



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), mayo-junio 2026,
Volumen 10, Número 3.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i3

GREENLY: SISTEMA IOT DISTRIBUIDO PARA LA AUTOMATIZACIÓN Y TELEMETRÍA DEL RIEGO DE JARDINES

**GREENLY: DISTRIBUTED IOT SYSTEM FOR GARDEN
IRRIGATION AUTOMATION AND TELEMETRY**

Gabriel Hussein Ornelas Higareda

Centro Universitario de los Valles, Universidad de Guadalajara

Alberto Vera Camacho

Universidad Tecnológica de Tecamachalco

Manuel González Pérez

Universidad Tecnológica de Tecamachalco

Erik Juárez Cortes

Universidad Tecnológica de Tecamachalco

Gustavo Vera Cruz

Universidad Tecnológica de Tecamachalco

Felipe Canseco Hernández

Universidad Tecnológica de Tecamachalco

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i3.24973

Greenly: sistema IoT distribuido para la automatización y telemetría del riego de jardines

Gabriel Hussein Ornelas Higareda¹ornelasgabriel51@gmail.comgabriel.ornelas4895@alumnos.udg.mx<https://orcid.org/0009-0009-8160-1732>Centro Universitario de los Valles, Universidad
de Guadalajara
México**Alberto Vera Camacho**albertovera16_06@hotmail.comalberto.vc@personal.uttecama.edu.mx<https://orcid.org/0000-0002-5990-9353>Universidad Tecnológica de Tecamachalco
México**Manuel González Pérez**m.gonzalez.perez@personal.uttecama.edu.mx<https://orcid.org/0000-0001-8700-2866>Universidad Tecnológica de Tecamachalco
SECIHTI
México**Erik Juárez Cortes**ek_24@hotmail.comerik.jc@personal.uttecama.edu.mx<https://orcid.org/0000-0002-4478-0825>Universidad Tecnológica de Tecamachalco
México**Gustavo Vera Cruz**gusmag86@gmail.comgustavo.vc@personal.uttecama.edu.mx<https://orcid.org/0009-0008-3157-0483>Universidad Tecnológica de Tecamachalco
México**Felipe Canseco Hernández**cahf_104@hotmail.comfelipe.ch@personal.uttecama.edu.mx<https://orcid.org/0009-0000-1352-5744>Universidad Tecnológica de Tecamachalco
México

RESUMEN

La gestión ineficiente del agua en los espacios académicos representa un desafío creciente ante la variabilidad climática. Este trabajo presenta el diseño e implementación de Greenly, un sistema IoT distribuido para automatizar el riego de un jardín en la Universidad Tecnológica de Tecamachalco, aprovechando el agua almacenada en una cisterna. La arquitectura del sistema se basa en tres nodos con responsabilidades diferenciadas: un nodo de campo (Arduino Nano) que adquiere lecturas de humedad del suelo y las transmite vía RS485; un nodo central (ESP32) que ejecuta la lógica de control y gobierna una bomba hidráulica mediante una etapa de potencia aislada; y un nodo de telemetría (Wemos D1 Mini) que sincroniza el tiempo mediante NTP y registra datos en Firebase Realtime Database cada 60 segundos. La seguridad operativa se garantiza mediante un sensor ultrasónico de nivel volumétrico y flotador mecánico. El sistema se complementa con una aplicación móvil nativa en Android (Kotlin/Jetpack Compose) que integra el control local por Bluetooth Classic y el análisis histórico del riego. Las pruebas de validación confirman la estabilidad de la telemetría, el correcto acoplamiento de potencia y la tolerancia a fallos de comunicación, lo que consolida un prototipo funcional y replicable para la gestión eficiente del agua en contextos de riego de pequeña y mediana escala.

Palabras clave: Internet de las Cosas, automatización de riego, arquitectura distribuida, sistemas embebidos, gestión del agua

¹ Autor Principal

Correspondencia: m.gonzalez.perez@personal.uttecama.edu.mx

Greenly: distributed IoT system for garden irrigation automation and telemetry

ABSTRACT

Inefficient water management in academic settings poses a growing challenge amid climate variability. This work presents the design and implementation of Greenly, a distributed IoT system that automates garden irrigation at the Universidad Tecnológica de Tecamachalco by leveraging water stored in a cistern. The system architecture is based on three nodes with differentiated responsibilities: a field node (Arduino Nano) that acquires soil moisture readings and transmits them via RS485; a central node (ESP32) that executes the control logic and drives a hydraulic pump through an isolated power stage; and a telemetry node (Wemos D1 Mini) that synchronizes time via NTP and logs data to Firebase Realtime Database every 60 seconds. Operational safety is ensured by an ultrasonic volumetric level sensor and a mechanical float switch. The system is complemented by a native Android mobile application (Kotlin/Jetpack Compose) that integrates local Bluetooth Classic control and historical irrigation analysis. Validation tests confirm telemetry stability, correct power coupling, and fault tolerance in communication, consolidating a functional and replicable prototype for efficient water management in small- and medium-scale irrigation contexts.

Keywords: Internet of Things, irrigation automation, distributed architecture, embedded systems, water management

*Artículo recibido 20 mayo 2026
Aceptado para publicación: 20 junio 2026*



INTRODUCCIÓN

La convergencia entre la electrónica, la computación y las redes de comunicación ha impulsado el desarrollo de sistemas capaces de interactuar de forma inteligente con el entorno físico. En este contexto, los sistemas embebidos, basados en microcontroladores, permiten ejecutar tareas dedicadas de monitoreo y control en tiempo real con recursos limitados. La consolidación del Internet de las Cosas (IoT) ha ampliado estas capacidades al incorporar conectividad y gestión remota, lo que ha habilitado soluciones de automatización antes reservadas a entornos industriales (Alfaro et al., 2024).

La gestión eficiente del agua constituye uno de los principales desafíos actuales. En Tecamachalco, Puebla, la sobreexplotación de acuíferos y las deficiencias en la infraestructura hídrica han generado problemas de abastecimiento que afectan tanto a la población como a las instituciones educativas (CUPREDER, s.f.; El Herald de Puebla, 2026). En este escenario, el riego de áreas verdes suele depender de la intervención manual, lo que favorece el desperdicio y la aplicación inconsistente del recurso.

La agricultura de precisión y la gestión hídrica inteligente son algunas de las aplicaciones más relevantes del IoT. Diversos estudios muestran que la integración de sensores de humedad, actuadores controlados por microcontroladores y plataformas de telemetría en la nube puede reducir el consumo de agua entre un 20 % y un 50 % respecto a métodos convencionales, manteniendo o mejorando las condiciones de los cultivos (Nsoh et al., 2024). Asimismo, investigaciones recientes destacan el potencial de los sistemas embebidos de bajo costo para ampliar el acceso a tecnologías de automatización hídrica en contextos con recursos limitados (Hernández Lara et al., 2021; Peña de Loza & Ibarra-Villegas, 2024). Desde el punto de vista técnico, los sistemas IoT de riego enfrentan desafíos relacionados con la confiabilidad de las comunicaciones, el aislamiento entre las etapas de control y de potencia, y la sincronización temporal de los datos. En este sentido, las arquitecturas distribuidas basadas en múltiples nodos constituyen una alternativa eficaz para reducir cuellos de botella, incrementar la tolerancia a fallos y facilitar la escalabilidad y el mantenimiento del sistema (Alfaro et al., 2024; Shelzer, 2025).

