



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

”Implementación de un Sistema IoT para la Captura de Datos y Control Remoto de Actuadores en un Invernadero Semi-hidropónico de Fresa”

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO

Autor:

CARLOS FABIAN NUGRA CHIMBO

Director:

ING DANIEL ITURRALDE PIEDRA, PhD

CUENCA, ECUADOR

2026

DEDICATORIA

A Dios, fuente de fortaleza y sabiduría,
por guiar cada uno de mis pasos
y permitirme alcanzar esta meta.

A mi familia, pilar fundamental de mi vida,
por su amor incondicional, su paciencia y su
apoyo constante. En especial a mis padres, por
sus sacrificios y enseñanzas, y a mis hermanos,
por su compañía y ánimo en cada momento.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Azuay, por brindarme un espacio de crecimiento académico y humano, así como por proporcionar los recursos y el entorno necesarios para mi formación profesional y el desarrollo de este proyecto.

A mis profesores, quienes a lo largo de la carrera compartieron generosamente sus conocimientos, experiencias y valores, contribuyendo de manera significativa a mi formación integral. En especial, a aquellos que despertaron en mí la pasión por la investigación, la innovación y el rigor técnico.

A mi tutor, por su paciencia, guía y valiosas observaciones durante la realización de este trabajo, siempre con disposición y claridad para orientarme en cada etapa del proceso.

A todos ellos, mi más sincero y profundo agradecimiento.

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA IoT PARA LA CAPTURA DE DATOS Y CONTROL REMOTO DE ACTUADORES EN UN INVERNADERO SEMI-HIDROPÓNICO DE FRESA

En los últimos años, el crecimiento poblacional ha incrementado la demanda de alimentos, mientras que la reducción de suelos agrícolas y la escasez de recursos hídricos afectan directamente la producción agrícola. En este artículo se presenta la implementación de un sistema IoT para el monitoreo de variables agrícolas y el control automático de actuadores en un invernadero semi hidropónico de fresa. El sistema utiliza nodos basados en ESP32-S3 que se comunican con un gateway mediante Bluetooth Low Energy (BLE). Los datos capturados por los sensores son enviados a la plataforma en la nube Ubidots. Además, el sistema permite una comunicación bidireccional para el encendido y apagado de las bombas de riego y control de pH desde un dashboard en la nube. Finalmente, se realizaron pruebas de conectividad, obteniendo resultados satisfactorios. Los ensayos demostraron que el enlace entre los nodos y el *gateway* se mantiene estable, permitiendo la transmisión del 100 % de los datos hacia la nube. Asimismo, se verificó que el sistema responde correctamente a los comandos enviados desde el dashboard, logrando el encendido y apagado adecuado de las bombas de riego y control de pH.

Palabras clave: Hidroponia, IoT, Agricultura de precisión.

IMPLEMENTATION OF AN IOT SYSTEM FOR DATA CAPTURE AND REMOTE CONTROL OF ACTUATORS IN A SEMI-HYDROPONIC STRAWBERRY GREENHOUSE

In recent years, population growth has accelerated, compounded by a shortage of agricultural land for food production and a lack of water resources. This article presents the implementation of an IoT system for monitoring agricultural variables and automatically controlling actuators in a semi-hydroponic strawberry greenhouse. Using nodes equipped with an ESP32-S3 connected to a *gateway* device via Bluetooth Low Energy (BLE) link, sensor data is sent to the Ubidots cloud with bidirectional communication to turn irrigation pumps on and off and control pH levels. Additionally, the system operates on batteries, making it fully autonomous. Satisfactory connectivity and autonomy tests were conducted, verifying that the information reaches the cloud correctly and that the pumps are activated and deactivated correctly via a dashboard

‘ **Keywords:** Hydroponics, IoT, Precision Agriculture.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Dedicatoria	i
Agradecimientos	ii
Resumen	iii
Abstract	iv
Índice de Contenidos	v
Índice de Figuras	vi
Índice de Tablas	vii
I Introducción	1
II Descripción del Sistema	2
II-A Nodo 1, Sistema de Riego Autónomo con Telemetría y Control Remoto	2
II-B Nodo 2, Sistema de corrección de pH con Telemetría y Control Remoto	4
II-C Comunicacion Bidireccional entre Nodos, <i>gateway</i> y servidor	5
III Resultados	6
IV Conclusiones	8
References	8
ANEXOS	10
Anexo 1: Diagrama de flujo nodo 1 (Riego)	10
Anexo 2: Esquema eléctrico del Nodo 1	11
Anexo 3: Etapa de potencia (Nodos 1 y 2)	12
Anexo 4: Diagrama de flujo Nodo 2	13
Anexo 5: Esquema eléctrico Nodo 2 (pH)	14
Anexo 6: Diagrama de flujo Maestro	15

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Diagrama del sistema IoT, control y servicio en la nube.	3
2	Diagrama de bloque del nodo de riego.	3
3	Diagrama de bloques Nodo 2.	4
4	Diagrama de bloques Nodo 2.	5
5	Curva de humedad ambiente nodo 1.	6
6	Curva de temperatura ambiente nodo 1.	7
7	Curva de humedad de suelo nodo 1.	7
8	Curva de pH nodo 2.	7
9	Curva de TDS nodo 2.	7
10	Panel de control manual desde computador.	7
11	Panel de control manual desde aplicación móvil.	8

ÍNDICE DE TABLAS

I	Características del ESP32-S3	3
II	Especificaciones del sensor de humedad DHT11	4
III	Especificaciones del sensor de humedad de suelo Plantmate	4
IV	Especificaciones del sensor de pH	5
V	Especificaciones del sensor de TDS	5
VI	Consumo de corriente por nodo	8

Implementación de un Sistema IoT para la Captura de Datos y Control Remoto de Actuadores en un Invernadero Semi-hidropónico de Fresa.

Carlos Nugra Chimbo
Ingeniería Electrónica
Universidad del Azuay
Cuenca, Ecuador
carlosnugra@es.uazuay.edu.ec

Abstract—En los últimos años el crecimiento poblacional se ha incrementado, a esto se suma la falta de suelos agrícolas para la producción de alimentos y la falta de recursos hídricos. En este artículo se presenta la implementación de un sistema IoT para el monitoreo de variables agrícolas y el control automático de actuadores para un invernadero semi hidropónico de fresa. Por medio de nodos que usan un ESP32-S3 conectados a un maestro mediante un enlace con Bluetooth Low Energy (BLE) se envían los datos de sensores hasta la nube en Ubidots con comunicación bidireccional para el encendido y apagado de las bombas de riego y control de pH. Además, operan con baterías siendo completamente autónomos. Se lograron pruebas de conectividad y autonomía satisfactorias, verificando que la información llega correctamente a la nube y mediante un dashboard se activa y desactiva las bombas correctamente.

Index Terms—Hidroponía, IoT, Agricultura de precisión.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el mundo ha experimentado cambios tecnológicos con la aparición de dispositivos inteligentes que han transformado diversos sectores, incluida el agrícola, en este sentido se busca construir sistemas de riego automatizados e inteligentes que permitan optimizar el uso de los recursos hídricos y mejorar el rendimiento de los sistemas de cultivo. Teniendo en consideración que la agricultura constituye uno de los principales motores económicos de un país, la integración de estas tecnologías al sector agrícola representa una oportunidad estratégica para enfrentar los desafíos tanto actuales y futuros [1].

El crecimiento acelerado de la población mundial ha incrementado la demanda de productos agrícolas y, en consecuencia, la necesidad de nuevos métodos de producción. La proporción de tierra fértil disponible está en descenso. Aquí es donde se puede utilizar el uso de la hidroponía para abordar la mayoría de los problemas actuales en la agricultura, la jardinería doméstica y las aplicaciones de ciudades verdes [2].

A nivel mundial existe un crecimiento poblacional constante de manera que esto demanda más áreas de suelo que se destina a vivienda e infraestructura, por lo tanto, las tierras agrícolas van reduciendo de manera progresiva su disponibilidad. Ante

esta situación se prevé una escasez de alimento en un futuro no muy lejano [3].

