

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

FACULTAD DE INFORMÁTICA, CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA

CARRERA DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO LOT BASADO EN ESP32 LORA PARA EL MONITOREO Y CONTROL INALÁMBRICO DEL NIVEL DE AGUA ENTRE CISTERNA Y TANQUE ELEVADO EN VIVIENDAS DEL CANTÓN LA TRONCAL

PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN

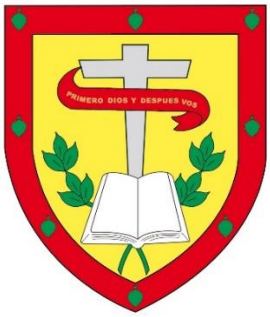
AUTOR: JUAN JOSE GUZMAN MOPOSITA

DIRECTOR: ING. CRISTIAN ALFONSO TOLEDO VÁSQUEZ

LA TRONCAL - ECUADOR

2026

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

FACULTAD DE INFORMÁTICA, CIENCIAS DE LAS COMPUTACIÓN E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA

CARRERA DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO LOT BASADO EN ESP32 LORA PARA EL MONITOREO Y CONTROL INALÁMBRICO DEL NIVEL DE AGUA ENTRE CISTERNA Y TANQUE ELEVADO EN VIVIENDAS DEL CANTÓN LA TRONCAL

PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN

AUTOR: JUAN JOSE GUZMAN MOPOSITA

DIRECTOR: ING. CRISTIAN ALFONSO TOLEDO VÁSQUEZ

LA TRONCAL - ECUADOR

2026

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

Universidad Católica de Cuenca

DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD

Declaratoria de Autoría y Responsabilidad

Juan José Guzmán Moposita portador(a) de la cédula de ciudadanía **Nº 0302520531.** Declaro ser el autor de la obra: **"DESARROLLO DE UN PROTOTIPO LOT BASADO EN ESP32 LORA PARA EL MONITOREO Y CONTROL INALÁMBRICO DEL NIVEL DE AGUA ENTRE CISTERNA Y TANQUE ELEVADO EN VIVIENDAS DEL CANTÓN LA TRONCAL"**, sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

La Troncal, 12 de noviembre de 2026

F: .....

Juan José Guzmán Moposita

C.I. 0302520531

FACULTA DE INFORMÁTICA, CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN

UNIDAD DE TITULACIÓN

La Troncal, 12 de noviembre de 2026

Sección: F. de Informática, Ciencias de la Computación e Innovación Tecnológica
Asunto: Certificación y aprobación de presentación del Trabajo de Titulación

Señor Ingeniero
Guillermo Rodríguez. Mgtr
Director de carrera
Ingeniería en Tecnologías de la Información

De mi consideración.

Reciba un cordial saludo y mis mejores deseos de éxito en sus funciones.

El suscrito, en calidad de tutor del trabajo de titulación, certifica que el trabajo titulado: **"DESARROLLO DE UN PROTOTIPO LOT BASADO EN ESP32 LORA PARA EL MONITOREO Y CONTROL INALÁMBRICO DEL NIVEL DE AGUA ENTRE CISTERNA Y TANQUE ELEVADO EN VIVIENDAS DEL CANTÓN LA TRONCAL",** desarrollado por el estudiante **Juan José Guzmán Moposita**, con número de cédula **0302520531**, ha sido guiado y revisado de manera periódica, cumpliendo con las normativas estatutarias establecidas por la Universidad Católica de Cuenca.

Particular que pongo en su conocimiento para los fines legales consiguientes. Sin otro particular me suscribo de Usted.

Atentamente,

Ing. Cristian Alfonso Toledo Vásquez
TUTOR

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por brindarme la vida, la sabiduría, la fortaleza y la perseverancia necesarias para culminar esta importante etapa de mi formación académica.

A mis padres y a mi familia, por su amor incondicional, sus consejos, sus sacrificios y su constante apoyo durante todo este proceso. Su confianza en mí ha sido una motivación fundamental para continuar adelante y superar cada dificultad presentada.

A la Universidad Católica de Cuenca, por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente. A mis docentes, por compartir sus conocimientos, experiencias y enseñanzas, que han contribuido significativamente a mi desarrollo académico y personal.

De manera especial, agradezco a mi tutor de trabajo de titulación, por su orientación, paciencia y acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación, cuyos aportes fueron fundamentales para alcanzar los objetivos propuestos.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, me brindaron su apoyo y contribuyeron a la realización de este proyecto. Cada palabra de aliento y cada gesto de confianza han sido parte importante de este logro.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación, en primer lugar, a Dios, por ser mi guía, mi fortaleza y mi refugio en cada etapa de mi vida. Por brindarme sabiduría, salud, paciencia y perseverancia para superar cada dificultad que se presentó durante mi formación académica. Gracias a Él, hoy puedo alcanzar una de las metas más importantes de mi vida.

A mi padre y a mi madre, quienes han sido los pilares fundamentales de este logro. Gracias por su amor incondicional, sus sacrificios, sus consejos y por confiar siempre en mis capacidades. Cada esfuerzo que realizaron para brindarme la oportunidad de estudiar ha sido una motivación para seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles. Este logro también les pertenece, porque sin su apoyo no habría sido posible llegar hasta aquí.

A toda mi familia, por acompañarme durante este camino, por sus palabras de aliento, sus oraciones y por brindarme la fuerza necesaria para nunca rendirme. Su cariño y confianza han sido fundamentales para alcanzar este sueño.

De manera especial, expreso mi gratitud a la carrera de Ingeniería en Tecnologías de la Información de la Universidad Católica de Cuenca y a los ingenieros docentes que formaron parte de mi preparación profesional. Gracias por compartir sus conocimientos, experiencias y enseñanzas, así como por su orientación, paciencia y apoyo durante esta importante etapa académica.

Finalmente, dedico este logro a todas las personas que, de una u otra manera, estuvieron presentes en este proceso y contribuyeron a mi crecimiento personal y profesional. Cada esfuerzo, sacrificio y desafío superado hoy se convierte en una satisfacción y en el comienzo de una nueva etapa de mi vida.

RESUMEN

El presente trabajo de titulación tuvo como objetivo desarrollar un prototipo basado en el Internet de las cosas (IoT), mediante tecnología ESP32 y comunicación LoRa, para el monitoreo y control inalámbrico del nivel de agua entre una cisterna y un tanque elevado en viviendas del cantón La Troncal. La propuesta surgió de la necesidad de reducir los inconvenientes asociados al control manual del abastecimiento de agua, particularmente los desbordamientos y el funcionamiento de la bomba en condiciones inadecuadas. Para su desarrollo, se implementaron dos nodos electrónicos mediante placas Heltec WiFi LoRa 32 V4, sensores de nivel tipo flotador y comunicación inalámbrica LoRa punto a punto. El prototipo incorporó un módulo de relé y un contactor para el accionamiento de la bomba, así como una interfaz web y una pantalla táctil para la visualización de los estados de funcionamiento. La evaluación se realizó mediante doce pruebas funcionales bajo diferentes condiciones de operación y comunicación, de las cuales once fueron satisfactorias y una presentó limitaciones debido a la presencia de obstáculos estructurales. Los resultados evidenciaron una comunicación inalámbrica funcional a una distancia aproximada de 100 metros en condiciones de línea de vista, así como la desactivación automática de la bomba ante la pérdida del enlace LoRa. Se concluye que el prototipo permite automatizar el control del abastecimiento de agua en las condiciones evaluadas y constituye una alternativa tecnológica funcional para aplicaciones residenciales, aunque el desempeño de la comunicación inalámbrica depende de las características del entorno.

Palabras clave: Internet de las cosas, ESP32, LoRa, monitoreo del nivel de agua, control automático de bombas.

ABSTRACT

This degree project aimed to develop a prototype based on the Internet of Things (IoT), using ESP32 technology and LoRa communication, for the wireless monitoring and control of water levels between a cistern and an elevated water tank in homes in the canton of La Troncal. The proposal arose from the need to reduce problems associated with manual water supply control, particularly water overflows and pump operation under unsuitable conditions. For its development, two electronic nodes were implemented using Heltec WiFi LoRa 32 V4 boards, float-type level sensors, and point-to-point LoRa wireless communication. The prototype incorporated a relay module and a contactor to operate the pump, as well as a web interface and a touchscreen display to visualize operating statuses. The evaluation involved twelve functional tests under different operating and communication conditions, eleven of which were successful, while one presented limitations due to the presence of structural obstacles. The results demonstrated functional wireless communication over an approximate distance of 100 meters under line-of-sight conditions, as well as the automatic deactivation of the pump in the event of LoRa link loss. It is concluded that the prototype enables automated control of the water supply under the conditions evaluated and represents a functional technological alternative for residential applications, although wireless communication performance depends on the characteristics of the surrounding environment.