En este contexto, el presente trabajo, desarrollado en el marco del Verano de Investigación Científica Delfín 2026 en la Universidad Tecnológica de Tecamachalco (UTTECAM), presenta el diseño e implementación de Greenly, un sistema IoT distribuido para la automatización del riego de un jardín



institucional mediante el aprovechamiento del agua almacenada en una cisterna. La solución integra tres nodos microcontrolados con funciones diferenciadas, comunicación RS485, telemetría en Firebase Realtime Database y una aplicación móvil Android para el monitoreo y control. El objetivo es desarrollar un prototipo funcional, replicable y de bajo costo que contribuya a la gestión eficiente del agua en espacios académicos de pequeña y mediana escala.

Diversos estudios recientes han demostrado la viabilidad de aplicar tecnologías IoT para automatizar el riego mediante sensores de humedad, microcontroladores y plataformas de monitoreo remoto. Sin embargo, las arquitecturas implementadas difieren en aspectos como los protocolos de comunicación, la distribución de funciones entre dispositivos y las capacidades de supervisión y control ofrecidas al usuario. La Tabla 1 presenta una comparación entre Greenly y algunos trabajos representativos reportados en la literatura reciente, considerando características relacionadas con la adquisición de datos, la conectividad, el almacenamiento de información y las estrategias de control.

Tabla 1. Comparación de Greenly con trabajos relacionados sobre automatización de riego basada en IoT

Característica	Sihombing et al. (2025)	Boursianis et al. (2023)	Sistema para invernadero (2025)	Greenly
Sensor de humedad de suelo	Sí	Sí	Sí	Sí
ESP32	Sí	Sí	Sí	Sí
Comunicación RS485	Sí	No reportada	No reportada	Sí
Arquitectura distribuida multicontrolador	Parcial	No	No	Sí (3 nodos)
Telemetría IoT	Sí	Sí	Sí	Sí
Almacenamiento en la nube	Parcial	Sí	Sí	Firestore Realtime Database

Aplicación móvil nativa Android	No reportada	No reportada	No reportada	Sí
Control local sin Internet	No reportado	No reportado	No reportado	Bluetooth Classic
Sincronización NTP	No reportada	No reportada	No reportada	Sí
Protección por nivel de agua	No reportada	No reportada	No reportada	Ultrasónico + flotador
Validación experimental	Sí	Sí	Sí	Sí

Fuente: Elaboración propia con base en Sihombing et al. (2025), Boursianis et al. (2023) y estudios recientes de automatización de riego basados en IoT.

Como puede observarse en la Tabla 1, todas las propuestas analizadas incorporan sensores de humedad, conectividad IoT y validación experimental, lo que confirma la madurez de estas tecnologías para aplicaciones de riego inteligente. No obstante, Greenly integra de manera simultánea características que no se reportan de forma conjunta en los trabajos comparados, entre ellas una arquitectura distribuida de tres nodos especializados, comunicación RS485 para el entorno de campo, sincronización temporal mediante NTP, almacenamiento histórico en Firebase Realtime Database y una aplicación móvil Android con control local mediante Bluetooth Classic. Adicionalmente, el sistema incorpora un mecanismo redundante de supervisión del nivel de agua basado en la combinación de un sensor ultrasónico y un flotador mecánico de seguridad. Esto permite desacoplar las funciones de adquisición, control y telemetría, favoreciendo la escalabilidad, el mantenimiento y la robustez operativa del sistema.

METODOLOGÍA

El presente trabajo adopta un enfoque cuantitativo de tipo aplicativo, orientado al diseño y validación de un sistema IoT para la automatización del riego. La investigación es de carácter experimental, ya que evalúa el comportamiento del sistema mediante el monitoreo y control de variables como la humedad del suelo, el nivel de la cisterna y el estado de la bomba hidráulica en condiciones reales de operación.

El estudio se realizó en la Universidad Tecnológica de Tecamachalco (UTTECAM), en Tecamachalco, Puebla, México, específicamente en el jardín exterior del edificio L. Greenly utiliza una cisterna existente en el plantel como fuente de suministro y automatiza la dosificación de agua hacia el jardín. La instalación final, con el gabinete de control montado sobre el muro contiguo a la cisterna, se muestra en la Figura 1.

Figura 1. vista general del despliegue, cisterna y gabinete sobre el muro



Arquitectura general del sistema

Greenly se organiza en tres nodos microcontrolados con funciones específicas, comunicados mediante los protocolos más adecuados para cada enlace. Esta arquitectura distribuida reduce la carga de procesamiento en un único dispositivo, facilita el mantenimiento y separa físicamente la electrónica de control del entorno húmedo de campo. El esquema eléctrico completo del sistema se presenta en la Figura 2, mientras que la arquitectura general, organizada en las capas física, IoT y de usuario, se muestra en la Figura 3.