En esta situación la agricultura de hoy en día se ve enfrentada a grandes desafíos por consecuencia del crecimiento de la población mundial, por lo tanto, la demanda de alimentos se incrementa cada día, llevando a una inestabilidad en temas de seguridad alimentaria. Existe un porcentaje de la población que opta por productos orgánicos libres de pesticidas lo que implica sumar presión adicional sobre los recursos agrícolas al requerir mayor uso de suelo cultivable, agua y energía [4].

En este mismo contexto, ante la falta de suelo agrícola, a esto se suma un nuevo problema debido a las inclemencias del tiempo. Estas condiciones de clima constantemente cambiantes han hecho que se vea afectada la producción agrícola, generando complicaciones a la hora de suministrar alimentos. sumado al deterioro del suelo generado por el uso descontrolado de pesticidas, lo cual incrementa la urgencia de buscar alternativas altamente eficientes. En países como la India que tiene una baja productividad agrícola representa un gran desafío que demanda de tecnologías enfocadas a mejorar la agricultura y poder satisfacer la demanda de alimentos [5].

Los avances recientes en la agricultura han puesto en evidencia la necesidad de mejorar la eficiencia productiva mediante el uso de tecnologías. En particular, las técnicas de cultivo hidropónico demandan sistemas capaces de gestionar datos a diferentes escalas, desde el monitoreo global del cultivo hasta la supervisión de cada planta individual. Sin embargo, los métodos tradicionales presentan limitaciones en la recolección y análisis de información, lo que dificulta un control preciso del estado de salud de plántulas y frutos, así como de la administración adecuada de nutrientes, agua y productos fitosanitarios dentro de los invernaderos. Esta situación refleja la urgencia de integrar soluciones basadas en Internet of Things (IoT) y algoritmos de aprendizaje automático, que permitan optimizar la automatización y al mismo tiempo considerar criterios de eficiencia energética en los sistemas de producción [6].

Por lo tanto, en una investigación realizada [7] destacan la importancia de la hidroponía, método por el cual producen

hortalizas y verduras sin la necesidad del suelo, además, el artículo señala que este sistema es adecuado para el cultivo en interiores, y, a su vez, incorpora herramientas como sensores, microcontroladores y logran un sistema completamente automatizado.

En [3] resaltan las ventajas de la hidroponía siendo la de mayor rendimiento de los cultivos, menor consumo de agua, también son menos propensos a sufrir enfermedades, hacen el uso de herramientas de medición como sensores IoT de temperatura y pH cuya información se recopila y es enviada a servicios en la nube para que remotamente el usuario pueda conocer los parámetros del estado de su cultivo.

En un estudio realizado por [8] se hace un aporte con base en un sistema agrícola autónomo que integra nuevas tecnologías como vehículos aéreos no tripulados (UAV), sensores y unidades modulares para agricultura vertical, los autores proponen una técnica para la creación de mapas en 3D basado en Scene Graph (3DSG) para el monitoreo dinámico del crecimiento de plantas y frutos. A través de una retroalimentación el sistema ajusta la iluminación y el suministro de nutrientes. Los autores indican que incluye un modelo de incertidumbre basado en la propagación de errores de los sensores y validación mediante simulaciones y experimentos reales. De manera complementaria, plantean una arquitectura de agricultura vertical, además, inteligente e impulsada por IoT que a su vez integra robots equipados con diferentes sensores que trabajan recopilando y compartiendo datos.

En [1] indican que la agricultura es parte de la economía de un país, además, un sistema de cultivo es mayormente productivo con la aplicación de sensores mismos que con la información se utiliza para mejorar la precisión del cultivo mejorando y optimizando el sistema de riego, aplicación de pesticidas y la maduración de la fruta, también indican que es factible determinar las condiciones ideales para las plantas en ambientes controlados bajo invernadero, haciendo ajustes de temperatura y humedad.

En [9] se basa la investigación en la aplicación de IoT en la hidroponía, más específica en plantas de tomate, hacen uso de una técnica de película de nutrientes (NFT), con esto los agricultores pueden monitorear y gestionar el sistema de cultivo facilitando una toma de decisión a su debido tiempo. El IoT brinda soluciones para resolver problemas de deficiencia de nutrientes como calcio, falta de corrientes de aire alrededor de las plantas.

En [10] se ha desarrollado un cultivo de tomate Cherry con hidroponía. Los autores indican que promueven el crecimiento de las plantas de tomate utilizando iluminación LED que tiene un espectro de luz solar natural. El cultivo usa luz LED blanca convencional y LED de espectro de luz solar.

En [6] presentan una propuesta orientada a la automatización de los invernaderos hidropónicos. Un sistema de brazo robótico con objetivo de optimizar el posicionamiento de las semillas de tomate obteniendo a futuro precisión y homogeneidad en la fase de plántulas, también integran sensores, actuadores, iluminación LED y técnicas de inteligencia artificial (IA), para conteo e identificación de las plántulas y su

posicionamiento dentro del germinador. El brazo cuenta con una cámara de video con aceleración de hardware con capacidad de ejecutar algoritmos de redes neuronales profundas. El brazo es activado gracias a los datos de la cámara y gestiona la colocación de las plántulas.

El trabajo de [11] presenta una revisión crítica de literatura relacionada con la IA, el (IoT) y la agricultura vertical, considerando de manera particular las condiciones climáticas y nutricionales en cultivos verticales seleccionados. Así mismo, el estudio examina distintas modalidades de agricultura vertical, entre ellas la aeroponía, la hidroponía y la acuicultura, todas enmarcadas dentro de las tecnologías de agricultura de ambiente controlado (CEA).

II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El presente proyecto plantea el diseño e implementación de una red de sensores IoT destinada a la adquisición continua de variables agrícolas fundamentales. Cada nodo sensor incorpora un microcontrolador capaz no solo de recopilar los datos, sino también de ejecutar acciones automáticas o remotas, como la activación del sistema de riego o el ajuste del nivel de pH, con el fin de mantener las condiciones óptimas para el desarrollo de los cultivos.

También se implementa un servidor en la nube encargado de recibir, almacenar y procesar la información enviada por los nodos sensores. Este servidor permite la comunicación bidireccional con el sistema IoT, garantizando la disponibilidad de los datos en todo momento. A través de la plataforma en la nube, los usuarios pueden visualizar en tiempo real los parámetros agrícolas desde una aplicación móvil o una computadora, como se muestra en la figura 1, lo que facilita la supervisión y el control remoto de las condiciones del cultivo de manera eficiente y confiable.

Se busca evaluar la estabilidad, precisión y desempeño del sistema IoT mediante el análisis de los datos almacenados en la nube, su representación gráfica y la aplicación de métodos estadísticos que permitan identificar variaciones, tendencias o posibles anomalías, contribuyendo a mejorar la eficiencia y confiabilidad del sistema de monitoreo hidropónico.

A. *Nodo 1, Sistema de Riego Autónomo con Telemetría y Control Remoto*

Nodo 1, es la unidad encargada del monitoreo de variables ligadas al riego y del control automatizado dentro del invernadero. Este módulo forma parte de una arquitectura IoT distribuida, integrando funciones de adquisición de datos, procesamiento local, control autónomo y comunicación remota. La arquitectura del nodo se observa en la figura 2

El sistema equipa un microcontrolador ESP32 modelos S3, seleccionado por su capacidad de procesamiento, conectividad inalámbrica integrada Wi-Fi y Bluetooth Low Energy (BLE), así como por su bajo consumo energético. Dentro de la arquitectura implementada, la tecnología BLE constituye el protocolo principal de comunicación entre nodos, cuyas características técnicas se presentan en la Tabla I. Este dispositivo

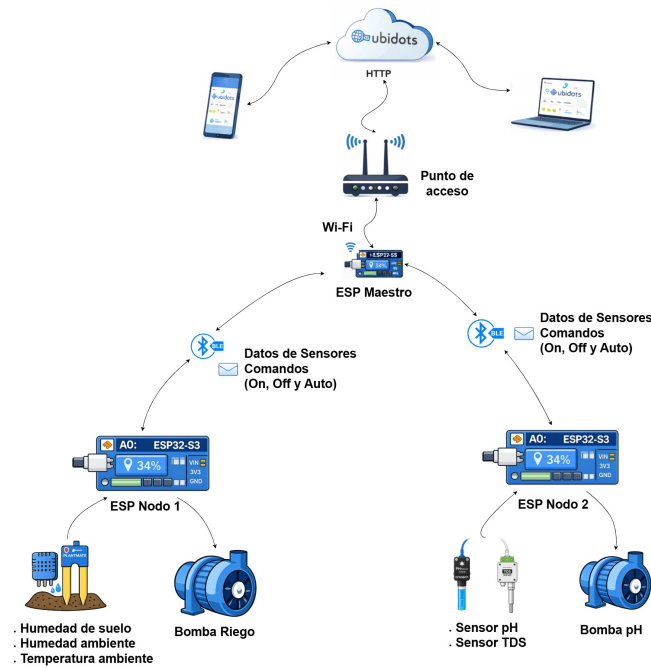


Fig. 1. Diagrama del sistema IoT, control y servicio en la nube.