Keywords: Internet of Things, ESP32, LoRa, water level monitoring, automatic pump control.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD i
CERTIFICACIÓN Y APROBACIÓN ii
AGRADECIMIENTO iii
DEDICATORIA iv
RESUMEN v
ABSTRACT vi
INDICE DE CONTENIDO vii
Índice de Tablas xi
Índice de Ilustraciones xii
INTRODUCCIÓN xiii
CAPÍTULO 1 1
MARCO REFERENCIAL 1
1.1 Planteamiento del problema 1
1.2 Formulación del problema 2
1.3 Antecedentes de la investigación 2
1.4 Justificación de la investigación 3
1.5 Objetivos de la investigación 4
1.5.1 Objetivo general 4
1.5.2 Objetivos específicos 4
1.6 Delimitación del estudio 4
1.7 Limitaciones de la investigación 5
CAPÍTULO 2 7
MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE 7
2.1 Fundamentación teórica 7
2.1.1 Sistemas cisterna-tanque elevado y automatización 7
2.1.2 Internet de las Cosas y sistemas embebidos 7
2.1.3 Microcontrolador ESP32 7
2.1.4 Tecnología LoRa y transceptor SX1278 8
2.1.5 Sensores discretos de nivel 8
2.1.6 Relé de interfaz, contactor y seguridad eléctrica 9
2.1.7 Arquitectura del prototipo 10

2.1.8 Variables de desempeño del enlace y del control 10
2.2 Conceptos clave relacionados con el estudio 11
2.3 Revisión de investigaciones previas / Estado del arte 13
2.4 Marco conceptual 14
2.5 Marco legal y normativo 14
2.5.1 Constitución de la República del Ecuador y legislación hídrica 14
2.5.2 Regulación del espectro radioeléctrico 15
2.5.3 Seguridad eléctrica 15
CAPÍTULO 3 16
MARCO METODOLÓGICO 16
3.1 Enfoque de la investigación 16
3.2 Tipo o nivel de investigación 16
3.3 Diseño de investigación 16
3.4 Unidad de análisis y escenarios de prueba 17
3.5 Métodos de investigación 17
3.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos 18
3.7 Procedimiento metodológico 19
3.8 Tratamiento y análisis de la información 20
3.8.1 Indicadores de validación 21
CAPÍTULO 4 23
DESARROLLO Y RESULTADOS 23
4.1 Desarrollo de la propuesta 23
4.1.1 Identificación de requerimientos 23
4.1.2 Diseño y arquitectura del prototipo 25
4.1.3 Selección de componentes y tecnologías 26
4.1.4 Construcción y montaje del prototipo 29
4.1.5 Programación y lógica de funcionamiento del prototipo 34
4.1.6 Integración del prototipo 37
4.2 Presentación del prototipo 38
4.2.1 Presentación del nodo del tanque elevado 38
4.2.2 Presentación del nodo de cisterna y control 39

4.2.3 Presentación de la interfaz de visualización 41
4.2.4 Presentación del prototipo integrado 42
4.3 Funcionamiento del prototipo 42
4.3.1 Funcionamiento del nodo del tanque 43
4.3.2 Funcionamiento del nodo de la cisterna 43
4.3.3 Estados de funcionamiento del sistema 44
4.3.4 Funcionamiento ante pérdida de comunicación 45
4.4 Pruebas del prototipo 45
4.4.1 Pruebas de los flotadores eléctricos 46
4.4.2 Prueba de comunicación LoRa 46
4.4.3 Pruebas de la lógica de control 47
4.4.4 Prueba de seguridad ante pérdida de comunicación 47
4.4.5 Verificación de la respuesta funcional del sistema 48
4.4.6 Matriz general de pruebas 48
4.5 Resultados obtenidos 51
4.5.1 Resultados de detección de nivel 51
4.5.2 Resultados del enlace inalámbrico 52
4.5.3 Resultados de la lógica de control 52
4.5.4 Resultados del mecanismo de seguridad 53
4.5.5 Resultados de la interfaz de visualización 53
4.6 Análisis de resultados 54
4.6.1 Análisis del sistema de detección 54
4.6.2 Análisis de la comunicación LoRa 54
4.6.3 Análisis de la lógica de control 55
4.6.4 Análisis del mecanismo de seguridad 56
4.6.5 Análisis de la interfaz de visualización 56
4.6.6 Limitaciones identificadas 57
4.6.7 Posibles aplicaciones del prototipo 57
4.7 Cumplimiento de los objetivos específicos 58
4.7.1 Evaluación del cumplimiento de los objetivos 58

CONCLUSIONES 61
RECOMENDACIONES 62
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 64
ANEXOS 66

Índice de Tablas

Tabla 1. Asignación de sensores y acciones asociadas en el prototipo 9
Tabla 2. Componentes principales y funciones de los nodos del prototipo 10
Tabla 3. Conceptos clave y definiciones operativas relacionadas con el prototipo. 11
Tabla 4. Comparativa del estado del arte: investigaciones previas relacionadas con el monitoreo y control de recursos hídricos mediante IoT y LoRa. 13
Tabla 5. Matriz de escenarios de prueba para la validación funcional y de desempeño del prototipo. 17
Tabla 6.Técnicas e instrumentos de recolección de datos empleados en la validación del prototipo 19
Tabla 7. Indicadores de validación del prototipo por dimensión de desempeño. 22
Tabla 8. Requerimientos funcionales del prototipo 24
Tabla 9. Componentes principales seleccionados para el desarrollo del prototipo 28
Tabla 10. Estados generales de funcionamiento del prototipo 44
Tabla 11. Matriz de pruebas funcionales del prototipo 49
Tabla 12. Resultados funcionales de los sensores de nivel 51
Tabla 13. Resultados funcionales de la lógica de control 53
Tabla 14. Matriz de cumplimiento de los objetivos específicos 59

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Montaje del nodo de monitoreo ubicado en el tanque Elevado..... 31
Ilustración 2. Montaje del nodo de control ubicado junto a la cisterna..... 33
Ilustración 3. Nodo de monitoreo correspondiente al tanque elevado 39
Ilustración 4. Nodo de recepción y control correspondiente a la cisterna..... 40
Ilustración 5. Interfaz de visualización del sistema de monitoreo y control. 41

INTRODUCCIÓN

El abastecimiento de agua constituye una necesidad fundamental en las viviendas, debido a su importancia para el desarrollo de las actividades domésticas y el bienestar de sus habitantes. En determinados sistemas residenciales, el almacenamiento y distribución del recurso hídrico se realiza mediante una cisterna, una bomba eléctrica y un tanque elevado. Sin embargo, cuando el funcionamiento de estos elementos depende de la supervisión manual, pueden presentarse inconvenientes relacionados con el desbordamiento de agua, el funcionamiento de la bomba en condiciones inadecuadas y la necesidad de intervención constante por parte de los usuarios.

Ante esta problemática, la incorporación de tecnologías de automatización y comunicación inalámbrica representa una alternativa para mejorar la supervisión y el control de los sistemas de almacenamiento de agua. En este contexto, los microcontroladores ESP32 permiten procesar información procedente de sensores y ejecutar acciones de control, mientras que la tecnología LoRa facilita el intercambio de datos entre dispositivos ubicados en diferentes puntos, sin requerir un cableado de comunicación entre ellos.

La presente investigación tiene como propósito desarrollar un prototipo basado en ESP32 y comunicación LoRa para el monitoreo y control inalámbrico del nivel de agua entre una cisterna y un tanque elevado, orientado a viviendas del cantón La Troncal, provincia del Cañar. La propuesta contempla una arquitectura distribuida compuesta por dos nodos electrónicos, encargados de detectar las condiciones de nivel, transmitir información y gestionar el accionamiento automático de una bomba de agua mediante una lógica de control previamente definida.

El desarrollo del prototipo considera condiciones de seguridad relacionadas con la disponibilidad de agua en la cisterna, el estado de llenado del tanque elevado y la continuidad del enlace inalámbrico. Asimismo, se plantea la evaluación de su funcionamiento mediante pruebas que permitan analizar la respuesta del sistema, el comportamiento de la comunicación LoRa y las condiciones de operación del mecanismo de control.

La investigación adopta un enfoque cuantitativo y aplicado, orientado al diseño, implementación y evaluación de una solución tecnológica. Su desarrollo comprende la revisión de fundamentos teóricos, la definición de requerimientos, la selección de componentes, la construcción de los nodos electrónicos, la programación de la lógica de funcionamiento y la ejecución de pruebas de validación.

El documento se estructura en cuatro capítulos. El primero presenta el problema de investigación, su justificación, los objetivos y la delimitación del estudio. El segundo desarrolla los fundamentos teóricos, los antecedentes y el marco normativo relacionado con las tecnologías utilizadas. El tercero describe la metodología, los instrumentos y los procedimientos de evaluación. Finalmente, el cuarto expone el desarrollo del prototipo, su funcionamiento, las pruebas realizadas y el análisis de los resultados obtenidos.

De esta manera, el trabajo busca aportar una alternativa tecnológica para la automatización de sistemas residenciales de almacenamiento de agua, así como generar conocimientos prácticos sobre la integración de sistemas embebidos, sensores discretos, comunicación inalámbrica y mecanismos de control eléctrico.