Figura 2. Diagrama Greenly: esquemático eléctrico completo

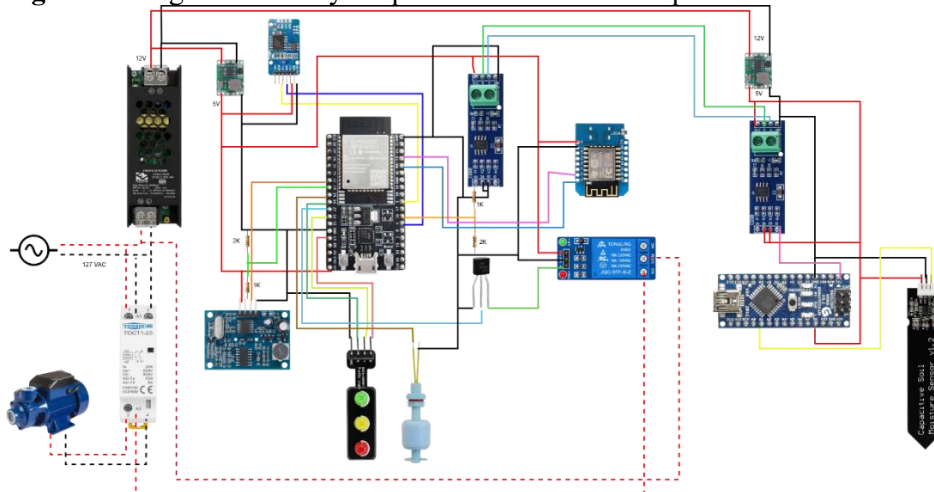
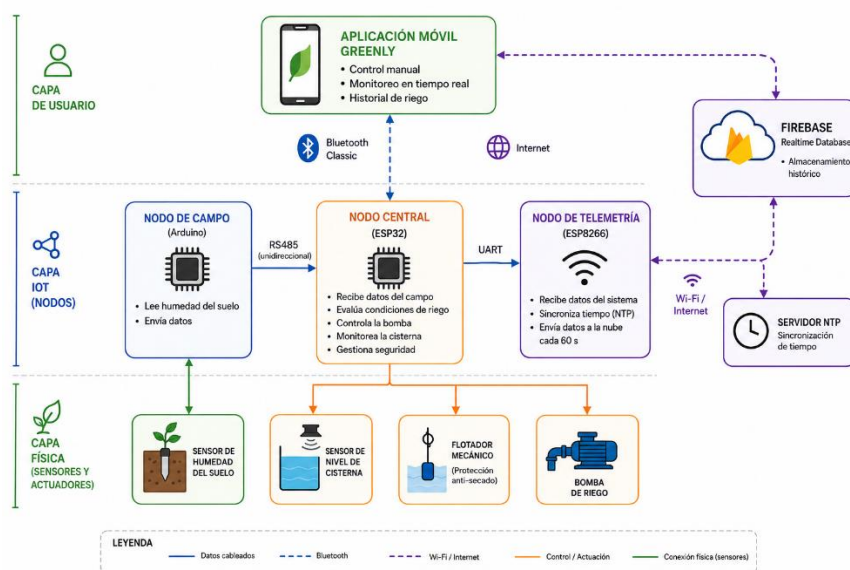


Figura 3. Arquitectura general del sistema Greenly organizada en tres capas: capa física (sensores y actuadores), capa IoT (nodos microcontrolados) y capa de usuario (aplicación móvil y servicios en la nube)



El nodo de campo adquiere la humedad del suelo, el nodo central ejecuta la lógica de control y acciona la bomba hidráulica, y el nodo de telemetría registra la información en la nube y mantiene la sincronización horaria del sistema. A continuación, se describe cada nodo en detalle.

Nodo de campo

El nodo de campo está basado en un Arduino Nano (ATmega328P) y tiene como función medir la humedad del suelo mediante un sensor capacitivo (DFRobot, 2024) y transmitir la lectura al nodo central. Se seleccionó un sensor capacitivo en lugar de uno resistivo debido a su mayor resistencia a la corrosión en ambientes húmedos. Además, el sensor fue sellado con termofit y silicón automotriz para mejorar su protección frente a la humedad.

Debido a que este nodo se encuentra enterrado junto a la línea de riego, la comunicación con el nodo central se realiza mediante RS485, protocolo elegido por su inmunidad al ruido y capacidad de transmisión a largas distancias (Sládek et al., 2025). Para ello se emplea un transceptor MAX485 (Maxim Integrated, 2022) configurado en un enlace unidireccional, donde el nodo de campo únicamente transmite datos. La alimentación se proporciona mediante una fuente conmutada de 12 V (UNIT Electronics, 2024b) y un convertidor reductor MP1584EN que suministra los 5 V de operación (Monolithic Power Systems, 2018).

Toda la electrónica se alojó en una caja estanca enterrada junto al sensor, protegida contra la humedad del subsuelo, como se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Caja estanca enterrada con el Arduino Nano y el módulo RS485



Nodo central

El nodo central constituye la unidad de control de Greenly y está basado en un ESP32 con conectividad Bluetooth integrada (Espressif Systems, 2024). Este nodo recibe las lecturas de humedad enviadas por el Arduino Nano mediante comunicación UART (Altium, 2024), evalúa las condiciones de riego y gobierna la bomba hidráulica según la lógica de control implementada.

El accionamiento de la bomba se realiza mediante una etapa de potencia aislada compuesta por un transistor 2N2222, un módulo relay y un contactor TOC11-25, garantizando el aislamiento eléctrico entre la electrónica de control y la línea de alimentación de 127 VAC (Fairchild Semiconductor, 2014; Nextia Fenix, 2024).

La seguridad operativa se basa en dos mecanismos complementarios. El primero es un sensor ultrasónico impermeable JSN-SR04T que monitorea continuamente el nivel de la cisterna (JSN-SR04T, 2019), mientras que el segundo consiste en un flotador mecánico vertical que actúa como protección contra funcionamiento en seco, bloqueando el arranque de la bomba cuando se alcanza un nivel crítico de agua (UNIT Electronics, 2024a). La instalación de ambos elementos se muestra en las Figuras 5 y 6.

Figura 5. Interior de la cisterna con sensor ultrasónico y flotador montados



Figura 6. Detalle del flotador mecánico vertical con su contrapeso para el agua



El estado operativo del sistema se indica mediante un módulo semáforo de tres LEDs que permite representar visualmente las principales condiciones de funcionamiento, incluyendo operación normal, riego activo, nivel bajo de agua, cisterna vacía, pérdida de comunicación y riego manual (UNIT Electronics, 2024d).

Para mantener la programación horaria incluso ante interrupciones de la red Wi-Fi o del suministro eléctrico, el nodo central incorpora un reloj de tiempo real DS3231 conectado mediante el protocolo I²C (Analog Devices, 2015; NXP Semiconductors, 2021). Con la información disponible, el ESP32 genera una trama en formato JSON que envía al nodo de telemetría y, simultáneamente, pone a disposición de la aplicación móvil mediante Bluetooth Classic, permitiendo el monitoreo y control local aun sin conexión a internet (Narváez Pupiales et al., 2023; Mora Olivero et al., 2021).

La electrónica se integró en una placa perforada soldada manualmente. La tarjeta terminada se muestra en la Figura 7 y su instalación final dentro del gabinete de control puede observarse en la Figura 8.

Figura 7. Placa perforada con el cableado del nodo central antes del montaje en el gabinete

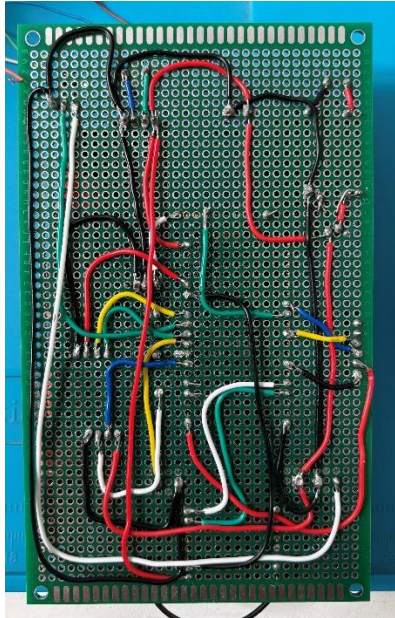


Figura 8. Interior del gabinete terminado — ESP32, Wemos, contactor, fuente, relay y semáforo



Nodo de telemetría

El nodo de telemetría se basa en un Wemos D1 Mini con ESP8266, seleccionado por su conectividad Wi-Fi integrada y su bajo costo (WEMOS Electronics, 2024). Su función es recibir la información generada por el nodo central, sincronizar la hora mediante NTP (Mills et al., 2010) y almacenar los registros en Firebase Realtime Database para construir un histórico consultable del sistema (Google,

2024). Adicionalmente, este nodo actualiza periódicamente la referencia temporal del ESP32, garantizando la consistencia de las marcas de tiempo durante periodos prolongados de operación.