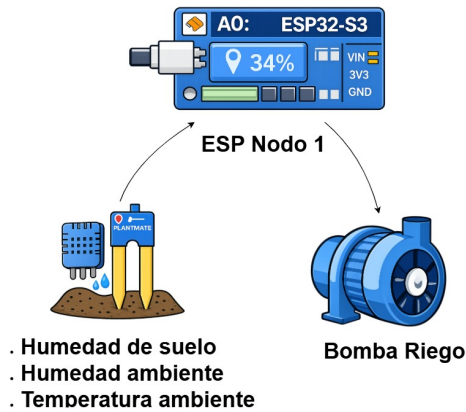


Fig. 2. Diagrama de bloque del nodo de riego.

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DEL ESP32-S3

Parámetro	Especificación
Microcontrolador	Xtensa® LX7 dual-core 32 bits
Frecuencia CPU	240 MHz
Memoria ROM	20 - 384KB
Memoria Sram	512 KB
SRAM RTC	16 KB
Memoria Flash	16 MB
PSRAM	16 MB
Wi-Fi	802.11 b/g/n (2.4 GHz)
Velocidad Wi-Fi	150 Mbps
Bluetooth	Bluetooth 5 (BLE + Mesh)
ADC	2 ADC SAR de 12 bits
Interfaces de comunicación	UART, SPI, I2C, I2S, CAN (TWAI), USB OTG
USB	USB 2.0 OTG + USB Serial/JTAG
Voltaje de operación	3.0 v - 3.6 v

permite gestionar de forma eficiente sensores, actuadores y protocolos de comunicación dentro del sistema IoT propuesto.

El nodo está equipado con un sistema de alimentación de dos baterías recargables de 3.7 V y 2500 mAh, configuradas en paralelo las cuales proporcionan autonomía energética y estabilidad operativa al módulo. Para dotar de voltaje estable de 3.0 V al ESP es necesario utilizar un regulador de voltaje. Esta configuración permite la instalación del sistema dentro del invernadero sin requerir infraestructura de cableado adicional, facilitando su integración en diferentes configuraciones del cultivo y garantizando una operación continua.

En la etapa de adquisición de datos, el nodo integra un sensor de humedad de suelo tipo capacitivo Plantmate, cuya señal de salida es analógica y es procesada mediante el convertidor analógico-digital (ADC) del microcontrolador, empleando pines de propósito general (GPIO). Este sensor permite estimar el contenido de agua en el sustrato, constituyendo la variable principal para la toma de decisiones del sistema de riego. De manera complementaria, se emplea un sensor con salida digital DHT11 para la medición de temperatura y humedad relativa del ambiente, proporcionando información adicional sobre las condiciones internas del invernadero. Las características técnicas de estos sensores se presentan en la Tabla II y Tabla III, respectivamente.

Desde el punto de vista funcional, el comportamiento del nodo se describe en el diagrama de flujo presentado en el anexo 1. A partir de este, el sistema ejecuta un ciclo continuo de operación que comprende la lectura de sensores, el procesamiento de datos y la toma de decisiones en tiempo real. La lógica de control implementada se basa en una estrategia de histéresis, diseñada para mantener la humedad del sustrato

TABLA II
ESPECIFICACIONES DEL SENSOR DE HUMEDAD DHT11

Sensor	DHT11
Voltaje de alimentación	3 - 5 Vcc
Corriente en operación	0.5 mA
Rango de humedad	20 - 80 por ciento ± 5
Rango de temperatura	0° - 50° $\pm 2^\circ$

TABLA III
ESPECIFICACIONES DEL SENSOR DE HUMEDAD DE SUELO PLANTMATE

Sensor	Plantmate Capacitivo
Voltaje de alimentación	3.3 Vcc
Voltaje de salida	0 - 3 Vcc (Señal Analógica)
Interface	Micro USB

dentro de un rango operativo comprendido entre el 50% y el 70%.

En este esquema, cuando la humedad del sustrato desciende por debajo del umbral inferior del 50%, el sistema activa automáticamente la bomba de riego. Por el contrario, cuando la humedad supera el umbral superior del 70%, la bomba es desactivada. Este enfoque evita conmutaciones rápidas e innecesarias, reduciendo el desgaste de los componentes electrónicos y mecánicos, además de garantizar una operación estable y eficiente del sistema.

El accionamiento de la bomba se realiza mediante una etapa de potencia eléctricamente aislada, implementada a través de optoacopladores y TRIAC, como se detalla en el anexo 2. Esta configuración permite separar la etapa de control de bajo voltaje del circuito de potencia de alto voltaje, minimizando el riesgo de daños en el microcontrolador y mejorando la seguridad operativa del sistema.

En cuanto a la comunicación inalámbrica, el nodo incorpora conectividad mediante BLE, operando como un servidor BLE dentro de la red IoT. A través de esta interfaz, transmite datos de telemetría hacia el ESP *gateway* mediante el mecanismo de notificaciones (Notify), incluyendo variables como humedad del sustrato, temperatura ambiente, humedad relativa, estado de la bomba y modo de operación. De igual manera, el nodo puede recibir comandos mediante operaciones de escritura (Write), lo que permite la activación o desactivación manual de la bomba desde el dashboard de Ubidots. Estos comandos son gestionados inicialmente por el ESP *gateway* y posteriormente enviados al Nodo 1, proporcionando un nivel adicional de supervisión y control remoto. El diagrama eléctrico del nodo 1 se indica en el anexo 3.

Es importante destacar que el Nodo 1 mantiene su funcionamiento de manera autónoma, es decir, no depende de la conexión BLE para ejecutar la lógica de control del riego. Esto garantiza la continuidad operativa del sistema incluso en ausencia de comunicación con el nodo maestro.

B. Nodo 2, Sistema de corrección de pH con Telemetría y Control Remoto

El Nodo 2 corresponde al módulo encargado del monitoreo de la calidad de la solución nutritiva utilizada en el sistema de riego. Este nodo se encuentra ubicado en el cuarto de máquinas, donde se dispone del tanque de almacenamiento de la solución nutritiva y de los sistemas asociados al control de los parámetros químicos del agua. Al igual que el Nodo 1, este módulo forma parte de la arquitectura IoT distribuida implementada en el sistema, integrando funciones de adquisición de datos, procesamiento local, comunicación remota y supervisión de variables críticas del cultivo, el diagrama de bloque se indica en la figura 3.

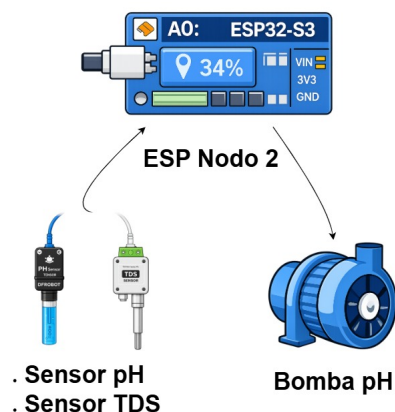


Fig. 3. Diagrama de bloques Nodo 2.