CAPÍTULO 1
MARCO REFERENCIAL

1.1 Planteamiento del problema

En viviendas que utilizan una cisterna, una bomba eléctrica y un tanque elevado, el abastecimiento de agua depende de una secuencia de control que permita iniciar el bombeo cuando el tanque requiere agua y detenerlo cuando alcanza el nivel máximo o cuando la cisterna no dispone de agua suficiente. Cuando esta operación se realiza manualmente o mediante tendidos de control extensos, pueden presentarse dificultades de instalación, mantenimiento y supervisión.

En el cantón La Troncal, este tipo de configuración se observa en viviendas donde el agua se almacena temporalmente en una cisterna y posteriormente se impulsa hacia un tanque elevado para su distribución por gravedad. El proyecto parte de experiencias de instalación y mantenimiento reportadas por el estudiante en este tipo de sistemas. Debido a que no se dispone en esta investigación de un levantamiento estadístico de todas las viviendas del cantón, estas observaciones se consideran un contexto técnico de referencia y no una estimación de prevalencia.

En sistemas convencionales, los interruptores de nivel pueden conectarse al tablero de control mediante cableado que recorre la distancia entre el tanque elevado y el área donde se encuentra la bomba. La automatización permite reemplazar parte de esta intervención manual y establecer una lógica de operación basada en sensores y actuadores [1]. En sistemas de bombeo, la protección contra operación en seco y contra desbordamiento constituye una condición funcional importante para reducir fallos de operación [2].

Las tecnologías de comunicación inalámbrica de bajo consumo representan una alternativa para transmitir los estados de los sensores sin extender líneas de control entre los puntos del sistema. LoRa es una tecnología de modulación diseñada para enlaces de largo alcance y baja tasa de datos, características adecuadas para aplicaciones en las que solo se requiere transmitir estados, alarmas o pequeñas tramas de información [3] . Los transceptores de la familia SX1276/77/78/79 incorporan el módem LoRa y pueden operar con microcontroladores mediante una interfaz SPI [4] .

Por su parte, el ESP32 constituye una plataforma de desarrollo apropiada para prototipos de automatización por disponer de entradas y salidas digitales, **buses de** comunicación y capacidad suficiente para ejecutar la lógica de control [5]. Ranjith et al.

documentaron una aplicación de monitoreo inalámbrico de nivel de líquidos utilizando ESP32 y LoRa, demostrando la viabilidad de integrar ambas tecnologías para transmitir información de nivel sin depender de un enlace cableado entre los nodos [6].

En consecuencia, el problema de investigación se concentra en determinar si un prototipo compuesto por dos nodos ESP32 con comunicación LoRa puede ejecutar de manera confiable el monitoreo y control automático de un sistema cisterna-tanque elevado, sustituyendo el enlace cableado de control entre ambos puntos y manteniendo protecciones básicas de operación.

1.2 Formulación del problema

A partir de la situación descrita se formula la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué desempeño presenta un prototipo basado en ESP32 y comunicación LoRa para el monitoreo y control inalámbrico del nivel de agua entre una cisterna y un tanque elevado, bajo condiciones de prueba representativas de viviendas del cantón La Troncal?

La pregunta orienta la validación hacia variables que pueden medirse directamente en el prototipo: funcionamiento de la lógica de control, alcance de comunicación, intensidad de señal, pérdida de paquetes, tiempo de respuesta, consumo del sistema de control y comportamiento ante condiciones de seguridad.

1.3 Antecedentes de la investigación

Ranjith et al. desarrollaron un indicador inalámbrico de nivel de líquido utilizando LoRa y ESP32 [6]. El trabajo constituye un antecedente directo porque integra el mismo microcontrolador y tecnología de comunicación que se consideran en esta investigación. Su principal aporte es demostrar que la información de nivel puede transmitirse entre nodos separados sin un enlace de control cableado.

Syrmos et al. propusieron un sistema modular de monitoreo de agua basado en IoT para registrar variables cuantitativas y cualitativas [7]. Aunque su aplicación es más amplia que la del presente proyecto, el estudio evidencia la utilidad de arquitecturas distribuidas con sensores y comunicación remota para supervisar recursos hídricos.

Blanco Jáquez et al. estudiaron la ampliación de cobertura LoRa y la integración de técnicas de detección de anomalías en un sistema IoT de monitoreo de calidad de agua [8]. Este antecedente resulta útil para la metodología de pruebas de comunicación,

especialmente en lo referente a RSSI, pérdida de paquetes y comportamiento del enlace ante obstáculos.

Lloys et al. desarrollaron un sistema para gestión eficiente del agua utilizando ESP32, MicroPython e IoT [9]. Su trabajo respalda el uso de plataformas de bajo costo para monitoreo hídrico y muestra la posibilidad de integrar sensores y comunicación en soluciones reproducibles.

Fauzi e Irianto implementaron un sistema de monitoreo de contaminación de agua con comunicación LoRa [10]. Aunque la variable medida difiere del nivel de agua, el estudio aporta referencias para evaluar la calidad del enlace inalámbrico y la transmisión de paquetes en escenarios reales.

En conjunto, estos antecedentes muestran que ESP32 y LoRa son tecnologías adecuadas para sistemas distribuidos de monitoreo. La contribución específica del presente proyecto se encuentra en su aplicación a una lógica de control de bombeo cisterna-tanque elevado con sensores discretos, protecciones de operación y enlace LoRa punto a punto en un prototipo orientado al contexto residencial.

1.4 Justificación de la investigación

La investigación se justifica desde una dimensión práctica porque busca automatizar un proceso doméstico que requiere decisiones repetitivas de encendido y apagado de una bomba de agua. La incorporación de sensores de nivel y una lógica de control permite establecer condiciones explícitas para iniciar y detener el bombeo, así como bloquear la operación cuando el nivel de la cisterna es insuficiente [1], [2] .

Desde la dimensión tecnológica, el proyecto integra un microcontrolador ESP32, comunicación LoRa punto a punto, sensores discretos y un sistema de accionamiento mediante relé de interfaz y contactor. El ESP32 dispone de los periféricos necesarios para leer entradas digitales, manejar comunicación SPI y ejecutar tareas de control [5]. La familia SX1278 permite implementar enlaces LoRa en el rango de frecuencias soportado por el dispositivo [4].

La utilización de un enlace inalámbrico entre el tanque elevado y la cisterna permite reducir el tendido de señales de control entre ambos puntos. Esto no elimina la instalación eléctrica de potencia de la bomba ni sustituye los elementos de protección requeridos, pero sí permite simplificar la comunicación entre sensores y controlador.

Desde la perspectiva académica, el prototipo permite integrar conocimientos de sistemas embebidos, comunicaciones inalámbricas, automatización, instrumentación y

seguridad eléctrica. El resultado podrá evaluarse mediante pruebas reproducibles, generando evidencia técnica sobre su funcionamiento y limitaciones.

1.5 Objetivos de la investigación

1.5.1 Objetivo general

Desarrollar y validar un prototipo basado en ESP32 y comunicación LoRa para el monitoreo y control inalámbrico del nivel de agua entre una cisterna y un tanque elevado, mediante sensores discretos y un sistema automático de accionamiento de la bomba.

1.5.2 Objetivos específicos

1. Fundamentar los principios relacionados con sistemas de abastecimiento cisterna-tanque elevado, automatización, sistemas embebidos, ESP32, comunicación LoRa, sensores discretos de nivel y accionamiento de bombas.
2. Diseñar la arquitectura del prototipo, definiendo los nodos, sensores, actuadores, lógica de control, parámetros de comunicación y mecanismos de seguridad funcional.
3. Implementar un prototipo funcional con dos nodos basados en la plataforma Heltec WiFi LoRa 32 V4, dos puntos discretos de detección de nivel y control automático de la bomba mediante relé de interfaz y contactor
4. Evaluar el desempeño del prototipo mediante pruebas de funcionamiento de la lógica de control, alcance efectivo de la comunicación LoRa, RSSI, pérdida de paquetes, tiempo de respuesta, consumo del sistema de control y comportamiento ante condiciones de fallo.

1.6 Delimitación del estudio

Delimitación espacial: el prototipo se diseña para representar un sistema de abastecimiento de agua utilizado en viviendas del cantón La Troncal, provincia del Cañar. Las pruebas se realizarán en un banco de pruebas y, cuando las condiciones lo permitan, en una vivienda piloto.

Delimitación temporal: el trabajo se desarrollará durante el período académico abril-septiembre de 2026.

Delimitación temática: el estudio comprende automatización de bombeo, sistemas embebidos, ESP32, comunicación LoRa punto a punto, sensores discretos de nivel, relés, contactores y medición de variables de desempeño. No contempla

potabilización, calidad del agua, medición de caudal o presión ni conexión a servicios en la nube.

Delimitación funcional: el sistema utilizará dos puntos de detección discretos, uno en el tanque elevado y otro en la cisterna. El flotador ubicado en el tanque elevado permitirá determinar la condición de llenado y transmitir su estado hacia el nodo de control. El flotador instalado en la cisterna permitirá verificar la disponibilidad de agua y establecer una condición de seguridad para impedir el funcionamiento de la bomba cuando el nivel de agua sea insuficiente.