Aplicación móvil

Como interfaz de usuario se desarrolló una aplicación móvil nativa para Android utilizando Kotlin y Jetpack Compose. La aplicación integra funciones de autenticación, conexión Bluetooth, monitoreo en tiempo real e historial de registros. Desde ella es posible supervisar la humedad del suelo y el nivel de la cisterna, consultar el historial almacenado en Firebase y controlar manualmente el riego cuando sea necesario (Google, 2024).

Modelo matemático de los sensores

La conversión de las magnitudes físicas en valores interpretables por el sistema se apoya en los siguientes modelos, implementados directamente en el firmware de cada nodo.

Humedad del suelo. La medición de humedad atraviesa dos transformaciones sucesivas en nodos distintos. En la primera, que ocurre en el nodo de campo, el sensor capacitivo entrega una señal analógica de voltaje que el convertidor analógico-digital (ADC) de 10 bits del Arduino Nano traduce a un número entero entre 0 y 1023, al que llamaremos **lectura cruda** (L_{ADC}): un valor de 0 corresponde a 0 V en el pin y uno de 1023 al voltaje máximo de referencia (5 V). Para atenuar el ruido propio de las mediciones analógicas, se toman $n = 5$ muestras consecutivas separadas 10 ms y se promedian:

$$L_{ADC}^- = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_{ADC,i} \quad \text{Ecuación 1}$$

El subíndice final corresponde a la i -ésima lectura del ADC. Ese promedio se convierte en un primer porcentaje de humedad mediante un mapeo lineal calibrado en campo con dos referencias físicas: el sensor al aire libre (suelo completamente seco), que arroja $L_{seco} = 675$, y el sensor sumergido en agua (humedad máxima), que arroja $L_{húmedo} = 354$:

$$H_{nodo}(\%) = \left(\frac{L_{seco} - L_{ADC}^-}{L_{seco} - L_{húmedo}} \right) \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

Conviene notar que la lectura cruda disminuye conforme aumenta la humedad —de ahí que la fórmula reste L_{ADC}^- del valor seco—. El resultado se limita al intervalo [0,100] % y se transmite por RS485 al nodo central.

En la segunda transformación, ya en el nodo central, el ESP32 aplica un reescalado adicional. La razón es práctica: en las pruebas, la salida útil del nodo de campo se saturaba cerca del 91 % en lugar de alcanzar el 100 % teórico, debido a las características físicas del propio sensor. Para que la variable de control aproveche toda la escala, el firmware reasigna el rango observado [0,91] al rango completo [0,100]:



$$H(\%) = \left(\frac{H_{nodo}}{91} \right) \times 100$$

Ecuación 3

Agotando de nuevo el resultado a $[0,100]$ %. Este doble escalado asegura que la decisión de riego se tome en una escala porcentual completa y consistente.

Nivel de la cisterna. El sensor ultrasónico JSN-SR04T determina la distancia hasta la superficie del agua mediante el principio del tiempo de vuelo: emite un pulso sonoro y mide cuánto tarda el eco en regresar. Ese intervalo, el **tiempo de eco** (t_{eco}), se mide en microsegundos con la función `pulseIn()` del ESP32. La distancia hasta el agua (d_{agua}), en centímetros, se obtiene con la velocidad del sonido en aire empleada por el `fsonidomware`, $v_{sonido} = 0.034 \text{ cm}/\mu\text{s}$, dividiendo entre dos porque el pulso recorre el trayecto de ida y vuelta:

$$d_{agua} = \frac{t_{eco} \cdot v_{sonido}}{2} = \frac{t_{eco} \cdot 0.034}{2}$$

Ecuación 4

Esa distancia se convierte después en porcentaje de llenado (N) mediante un mapeo lineal inverso calibrado físicamente sobre el tanque real: a $d_{vacío} = 135 \text{ cm}$ la cisterna está vacía (0 %) y a $d_{lleno} = 22 \text{ cm}$ está llena (100 %):

$$N(\%) = \left(\frac{d_{vacío} - d_{agua}}{d_{vacío} - d_{lleno}} \right) \times 100$$

Ecuación 5

con el resultado igualmente acotado a $[0, 100]$ %.

Lógica de control del riego. El encendido y apagado de la bomba se rige por una **función de histéresis** definida sobre dos umbrales de humedad: el **umbral seco** $U_{seco} = 15\%$, que dispara el riego cuando la humedad cae por debajo, y el **umbral húmedo** $U_{húmedo} = 75\%$, que lo detiene cuando la humedad lo supera. Trabajar con dos umbrales en lugar de uno evita que la bomba se encienda y apague repetidamente cuando la humedad ronda un valor límite, fenómeno conocido como *chattering*.

A esta condición se añade una restricción horaria. El sistema riega en dos ventanas diarias de 4 minutos cada una: una matutina a las 7:30 h y otra vespertina a las 17:30 h. Se denomina $\mathcal{H}_{permitido}$ al conjunto de instantes que caen dentro de cualquiera de esas dos ventanas. Si H_t es la humedad en el instante t ,