El sistema está basado en un microcontrolador ESP32 modelo S3, encargado de la adquisición de señales provenientes de los sensores, el procesamiento de los datos y la ejecución de funciones de control dentro del sistema IoT. Este dispositivo permite gestionar la lectura de variables químicas, la comunicación inalámbrica e interacción con actuadores asociados al sistema de corrección de la solución nutritiva.

En cuanto al sistema de alimentación, el nodo equipa dos baterías recargables de 3.7 V y 3500 mAh configuradas en serie, con el objetivo de proporcionar el nivel de voltaje requerido por los sensores implementados en este módulo mismos que necesitan una alimentación de 5 V. Debido a esta configuración el voltaje supera el valor determinado por el fabricante de los sensores en necesario utilizar un regulador MP2315, el cual permite obtener una tensión estable y adecuada para la operación segura del ESP32 y sensores, evitando daños en el sistema de alimentación y garantizando estabilidad operativa.

Para el monitoreo de la solución nutritiva, el nodo incorpora un sensor de pH de DFRobot, el cual permite determinar el nivel de acidez o alcalinidad del agua. Este parámetro resulta fundamental para garantizar la correcta absorción de nutrientes por parte del cultivo, ya que valores fuera del rango óptimo pueden afectar directamente el desarrollo de las plantas. Las características técnicas del sensor de pH utilizado se presentan en la Tabla IV.

TABLA IV
ESPECIFICACIONES DEL SENSOR DE pH

Sensor	Gravity: Analog pH Meter Pro Kit V2
Voltaje de alimentación	3.3 - 5.5 Vcc
Voltaje de salida	0 - 3 Vcc (Señal Analógica)
Rango de medición	0 a 14 pH
Precisión de medición pH	±0.1 pH (a 25°C)
Calibración	Dos puntos (pH 4.0 y 7.0)
Tipo de sonda	Grado Industrial

De manera complementaria, el nodo también incorpora un sensor de Sólidos Disueltos Totales (TDS), el cual permite estimar la concentración de sales disueltas presentes en la solución nutritiva. Este parámetro constituye un indicador directo de la disponibilidad de nutrientes en el sistema semi hidropónico, por lo que su monitoreo resulta esencial para mantener condiciones adecuadas de fertilización del cultivo. Las especificaciones técnicas del sensor TDS se presentan en la Tabla V, donde se detallan las características eléctricas y operativas del dispositivo.

TABLA V
ESPECIFICACIONES DEL SENSOR DE TDS

Sensor	Gravity: TDS Meter V1.0
Voltaje de alimentación	3.3 - 5.5 Vcc
Voltaje de salida	0 - 2.3 Vcc (Señal Analógica)
Rango de medición	0 - 1000ppm
Precisión de medición TDS	± 10 F.S. (25 °C)
Interfaz de electrodos	XH2.54-2P

Las señales generadas por ambos sensores son de tipo analógico, por lo que son adquiridas mediante el convertidor analógico-digital (ADC) del microcontrolador, empleando pines de propósito general (GPIO). Posteriormente, estas señales son procesadas para obtener valores representativos de pH y concentración de sólidos disueltos, permitiendo su análisis y supervisión dentro del sistema.

Desde el punto de vista funcional, el comportamiento del Nodo 2 se describe en el diagrama de flujo presentado en el anexo 4. A partir de este, el sistema ejecuta un ciclo continuo de adquisición de datos, procesamiento y transmisión de información. Mediante este proceso, el nodo realiza el monitoreo permanente de los parámetros químicos de la solución nutritiva, proporcionando información crítica para la supervisión del sistema de fertirrigación.

Adicionalmente, el Nodo 2 incorpora comunicación inalámbrica mediante Bluetooth Low Energy (BLE), operando como un servidor BLE dentro de la red de sensores. A través de esta interfaz, transmite los datos de pH, TDS y estado del sistema hacia el *gateway* mediante notificaciones (Notify), constituyendo el canal principal de telemetría. De igual forma, el nodo puede recibir comandos mediante operaciones de escritura (Write), permitiendo la interacción externa con el sistema.

En este contexto, el nodo cuenta con la capacidad de accionar una bomba de corrección de pH, la cual puede

ser activada o desactivada manualmente mediante comandos enviados desde el dashboard de Ubidots. Estos comandos son gestionados por el nodo maestro y posteriormente transmitidos al Nodo 2 a través de BLE, permitiendo la intervención remota cuando sea necesario.

De esta manera, el Nodo 2 forma parte integral de la red de sensores IoT, proporcionando información relevante sobre la calidad de la solución nutritiva y permitiendo la supervisión y control remoto del sistema de fertirrigación. El detalle del funcionamiento eléctrico del sistema se presenta en el anexo 5

C. Comunicación Bidireccional entre Nodos, gateway y servidor

El sistema implementa una arquitectura de comunicación híbrida basada en Bluetooth Low Energy (BLE) para la interacción local entre dispositivos y en el protocolo HTTP para la transmisión de datos hacia la plataforma en la nube Ubidots. Esta combinación permite integrar comunicación de corto alcance y bajo consumo energético con servicios de monitoreo remoto y almacenamiento en la nube, constituyendo una solución adecuada para aplicaciones de agricultura de precisión. El diagrama de bloques se indica en la figura 4.

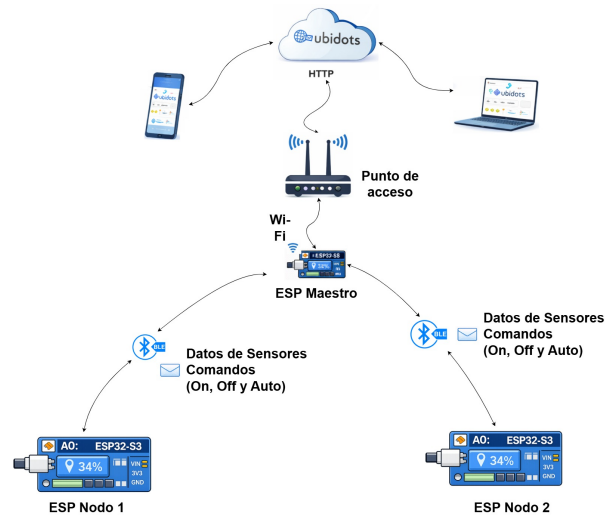


Fig. 4. Diagrama de bloques Nodo 2.

Dentro de esta topología, los nodos 1 (riego) y 2 (pH) actúan como dispositivos periféricos BLE, mientras que el ESP *gateway* opera como dispositivo central. En esta arquitectura, el *gateway* es el encargado de la recolección, procesamiento, gestión de comandos y envío de información hacia la nube, consolidando la operación de toda la red IoT. En el anexo 6 muestra el comportamiento del *gateway* mediante el diagrama de flujo.

Para la iniciación de la conexión entre los dispositivos, se utiliza el protocolo GAP (Generic Access Profile), el cual define los mecanismos de descubrimiento y enlace entre dispositivos BLE. En este contexto, los nodos periféricos transmiten paquetes de publicidad (advertising) que contienen

información básica, como el nombre del dispositivo y el identificador del servicio. El *gateway*, actuando como dispositivo central, realiza un proceso continuo de escaneo del entorno y, al detectar un nodo válido, inicia el procedimiento de conexión.

Una vez establecida la conexión, el intercambio de datos se realiza mediante el protocolo GATT (Generic Attribute Profile), el cual organiza la información en una estructura jerárquica compuesta por servicios y características. En el sistema implementado, cada nodo funciona como un servidor GATT que expone un servicio principal identificado mediante un UUID (Identificador Único Universal) específico.

Este servicio contiene dos características fundamentales: una característica de datos (DATA) y una característica de comandos (CMD). La característica DATA está destinada a la transmisión de información proveniente de los sensores, mientras que la característica CMD se utiliza para la recepción de instrucciones externas enviadas por *gateway*.

La característica de datos opera bajo el mecanismo de lectura y notificación (Notify), lo que permite al nodo enviar información de manera periódica o bajo demanda sin necesidad de solicitudes explícitas por parte del *gateway*. Este mecanismo constituye el canal principal de telemetría del sistema, permitiendo la transmisión de variables como humedad del sustrato, temperatura ambiente, humedad relativa, pH, TDS y estado de los actuadores.