Delimitación de comunicación: el enlace se implementará en modo LoRa punto a punto entre un nodo ubicado en el tanque elevado y un nodo de control ubicado junto a la cisterna y la bomba. El prototipo no utilizará LoRaWAN ni conexión a Internet.

1.7 Limitaciones de la investigación

1. Las pruebas se realizarán principalmente en condiciones controladas, por lo que los resultados de cobertura pueden variar al instalar el sistema en viviendas con diferentes materiales, alturas, interferencias u obstáculos.
2. El prototipo utiliza sensores discretos de nivel; por tanto, determina estados de presencia o ausencia de agua en puntos definidos y no mide de manera continua la altura del líquido.
3. La comunicación se implementará mediante un único enlace LoRa punto a punto. Una falla sostenida del módulo o una interferencia severa puede interrumpir temporalmente el intercambio de estados.
4. La parte de potencia de la bomba trabaja con tensión de red y requiere elementos de protección y montaje seguro. Las pruebas de alta tensión deberán realizarse bajo supervisión técnica y con separación física de la electrónica de baja tensión.
5. El estudio no pretende demostrar ahorro mensual de agua o energía en una población de viviendas; se limita a medir el comportamiento del prototipo y el consumo de su sistema de control.
6. La frecuencia y potencia de transmisión definitivas deberán configurarse de acuerdo con la normativa ecuatoriana vigente sobre espectro de uso libre y con las características del módulo empleado.

7. Los resultados corresponden al prototipo construido y a los escenarios de prueba ejecutados; no deben generalizarse automáticamente a todas las viviendas del cantón.

CAPÍTULO 2
MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1 Fundamentación teórica

2.1.1 Sistemas cisterna-tanque elevado y automatización

Un sistema residencial cisterna-tanque elevado almacena agua en un depósito inferior y utiliza una bomba para elevarla hacia un depósito ubicado a mayor altura. El tanque elevado permite distribuir el agua por gravedad. La automatización de este proceso requiere detectar estados de nivel y gobernar el motor mediante una lógica de arranque, parada y protección [1], [2].

En el prototipo se utiliza una lógica discreta. El arranque solo será permitido cuando el tanque elevado solicite llenado y la cisterna disponga de agua suficiente. La parada se producirá cuando el tanque alcance el nivel alto, cuando la cisterna alcance el nivel mínimo de seguridad o cuando se detecte una condición de fallo.

2.1.2 Internet de las Cosas y sistemas embebidos

El Internet de las Cosas integra objetos físicos, sensores, procesamiento y comunicación para intercambiar información y ejecutar acciones [11]. Aunque el prototipo no se conectará a Internet, emplea principios habituales de arquitecturas IoT: sensado, procesamiento distribuido, comunicación máquina a máquina y actuación.

Un sistema embebido ejecuta una función específica dentro de un equipo mayor. En este proyecto, cada nodo ESP32 constituye un sistema embebido encargado de leer sensores, intercambiar tramas LoRa y ejecutar tareas de control [12].

2.1.3 Microcontrolador ESP32

El ESP32-WROOM-32E integra un microcontrolador de 32 bits, memoria, interfaces digitales y buses de comunicación. Su documentación oficial incluye GPIO, SPI, UART, I2C y otros periféricos que permiten conectar sensores y transceptores externos [5]. En el prototipo se utilizarán entradas GPIO para los flotadores, una interfaz SPI para el módulo LoRa y una salida digital para accionar el relé de interfaz.

La lógica del prototipo no requiere asignar obligatoriamente tareas a núcleos específicos del procesador. La programación priorizará simplicidad, lectura confiable de entradas, gestión del enlace LoRa y estados de seguridad.

2.1.4 Tecnología LoRa y transceptor SX1278

LoRa es una tecnología de modulación de espectro ensanchado orientada a comunicaciones de largo alcance y baja tasa de datos [3]. Los transceptores SX1276/77/78/79 incorporan un módem LoRa y ofrecen alta sensibilidad de recepción y parámetros configurables como spreading factor, ancho de banda y coding rate [4].

El SX1278 opera dentro del rango de 137 a 525 MHz, por lo que puede utilizarse en configuraciones compatibles con la banda seleccionada para el prototipo [4]. La frecuencia y potencia de transmisión no se fijarán únicamente a partir de la capacidad máxima del dispositivo; deberán respetar la normativa ecuatoriana aplicable.

El Plan Nacional de Frecuencias de Ecuador contempla la banda 433,05-434,79 MHz como banda destinada a aplicaciones industriales, científicas y médicas en el marco de las atribuciones correspondientes [13]. Además, ARCOTEL dispone de una Norma Técnica de Espectro de Uso Libre que establece las condiciones para equipos que operan en bandas libres [14]. Por esta razón, la potencia definitiva del prototipo se configurará según el límite que resulte aplicable a la clase de dispositivo y banda empleada, evitando asumir que la potencia máxima del SX1278 puede utilizarse automáticamente.

2.1.5 Sensores discretos de nivel

Los interruptores de flotador permiten detectar la presencia o ausencia de líquido en un punto específico; su salida es discreta, por lo que son apropiados para sistemas de control on/off donde interesa conocer estados como nivel mínimo, nivel operativo, nivel bajo de tanque y nivel máximo.

En este proyecto se utilizarán dos flotadores eléctricos, uno ubicado en la cisterna y otro en el tanque elevado. El flotador instalado en el tanque elevado permitirá detectar la condición de llenado establecida y transmitir su estado hacia el nodo de control. Por su parte, el flotador ubicado en la cisterna permitirá verificar la disponibilidad de agua y establecer una condición de seguridad para impedir el funcionamiento de la bomba cuando el nivel sea insuficiente.

Tabla 1. Asignación de sensores y acciones asociadas en el prototipo

Ubicación	Sensor	Estado detectado	Acción asociada
Tanque elevado	Flotador eléctrico	Solicitud o finalización del llenado	Genera la solicitud de control de la bomba
Cisterna	Flotador eléctrico	Disponibilidad de agua	Permite o bloquea el funcionamiento de la bomba como medida de protección

Fuente: Elaboración propia, basado en [1], [2].

2.1.6 Relé de interfaz, contactor y seguridad eléctrica

El ESP32 no debe conmutar directamente la carga de una bomba conectada a la red eléctrica. La salida de baja tensión activará un módulo relé de interfaz y este gobernará la bobina de un contactor adecuado para la carga del motor, el contactor actúa como elemento de maniobra; no sustituye las protecciones contra sobre corriente, cortocircuito, fuga a tierra o puesta a tierra.

El dimensionamiento definitivo del contactor y de las protecciones dependerá de la placa de características de la bomba utilizada en las pruebas; por seguridad, la sección de potencia deberá mantenerse físicamente separada de los circuitos de 3,3 V/5 V, utilizando gabinete y aislamiento apropiados.

2.1.7 Arquitectura del prototipo

El sistema estará constituido por dos nodos basados en la plataforma Heltec WiFi LoRa 32 V4. El nodo ubicado en el tanque elevado leerá el estado de un flotador de nivel y transmitirá esta información mediante comunicación LoRa. El nodo ubicado junto a la cisterna leerá el estado de un segundo flotador, recibirá la información proveniente del nodo del tanque elevado y ejecutará la lógica de control de la bomba de acuerdo con las condiciones establecidas.

Tabla 2. Componentes principales y funciones de los nodos del prototipo

Nodo	Componentes principales	Función
Nodo tanque elevado	Heltec WiFi LoRa 32 V4, flotador eléctrico y fuente de alimentación	Detectar la solicitud de llenado o su finalización y transmitir el estado mediante LoRa
Nodo cisterna/control	Heltec WiFi LoRa 32 V4, flotador eléctrico, módulo relé, contactor y fuente de alimentación	Detectar la disponibilidad de agua, recibir los estados del tanque y controlar el accionamiento de la bomba.

Fuente: Elaboración propia, basado en las especificaciones de [4] y [5] .

La lógica incorporará mensajes periódicos, detección de pérdida de comunicación y un estado seguro; si el nodo de control deja de recibir información válida durante un tiempo definido, la bomba deberá permanecer apagada hasta recuperar el enlace.

2.1.8 Variables de desempeño del enlace y del control

El desempeño de la comunicación se evaluará mediante RSSI, pérdida de paquetes y distancia efectiva, el tiempo de respuesta se medirá entre el cambio de estado relevante de un sensor y la ejecución de la acción correspondiente en el nodo de control.

Debido a que los flotadores son sensores discretos, no se utilizará el término 'precisión del nivel' como si se tratara de un sensor continuo; la validación de los sensores se expresará como porcentaje de detecciones correctas del estado esperado durante los casos de prueba.

2.2 Conceptos clave relacionados con el estudio

A continuación, se definen los términos técnicos y operativos fundamentales para la comprensión del presente estudio:

Tabla 3. Conceptos clave y definiciones operativas relacionadas con el prototipo.