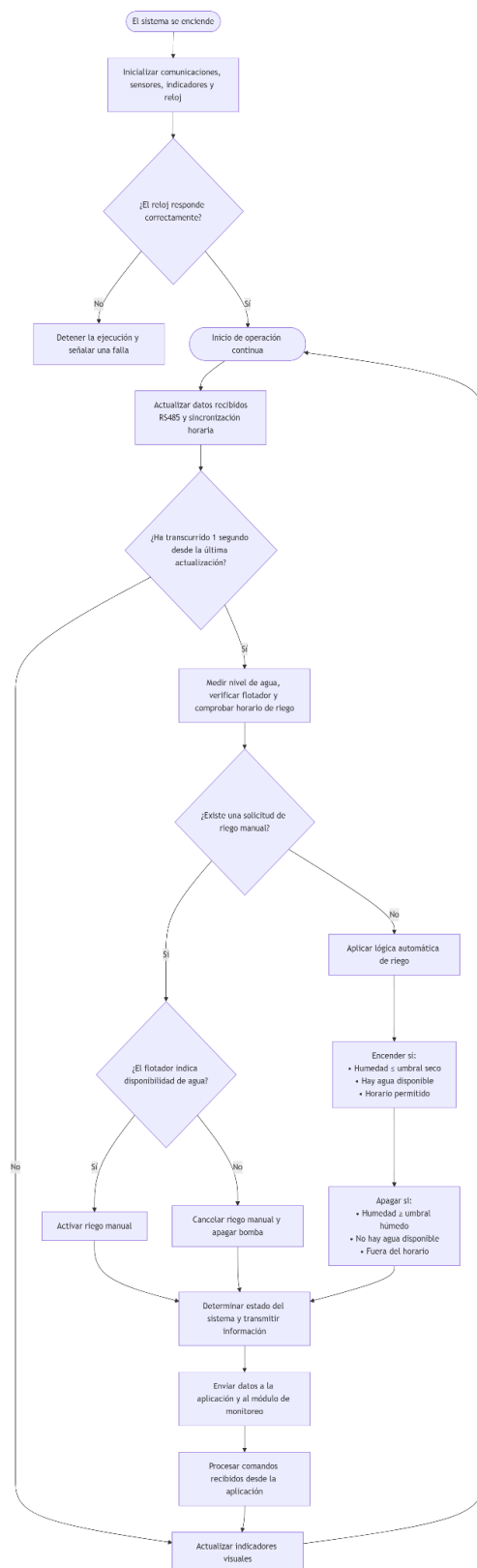
$h(t)$ la hora del sistema y $B_t \in \{0,1\}$ el estado de la bomba (0 = apagada, 1 = encendida), la transición se describe así:

$$B_t = \begin{cases} 1, & \text{si } H_t \leq U_{seco} \wedge h(t) \in \mathcal{H}_{permitido} \wedge \text{flotador OK} \\ 0, & \text{si } H_t \geq U_{húmedo} \vee h(t) \notin \mathcal{H}_{permitido} \vee \text{flotador en alerta} \\ B_{t-1}, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad \text{Ecuación 6}$$

El tercer caso, $B_t = B_{t-1}$, es la zona intermedia: la bomba conserva el estado que traía. Ese es el ciclo de histéresis.

Por encima de cualquier otra condición está la seguridad del flotador. Si detecta nivel crítico, el firmware apaga la bomba de inmediato sin importar la humedad, la hora ni el modo de operación, incluido el riego manual. El nivel ultrasónico N cumple en cambio un papel estrictamente informativo: se envía a la aplicación, se guarda en Firebase y enciende la advertencia visual (LED amarillo parpadeante) cuando $N \leq U_{agua_baja}$, con $U_{agua_baja} = 30\%$, pero nunca interrumpe la bomba. Queda así una división clara de responsabilidades: el ultrasónico mide de forma continua e informa; el flotador, binario y mecánico, protege. El proceso de toma de decisiones descrito se resume en el diagrama de flujo de la Figura 9.

Figura 9. Diagrama de flujo del ciclo de control del nodo central (ESP32), desde el arranque del sistema hasta la toma de decisiones de riego manual y automático con retorno al ciclo continuo



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Greenly fue evaluado en condiciones reales entre el 25 de junio de 2026 a las 14:25 h y el 29 de junio de 2026 a las 17:40 h, acumulando 5955 minutos de operación. Durante este periodo se registraron 5833

mediciones de humedad del suelo, nivel de cisterna y estado operativo, almacenadas en Firebase Realtime Database.

Con una frecuencia de muestreo de un registro por minuto, se esperaban 5955 muestras. De ellas, 5833 fueron almacenadas correctamente, lo que corresponde a una eficiencia de telemetría del 97.95 %. Asimismo, no se detectaron interrupciones de comunicación durante el periodo de prueba, obteniéndose una disponibilidad del 100 %.

La diferencia entre los registros esperados y los almacenados fue de 2.05 %. Sin embargo, esta pérdida no afectó la reconstrucción continua del comportamiento temporal de las variables monitoreadas, por lo que la infraestructura de telemetría demostró ser adecuada para aplicaciones de riego, donde la dinámica de las variables físicas es significativamente más lenta que el intervalo de muestreo utilizado. El registro histórico exportado desde Firebase en formato CSV (Figura 10) documenta el llenado inicial de la cisterna, lo que permitió validar la calibración del sensor ultrasónico JSN-SR04T. Entre las 14:25 h y las 15:29 h del 25 de junio, el nivel reportado aumentó de forma consistente desde 4 % hasta 92 %. La evolución fue prácticamente monótona, con una única lectura anómala a las 14:37:43 h (43 % frente a valores cercanos a 12–15 %), atribuida a una reflexión espuria del pulso ultrasónico, fenómeno característico de este tipo de sensores en presencia de superficies irregulares o turbulencia temporal del agua durante el llenado.

Figura 10. Fragmento del histórico exportado en CSV durante el llenado inicial de la cisterna el 25 de junio de 2026

