión de datos, se implementó el protocolo MQTT, permitiendo comunicación en tiempo real con un broker en la nube y visualización a través de la aplicación MyMQTT. Además, se utilizaron soluciones de calibración certificadas para asegurar mediciones precisas y confiables.

B. Procedimiento de recolección de datos

La recolección de datos inicia con la implementación del sistema de monitoreo IoT, compuesto por un ESP32, sensores de pH, CE, OD, temperatura y ORP, y comunicación mediante MQTT. Tras su integración, se verifica su operatividad y estabilidad antes de proceder con la recopilación de mediciones en tiempo real. Los datos son transmitidos a la nube y visualizados en el aplicativo MyMQTT, permitiendo un registro continuo en intervalos predefinidos. Se aplican protocolos de calibración para garantizar que las mediciones sean precisas y representativas del entorno hidropónico.

C. Análisis e interpretación de resultados.

El análisis no solo se enfoca en la precisión y estabilidad de las mediciones, sino también en la eficiencia del sistema implementado. Se evalúa el desempeño del ESP32 y la conectividad MQTT, verificando que la transmisión de datos sea fluida y sin pérdidas. Además, se comparan las mediciones obtenidas con valores de referencia para validar su fiabilidad. Se examina cómo la implementación del sistema facilita la automatización y reduce la intervención manual en la supervisión de cultivos hidropónicos.

D. Limitaciones

La principal limitación radica en que la implementación se prueba en un entorno controlado, lo que podría diferir de escenarios más variables en campo abierto. Además, la dependencia de Wi-Fi y MQTT para la transmisión de datos podría verse afectada en condiciones de red inestables. Otro aspecto para considerar es la calibración de los sensores, ya que, aunque se utilizan soluciones estándar, estas tienen tolerancias que pueden generar variaciones mínimas en las mediciones.

E. Implicancias teóricas, prácticas y metodológicas

El estudio valida teóricamente la viabilidad de un sistema IoT en hidroponía, demostrando en la práctica su capacidad para optimizar el monitoreo en tiempo real. Metodológicamente, presenta un modelo replicable basado en sensores y transmisión MQTT, útil para futuras aplicaciones en agricultura inteligente.

II. DISEÑO

Este proyecto implementa un sistema de monitoreo automatizado basado en IoT para controlar los parámetros clave en cultivos hidropónicos. El diseño consiste en un microcontrolador ESP32 conectado a sensores de alta precisión los cuales miden niveles de pH, conductividad eléctrica (CE), potencial de reducción-oxidación (ORP), oxígeno disuelto (OD) y temperatura (°C). Los datos recopilados se procesan y transmiten mediante un broker MQTT hacia un servidor en la nube. Los usuarios accederán al sistema en tiempo real y lo administrarán a través de una aplicación móvil con una interfaz amigable.

A. Elementos del Sistema

1) Microcontrolador ESP32

Este dispositivo con un procesador de doble núcleo con conectividad integrada de Bluetooth y Wi-Fi, múltiples interfaces de comunicación (I2C, SPI, UART, ADC, DAC) y la capacidad de realizar tareas en tiempo real. Dentro del Sistema de Monitoreo de Cultivos Hidropónicos Automatizado, el ESP32 se utiliza principalmente como unidad de procesamiento y comunicación. Su función principal es recopilar los datos de los sensores de pH, CE, ORP, OD y °C, realizar cálculos y enviarlos a través del protocolo MQTT a un servidor en la nube donde será vista por el app MyMQTT a través de Wi-Fi permitiendo interactuar y monitorear el sistema en tiempo real, asegurando que los valores de los niveles de medición se encuentren dentro del rango óptimo.

2) Sensores hidropónicos Atlas Scientific

Para garantizar mediciones precisas y estabilidad en el monitoreo hidropónico, se seleccionaron sensores de Atlas Scientific, reconocidos por su alta precisión, calibración confiable y compatibilidad con sistemas embebidos como el ESP32. Esta elección se basó en su integración mediante I2C y UART, permitiendo una comunicación eficiente y una menor interferencia en la transmisión de datos [8].

B. Arquitectura y Operación basado en IOT

1) Adquisición de Datos

El sistema utiliza sensores especializados para medir parámetros críticos de los cultivos hidropónicos, incluyendo pH, conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD) y temperatura. Cada sensor recopila información precisa de su variable asignada y la transmite al microcontrolador ESP32 mediante el protocolo de comunicación I2C, asegurando una lectura eficiente y coordinada.

2) Procesamiento Local

El microcontrolador ESP32, con capacidad de procesamiento de doble núcleo y conectividad Wi-Fi, actúa como el núcleo del sistema. Recibe los datos de los sensores, realiza cálculos necesarios y los estructura en mensajes según el protocolo MQTT. Este procesamiento local asegura que los datos sean enviados al broker con mínima latencia.

3) Transmisión de Datos

A través de su módulo Wi-Fi integrado, el ESP32 envía los datos procesados al broker MQTT. Los mensajes son organizados en tópicos específicos como huerto/ph o huerto/temperatura, lo que permite una gestión eficiente y jerárquica de la información.

4) Gestión Centralizada

El broker MQTT, actuando como intermediario, distribuye los datos recibidos desde el ESP32 a los suscriptores. Estos incluyen un servidor en la nube para almacenamiento y análisis de datos históricos, y la aplicación móvil MyMQTT para monitoreo en tiempo real. La estructura pub/sub del broker garantiza que cada suscriptor reciba únicamente los datos relevantes.

5) Interacción del Usuario

La aplicación móvil MyMQTT permite a los usuarios acceder a los datos en tiempo real y supervisar el estado de los cultivos. En caso de detectar parámetros fuera de los rangos óptimos, el usuario puede enviar comandos de ajuste mediante la app. Estos comandos se transmiten al broker, que los redirige al ESP32 para ejecutar las acciones necesarias, como ajustar la solución nutritiva o activar equipos de control [10].