Concepto	Definición operativa
ESP32	Microcontrolador de 32 bits de doble núcleo desarrollado por Espressif, con conectividad WiFi y Bluetooth integrados, que en este prototipo se utiliza como unidad de procesamiento para la lectura de entradas digitales (flotadores), el manejo de la interfaz SPI hacia el transceptor LoRa y la ejecución de la lógica de control de la bomba [5] .
LoRa	Tecnología de modulación de espectro ensanchado por barrido de frecuencia (CSS – *Chirp Spread Spectrum*) diseñada para comunicaciones de largo alcance y baja tasa de datos en la capa física (PHY), utilizada en este proyecto para el enlace inalámbrico punto a punto entre los nodos del tanque elevado y la cisterna [3].
SX1278	Transceptor de la familia SX1276/77/78/79 de Semtech que incorpora el módem LoRa y opera en el rango de 137 a 525 MHz, comunicándose con el microcontrolador mediante interfaz SPI; en este prototipo se configura para operar en la banda ISM de 433 MHz conforme a la normativa ecuatoriana [4], [13].
Flotador eléctrico	Interruptor de nivel discreto (tipo *on/off*) que cierra o abre un contacto eléctrico (normalmente abierto o normalmente cerrado) según la posición vertical de su elemento flotante, permitiendo detectar la presencia o ausencia de líquido en un punto específico del depósito. Su uso en sistemas de control de bombeo está documentado como alternativa de sensado discreto frente a sensores continuos [2].
Relé de interfaz	Dispositivo electromecánico o de estado sólido de baja potencia que actúa como etapa de aislamiento galvánico entre el circuito de control (3,3 V / 5 V del ESP32) y la bobina del contactor, protegiendo la electrónica de control de transitorios y ruidos provenientes del circuito de potencia. Su aplicación como etapa de interconexión entre sistemas embebidos y cargas de potencia es una práctica estándar en automatización [1].
Contactor	Dispositivo de maniobra electromecánico diseñado para conmutar cargas de potencia (como motores eléctricos), capaz de manejar corrientes significativamente mayores que las del relé de interfaz, y que en este prototipo conecta o desconecta la alimentación de la bomba de agua. Su selección y dimensionamiento debe cumplir con los requisitos de la normativa eléctrica ecuatoriana vigente [15].

Concepto	Definición operativa
RSSI	*Received Signal Strength Indicator* (Indicador de Intensidad de Señal Recibida), parámetro reportado por el transceptor en dBm que cuantifica la potencia de la señal recibida; valores más cercanos a 0 dBm indican mejor calidad de enlace, mientras que valores más negativos (ej. −120 dBm) indican señal débil. Su uso como indicador de calidad de enlace LoRa está ampliamente documentado en la literatura técnica [3], [8].
Pérdida de paquetes (PER)	*Packet Error Rate* o Tasa de Error de Paquetes, indicador calculado como el porcentaje de tramas transmitidas que no son recibidas o decodificadas correctamente por el nodo destino: PER (%) = ((Paquetes enviados − Paquetes recibidos) / Paquetes enviados) × 100. Su medición es un procedimiento estándar en la evaluación de enlaces LoRa en escenarios reales [8], [10].
Tiempo de respuesta	Intervalo temporal medido en milisegundos (ms) entre el instante en que un sensor discreto cambia de estado (ej. flotador de nivel bajo activado) y el instante en que el nodo de control ejecuta la acción correspondiente (ej. energización de la bobina del contactor). Su medición permite caracterizar la latencia del lazo de control del prototipo.
Estado seguro (*Fail-safe*)	Condición de operación definida por principio de ingeniería de seguridad, mediante la cual el sistema adopta una configuración de mínimo riesgo (bomba apagada y bloqueada) ante la pérdida de comunicación, falta de alimentación o detección de una condición anómala, garantizando que cualquier fallo conocido conduzca a un estado no peligroso. Este principio se alinea con los criterios de seguridad funcional establecidos en normas internacionales como la IEC 61508 para sistemas eléctricos/electrónicos/electrónicos programables relacionados con la seguridad.
SPI	*Serial Peripheral Interface*, bus de comunicación síncrono serie utilizado en este prototipo para el intercambio de datos entre el ESP32 (maestro) y el transceptor SX1278 (esclavo), mediante las líneas MOSI, MISO, SCK y CS. Su uso está documentado tanto en el datasheet del ESP32 [5] como en el del SX1278 [4] como interfaz estándar de comunicación entre el microcontrolador y el módem LoRa.
Spreading Factor (SF)	Parámetro configurable del módem LoRa que define el número de *chirps* por símbolo; valores mayores (SF7 a SF12) incrementan el alcance y la sensibilidad a cambio de menor tasa de datos y mayor tiempo de aire. Su configuración óptima depende del escenario de despliegue y está detallada en la documentación técnica del transceptor [4] y en revisiones técnicas de la tecnología LoRa [3].
Nodo	Unidad funcional del sistema distribuido compuesta por un microcontrolador, su transceptor LoRa, los sensores y/o actuadores asociados, y el firmware que ejecuta tareas específicas dentro de la arquitectura del prototipo. El concepto de nodo distribuido es fundamental en las arquitecturas IoT aplicadas al monitoreo de recursos hídricos [7], [9].

Concepto	Definición operativa
Banda ISM	*Industrial, Scientific and Medical Band*, porción del espectro radioeléctrico reservada para usos no comerciales sujeta a límites de potencia, regulada internacionalmente por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y, en Ecuador, por ARCOTEL a través del Plan Nacional de Frecuencias [13] y la Norma Técnica de Espectro de Uso Libre [14]. La banda de 433 MHz es una de las bandas ISM disponibles para operación LoRa en el país.
Timeout	Temporizador de seguridad implementado en el firmware del nodo de control que, al expirar sin recibir tramas válidas desde el nodo remoto, fuerza el apagado de la bomba como medida de protección ante pérdida de comunicación. Su implementación es parte de las buenas prácticas de diseño de sistemas embebidos de control [12].
Heartbeat (latido)	Trama periódica enviada entre los nodos del sistema para confirmar la vigencia del enlace; su ausencia durante un intervalo superior al *timeout* activa el estado seguro. Este mecanismo es una práctica estándar en sistemas distribuidos para la detección de fallos de comunicación.

Fuente: Elaboración propia, basado en [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16].

2.3 Revisión de investigaciones previas / Estado del arte

La comparación de antecedentes permite identificar tecnologías, variables de evaluación y diferencias respecto de la propuesta actual.

Tabla 4. Comparativa del estado del arte: investigaciones previas relacionadas con el monitoreo y control de recursos hídricos mediante IoT y LoRa.

Fuente	Aplicación	Tecnología	Aporte	Diferencia con el proyecto
[6] Ranjith et al.	Nivel de líquidos	ESP32 + LoRa	Antecedente directo de comunicación inalámbrica de nivel	El presente proyecto agrega control de bomba y protecciones específicas
[7] Syrmos et al.	Monitoreo de agua	IoT multisensor	Arquitectura distribuida para variables hídricas	La propuesta usa estados discretos y enlace P2P local
[8] Blanco Jáquez et al.	Calidad de agua	LoRa + análisis de enlace	Aporta criterios para cobertura, RSSI y pérdida de paquetes	No se enfoca en bombeo residencial
[9] Lloys et al.	Gestión de recursos hídricos	ESP32 + IoT	Confirma viabilidad de hardware de bajo costo	Utiliza otra arquitectura y sensores

Fuente	Aplicación	Tecnología	Aporte	Diferencia con el proyecto
[10] Fauzi e Irianto	Monitoreo de contaminación	LoRa + nodo de sensado	Aporta evaluación de transmisión LoRa	La variable de interés no es nivel de tanque

Fuente: Elaboración propia, basado en [6], [7], [8], [9], [10].

La brecha abordada por esta investigación se encuentra en integrar el enlace LoRa con una lógica doméstica de bombeo que utilice cuatro estados discretos de nivel, protección contra operación en seco, parada por tanque lleno y comportamiento seguro ante pérdida de comunicación

2.4 Marco conceptual

El prototipo se concibe como un sistema de control distribuido, el tanque elevado genera información sobre la necesidad de llenado, mientras que la cisterna determina si existen condiciones seguras para bombear. La decisión final se ejecuta en el nodo de control próximo a la bomba.

El sistema funcionará mediante estados: para iniciar el bombeo deberán cumplirse simultáneamente la solicitud de llenado del tanque, la disponibilidad de agua en la cisterna y la existencia de comunicación válida. La bomba se apagará si el tanque alcanza el nivel alto, la cisterna llega al nivel mínimo, se cumple un timeout de operación o se pierde la comunicación durante el intervalo de seguridad.

2.5 Marco legal y normativo

2.5.1 Constitución de la República del Ecuador y legislación hídrica

La Constitución de la República del Ecuador reconoce el derecho humano al agua y establece su carácter estratégico. La Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua regula la gestión y uso del recurso [15]. El prototipo se relaciona con estos principios únicamente desde una perspectiva de automatización y uso eficiente; no interviene en captación, tratamiento ni autorización de aprovechamiento de fuentes naturales.