	A	B	C	D	E	F	G
1	Fecha	Hora	Humedad (%)	Cisterna (%)	Rombo	Tipo de riego	Estado
2	2026-06-25	14:25:43	78	4	Apagada	-	Cisterna vacía
3	2026-06-25	14:26:43	78	4	Apagada	-	Cisterna vacía
4	2026-06-25	14:27:43	78	4	Apagada	-	Cisterna vacía
5	2026-06-25	14:28:43	78	6	Apagada	-	Cisterna vacía
6	2026-06-25	14:29:43	78	6	Apagada	-	Cisterna vacía
7	2026-06-25	14:30:43	78	8	Apagada	-	Cisterna vacía
8	2026-06-25	14:31:43	78	9	Apagada	-	Cisterna vacía
9	2026-06-25	14:32:43	78	8	Apagada	-	Cisterna vacía
10	2026-06-25	14:33:43	78	10	Apagada	-	Cisterna vacía
11	2026-06-25	14:34:43	78	11	Apagada	-	Cisterna vacía
12	2026-06-25	14:35:43	78	12	Apagada	-	Cisterna vacía
13	2026-06-25	14:36:43	78	12	Apagada	-	Cisterna vacía
14	2026-06-25	14:37:43	76	43	Apagada	-	Sistema OK
15	2026-06-25	14:38:43	76	15	Apagada	-	Cisterna baja
16	2026-06-25	14:39:43	76	16	Apagada	-	Cisterna baja
17	2026-06-25	14:41:43	78	17	Apagada	-	Cisterna baja
18	2026-06-25	14:42:43	78	19	Apagada	-	Cisterna baja
19	2026-06-25	14:43:43	78	19	Apagada	-	Cisterna baja
20	2026-06-25	14:44:43	78	20	Apagada	-	Cisterna baja
21	2026-06-25	14:45:43	78	20	Apagada	-	Cisterna baja
22	2026-06-25	14:46:43	78	22	Apagada	-	Cisterna baja
23	2026-06-25	14:47:43	78	24	Apagada	-	Cisterna baja
24	2026-06-25	14:49:43	75	24	Apagada	-	Cisterna baja
25	2026-06-25	14:50:43	75	26	Apagada	-	Cisterna baja
26	2026-06-25	14:51:43	75	29	Apagada	-	Cisterna baja
27	2026-06-25	14:52:43	75	31	Apagada	-	Sistema OK
28	2026-06-25	14:53:43	78	32	Apagada	-	Sistema OK
29	2026-06-25	14:54:43	76	34	Apagada	-	Sistema OK
30	2026-06-25	14:55:43	76	35	Apagada	-	Sistema OK
31	2026-06-25	14:56:43	75	37	Apagada	-	Sistema OK
32	2026-06-25	14:58:43	75	41	Apagada	-	Sistema OK
33	2026-06-25	14:59:43	76	42	Apagada	-	Sistema OK
34	2026-06-25	15:00:43	76	44	Apagada	-	Sistema OK
35	2026-06-25	15:01:44	76	46	Apagada	-	Sistema OK
36	2026-06-25	15:02:44	76	47	Apagada	-	Sistema OK
37	2026-06-25	15:03:44	76	49	Apagada	-	Sistema OK
38	2026-06-25	15:04:44	76	51	Apagada	-	Sistema OK
39	2026-06-25	15:05:44	76	52	Apagada	-	Sistema OK
40	2026-06-25	15:06:44	76	54	Apagada	-	Sistema OK
41	2026-06-25	15:07:44	76	56	Apagada	-	Sistema OK
42	2026-06-25	15:08:44	76	58	Apagada	-	Sistema OK
43	2026-06-25	15:09:44	78	60	Apagada	-	Sistema OK
44	2026-06-25	15:10:44	78	58	Apagada	-	Sistema OK
45	2026-06-25	15:11:44	76	60	Apagada	-	Sistema OK
46	2026-06-25	15:12:44	78	64	Apagada	-	Sistema OK
47	2026-06-25	15:13:44	76	65	Apagada	-	Sistema OK
48	2026-06-25	15:14:44	78	68	Apagada	-	Sistema OK
49	2026-06-25	15:15:44	78	68	Apagada	-	Sistema OK
50	2026-06-25	15:16:44	78	71	Apagada	-	Sistema OK
51	2026-06-25	15:17:44	78	72	Apagada	-	Sistema OK
52	2026-06-25	15:18:44	78	73	Apagada	-	Sistema OK
53	2026-06-25	15:19:44	78	75	Apagada	-	Sistema OK
54	2026-06-25	15:20:44	78	78	Apagada	-	Sistema OK
55	2026-06-25	15:21:44	78	80	Apagada	-	Sistema OK
56	2026-06-25	15:22:44	78	81	Apagada	-	Sistema OK
57	2026-06-25	15:23:44	78	83	Apagada	-	Sistema OK
58	2026-06-25	15:24:44	78	84	Apagada	-	Sistema OK
59	2026-06-25	15:25:44	78	86	Apagada	-	Sistema OK
60	2026-06-25	15:26:44	78	88	Apagada	-	Sistema OK
61	2026-06-25	15:27:44	78	89	Apagada	-	Sistema OK
62	2026-06-25	15:28:44	78	91	Apagada	-	Sistema OK
63	2026-06-25	15:29:44	78	92	Apagada	-	Sistema OK

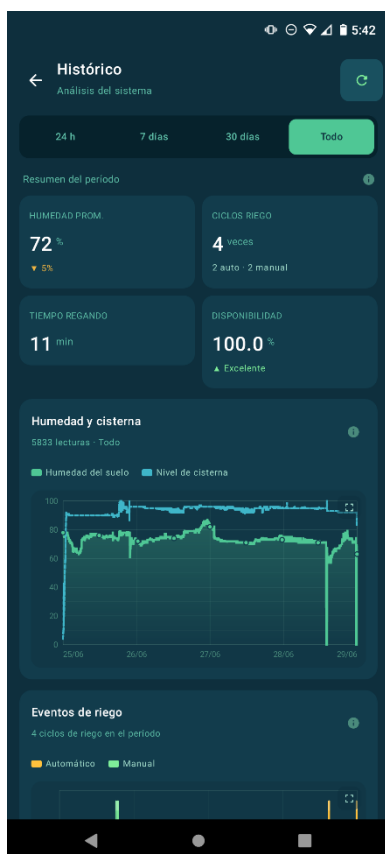
La Figura 11 muestra la pantalla principal de la aplicación móvil durante una sesión de monitoreo en vivo. En ella se observa una humedad del suelo de 65 %, nivel de cisterna de 96 %, flotador de seguridad activo, semáforo en estado "Sistema OK" y el siguiente riego automático programado para las 17:30 h con una duración de 4 minutos. La visualización simultánea de información proveniente de los tres nodos —humedad del nodo de campo, estado y nivel de la cisterna del nodo central, y referencia temporal sincronizada desde el nodo de telemetría— evidencia la correcta integración de la arquitectura distribuida implementada.

El panel histórico de la aplicación, configurado para el rango "Todo" (Figura 12), reportó para las 99.25 horas de evaluación una humedad promedio de 72 %, cuatro ciclos de riego acumulados (dos automáticos y dos manuales), 11 minutos totales de bombeo y una disponibilidad del 100 %.

Figura 12. Resumen agregado del periodo completo de pruebas en la aplicación Greenly.

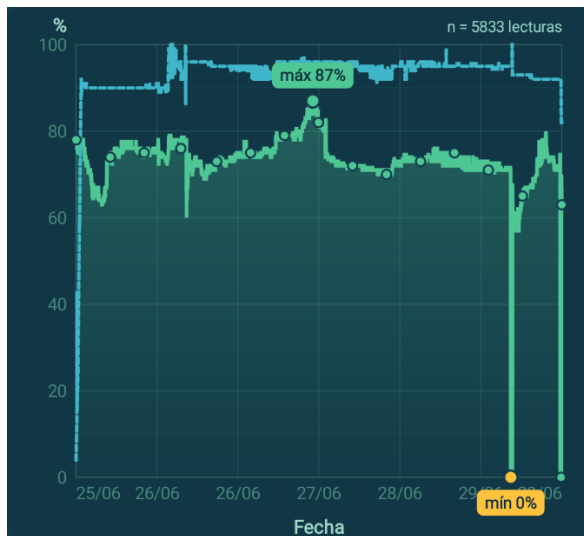


Figura 11. Pantalla principal de la aplicación Greenly durante una sesión de monitoreo en vivo



La Figura 13 presenta la curva combinada de humedad del suelo y nivel de cisterna a lo largo de los cinco días de operación, sobre un total de 5,833 puntos. El análisis de esta gráfica permite extraer tres observaciones cuantitativas relevantes:

Figura 13. Evolución temporal de la humedad del suelo y el nivel de la cisterna durante el periodo completo de pruebas, 5,833 lecturas



Estabilidad del nivel de cisterna

La curva azul (nivel volumétrico) permaneció entre 82 % y 87 % durante la mayor parte del periodo de evaluación. Los descensos observados coincidieron con los ciclos de riego registrados en la Figura 14, lo que confirma la relación entre el accionamiento de la bomba y el consumo de agua almacenada. Asimismo, se detectaron incrementos asociados al abastecimiento desde la red hidráulica. La reducción total de únicamente 5 puntos porcentuales en cuatro días de operación y cuatro ciclos de riego evidencia un consumo conservador bajo el esquema actual de dos ventanas diarias de 4 minutos.