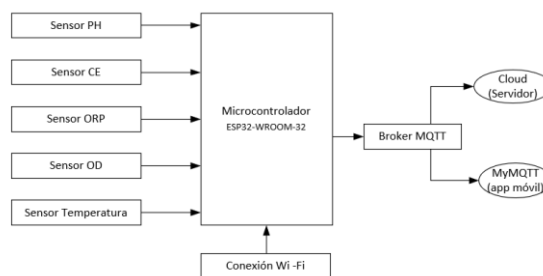


Fig. 1.- Diagrama en bloques de operación del sistema

C. Indicadores Hidropónicos Clave (IHC):

PH: Indica el nivel de acidez o alcalinidad de una solución en una escala de 0 a 14, donde 7 es neutro. Para cultivos hidropónicos el rango óptimo para la absorción de nutrientes es $5.8 \leq \text{pH} \leq 6.5$, fuera de este rango dicha absorción es limitada [9].

CE (Conductividad Eléctrica): Es la capacidad de una solución para conducir electricidad, directamente relacionada con la concentración de iones y nutrientes disueltos. En sistemas hidropónicos, la CE óptima puede variar según el tipo de cultivo y etapa de crecimiento. Los rangos de referencia proporcionados por el sistema son $12,880 \mu\text{S}/\text{cm}$ ($12.88 \text{ dS}/\text{m}$) para condiciones estándar y hasta $80,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ ($80 \text{ dS}/\text{m}$) para casos de mayor concentración de nutrientes, ajustándose según las necesidades específicas de las plantas[9].

Potencial de Reducción-Oxidación (ORP): El ORP mide la capacidad de una solución para actuar como agente oxidante o reductor, expresado en milivoltios (mV). En sistemas hidropónicos, un rango de 200 mV a 400 mV es ideal para mantener un entorno limpio y minimizar el riesgo de patógenos, asegurando condiciones saludables para el desarrollo de las plantas. Valores superiores a 400 mV pueden ser útiles para la desinfección, aunque niveles prolongados podrían generar estrés en las plantas. Por otro lado, valores inferiores a 200 mV pueden propiciar condiciones anaeróbicas, favoreciendo el crecimiento de patógenos indeseados y afectando negativamente la salud del sistema.

Oxígeno Disuelto (OD): Representa la cantidad de oxígeno presente en la solución nutritiva, esencial para la respiración de las raíces y la eficiente absorción de nutrientes. Un nivel óptimo, cercano a 5 mg/L, es crucial para evitar condiciones anaeróbicas que pueden limitar el crecimiento de las plantas y favorecer el desarrollo de patógenos. Mantener este parámetro dentro del rango adecuado asegura un entorno saludable para el cultivo.

Temperatura: Un rango de temperatura entre $21 \text{ }^\circ\text{C}$ y $32 \text{ }^\circ\text{C}$ es ideal para el crecimiento vegetativo de las plantas en sistemas hidropónicos. Temperaturas fuera de este rango, ya sea por debajo o por encima, pueden generar estrés en las plantas y afectar negativamente su desarrollo, reduciendo su capacidad para crecer de manera óptima.

La integración de sensores en el proyecto de huerto hidropónico es esencial para mantener condiciones óptimas que favorezcan el crecimiento y la salud de las plantas. Un medidor digital multifuncional facilita la medición precisa los IHC proporciona datos cruciales para el ajuste y control eficiente del sistema.

D. Diagrama de conexión de los módulos del sistema

1) Módulo de alimentación

El circuito convierte 12V en 3.3V mediante un regulador DC-DC TPS562209DDCT, con filtrado y estabilización a través de una bobina (L1) y condensadores (C1 y C2). Un divisor resistivo (R21 y R22) ajusta la retroalimentación para mantener la salida, mientras un LED con resistencia limitadora (R1) indica su correcto funcionamiento.

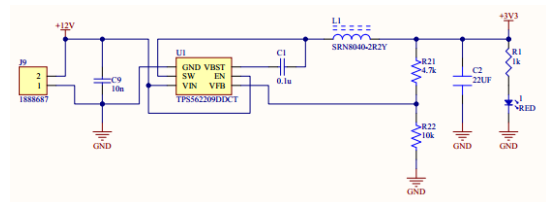


Fig. 2.- Esquemático del módulo de alimentación

2) Módulo de Programación

Este circuito permite programar al ESP32 mediante una conexión USB a UART. Utiliza un conector USB tipo C para proporcionar alimentación y líneas de datos, con protección en las líneas D+ y D- mediante diodos TVS contra picos de voltaje. Un integrado, como el CP2102N, convierte las señales USB a UART para la comunicación con el ESP32. También incluye resistencias y condensadores para estabilizar el funcionamiento y asegurar la transferencia de datos, permitiendo alimentar al ESP32 durante la programación.

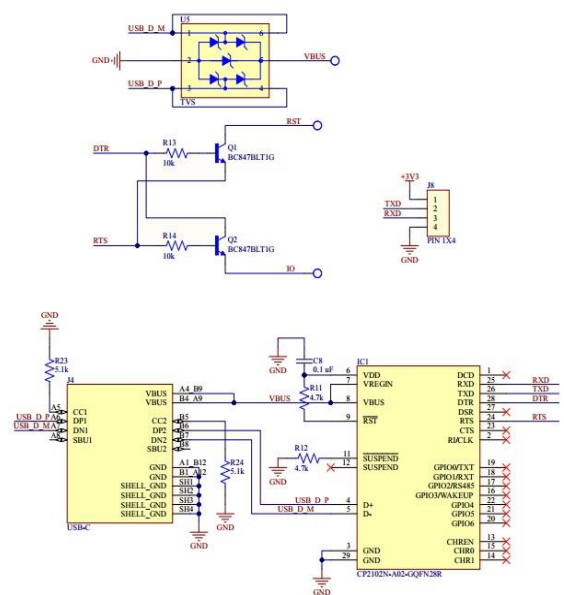


Fig. 3.- Esquemático del módulo de programación

2) Módulo RS485

El módulo RS485 utiliza el transceptor SN65HVD10D para convertir señales UART en diferenciales RS485, permitiendo comunicación a larga distancia. Las líneas de entrada (RX y TX) incluyen resistencias pull-up y pull-down para estabilizar niveles, mientras que los pines RE y DE controlan la transmisión y recepción. Las líneas de salida RS485_A y RS485_B están conectadas al bus RS485 con una resistencia de terminación de 120Ω (R18) y resistencias de polarización (R15 y R20) para asegurar integridad y estabilidad en la señal, ideal para entornos industriales.