Por otro lado, la característica de comandos emplea operaciones de escritura (Write), mediante las cuales el *gateway* puede enviar instrucciones específicas a los nodos, tales como la activación o desactivación de bombas de riego y corrección de pH. De esta manera, se establece una separación funcional entre el tráfico de telemetría y el tráfico de control, mejorando la organización y robustez del sistema de comunicación.

El *gateway* desempeña múltiples funciones dentro de la arquitectura propuesta. Inicialmente, actúa como cliente BLE, realizando procesos de escaneo para identificar los nodos disponibles en el entorno. Una vez detectado un nodo, el maestro establece la conexión, descubre el servicio GATT correspondiente y se suscribe a la característica de datos para recibir información mediante notificaciones.

Posteriormente, los datos recibidos son procesados, estructurados y agrupados en un formato adecuado para su transmisión hacia la plataforma en la nube.

Adicionalmente, el nodo maestro consulta periódicamente la plataforma Ubidots mediante solicitudes HTTP GET, con el objetivo de obtener comandos remotos definidos desde el panel de control. Estos comandos son interpretados por el *gateway*, quien determina a qué nodo corresponden según su identificador y los transmite a través de la característica CMD mediante operaciones de escritura (Write) sobre BLE.

Finalmente, el *gateway* agrupa los datos provenientes de los diferentes nodos y los envía hacia la nube mediante solicitudes HTTP POST, permitiendo su almacenamiento, visualización y análisis remoto en tiempo real. Esta integración habilita funcionalidades de supervisión continua, generación de datos

históricos y control remoto desde interfaces web o dispositivos móviles.

Debido al bajo volumen de datos, el protocolo GATT con notificaciones resulta suficiente para la transmisión de datos en aplicaciones de monitoreo.

III. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la implementación de los nodos: uno para control de riego y otro para control de pH. La comunicación se realizó mediante BLE, con un intervalo de envío de datos de 5 minutos y recepción de comandos instantánea.

Para verificar la fiabilidad del enlace BLE, se monitorizaron durante dos días (en horario de 6:00 a.m. a 6:00 p.m.) las variables de interés (humedad del suelo, humedad ambiente, temperatura ambiente, pH y TDS) en el dashboard de Ubidots, con el fin de observar la evolución de las curvas y confirmar la correcta transmisión periódica de los datos.

El 100% de las lecturas programadas aparecieron reflejadas en las gráficas. No se detectaron pérdidas de paquetes ni intervalos sin datos. Cada punto en la curva corresponde al instante de llegada de la trama BLE al maestro, con una latencia total inferior a 1 segundos. Se validaron los datos de los nodos imprimiendo en el monitor serie y verificando en el dashboard de Ubidots, por lo tanto, se confirma la integridad de los datos transmitidos.

En la figura 5 se muestra la evolución de la variable humedad ambiente del nodo 1, la cual se ha mantenido en un valor máximo de humedad 52% en las primeras horas de la mañana y un descenso de la misma hasta 38% durante el medio día.

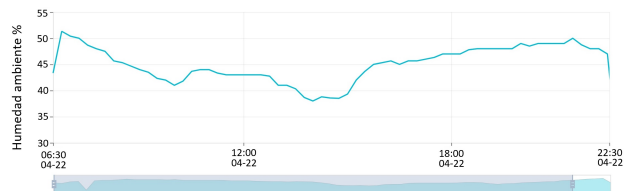


Fig. 5. Curva de humedad ambiente nodo 1.

Existe una relación inversa entre la temperatura ambiente y la humedad ambiente a lo largo del día, al inicio la temperatura es baja aproximadamente de 12 grados centígrados mientras que la humedad alcanza su punto más alto en este mismo horario ver figura 6. A medida que avanza el día la radiación solar incrementa paulatinamente la temperatura alcanzando un máximo aproximado de 23 grados, paralelamente la humedad descende. La tendencia observada en las curvas da certeza que el sensor DHT11 está funcionando correctamente.

La figura 7 muestra la curva de comportamiento de la variable humedad de suelo, que mide la cantidad de agua contenida en porcentaje. Se observa que en las primeras horas del día la humedad del suelo ha alcanzado el umbral más bajo; por lo tanto, el sistema enciende automáticamente la bomba de riego. Durante el día, la humedad se mantiene

constante entre un 65% y un 75%, demostrando que el control automático responde. Además, se puede evidenciar que no se registran falsas activaciones ni oscilaciones, debido a la histerénesis implementada en el algoritmo.

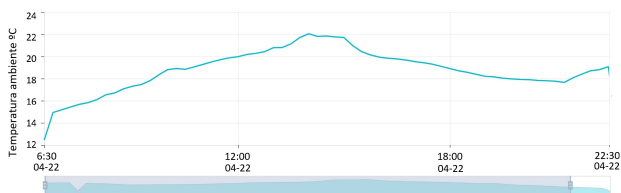


Fig. 6. Curva de temperatura ambiente nodo 1.

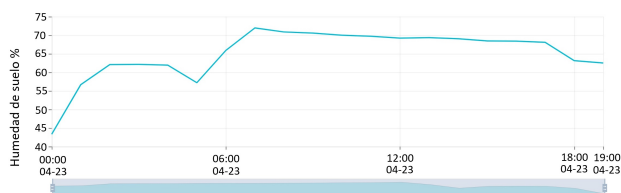


Fig. 7. Curva de humedad de suelo nodo 1.

La figura 8 muestra la evolución del pH en el agua de riego durante el periodo de monitoreo. El valor se mantuvo estable dentro del rango ideal de 5 a 6 unidades de pH, que es el recomendado para cultivos semi hidropónicos como la fresa a fin de favorecer la disponibilidad de nutrientes esenciales. En ningún momento se superaron los umbrales críticos, y cuando el pH se acercaba al límite superior, el sistema activaba automáticamente la bomba correctora inyectando nutrientes a base de ácido fosfórico, devolviendo rápidamente el valor a la zona deseada. Esta respuesta rápida evitó fluctuaciones bruscas que podrían haber bloqueado la absorción de micronutrientes.

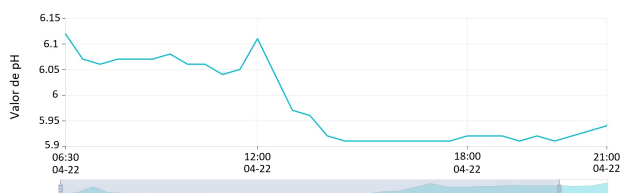


Fig. 8. Curva de pH nodo 2.

Por otra parte, la figura 9 presenta la curva de sólidos disueltos totales (TDS), medida en ppm (Partes por millón). Los valores se mantuvieron en un intervalo de 320 a 335 ppm, estos valores indican que la solución carece de nutrientes, por lo tanto, es un indicativo de que se tiene que subir la dosis de nutrición para lograr un cultivo y producción favorables.

Se puede acceder al panel de control en la nube mediante un computador y también desde un dispositivo móvil, desde donde se pueden enviar comandos directos a los nodos a través del maestro BLE. Los comandos disponibles permiten encender (ON) o apagar (OFF) la bomba de riego o de pH

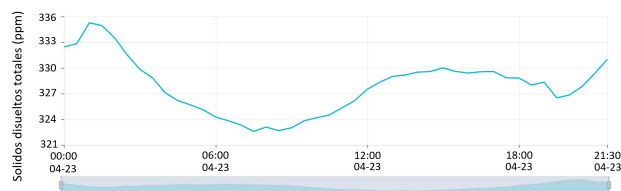


Fig. 9. Curva de TDS nodo 2.

en modo manual, o bien cambiar al modo automático para que el sistema opere según los umbrales predefinidos. Durante las pruebas, cada comando enviado desde el dashboard se ejecutó en el nodo correspondiente en menos de 1 segundo, y el cambio de estado se reflejó inmediatamente en la interfaz, validando así el correcto funcionamiento del control remoto figuras 10 y 11.