2.5.2 Regulación del espectro radioeléctrico

ARCOTEL administra el espectro radioeléctrico en Ecuador. El Plan Nacional de Frecuencias y la Norma Técnica de Espectro de Uso Libre constituyen las fuentes que deben consultarse para seleccionar frecuencia, potencia y demás condiciones de operación [13], [14]. La configuración final del módulo LoRa se mantendrá dentro de los parámetros permitidos para la banda y clase de aplicación elegidas.

2.5.3 Seguridad eléctrica

El prototipo incluye una sección de baja tensión y una sección de potencia. La Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica establece el marco general del sector eléctrico ecuatoriano [16]. Para el montaje práctico se aplicarán además buenas prácticas de protección contra sobre corriente, contacto indirecto, puesta a tierra y separación entre circuitos.

Cuando corresponda al diseño y componentes utilizados, podrán emplearse como referencias técnicas normas IEC para instalaciones de baja tensión y contactores. Estas normas se utilizarán como criterios técnicos de seguridad, sin presentarlas como sustitutos de la regulación nacional aplicable.

CAPÍTULO 3
MARCO METODOLÓGICO

3.1 Enfoque de la investigación

La investigación tendrá un enfoque cuantitativo, debido a que la validación del prototipo se basará principalmente en mediciones y resultados observables. Se registrarán variables como RSSI, pérdida de paquetes, distancia, tiempo de respuesta, consumo eléctrico del sistema de control y porcentaje de casos funcionales superados.

Las observaciones realizadas durante el montaje y las pruebas se utilizarán como registros técnicos complementarios para explicar fallos o comportamientos particulares, pero no constituyen un componente cualitativo independiente.

3.2 Tipo o nivel de investigación

Por su finalidad, la investigación es aplicada y de desarrollo tecnológico, ya que busca construir una solución funcional para un problema específico de automatización. Por su alcance es descriptiva y experimental: descriptiva porque documentará la arquitectura y desempeño del prototipo, y experimental porque se modificarán de manera controlada condiciones como estados de los sensores, distancia y obstáculos para observar su efecto sobre el sistema.

3.3 Diseño de investigación

El estudio utilizará un diseño experimental de validación tecnológica. Se construirá el prototipo y se someterá a una matriz de escenarios definidos previamente. Las variables independientes serán las condiciones de nivel representadas por los flotadores, la distancia entre nodos y la presencia de obstáculos. Las variables dependientes serán la acción de la bomba, RSSI, pérdida de paquetes, tiempo de respuesta y estabilidad del enlace.

El diseño incluirá pruebas repetidas por escenario con el propósito de obtener medidas consistentes y reducir el efecto de resultados aislados. El número de repeticiones por escenario se establecerá antes de la ejecución y se reportará junto con los resultados en el Capítulo IV.

3.4 Unidad de análisis y escenarios de prueba

La unidad principal de análisis será el prototipo IoT y su comportamiento ante escenarios controlados. Debido a que no se aplicarán encuestas ni entrevistas a propietarios, no se considerará a los habitantes de las viviendas como población de estudio.

Los escenarios de prueba incluirán combinaciones de estados de los dos flotadores, distancias progresivas entre nodos, pruebas con y sin obstáculos y condiciones de fallo de comunicación. Cuando se utilice una vivienda piloto, esta funcionará como entorno físico de validación y no como muestra estadística de viviendas del cantón.

Tabla 5. Matriz de escenarios de prueba para la validación funcional y de desempeño del prototipo.

Grupo de pruebas	Ejemplos de escenarios	Resultado esperado
Lógica de control	Tanque solicita llenado, cisterna con agua y tanque lleno.	Activación o desactivación de la bomba según las condiciones establecidas.
Comunicación	Transmisión LoRa con línea de vista y presencia de obstáculos	Recepción de estados del tanque e identificación de dificultades de comunicación
Seguridad	Pérdida del enlace LoRa o falta de agua en la cisterna	Apagado automático o bloqueo de la bomba
Recuperación	Restablecimiento de la comunicación inalámbrica	Recuperación de la recepción de estados del tanque elevado

Fuente: Elaboración propia.

3.5 Métodos de investigación

- **Método analítico-sistémico:** permitirá estudiar los subsistemas de sensado, comunicación, control y actuación, así como sus relaciones.
- **Método experimental:** se utilizará para modificar condiciones de prueba y medir el comportamiento del prototipo.
- **Método comparativo:** permitirá comparar el desempeño del enlace en diferentes distancias y condiciones, así como contrastar los resultados obtenidos entre configuraciones de prueba.
- **Estrategia de desarrollo tecnológico - Desarrollo iterativo por prototipos:** se empleará como estrategia de ingeniería para construir, integrar, probar y corregir progresivamente los módulos del sistema.

3.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La validación del prototipo requiere la aplicación sistemática de técnicas de recolección de datos que permitan cuantificar el desempeño funcional, comunicacional y eléctrico del sistema bajo los escenarios de prueba definidos en la sección 3.4. Dado que la investigación adopta un enfoque cuantitativo con registros técnicos complementarios, cada técnica se asocia a un instrumento específico orientado a capturar variables medibles tales como el estado de los sensores, la calidad del enlace LoRa (RSSI y pérdida de paquetes), el tiempo de respuesta del lazo de control, el consumo eléctrico del sistema de gestión y la ocurrencia de eventos relevantes durante las pruebas.

La selección de las técnicas considera tanto la naturaleza de las variables a medir como las condiciones operativas del prototipo. Mientras que las pruebas funcionales se apoyan en una matriz estructurada de casos de prueba, las mediciones de distancia, tiempo y magnitudes eléctricas se realizan con instrumentos calibrados de uso convencional en laboratorios de electrónica y telecomunicaciones. De manera complementaria, se implementa una bitácora de pruebas que permite registrar incidencias, fallas y observaciones técnicas que, sin constituir una fuente independiente de tipo cualitativo, aportan contexto para la interpretación de los resultados cuantitativos.

En la Tabla 6 se presenta la relación entre las técnicas empleadas, los instrumentos utilizados, las variables o registros asociados y la finalidad específica de cada uno dentro del proceso de validación del prototipo.

Tabla 6.Técnicas e instrumentos de recolección de datos empleados en la validación del prototipo.

Técnica	Instrumento	Variable / registro	Finalidad
Prueba funcional	Matriz de casos de prueba	Estados de los flotadores y de la bomba	Verificar el cumplimiento de la lógica de control.
Estimación de distancia	Referencia de distancia del recorrido de prueba	Distancia aproximada entre nodos	Relacionar la separación entre dispositivos con la recepción de mensajes LoRa.
Verificación de comunicación	Observación de los mensajes recibidos	Recepción de estados y pérdida de comunicación	Comprobar el funcionamiento del enlace inalámbrico
Prueba de seguridad	Interrupción intencional del enlace LoRa	Estado de la bomba ante la pérdida de comunicación	Verificar el apagado automático de la bomba.
Observación técnica	Registro de pruebas y resultados	Funcionamiento, fallas y limitaciones identificadas	Documentar el comportamiento del prototipo durante las pruebas

Fuente: Elaboración propia.

3.7 Procedimiento metodológico

1. **Análisis de requisitos.** Se definirán las funciones del sistema, estados de seguridad y variables a medir.
2. **Diseño de arquitectura.** Se elaborará el diagrama de bloques de los dos nodos, las conexiones de los flotadores, el sistema de comunicación LoRa, el relé de interfaz, el contactor y las fuentes de alimentación.
3. **Selección de componentes.** Se verificarán las características eléctricas de la plataforma Heltec WiFi LoRa 32 V4, los flotadores eléctricos, el relé de interfaz y el contactor a partir de hojas de datos y especificaciones técnicas.
4. **Montaje del nodo del tanque elevado.** Se instalará la plataforma Heltec WiFi LoRa 32 V4 junto con un flotador eléctrico encargado de detectar la condición de llenado del tanque elevado.
5. **Montaje del nodo de cisterna y control.** Se instalará la plataforma Heltec WiFi LoRa 32 V4 junto con un flotador eléctrico para verificar la disponibilidad de agua, además del relé de interfaz y el circuito de accionamiento del contactor para el control de la bomba.
6. **Programación del enlace LoRa.** Se configurarán frecuencia, spreading factor, bandwidth, coding rate y potencia dentro de los límites permitidos, y se implementarán identificación de mensajes, reintentos y heartbeat.

7. **Programación de la lógica de control.** Se implementarán reglas de arranque y parada de la bomba, bloqueo por disponibilidad insuficiente de agua en la cisterna, timeout de operación y estado seguro por pérdida de comunicación.
8. **Pruebas unitarias.** Cada sensor, enlace de radio y salida de control se probará de forma independiente.
9. **Pruebas integradas.** Se ejecutará la matriz de escenarios funcionales y se registrarán los resultados.
10. **Pruebas de cobertura.** Se incrementará progresivamente la distancia entre nodos y se introducirán obstáculos, registrando RSSI, paquetes enviados y recibidos.
11. **Análisis y ajustes.** Se identificarán fallos, se modificarán parámetros cuando corresponda y se repetirá la prueba afectada.
12. **Validación final**. Se ejecutará nuevamente el conjunto de casos definidos y se documentarán los resultados para el Capítulo IV.