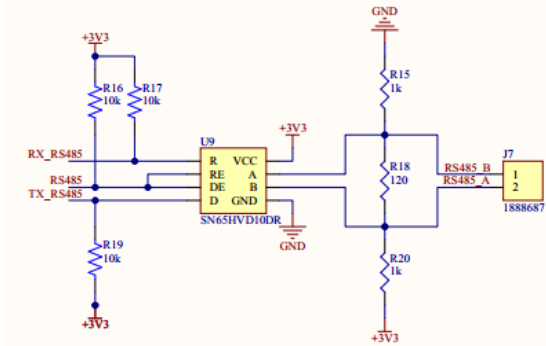


Fig. 4.- Esquemático del módulo RS485

3) Aislamiento – DC/DC

El circuito mostrado utiliza el integrado ADM3260ARZ para proporcionar aislamiento entre dos lados de una conexión I2C (SCL/SDA) y alimentar un lado aislado del sistema. El ADM3260 incorpora un aislador digital para las líneas I2C y un convertidor DC/DC para generar una tensión aislada (+3.3VISO) desde una fuente principal de +3.3V. Los resistores pull-up (R3, R4, R5, R6) aseguran la operación de las líneas I2C en ambos lados. Capacitores de desacoplo (C5, C6, C3, C7) estabilizan la alimentación y reducen el ruido. Los pines GNDISO y GND están separados para mantener el aislamiento eléctrico entre las dos regiones.

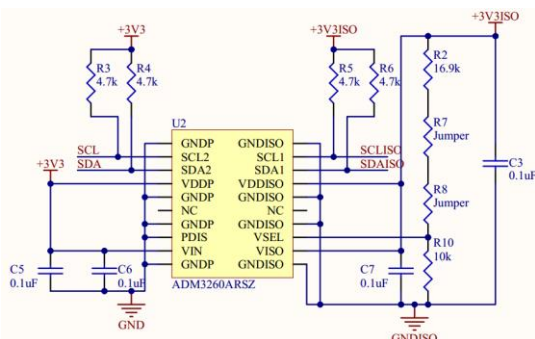


Fig. 5.- Esquemático Aislamiento – DC/DC

4) ADC / Conectores de sensores

El módulo conecta sensores de Atlas Scientific mediante conectores aislados que ofrecen alimentación (+3.3VISO), tierra (GNDISO) y comunicación UART (TX, RX). Usa aislamiento eléctrico para garantizar una operación segura y sin interferencias, gestionando señales I2C (SDAISO, SCLISO) desde el lado aislado.

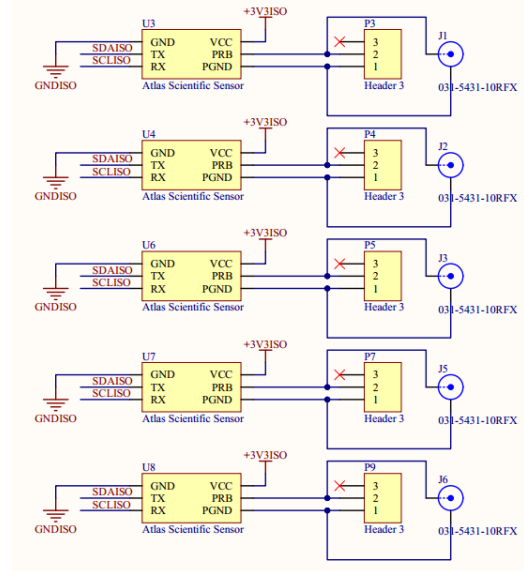


Fig. 6.- Esquemático ADC / Conectores de sensores

5) Conexiones del Microcontrolador ESP32

El módulo ESP32-WROOM-32D es el microcontrolador principal del sistema, alimentado por +3.3V, con pines configurados para funciones específicas como comunicación UART (TXD/RXD), I2C (SDA/SCL), y RS485. Incluye un botón de reinicio (RST) para reiniciar el dispositivo. Sus múltiples GPIOs están asignados para sensores y periféricos, soportando ADC, PWM y otras funciones. Este módulo actúa como el núcleo para la adquisición de datos y comunicación en el sistema.

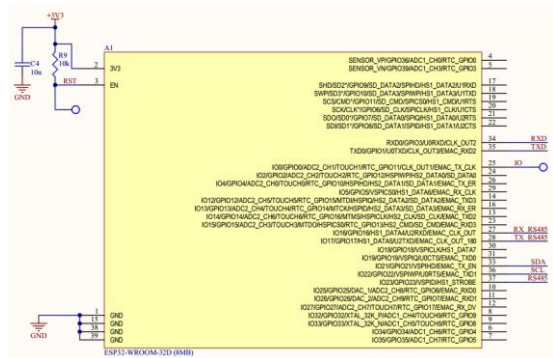


Fig. 7.- Esquemático Conexiones del Microcontrolador ESP32

IV. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

A. Resultados de la implementación

En la Fig.8 se muestra una representación básica del sistema hidropónico tras establecer las conexiones correspondientes. En la Fig. 9 se muestra el montaje real que incluye un depósito de solución nutritiva con plantas en desarrollo, sensores integrados para monitorear parámetros clave como pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, y un circuito de control basado en un ESP32 conectado a una protoboard. Este circuito recibe la alimentación necesaria, procesa las señales de los sensores y envía los datos al broker MQTT para su monitoreo remoto en tiempo real. Además, un sistema de aireación asegura condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas.