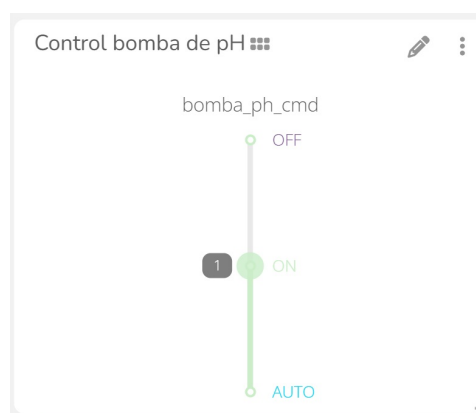


Fig. 10. Panel de control manual desde computador.

Se evaluó y comparó el consumo eléctrico de los nodos utilizando dos tecnologías inalámbricas: BLE empleada en el diseño final y Wi-Fi como referencia. Las mediciones realizadas con un multímetro mostraron una diferencia significativa: el nodo consumió 180 mA con Wi-Fi, mientras que con BLE el consumo fue de solo 6.6 μ A. Esta considerable reducción valida la elección de BLE como tecnología más eficiente para el sistema IoT.

Es importante señalar que, durante las pruebas, los nodos se mantuvieron en comunicación activa permanente, con los sensores siempre encendidos. Sin embargo, el multímetro utilizado no tiene la capacidad de capturar los picos de corriente durante los intervalos extremadamente cortos de transmisión de datos. Por esta razón, el equipo solo pudo registrar el consumo promedio en estado de reposo, mostrando 6.6 μ A para el nodo con BLE, sin reflejar los picos momentáneos asociados a la lectura de sensores y al envío de información.

Aunque es posible estimar teóricamente la autonomía de las baterías, estos picos no detectados afectan la duración real. En la tabla VI se presenta el consumo del nodo de riego junto con sus sensores, el cual alcanza los 73 mA en operación continua, valor que ya considera los picos de transmisión.

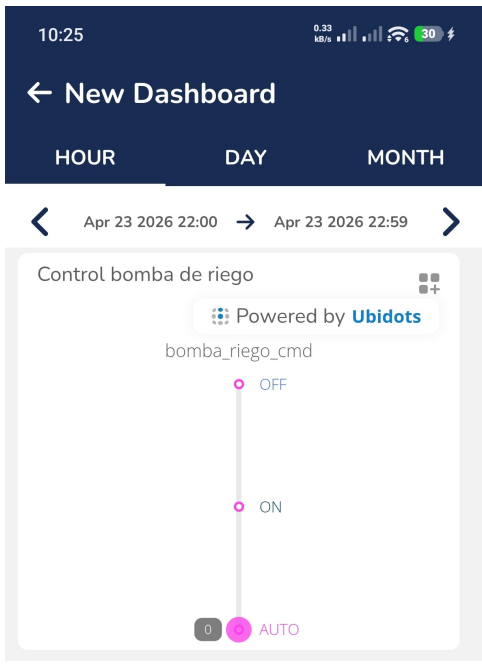


Fig. 11. Panel de control manual desde aplicación móvil.

Con una frecuencia de lectura y envío de datos constante cada 30 segundos, la batería tiene una duración aproximada de 5 días utilizando BLE. En contraste, con la tecnología Wi-Fi, la misma batería apenas alcanzaría 1 día de autonomía debido a su elevado consumo. No obstante, gracias a los ajustes de optimización energética implementados como la reducción de la frecuencia de operación del CPU, disminución de la potencia de transmisión BLE y muestreo diferenciado por horario, se logró extender la autonomía con BLE hasta 7 días.

TABLA VI
CONSUMO DE CORRIENTE POR NODO

Componente	Consumo en Corriente(mA)
Esp32 s3 (CPU 100Mhz y BLE activo)	50 mA
Sensor Plantmate capacitivo	5 mA
DHT11	2 mA
MOC Y TRIAC	10 mA (Tiempo riego)
Regulador MP2315 Mini	6 mA

Capacidad total del nodo = 10500 mA
 Eficiencia del regulador = 90%
 Capacidad util = 10500 mAh x 90%
 Capacidad util = 9450 mA

Duración de la batería = Capacidad util / corriente consumida por nodo
 Duración de la batería = 9450 mA / 73 mA
 Duración de la batería = 101,61 horas
 Duración de la batería en días = 101,61 horas / 24 horas
 Duración de la batería en días = 5.

Con el afán de maximizar la autonomía de las baterías, se recurrió a una serie de ajustes en el sistema. En primer lugar, se redujo la frecuencia del CPU de 240 MHz a 100 MHz. Adicionalmente, se disminuyó la potencia de transmisión BLE de +9 dBm a +6 dBm, valor suficiente para garantizar una comunicación confiable a la distancia operativa de 30 metros entre los nodos y el *gateway*, lo que permitió reducir el consumo durante las transmisiones. Finalmente, se implementó un esquema de muestreo diferenciado por horario: durante el período diurno (de 6:00 a 16:00), los sensores leen y transmiten datos cada 5 minutos, garantizando un monitoreo continuo y detallado de las condiciones del cultivo. En cambio, durante el período nocturno (de 16:00 a 6:00), el intervalo de lectura y envío de datos se incrementó de 5 a 30 minutos, reduciendo así el consumo energético en este intervalo. Gracias a estos ajustes, se logró una autonomía de aproximadamente 7 días con una carga completa de las baterías.

Con base en estos datos expuestos, queda demostrado que BLE es una tecnología de bajo consumo y, por lo tanto, ha sido adoptada para este proyecto.

IV. CONCLUSIONES

Se concluye que el sistema desarrollado logró un control eficaz de las variables del cultivo. Tanto el riego automático como la corrección de pH respondieron adecuadamente, manteniendo la humedad del sustrato en niveles óptimos y estabilizando el pH cuando fue necesario.

En cuanto a la autonomía energética, los ajustes implementados permitieron reducir el consumo de los nodos, demostrando que BLE es más eficiente que Wi-Fi e ideal para sistemas operados con baterías.

En cuanto a conectividad, la implementación del sistema IoT basado en BLE resultó exitosa, logrando una comunicación bidireccional confiable. Se obtuvo una cobertura total de los datos transmitidos desde los nodos hacia la nube, así como una respuesta efectiva a los comandos enviados desde el dashboard de Ubidots hacia los actuadores.

Finalmente, el sistema constituye una alternativa viable para la agricultura de precisión, contribuyendo a un uso más eficiente del agua y los recursos.