3.8 Tratamiento y análisis de la información

Los datos se organizarán en hojas de cálculo. Para cada escenario se registrarán condiciones iniciales, número de prueba, estado esperado, estado obtenido, RSSI, paquetes enviados, paquetes recibidos, tiempo de respuesta y observaciones.

La pérdida de paquetes se calculará como la diferencia entre paquetes enviados y recibidos dividida para el número de paquetes enviados, multiplicada por cien. El porcentaje de éxito funcional se obtendrá dividiendo los casos ejecutados correctamente para el total de casos probados y multiplicando por cien.

Para RSSI y tiempo de respuesta se calcularán promedio, mínimo, máximo y desviación estándar cuando el número de repeticiones lo permita. Se elaborarán gráficos de RSSI frente a distancia y pérdida de paquetes frente a distancia para identificar el comportamiento del enlace.

El consumo del sistema de control se expresará mediante las mediciones de corriente y potencia en los nodos electrónicos. No se extrapolará esta medición a un supuesto ahorro energético mensual de la bomba, salvo que se realice una comparación experimental específica con un sistema de referencia.

Los resultados de los flotadores se evaluarán como detecciones correctas o incorrectas de estados discretos. No se calculará precisión de nivel en milímetros, ya que estos sensores no producen una medición continua.

Las observaciones de fallos se utilizarán para interpretar los datos cuantitativos y documentar las condiciones que afectan al prototipo. El análisis final establecerá si el sistema cumple los requisitos funcionales definidos y en qué condiciones mantiene una comunicación y control confiables.

3.8.1 Indicadores de validación

Para establecer criterios objetivos de evaluación del prototipo, se definen indicadores de validación alineados con los objetivos específicos de la investigación y con las dimensiones de desempeño identificadas en el marco teórico. Estos indicadores permiten transformar las mediciones obtenidas mediante las técnicas descritas en la sección 3.6 en valores comparables e interpretables, facilitando la verificación del cumplimiento de los requisitos funcionales, comunicacionales y de seguridad establecidos para el sistema.

Los indicadores se agrupan en ocho dimensiones que cubren la funcionalidad de la lógica de control, la calidad del enlace LoRa, el rendimiento temporal del sistema, la cobertura efectiva, la precisión del censado discreto, el consumo eléctrico del sistema de control y la respuesta ante condiciones de fallo. Cada indicador se expresa en unidades o criterios específicos que permiten su cálculo directo a partir de los datos registrados durante las pruebas, y se asocia al instrumento de medición correspondiente para garantizar la trazabilidad entre el dato bruto y el resultado evaluado.

La definición de estos indicadores cumple además una función metodológica adicional: delimita el alcance de la validación al comportamiento del prototipo bajo los escenarios controlados, evitando extrapolaciones no sustentadas experimentalmente, como la estimación de ahorro energético mensual o la generalización de resultados a contextos distintos a los evaluados. En la Tabla 7 se sintetizan los indicadores de validación, su unidad o criterio de medición y el instrumento asociado a cada uno.

Tabla 7. Indicadores de validación del prototipo por dimensión de desempeño.

Dimensión	Indicador	Unidad / criterio	Instrumento
Funcionalidad	Cumplimiento de casos de prueba	Cumple / No cumple	Matriz de pruebas
Comunicación	Recepción de estados mediante LoRa	Satisfactoria / No satisfactoria	Observación de mensajes recibidos
Cobertura	Distancia aproximada de comunicación evaluada	Metros (m), valor aproximado	Referencia del recorrido de prueba
Sensado	Reconocimiento de estados de los flotadores	Cumple / No cumple	Pruebas funcionales
Control	Activación y desactivación de la bomba según las condiciones establecidas	Cumple / No cumple	Matriz de pruebas
Seguridad funcional	Apagado de la bomba ante pérdida de comunicación o falta de agua	Cumple / no cumple	Pruebas de fallos controlados

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 4
DESARROLLO Y RESULTADOS

4.1 Desarrollo de la propuesta

El desarrollo de la propuesta se realizó mediante un proceso iterativo orientado a la construcción de un prototipo para el monitoreo y control inalámbrico del nivel de agua entre una cisterna y un tanque elevado. El sistema fue concebido mediante una arquitectura distribuida compuesta por dos nodos, de manera que la información de los sensores ubicados en el tanque pudiera transmitirse de forma inalámbrica hacia el nodo instalado junto a la cisterna y al sistema de bombeo.

El proceso de desarrollo comprendió la definición de los requerimientos funcionales y de seguridad, el diseño de la arquitectura, la selección de los componentes electrónicos, la construcción individual de los nodos, la programación de la comunicación inalámbrica, la implementación de la lógica de control y, finalmente, la integración de los diferentes elementos del prototipo.

Como criterio fundamental de diseño se estableció que el sistema debía mantener una operación segura ante condiciones como nivel insuficiente de agua en la cisterna, tanque lleno o pérdida del enlace inalámbrico. En estas situaciones, la lógica de control debe impedir o detener el funcionamiento de la bomba, evitando que una falla de comunicación genere una orden de bombeo no controlada.

4.1.1 Identificación de requerimientos

A partir del problema de investigación y de la metodología establecida, se identifican los requerimientos funcionales necesarios para el desarrollo del prototipo IoT destinado al monitoreo y control inalámbrico del nivel de agua entre una cisterna y un tanque elevado. Estos requerimientos comprenden la detección de los estados de nivel mediante flotadores eléctricos, la comunicación inalámbrica LoRa punto a punto entre dos nodos Heltec WiFi LoRa 32 V4, el accionamiento automático de la bomba mediante un relé y un contactor, la aplicación de condiciones de seguridad y la supervisión de los estados del sistema mediante una interfaz web. La definición de estos requerimientos permite establecer las funciones principales del prototipo y orientar su implementación y evaluación.

Tabla 8. Requerimientos funcionales del prototipo

Código	Requerimiento	Descripción
RF-01	Detección de nivel	Identificar mediante flotadores eléctricos las condiciones de agua establecidas para la cisterna y el tanque elevado
RF-02	Comunicación inalámbrica	Transmitir los estados del tanque elevado hacia el nodo de control mediante comunicación LoRa punto a punto.
RF-03	Control automático	Autorizar la activación de la bomba cuando el tanque requiera llenado, exista disponibilidad de agua en la cisterna y la comunicación sea válida.
RF-04	Parada por tanque lleno	Desactivar la bomba cuando el flotador del tanque elevado indique la finalización del llenado.
RF-05	Protección por nivel mínimo	Bloquear o detener el bombeo cuando el flotador de la cisterna indique una condición insuficiente de agua.
RF-06	Supervisión del enlace	Identificar la ausencia de información válida del nodo remoto mediante un tiempo de espera programado.
RF-07	Estado seguro	Mantener la bomba apagada ante la pérdida de comunicación o una condición que impida el bombeo seguro.
RF-08	Registro de comunicación	Recuperar la recepción de los estados transmitidos por el tanque elevado cuando se restablezca el enlace LoRa.
RF-09	Supervisión mediante Dashboard web	Visualizar mediante una interfaz web los estados de los depósitos y el funcionamiento de la bomba de agua.
RF-10	Supervisión mediante pantalla táctil	Visualizar localmente la información del sistema mediante la pantalla Waveshare ESP32-S3-Touch-LCD-4.3B de 4,3 pulgadas.

Fuente: Elaboración propia.

Los requerimientos funcionales establecidos definen las condiciones de operación del prototipo IoT para el monitoreo y control inalámbrico del nivel de agua entre una cisterna y un tanque elevado. El sistema integra dos nodos Heltec WiFi LoRa 32 V4, sensores de nivel tipo flotador eléctrico y comunicación LoRa punto a punto. La lógica de funcionamiento permite activar la bomba cuando el tanque elevado requiere llenado y existe disponibilidad suficiente de agua en la cisterna. Asimismo, contempla la desactivación del bombeo cuando el tanque alcanza el nivel establecido, cuando se detecta una condición de nivel insuficiente en la cisterna o cuando se presenta una pérdida sostenida de comunicación entre los nodos.

Adicionalmente, el prototipo dispone de un Dashboard web que permite supervisar los estados de la cisterna, el tanque elevado y la bomba de agua mediante una conexión Wi-Fi local. Como parte de la ampliación prevista del sistema, se contempla integrar una pantalla táctil Waveshare ESP32-S3 de 4,3 pulgadas, destinada a presentar localmente la misma información de supervisión. Esta incorporación se encuentra pendiente de implementación y validación, por lo que sus resultados se documentarán una vez realizadas las pruebas correspondientes. De esta manera, los requerimientos permiten relacionar las funciones de detección, comunicación, control y visualización con las etapas de desarrollo y evaluación del prototipo.

4.1.2 Diseño y arquitectura del prototipo

La arquitectura del prototipo se encuentra estructurada bajo un esquema distribuido, conformado por dos nodos electrónicos Heltec WiFi LoRa 32 V4 que intercambian información mediante comunicación inalámbrica LoRa punto a punto. Esta configuración establece un enlace entre el nodo de monitoreo instalado en el tanque elevado y el nodo de control ubicado junto a la cisterna y la bomba de agua, eliminando la necesidad de instalar cableado de comunicación entre ambos puntos.