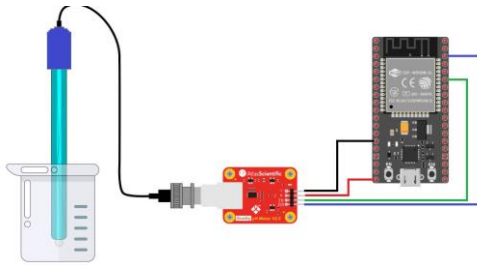


Fig. 8.- Diseño representativo del sistema

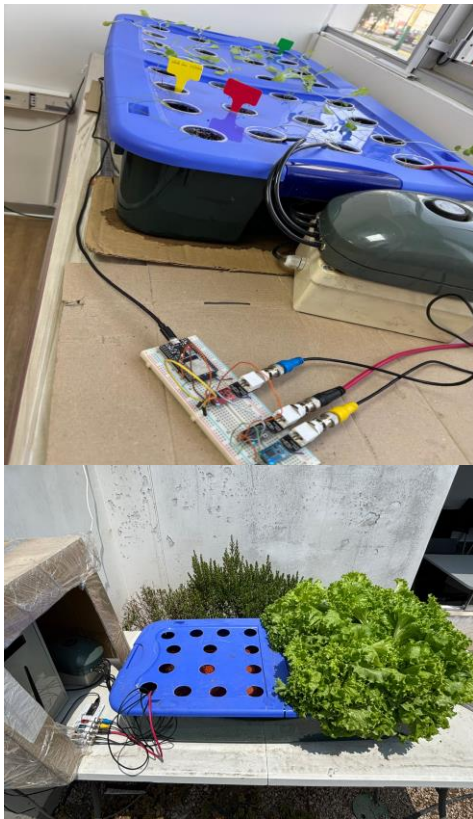


Fig. 9.- Resultados de la implementación del Sistema Hidropónico

B. Resultados de la calibración de sensores

La calibración precisa de los sensores IHC es fundamental para garantizar mediciones fiables en sistemas de monitoreo hidropónico. Se describen los procedimientos implementados para calibrar los sensores de Atlas Scientific, incluyendo las técnicas, soluciones de calibración y configuraciones necesarias para asegurar su óptimo desempeño. Se utiliza el IDE de Arduino para programar y configurar el ESP32, al cual se conectan los sensores IHC mediante sondas especializadas. Además, se emplean soluciones de calibración proporcionadas por el proveedor para ajustar los parámetros de medición, contribuyendo al éxito del monitoreo automatizado y a la precisión de los datos en tiempo real tal como se muestra en la Fig. 10.

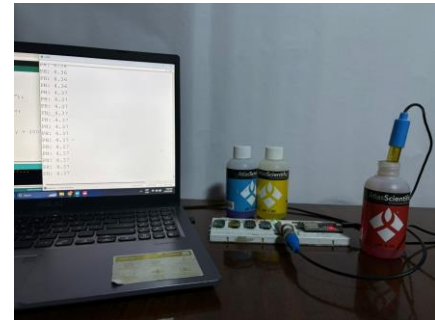


Fig. 10.- Calibración de sensores hidropónicos Atlas Scientific

1) Resultados de la calibración de sensor de PH

El sensor de pH se calibra utilizando soluciones tampón de pH 4.00, 7.00 y 10.00 (frascos de 125 ml, tolerancia ± 0.2) mediante un procedimiento de dos puntos para garantizar lecturas precisas. El proceso incluye la conexión al ESP32, enjuague con agua destilada, inmersión secuencial en cada solución, ajuste de valores y almacenamiento de los parámetros calibrados. Cada etapa toma 45 minutos, considerando programación, estabilización, y limpieza entre soluciones, asegurando la fiabilidad del monitoreo hidropónico.

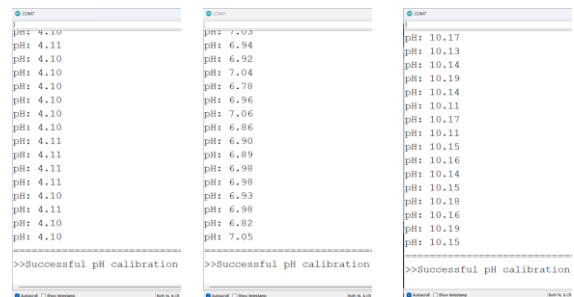
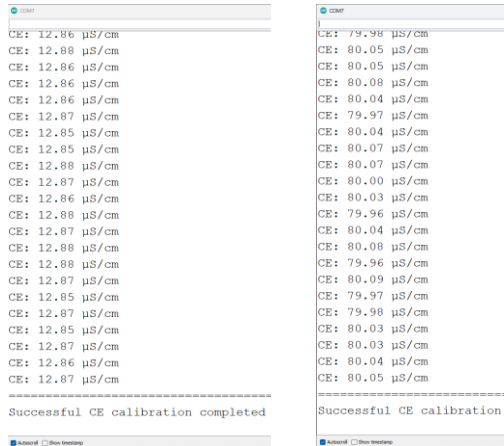


Fig. 11.- Resultados de la calibración de sensor PH

2) Resultado de la calibración del sensor (CE)

La calibración del sensor de conductividad eléctrica (CE) se realiza utilizando soluciones estándar de 80.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 12.88 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con una tolerancia de ± 0.2 . El procedimiento inicia con el enjuague del sensor utilizando agua destilada para evitar contaminaciones. Luego, se sumerge en la solución de menor conductividad (80.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$) para ajustar los valores iniciales. Posteriormente, se realiza una calibración de dos puntos, sumergiéndolo en la solución de mayor conductividad (12.88 $\mu\text{S}/\text{cm}$) para afinar la precisión. Cada solución utiliza un volumen de 20 ml, y el proceso completo toma aproximadamente 45 minutos por solución, incluyendo tiempo de estabilización y ajustes. Los valores calibrados se almacenan en el ESP32.