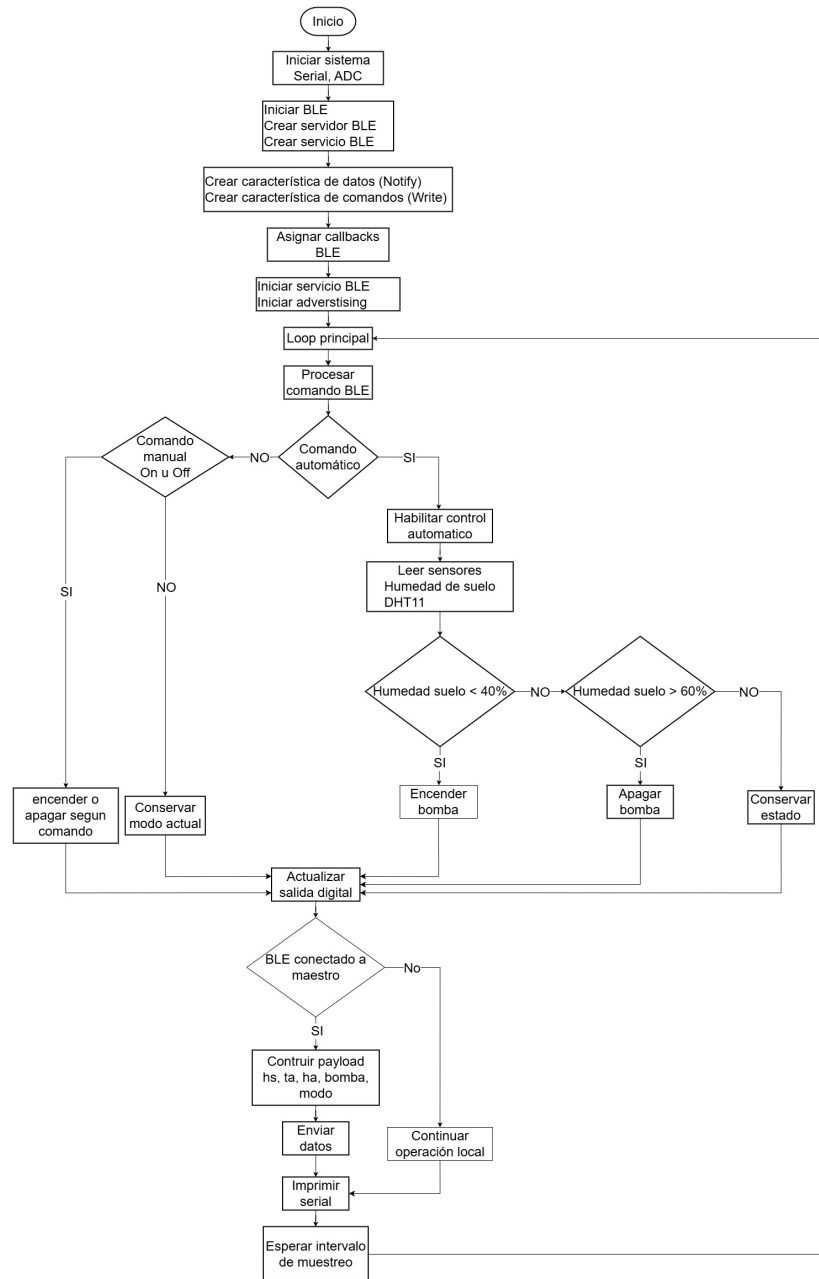
REFERENCES

- [1] S. Venkatachalam, S. Kavitha, P. Neeraja, B. Rajasekaran, and G. Kumar, "Future iot applications using artificial intelligence-based sensors: Agriculture," *2022 4th International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, pp. 1226–1229, 2022.
- [2] S. Shubham, U. Shuchith B, P. Siddarth M, M. Siddarth, G. P. Revathi, and P. B. Honnavalli, "Benefits of hydroponics system using iot," *2022 International Conference on Knowledge Engineering and Communication Systems (ICKES)*, pp. 1–7, 2022.
- [3] Vagisha, E. Rajesh, S. Basheer, and K. Baskar, "Hydroponics soilless smart farming in improving productivity of crop using intelligent smart systems," *2023 3rd International Conference on Innovative Practices in Technology and Management (ICIPTM)*, pp. 1–6, 2023.
- [4] B. Mosaad, R. Abdulla, and M. E. Rana, "Recommendations for a vertical farming system using hydroponics, machine learning and iot," *2023 4th International Conference on Data Analytics for Business and Industry (ICDABI)*, pp. 373–378, 2023.

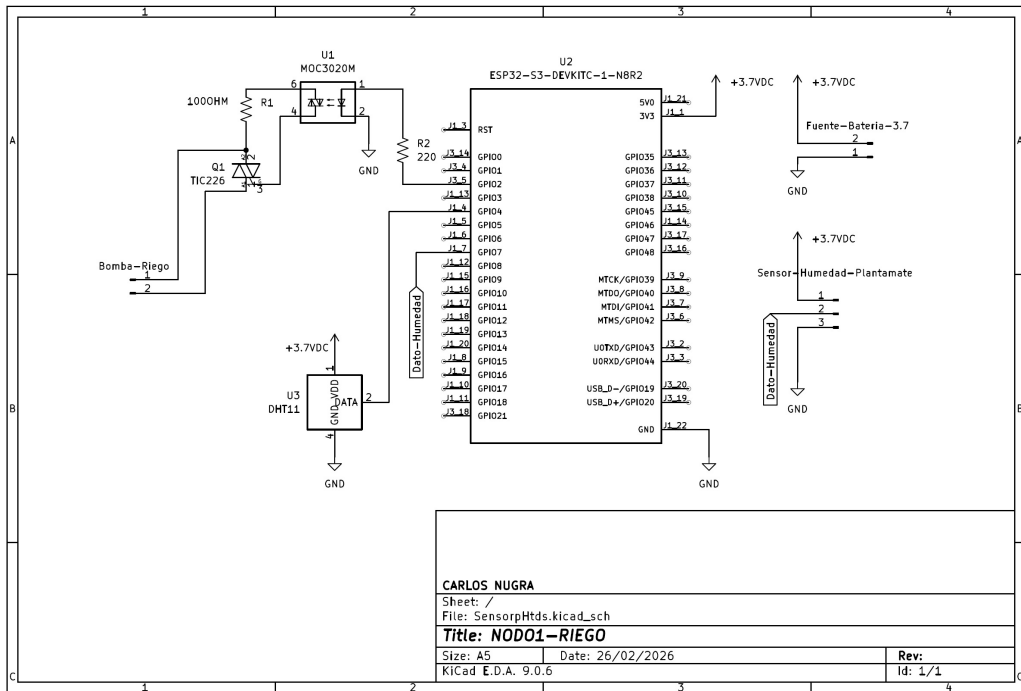
- [5] A. Kumar and P. Savaridassan, "Monitoring and accelerating plant growth using iot and hydroponics," *2023 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*, pp. 1–6, 2023.
- [6] G. Caruso, M. Tamburello, C. Bua, D. Adami, and S. Giordano, "A seedling handling system in a hydroponic greenhouse for homogeneous crop growth," *2023 IEEE 9th World Forum on Internet of Things (WF-IoT), Aveiro, Portugal*, pp. 1–6, 2023.
- [7] M. Shukla, A. Kanwar, R. Soumyadeep, and B. Verma, "Iot based monitoring of environment in a smart hydroponic system," *2023 IEEE Devices for Integrated Circuit (DevIC)*, pp. 257–260, 2023.
- [8] W. Yang, K. Liu, Z. Tan, L.-Y. Lo, Y. Wang, Y. Wang, K.-H. Wong, and C.-Y. Wen, "Hierarchical 3d scene graph based semantic-metric slam for plant inspection and fruit counting in intelligent hydroponics system," *IEEE Internet of Things Journal*, p. 1, 2025.
- [9] T. Choudhury, A. Rohini, and H. Mahdi, "Optimized crop detection using iot and deep neural networks," *2023 5th International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, pp. 1–6, 2023.
- [10] T. Suda, H. Yamashita, and T. Kumaki, "Growth promotion effect using natural sunlight spectrum led for plant factory," *2024 International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers, and Communications (ITC-CSCC)*, pp. 1–4, 2024.
- [11] M. Halder, H. Sekhawat, V. Sharma, S. Dehury, and A. Alkhayyat, "Vertical farming for sustainable urban agriculture using integrated smart intelligence approach," *2024 IEEE 11th Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*, pp. 1–6, 2024.