Estabilidad y ruido de la lectura de humedad

Exceptuando los eventos de extracción intencional del sensor, la humedad del suelo se mantuvo entre 60 % y 87 %. El ruido observable fue del orden de $\pm 2-3$ puntos porcentuales, valor consistente con el filtrado por promediado descrito en la metodología. Esta baja variabilidad confirma la estabilidad del sensor capacitivo y la idoneidad de la señal para alimentar directamente la lógica de control.

Discontinuidades por extracción intencional del sensor

La curva presenta dos caídas abruptas hasta 0 %, atribuibles a la extracción deliberada del sensor durante las pruebas y no a un proceso natural de secado. Esta intervención fue necesaria porque la humedad permaneció por encima del umbral de activación automática ($U_{seco} = 15\%$) durante la mayor parte del periodo de evaluación. Los eventos simulados permitieron verificar la respuesta del sistema bajo

condiciones extremas. En ambos casos, la bomba permaneció apagada debido a que las pruebas se realizaron fuera de las ventanas de riego permitidas ($\mathcal{H}_{\text{permitido}}$), confirmando el correcto funcionamiento de la restricción horaria implementada.

Los cuatro eventos de riego identificados en la Figura 14 permitieron validar los dos modos de operación implementados en Greenly. Los dos primeros correspondieron a pruebas de riego manual iniciadas desde la aplicación móvil mediante Bluetooth Classic, observándose la activación y detención correcta de la bomba en respuesta a las órdenes del usuario.

Los dos eventos restantes correspondieron a ciclos automáticos. Debido a que la humedad del suelo permaneció por encima del umbral de activación durante gran parte del periodo de evaluación, fue necesario inducir una condición de baja humedad mediante la extracción temporal del sensor capacitivo antes de las ventanas horarias programadas. Bajo esta condición, el sistema ejecutó correctamente los ciclos previstos, validando tanto la lógica basada en humedad como la restricción temporal implementada en el firmware.

La distribución de estados reportada por el dashboard (Figura 15) mostró que el estado "Sistema OK" representó el 98 % del tiempo total de operación, mientras que los estados de riego, espera y alerta ocuparon conjuntamente el 2 % restante. Esta distribución indica que los eventos de activación fueron breves y poco frecuentes, lo que evidencia la estabilidad del sistema y el correcto funcionamiento de la estrategia de histéresis. Al evitar conmutaciones repetitivas de la bomba alrededor de un único umbral, la lógica de control reduce el desgaste de los elementos de potencia y el consumo energético asociado. En conjunto, los resultados demuestran que la arquitectura distribuida y la lógica de control implementadas en Greenly respondieron de forma consistente durante todo el periodo de evaluación, tanto en condiciones normales de operación como ante perturbaciones inducidas para validar su funcionamiento.

Figura 14. Eventos de riego registrados durante el periodo: pulsos verdes para riego manual, pulsos naranjas para riego automático.



Figura 15. Distribución porcentual del tiempo del sistema en cada estado operativo durante el periodo completo de pruebas, según la aplicación móvil Greenly.



CONCLUSIONES

Se diseñó, implementó y validó exitosamente Greenly, un sistema IoT distribuido para la automatización del riego de un jardín institucional basado en tres nodos especializados, comunicación RS485, telemetría en la nube mediante Firebase Realtime Database y una aplicación móvil Android para monitoreo y control. Durante 99.25 horas continuas de operación, el sistema registró 5833 mediciones, alcanzó una eficiencia de telemetría del 97.95 % y mantuvo una disponibilidad de comunicación del 100 %, lo que demuestra la confiabilidad de la arquitectura propuesta en condiciones reales de funcionamiento.

Los resultados experimentales confirmaron el correcto desempeño de los subsistemas de medición, control y supervisión. El sensor capacitivo proporcionó lecturas estables de humedad con baja variabilidad, el sensor ultrasónico permitió monitorear adecuadamente las variaciones del nivel de la cisterna y la lógica de control basada en histéresis ejecutó satisfactoriamente los ciclos de riego manual y automático, evitando activaciones repetitivas de la bomba. Asimismo, la integración de los tres nodos permitió sincronizar de forma consistente la adquisición de datos, la toma de decisiones y su visualización en la aplicación móvil.

Desde el punto de vista de diseño, la arquitectura distribuida demostró ser una alternativa viable frente a soluciones centralizadas, al separar físicamente las funciones de adquisición, control y telemetría. Esta

organización favorece la escalabilidad del sistema, simplifica las tareas de mantenimiento y facilita la incorporación futura de nuevos sensores o zonas de riego sin modificar sustancialmente la estructura existente.

La experiencia obtenida durante la implementación evidenció además la importancia de realizar procesos de calibración en campo. Tanto la estimación de humedad como la medición del nivel de agua requirieron ajustes basados en condiciones reales de operación para alcanzar una representación más fiel de las variables físicas monitoreadas, lo que resalta la necesidad de complementar las especificaciones de fábrica con procedimientos de validación experimental.

Como trabajo futuro, se propone ampliar el periodo de evaluación a distintas condiciones climáticas y estaciones del año, incorporar técnicas adicionales de filtrado para las mediciones ultrasónicas y evaluar la degradación a largo plazo de los sensores instalados. Estas mejoras permitirán incrementar la robustez del sistema y profundizar en el estudio de su desempeño operativo.