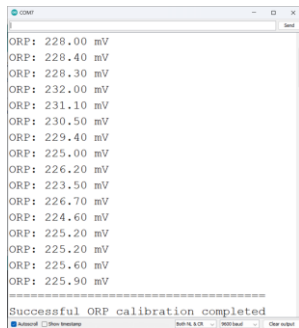
```
Terminal 1
CE: 12.86 uS/cm
CE: 12.88 uS/cm
CE: 12.86 uS/cm
CE: 12.86 uS/cm
CE: 12.86 uS/cm
CE: 12.87 uS/cm
CE: 12.85 uS/cm
CE: 12.85 uS/cm
CE: 12.88 uS/cm
CE: 12.87 uS/cm
CE: 12.86 uS/cm
CE: 12.88 uS/cm
CE: 12.87 uS/cm
CE: 12.88 uS/cm
CE: 12.87 uS/cm
CE: 12.85 uS/cm
CE: 12.87 uS/cm
CE: 12.85 uS/cm
CE: 12.87 uS/cm
CE: 12.85 uS/cm
CE: 12.87 uS/cm
CE: 12.86 uS/cm
CE: 12.87 uS/cm
CE: 12.88 uS/cm
CE: 12.88 uS/cm
CE: 12.87 uS/cm
CE: 12.85 uS/cm
CE: 12.87 uS/cm
CE: 12.85 uS/cm
CE: 12.87 uS/cm
CE: 12.86 uS/cm
CE: 12.87 uS/cm
Successful CE calibration completed

Terminal 2
CE: 79.98 uS/cm
CE: 80.05 uS/cm
CE: 80.05 uS/cm
CE: 80.08 uS/cm
CE: 80.04 uS/cm
CE: 79.97 uS/cm
CE: 80.04 uS/cm
CE: 80.07 uS/cm
CE: 80.07 uS/cm
CE: 80.00 uS/cm
CE: 80.03 uS/cm
CE: 79.96 uS/cm
CE: 80.04 uS/cm
CE: 80.08 uS/cm
CE: 79.96 uS/cm
CE: 80.09 uS/cm
CE: 79.97 uS/cm
CE: 79.98 uS/cm
CE: 80.03 uS/cm
CE: 80.03 uS/cm
CE: 80.04 uS/cm
CE: 80.05 uS/cm
Successful CE calibration
```

Fig. 12.- Resultados de la calibración de sensor CE

3) Resultado de la calibración del sensor ORP

La calibración del sensor de potencial de reducción-oxidación (ORP) se realiza utilizando una solución estándar de 225 mV, con una tolerancia de ± 5 mV. El proceso inicia enjuagando el electrodo con agua destilada para evitar contaminaciones y luego sumergiéndolo en la solución tampón de 20 ml. Tras la estabilización de los valores medidos, se ajusta el sistema de control para garantizar que el sensor opere dentro de los parámetros especificados. Cada etapa toma aproximadamente 45 minutos, asegurando lecturas precisas y consistentes

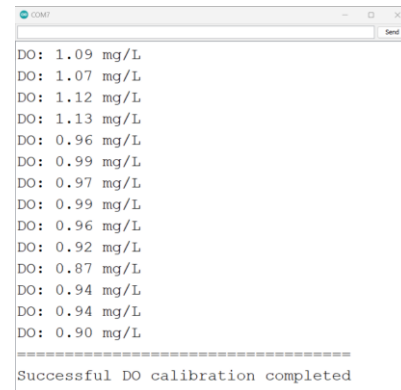


```
Terminal
ORP: 228.00 mV
ORP: 228.40 mV
ORP: 228.30 mV
ORP: 232.00 mV
ORP: 231.10 mV
ORP: 230.50 mV
ORP: 229.40 mV
ORP: 225.00 mV
ORP: 226.20 mV
ORP: 223.50 mV
ORP: 226.70 mV
ORP: 224.60 mV
ORP: 225.20 mV
ORP: 225.20 mV
ORP: 225.60 mV
ORP: 225.90 mV
Successful ORP calibration completed
```

Fig. 13.- Resultados de la calibración de sensor ORP

4) Resultado de la calibración del sensor OD

Se utiliza una solución especial de oxígeno disuelto cero de Atlas Scientific, garantizada para no contener oxígeno. Esta solución es ideal para calibrar el extremo inferior de la escala de oxígeno disuelto, asegurando un punto de 0% de saturación. El sensor debe estabilizarse en un valor máximo de 0.96 mg/L, lo que confirma su correcto funcionamiento y elimina sesgos iniciales. Este ajuste asegura mediciones precisas en sistemas hidropónicos avanzados, especialmente en condiciones críticas de monitoreo.



```
Terminal
DO: 1.09 mg/L
DO: 1.07 mg/L
DO: 1.12 mg/L
DO: 1.13 mg/L
DO: 0.96 mg/L
DO: 0.99 mg/L
DO: 0.97 mg/L
DO: 0.99 mg/L
DO: 0.96 mg/L
DO: 0.92 mg/L
DO: 0.87 mg/L
DO: 0.94 mg/L
DO: 0.94 mg/L
DO: 0.90 mg/L
Successful DO calibration completed
```

Fig. 14.- Resultados de la calibración de sensor DO

5) Resultado de la calibración del sensor de temperatura

En cuanto al sensor de temperatura, este viene precalibrado de fábrica por Atlas Scientific, pero su precisión se valida comparando las lecturas obtenidas con un termómetro de referencia. Este paso permite confirmar que el sensor está listo para integrarse en el sistema sin requerir ajustes adicionales.