ANEXOS

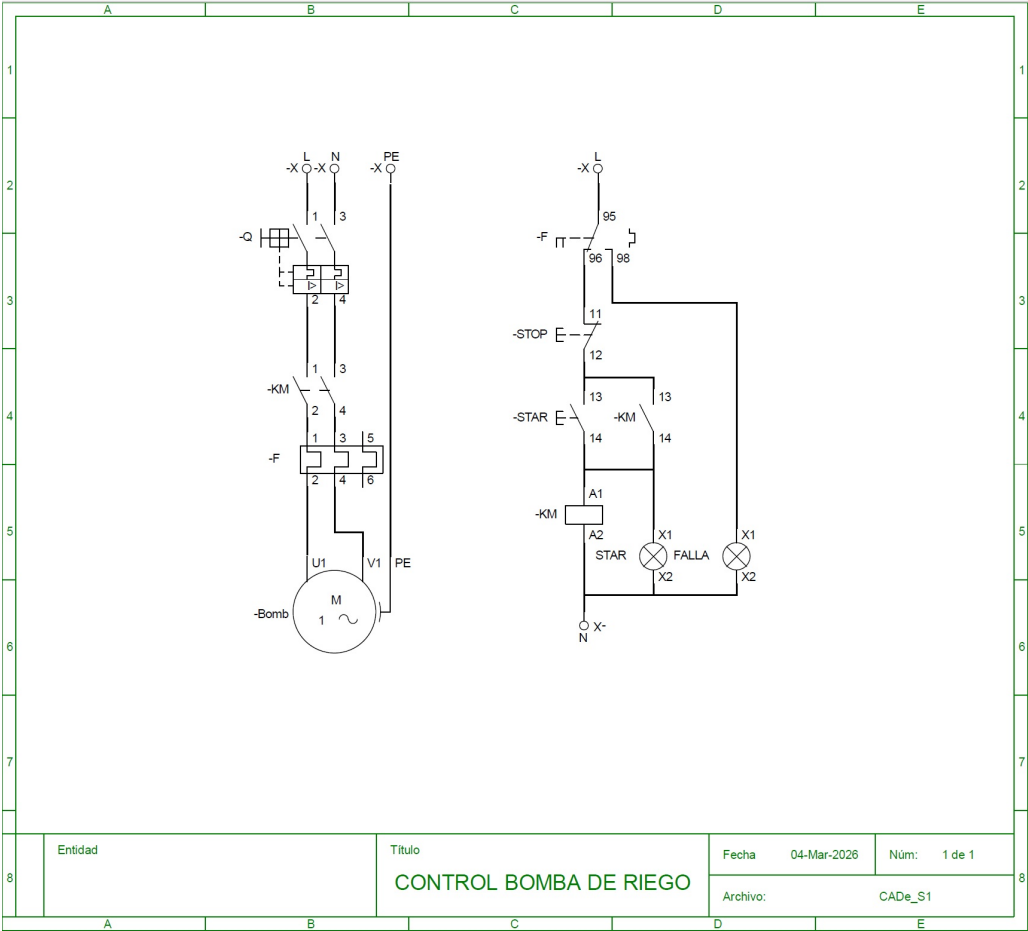
ANEXO 1: DIAGRAMA DE FLUJO NODO 1 (RIEGO)



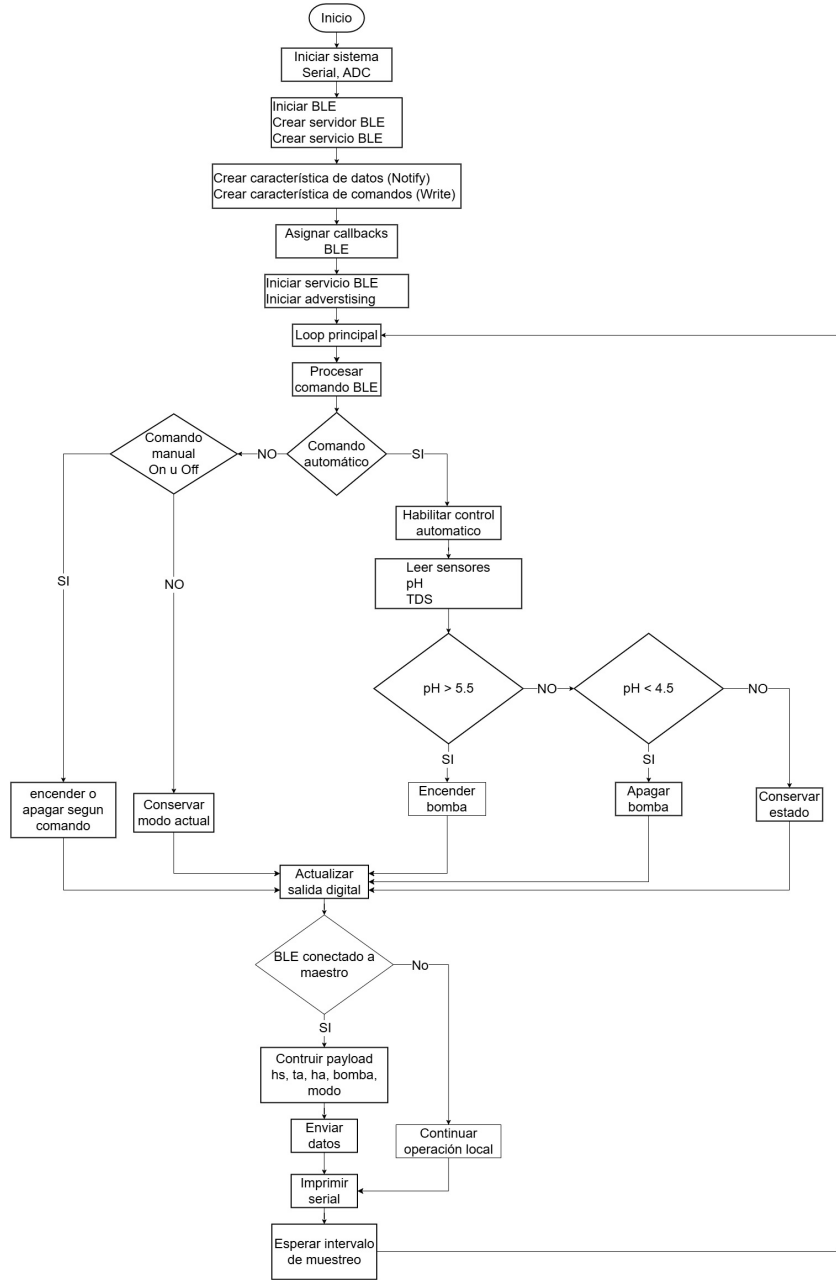
ANEXO 2: ESQUEMA ELÉCTRICO DEL NODO 1



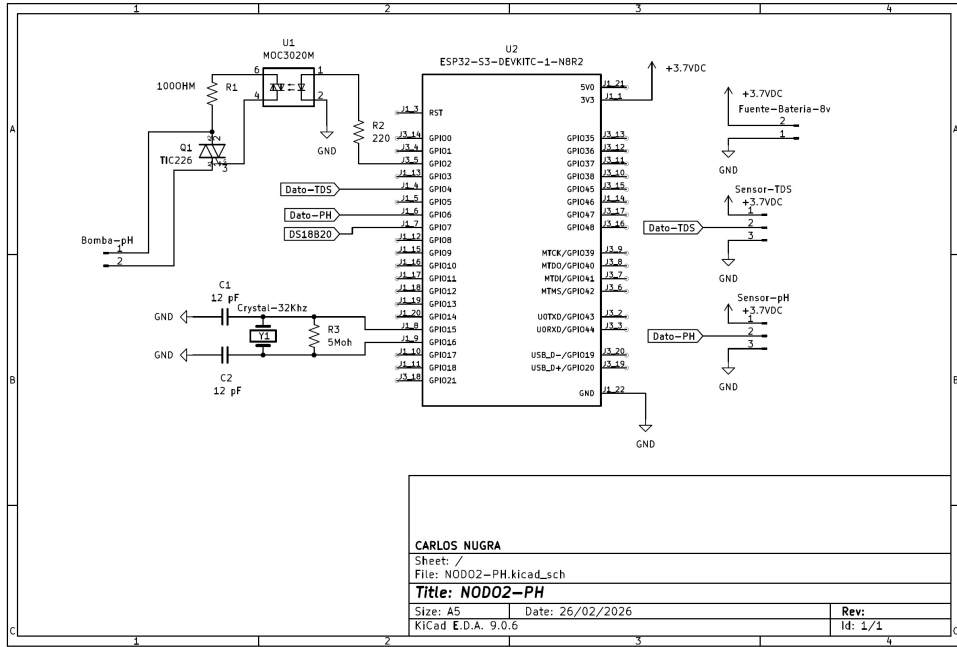
ANEXO 3: ETAPA DE POTENCIA (NODOS 1 Y 2)



ANEXO 4: DIAGRAMA DE FLUJO NODO 2



ANEXO 5: ESQUEMA ELÉCTRICO NODO 2 (pH)



ANEXO 6: DIAGRAMA DE FLUJO MAESTRO