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que Greenly constituye una solución funcional, replicable y de bajo costo para la automatización y telemetría del riego, aportando una alternativa tecnológica viable para la gestión eficiente del agua en instituciones educativas y otros espacios de pequeña y mediana escala.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfaro, K. J., Andrade, E. R., Chávez, E. A., Espinoza, W. A., Herrero, R. J., Ramírez, A. B., Sura, L. H., y García, R. E. (2024). El impacto del internet de las cosas (IoT) en la sociedad moderna, con relación al crecimiento y evolución industrial, y sus retos. Una revisión sistemática de literatura. *Investigaciones Latinoamericanas en Ingeniería y Arquitectura*, (1), 16–25.
<https://doi.org/10.51378/ilia.vi1.8495>
- Altium. (2024). *Protocolos de comunicaciones seriales — Parte dos: UART*. Altium Resources.
<https://resources.altium.com/es/p/serial-communications-protocols-part-two-uart>
- Analog Devices. (2015). *DS3231 Extremely Accurate I²C-Integrated RTC/TCXO/Crystal datasheet*. Analog Devices Inc. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/ds3231.pdf>



- Arduino. (2023). *Arduino Nano datasheet*. Arduino S.r.l.
<https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000005-datasheet.pdf>
- Centro Universitario para la Prevención de Desastres Regionales (CUPREDER). (s.f.). *El agua que desaparece: un plan urgente para Tecamachalco*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. <https://cupreder.buap.mx/agua/?q=problema-agua-tecamachalco-atlas-de-riesgo>
- Correa-Quiroz, J. J., Toribio-Barrueto, M. A., y Castro-Vargas, C. (2025). IoT system with ESP32 for smart drip irrigation and climate monitoring in greenhouses. *Emerging Science Journal*, 9(3), 1133–1157. <https://doi.org/10.28991/ESJ-2025-09-03-01>
- DFRobot. (2024). *Capacitive soil moisture sensor (SEN0193) documentation*. DFRobot.
https://wiki.dfrobot.com/Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0193
- El Heraldo de Puebla. (2026, 16 de marzo). *El problema del agua en Puebla (y el mundo)*.
<https://heraldodepuebla.com/2026/03/16/el-problema-del-agua-en-puebla-y-el-mundo/>
- Espressif Systems. (2024). *ESP32 series datasheet* (v5.2).
https://documentation.espressif.com/esp32_datasheet_en.html
- Fairchild Semiconductor. (2014). *2N2222 NPN small signal general purpose amplifier datasheet*.
<https://www.mouser.com/datasheet/2/345/2n2222a-1395942.pdf>
- Google. (2024). *Firebase Realtime Database*. Google LLC.
<https://firebase.google.com/products/realtime-database>
- Hernández Lara, D., Mojica Mendoza, Y. A., Barón Velázquez, L. P., Juárez Velázquez, E. T., y Téllez Torres, D. J. (2021). Diseño e implementación de un sistema embebido para la administración del agua en casas habitación. *Revista Tecnología Digital*, 11(1), 115–126.
http://www.revistatecnologiadigital.com/pdf/11_01_011_diseno_implementacion_sistema_e_mbebido_administracion_agua_casas_habitacion.pdf
- JSN-SR04T. (2019). *Ultrasonic waterproof range finder datasheet* v2.0.
<https://www.makerguides.com/wp-content/uploads/2019/02/JSN-SR04T-Datasheet.pdf>
- KEYES. (2017). *KY-019 5V relay module datasheet*. Lafayette College.
<https://sites.lafayette.edu/ece492-sp17/files/2017/01/KEYES-5V-Relay-Module-KY-019.pdf>



- Maxim Integrated. (2022). *MAX485 low-power transceivers for RS-485 and RS-422 communication datasheet*. Maxim Integrated Products, Inc. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX1487-MAX491.pdf>
- Mills, D., Martin, J., Burbank, J., y Kasch, W. (2010). *Network Time Protocol Version 4: Protocol and algorithms specification* (RFC 5905). Internet Engineering Task Force (IETF). <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5905>
- Monolithic Power Systems. (2018). *MP1584EN 3A, 1.5MHz, 28V step-down converter datasheet*. https://www.monolithicpower.com/en/documentview/productdocument/index/version/2/document_type/Datasheet/lang/en/sku/MP1584EN/document_id/204
- Mora Olivero, A. P., Macías Lara, R. A., Rodríguez Vizuite, J. D., y Sacón Klinger, H. A. (2021). Estudio de la tecnología de comunicación inalámbrica en el estándar IEEE 802.11ax orientada al despliegue en Ecuador para el desarrollo del Internet de las Cosas. *Dominio de las Ciencias*, 7(Extra 4), 12. <https://doi.org/10.23857/dc.v7i4.2447>
- Narváez Pupiales, A. J., Urquiza-Aguilar, L. F., Paredes Paredes, M. C., y Tripp-Barba, C. (2023). Análisis del cumplimiento de Bluetooth 5 con los requisitos de IoT de la UIT. *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información (RITI)*, 11(23), 28–41.
- Nextia Fenix. (2024, febrero). *Contactor TOC11-25 2 fases 25A*. <https://www.nextiafenix.com/contactor-2-fases-25a-toct1-25/>
- Nsoh, B., Katimbo, A., Guo, H., Heeren, D. M., Nakabuye, H. N., Qiao, X., Ge, Y., Rudnick, D. R., Wanyama, J., Bwambale, E., y Kiraga, S. (2024). Internet of Things-based automated solutions utilizing machine learning for smart and real-time irrigation management: A review. *Sensors*, 24(23), 7480. <https://doi.org/10.3390/s24237480>
- NXP Semiconductors. (2021). *UM10204 I2C-bus specification and user manual* (Rev. 7.0). <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>
- Pereira, G. P., Chaari, M. Z., y Daroge, F. (2023). IoT-enabled smart drip irrigation system using ESP32. *IoT*, 4(3), 221–243. <https://doi.org/10.3390/iot4030012>



- Peña de Loza, F., e Ibarra-Villegas, F. J. (2024). Implementación de tecnologías IoT para la reducción del consumo energético en oficinas inteligentes mediante el control de la iluminación. *Revista de Ciencias Tecnológicas*, 7(3), e332. <https://doi.org/10.37636/recit.v7n3e332>
- Prasasti, A. L., Hasibuan, F. C., Hartono, A. F., Mertu, A., Fajri, F. U., y Ruslan, R. R. (2025). Smart drip irrigation system with integrated soil pH and moisture sensors using RS485 communication. *PIKSEL: Penelitian Ilmu Komputer Sistem Embedded and Logic*, 13(2), 131–140. <https://doi.org/10.33558/piksel.v13i2.11507>
- Shelzer, R. (2025, diciembre). *What causes relay contact welding — and how to prevent it*. Global Electronic Services. <https://gesrepair.com/what-causes-relay-contact-welding-and-how-to-prevent-it/>
- Sládek, I., Skovajsa, M., Kuchár, P., Kafková, J., Šedivý, Š., y Gašpar, G. (2025). A universal I2C-to-RS-485 module for industrial sensing. *Electronics*, 14(18), 3675. <https://doi.org/10.3390/electronics14183675>
- UNIT Electronics. (2024a). *Sensor de nivel flotador vertical*. <https://uelectronics.com/producto/sensor-de-nivel-flotador-vertical/>
- UNIT Electronics. (2024b). *Fuente de alimentación conmutada 12V*. <https://uelectronics.com/producto/fuente-de-alimentacion-12v/>
- UNIT Electronics. (2024d). *Semáforo LED 5V 10mm*. <https://uelectronics.com/producto/semaforo-led-5v-10mm/>
- WEMOS Electronics. (2024). *LOLIN D1 Mini documentation*. https://www.wemos.cc/en/latest/d1/d1_mini.html