C. Resumen y análisis de los resultados de la calibración

Los resultados de la calibración han sido exitosos, asegurando mediciones precisas dentro de los rangos de tolerancia establecidos. Las variaciones promedio en los parámetros calibrados se mantuvieron dentro de los límites esperados, garantizando estabilidad en las mediciones. En particular, el pH, la conductividad eléctrica (CE) y el potencial de reducción-oxidación (ORP) mostraron mínimas desviaciones, confirmando la confiabilidad del sistema. Además, el oxígeno disuelto (OD) se estabilizó en los valores esperados, y la calibración de la temperatura fue validada mediante comparación con un termómetro ambiental. Estos resultados indican que el sistema de monitoreo IoT proporciona datos confiables para la gestión del cultivo hidropónico.

TABLA I
RESULTADOS DE CALIBRACIÓN DE SENSORES IHC

Parámetros IHC	Mínimo	Medio	Máximo	Variación Promedio	Estado de Calibración
pH (Solución 4.00)	3.85	4.10	4.21	0.15	Exitosa
pH (Solución 7.00)	6.85	7.05	7.11	0.16	Exitosa
pH (Solución 10.00)	9.85	10.01	10.19	0.15	Exitosa
CE (80.00 μ S/cm)	79.70	80.02	80.80	0.20	Exitosa
CE (12.88 mS/cm)	12.86	12.88	12.89	0.17	Exitosa
ORP (mV)	223.55	224.03	233.40	5.00	Exitosa
OD (mg/L)	0.90	0.96	1.02	0.06	Exitosa
Temperatura ($^{\circ}$ C)	21.00	26.00	32.00	11.00	Exitosa. Acorde con la medida de termómetro ambiental

D. Resultados de la integración al MyMQTT

Los resultados se muestran la integración exitosa del sistema de monitoreo hidropónico con MyMQTT y MQTT Explorer, permitiendo la transmisión y visualización de datos en tiempo real. En MyMQTT, se observa la recepción de mediciones de pH, ORP, temperatura (T°), oxígeno disuelto (DO) y conductividad (Cond), enviadas por el ESP32 a través del broker MQTT (Fig 15). Cada mensaje está estructurado en formato JSON, incluyendo un ID único, fecha y hora, lo que facilita el seguimiento de las mediciones.



Fig. 15.- Resultados IHC en MyMQTT

En MQTT Explorer, la interfaz refleja la conexión activa al broker y el historial de datos transmitidos en el tópico "sensores/agua", donde se almacenan valores recientes. Se verifica que los datos se reciben correctamente y en intervalos regulares, lo que demuestra la estabilidad del sistema. Esta integración confirma que el monitoreo remoto funciona de

manera eficiente, permitiendo la supervisión de los parámetros críticos del cultivo en tiempo real y asegurando la precisión en la transmisión de información.

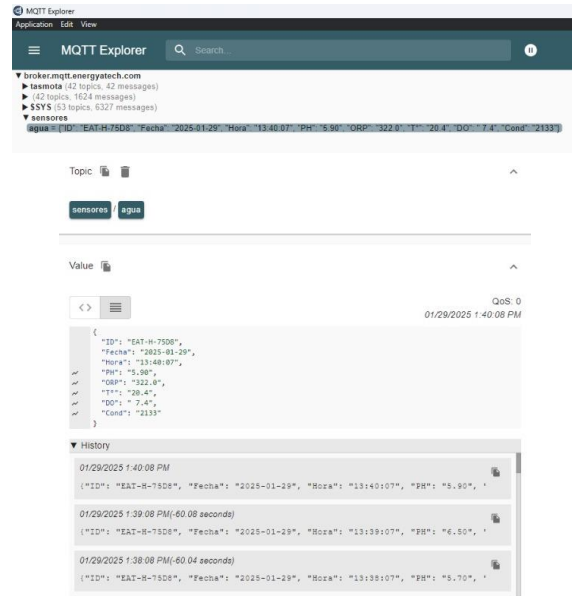


Fig. 16.- Resultados IHC en MQTT Explorer

E. Costo total del proyecto

El costo total del sistema de monitoreo hidropónico asciende a \$671.90. La integración de sensores de alta precisión con el ESP32 y MQTT permite un monitoreo remoto en tiempo real, mejorando la eficiencia en la gestión del agua y nutrientes. En la tabla II se detallan los costos involucrados

TABLA II
COSTO TOTAL DEL LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO.

Materiales	Costo (USD)
ESP-32	13
EZO™ pH Circuit	45.99
EZO™ ORP Circuit	45.99
EZO™ RTD	35.99
EZO™ Dissolved Oxygen Circuit	53.99
EZO™ Conductivity Circuit	67.99
Lab Grade pH Probe	84.99
Lab Grade ORP Probe	89.99
PT-1000 Temperature Probe	23.99
Lab Grade Dissolved Oxygen Probe	84.99
Conductivity Probe K 1.0	87.99
PCB	50
TOTAL	671.90

1. Ahorro estimado

Como se aprecia en la tabla comparativa, el sistema IoT desarrollado en esta investigación no solo mantiene la capacidad de medir las mismas variables clave de monitoreo agrícola que kits comerciales avanzados, sino que lo hace a un costo significativamente menor. La diferencia es más notoria frente al ENV-SDS Kit y el Wi-Fi Hydroponics Kit, dos

módulos que pone a la venta Atlas Scientific para cultivos Hidropónico (juntos tendrían las mismas funcionalidades y medición de los mismos parámetros) que comparado con el nuestro con un ahorro aproximado de 308.09 USD. Además, el diseño modular basado en ESP32 permite mayor flexibilidad, adaptabilidad y mantenimiento a largo plazo, reforzando su viabilidad económica y técnica.

TABLA III
AHORRO ESTIMADO

Sistema / Kit	Variables que mide	Costo (USD)	Observaciones
Sistema IoT propuesto (ESP32)	pH, ORP, Conductividad, OD, Temperatura	753.39	Incluye todos los sensores individualmente. Configuración personalizada.
Wi-Fi Hydroponics Kit	pH, Conductividad, Temperatura	552.99	No incluye OD ni ORP. Para igualar funciones se deben añadir más módulos.
Wi-Fi Hydroponics + sondas extra	pH, Conductividad, Temperatura, ORP, OD	860.95	Sumar ORP Probe (89.99) + OD Circuit (53.99) + OD Probe (89.99)
ENV-SDS Kit	pH, ORP, Conductividad, OD, Temperatura	979.99	Kit profesional, cerrado, sin posibilidad de ajustes a bajo nivel.
Ahorro estimado			308.09 USD

IV. DISCUSIÓN

La implementación del sistema de monitoreo IoT en cultivos hidropónicos permitió evaluar la precisión y estabilidad de las mediciones IHC, así como la eficiencia en la transmisión de datos mediante MQTT. Los resultados evidencian que la integración de sensores inteligentes y la calibración regular contribuyen significativamente a la confiabilidad de las mediciones, lo que concuerda con estudios previos que resaltan la importancia de la calibración periódica para garantizar la estabilidad de los datos [4].

El monitoreo en tiempo real permitió detectar variaciones mínimas en los parámetros analizados, manteniéndose dentro de los márgenes de tolerancia establecidos. Estos hallazgos son consistentes con la investigación de [2], donde se demostró que la calibración de sensores en sistemas IoT minimiza errores y asegura mediciones precisas en cultivos hidropónicos. Asimismo, la estabilidad en la transmisión de datos vía MQTT se alineó con los resultados de [3], en los que se evidenció que la comunicación eficiente a través de plataformas IoT garantiza la disponibilidad y actualización continua de la información sin interrupciones significativas.

Otro aspecto relevante fue la optimización del consumo de recursos en el sistema hidropónico. Si bien es cierto que este estudio se centra en la implementación del sistema, la precisión y fiabilidad de los datos, así como la transmisión en tiempo real, luego de la implementación, se observó una reducción en el consumo de agua y nutrientes en los 35 días

posteriores. Esto coincide con lo reportado en [1], donde se logró una reducción del 50% en el consumo de agua y un 30% en la aplicación de fertilizantes gracias a la integración de IoT en la fertirrigación. Estos hallazgos sugieren que la automatización del monitoreo no solo garantiza mediciones confiables, sino que también impacta positivamente en la eficiencia del uso de insumos agrícolas, optimizándolos en función de las necesidades reales del cultivo.

Por otro lado, se identificaron algunas limitaciones en la infraestructura de comunicación, ya que se registraron pequeñas pérdidas de paquetes de datos, aunque sin impacto significativo en la funcionalidad general del sistema. Este comportamiento es similar al reportado en [3], donde la disponibilidad del sistema alcanzó el 85%, con algunas interrupciones menores en la transmisión de datos. Si bien el sistema mostró resultados estables y precisos en el entorno de laboratorio, es importante señalar que estos experimentos se realizaron en condiciones controladas, donde factores externos como variabilidad climática, interferencias ambientales o cambios bruscos en el suministro hídrico no estuvieron presentes. Por tanto, una posible limitación del estudio radica en la falta de validación en entornos agrícolas reales o a cielo abierto, donde podrían presentarse desafíos adicionales. Esta consideración abre la posibilidad de futuras investigaciones orientadas a validar la robustez del sistema en contextos más complejos y menos predecibles.

Los resultados obtenidos confirman que la implementación de un sistema de monitoreo IoT en cultivos hidropónicos mejora la eficiencia operativa, optimiza el uso de recursos y garantiza mediciones confiables en tiempo real. La consistencia con los estudios previos respalda la viabilidad de este tipo de tecnologías para la modernización de la agricultura urbana, proporcionando herramientas innovadoras para la gestión precisa de los cultivos y la reducción de costos operativos en este caso fue comparado con los módulos que pone a la venta Atlas Scientific para hidroponía (uno de los mayores módulos adquiridos en el mercado), sin embargo para poder tener las mismas funcionalidades que la investigación se requiere adquirir más de uno de estos kit y realizar modificaciones. Además, el proyecto sugiere un ahorro de 308.09 dólares, comparados con sistemas basados con otros microcontroladores el ahorro alcanza los 1000 dólares.

V. CONCLUSIONES

El análisis realizado demuestra que los objetivos planteados en esta investigación se han cumplido satisfactoriamente. En cuanto al objetivo general, que consistía en implementar un sistema de monitoreo IoT en cultivos hidropónicos, se evidenció que esta tecnología es efectiva para garantizar la fiabilidad y precisión en la medición de los parámetros clave (pH, CE, ORP y OD). La integración de sensores inteligentes, junto con un protocolo de transmisión basado en MQTT, permitió el monitoreo continuo de las condiciones del cultivo,

reduciendo la dependencia de supervisión manual y mejorando la estabilidad del sistema.

Respecto al objetivo específico 1, se logró evaluar la precisión y estabilidad de los parámetros monitoreados después de la calibración de los sensores. Los resultados evidenciaron que la calibración periódica es esencial para mantener la fiabilidad de las mediciones, asegurando que las variaciones en los datos se mantengan dentro de los rangos óptimos. Además, se observó que la calibración correcta reduce la desviación en las mediciones, optimizando la interpretación de los valores registrados.

En relación con el objetivo específico 2, se evaluó la efectividad del protocolo de transmisión de datos basado en MQTT, verificando su rendimiento en la gestión de información en tiempo real. Se comprobó que la transmisión de datos se realizó de manera eficiente, sin pérdidas significativas de paquetes, lo que permitió a los usuarios acceder a la información de manera continua y fiable. Esta característica es fundamental para la automatización del sistema, ya que facilita la toma de decisiones y el ajuste oportuno de las condiciones del cultivo.

No obstante, se reconoce como limitación que los ensayos fueron realizados en un entorno parcialmente controlado, lo que no refleja completamente las condiciones de operación en zonas rurales o regiones con alta variabilidad ambiental. Se recomienda validar el sistema en escenarios más exigentes, como las regiones de la sierra norte o la selva del Perú, donde factores como la inestabilidad climática, la humedad extrema, la radiación solar variable o incluso la intermitencia del recurso hídrico y eléctrico pueden afectar el rendimiento del sistema. Estas validaciones permitirán comprobar su adaptabilidad y robustez frente a condiciones externas más complejas y menos predecibles.

Se identifican varias líneas de mejora. Entre ellas se incluye la implementación de mecanismos de seguridad en la transmisión de datos, fortaleciendo la protección del protocolo MQTT frente a accesos no autorizados. Asimismo, la optimización del consumo energético del ESP32, mediante técnicas de gestión de energía o uso de modos de bajo consumo, podría extender la autonomía del sistema. Otra posibilidad es la integración de algoritmos de inteligencia artificial para la predicción y ajuste automático de parámetros del cultivo.

Finalmente los resultados confirman que los sistemas IoT mejoran la precisión y estabilidad del monitoreo hidropónico, aumentando la eficiencia operativa y reduciendo costos al minimizar la intervención manual.

VI. AGRADECIMIENTO

Se expresa mayor agradecimiento a la empresa especializada en cultivos peruano-brasileña por la colaboración otorgada en la elaboración del proyecto.

REFERENCIAS

- [1] N. S. . Azwa Mahmudin and N. H. . Mohammad Radzi, "Application of Internet of Things (IoT) on Monitoring EC and pH Values for Fertigation System", *J. Adv. Res. Appl. Mech.*, vol. 126, no. 1, pp. 188–206, Oct. 2024.
- [2] M. A. J. Hidayat and A. Z. Amrullah, "Sistem kontrol dan monitoring tanaman hidroponik berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan NodeMCU ESP32," *Saintekom*, vol. 12, no. 1, pp. 23–32, Mar. 2022.
- [3] M. Montaña-Blacio, J. González-Escarabay, Ó. Jiménez-Sarango, L. Mingo-Morocho, y C. Carrión-Aguirre, "Diseño y despliegue de un sistema de monitoreo basado en IoT para cultivos hidropónicos," *Ingenius, Rev. Cienc. Tecnol.*, no. 30, pp. XX-XX, jul. 2023. DOI: 10.17163/ings.n30.2023.01.
- [4] M. A. Yate Bonilla y M. Á. Zambrano Saya, "Prototipo IoT de monitoreo y control de variables ambientales para un cultivo hidropónico de hortalizas," Tesis de grado, Facultad de Ingeniería, Univ. Católica de Colombia, Bogotá D.C., Colombia, 2021. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10983/27034>.
- [5] I. Agustian, B. I. Prayoga, H. Santosa, N. Daratha, y R. Faurina, "NFT hydroponic control using Mamdani fuzzy inference system," *J. Robot. Control (JRC)*, vol. 3, no. 3, pp. 374, mayo 2022. DOI: 10.18196/jrc.v3i3.14714.
- [6] L. M. Padilla García y K. M. Yagual Palma, "Diseño y construcción de un prototipo para automatizar la producción de forraje verde hidropónico en un vivero como alternativa en la nutrición bovina para la obtención de carne y leche vacuna," Proyecto integrador, Fac. Ing. Electricidad y Computación, Esc. Sup. Politéc. del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2022.
- [7] K. J. Cardoso Ibarra, I. Olivos Barranco, L. A. Monroy Peña, y A. Núñez Cuadra, "Sistema IoT hidropónico," *Rev. Electrón. ANFEI Digit.*, vol. 11, no. 16, ene.-dic. 2024. Disponible en: <https://anfei.mx/revista/index.php/revista/article/view/1005>.
- [8] Atlas Scientific, "Embedded solutions," Atlas Scientific, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://atlas-scientific.com/embedded-solutions/>
- [9] Atlas Scientific, "pH," Atlas Scientific, 2024. Disponible en: <https://atlas-scientific.com/ph>.
- [10] MQTT, "MQTT: The standard for IoT messaging," MQTT, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://mqtt.org/>
- [11] Wu, Fan, Chang Wei Tan, Majid Sarvi, Christoph Rudiger y Mehmet Rasit Yuce. "Diseño e implementación de una plataforma de red de sensores inalámbricos de bajo consumo basada en XBee". En la 85.ª Conferencia de Tecnología Vehicular del IEEE de 2017 (VTC Spring), págs. 1-5. IEEE, 2017. <https://doi.org/10.1109/vtcspring.2017.8108667>
- [12] Joseph, Cyril, I. Thirunavuakkarasu, Aadesh Bhaskar y Anish Penujuru. "Sistema de fertirrigación automatizado para la utilización eficiente de fertilizantes y agua". En 2017, 9.ª Conferencia Internacional sobre Tecnología de la Información e Ingeniería Eléctrica (ICITEE), págs. 1-6. IEEE, 2017. <https://doi.org/10.1109/icitee.2017.8250474>
- [13] Espressif Systems, *Technical Documents*. [En línea]. Disponible en: <https://www.espressif.com/en/support/documents/technical-documents>
- [14] S. Berrios Gomez y H. J. Rivera Herrera, "Sistema IoT basado en ESP32 para el control y monitoreo de cultivos en invernadero con enfoque de agricultura 4.0," *Ingenius*, vol. 4, no. e624, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.47796/ing.v4i0.624>
A. Matute Clavier y W. F. Bernal Suárez, «Técnicas de lógica difusa en ingeniería de control», *Cienc. Innov. Tecnol.*, vol. 3, pp. 125–134, nov. 2017. [En línea]. Disponible en: <https://revista.jdc.edu.co/index.php/rciyt/article/view/81>