El primer nodo se encuentra destinado al monitoreo del tanque elevado y está compuesto por una placa Heltec WiFi LoRa 32 V4 y un flotador eléctrico que permite detectar el estado del nivel de agua en el punto establecido. El microcontrolador procesa la señal obtenida del sensor y transmite la información mediante LoRa hacia el nodo de la cisterna. Esta comunicación permite que el sistema de control conozca el estado del tanque y determine si existe una solicitud de llenado.

El segundo nodo se encuentra ubicado junto a la cisterna y constituye la unidad principal de control del prototipo. Integra una placa Heltec WiFi LoRa 32 V4 y un flotador eléctrico que permite identificar la disponibilidad de agua en la cisterna. El controlador recibe el estado transmitido desde el tanque elevado y lo evalúa conjuntamente con la información del sensor local para determinar las condiciones de funcionamiento de la bomba.

La etapa de accionamiento se encuentra asociada al nodo de control de la cisterna y está constituida por un relé de interfaz y un contactor eléctrico. El microcontrolador genera la señal de control correspondiente, mientras que el relé permite accionar el circuito de mando del contactor, encargado de realizar la maniobra eléctrica de la bomba. Esta disposición permite diferenciar la electrónica de control de baja tensión de la etapa

de potencia, evitando que la bomba sea conectada directamente a las salidas del microcontrolador.

La comunicación entre ambos nodos se establece mediante un enlace LoRa punto a punto, a través del cual se transmite el estado detectado en el tanque elevado. La arquitectura contempla mecanismos de supervisión de la comunicación para identificar interrupciones en la recepción de información y establecer condiciones de seguridad. Ante una pérdida sostenida del enlace, la lógica de control debe impedir el funcionamiento no supervisado de la bomba, manteniendo como criterio de diseño la desactivación del sistema de bombeo.

Adicionalmente, el nodo de control dispone de una interfaz de monitoreo web, desarrollada para visualizar los estados de nivel de la cisterna y del tanque elevado, así como la condición de funcionamiento de la bomba. El acceso a esta interfaz se realiza mediante conectividad Wi-Fi, permitiendo consultar la información del prototipo desde un dispositivo compatible con navegador web. La implementación y configuración del Dashboard se describen posteriormente en el apartado correspondiente al desarrollo de las interfaces de supervisión.

Como ampliación de la arquitectura, se contempla la integración de una pantalla táctil Waveshare ESP32-S3 de 4,3 pulgadas, destinada a presentar localmente la misma información disponible en el Dashboard web. Esta interfaz constituye una mejora en proceso de incorporación y requiere establecer la comunicación entre la pantalla y el nodo de control, desarrollar la visualización de los estados y verificar su funcionamiento mediante pruebas de integración.

4.1.3 Selección de componentes y tecnologías

La selección de los componentes y tecnologías del prototipo se realizó considerando los requerimientos de detección de nivel, procesamiento de información, comunicación inalámbrica, control del sistema de bombeo y supervisión de los estados de funcionamiento. Se priorizaron dispositivos que permitieran implementar una arquitectura distribuida mediante dos nodos electrónicos, establecer comunicación LoRa punto a punto y ejecutar las funciones necesarias para el monitoreo del nivel de agua entre una cisterna y un tanque elevado.

Para el procesamiento de información y la comunicación inalámbrica se seleccionaron dos placas Heltec WiFi LoRa 32 V4, una destinada al tanque elevado y otra al sistema de control ubicado junto a la cisterna. Estas placas integran un microcontrolador de la familia ESP32 y un sistema de comunicación LoRa, lo que permite realizar las funciones de procesamiento y transmisión de datos mediante una misma plataforma electrónica. Esta característica facilita la construcción del prototipo y reduce la cantidad de conexiones externas requeridas para establecer la comunicación entre los nodos.

Para la detección de los niveles de agua se seleccionaron dos flotadores eléctricos, distribuidos entre el tanque elevado y la cisterna. Estos dispositivos funcionan como sensores discretos, debido a que permiten identificar condiciones específicas de nivel mediante cambios de estado eléctrico. Por esta razón, el prototipo no realiza mediciones continúas expresadas en litros, centímetros o porcentajes, sino que identifica las condiciones correspondientes a la posición de cada flotador.

En el tanque elevado, el flotador eléctrico permite identificar la condición de nivel establecida para solicitar o detener el llenado. La información es procesada por el nodo correspondiente y transmitida mediante LoRa hacia el nodo de control. Por su parte, el flotador ubicado en la cisterna permite determinar la disponibilidad de agua y establecer una condición de protección para evitar el funcionamiento de la bomba cuando el depósito alcanza el nivel mínimo definido.

Para el accionamiento de la bomba de agua se seleccionó una etapa de control compuesta por un módulo relé y un contactor eléctrico. El relé funciona como interfaz entre la señal generada por el microcontrolador y el circuito de mando del contactor, mientras que este último se encarga de realizar la maniobra eléctrica de la bomba. Esta configuración permite separar la electrónica de baja tensión del circuito de potencia, evitando que la carga eléctrica sea conectada directamente a las salidas del microcontrolador.

En cuanto a la supervisión del sistema, se desarrolló un Dashboard web que permite visualizar los estados correspondientes al tanque elevado, la cisterna y el funcionamiento de la bomba de agua. Esta interfaz utiliza la conectividad Wi-Fi del sistema para presentar la información en un navegador web, facilitando la consulta de las condiciones de operación del prototipo.

Para la supervisión local del sistema se seleccionó una pantalla táctil Waveshare ESP32-S3-Touch-LCD-4.3B de 4,3 pulgadas, incorporada en la arquitectura del prototipo

como interfaz de visualización. Su función consiste en presentar los estados de nivel de la cisterna y del tanque elevado, así como la condición de funcionamiento de la bomba de agua. Esta interfaz complementa el Dashboard web y permite disponer de un punto de consulta local de la información del sistema.

La alimentación eléctrica del prototipo se diseñó considerando los requerimientos de funcionamiento de las placas Heltec WiFi LoRa 32 V4 y los componentes electrónicos asociados. Para ello, se seleccionaron fuentes de alimentación de corriente continua con características adecuadas para cada nodo. El sistema de control ubicado junto a la cisterna contempla, además, la alimentación de los elementos de accionamiento de la bomba, manteniendo la separación entre los circuitos electrónicos de baja tensión y la etapa eléctrica de potencia.

Tabla 9. Componentes principales seleccionados para el desarrollo del prototipo

Componente	Cantidad	Ubicación	Función principal
Heltec WiFi LoRa 32 V4	2	Tanque y cisterna	Procesamiento de señales, comunicación LoRa y ejecución de funciones de control.
Flotador eléctrico	2	Uno en cada depósito	Detección discreta del nivel
Antena LoRa compatible	2	Un nodo cada una	Transmisión y recepción inalámbrica
Pantalla táctil Waveshare ESP32-S3 de 4,3 pulgadas	1	Cisterna	Visualización y supervisión local
Módulo relé de interfaz	1	Cisterna	Interfaz entre controlador y etapa de accionamiento
Contactor	1	Cisterna	Maniobra eléctrica de la bomba
Bomba de agua	1	Sistema hidráulico	Traslado de agua desde la cisterna hacia el tanque
Fuentes de alimentación	Según necesidad	Ambos puntos	Suministro de energía eléctrica a los componentes electrónicos
Conductores y elementos de protección	Según necesidad	Sistema	Conexión eléctrica y protección de circuitos

Fuente: Elaboración propia.

4.1.4 Construcción y montaje del prototipo

La construcción y montaje del prototipo IoT se realizó mediante la implementación de dos nodos electrónicos Heltec WiFi LoRa 32 V4, distribuidos entre el tanque elevado y la cisterna. Cada nodo incorporó un flotador eléctrico para detectar las condiciones de nivel de agua, mientras que la comunicación entre ambos dispositivos se estableció mediante tecnología LoRa punto a punto. Esta distribución permitió organizar los componentes según sus funciones de monitoreo y control, sin requerir cableado de comunicación entre los depósitos.

En el nodo de la cisterna se integraron los elementos encargados del accionamiento de la bomba de agua, conformados por un módulo relé y un contactor eléctrico. El montaje se realizó diferenciando las conexiones de alimentación, sensado, comunicación y control, así como la etapa electrónica de baja tensión y el circuito de potencia asociado al sistema de bombeo. Adicionalmente, se incorporaron un Dashboard web y una pantalla táctil Waveshare ESP32-S3-Touch-LCD-4.3B de 4,3 pulgadas para la supervisión de los estados del prototipo.

Una vez montados los componentes, se verificaron las conexiones y se desarrolló la integración funcional de los subsistemas. Este proceso permitió comprobar la detección de los estados de los flotadores, la transmisión de información mediante LoRa, el accionamiento de la bomba y la visualización de las condiciones de funcionamiento. Los detalles del montaje de cada nodo y de su integración se presentan en los siguientes subapartados.

4.1.4.1 Montaje del nodo del tanque elevado

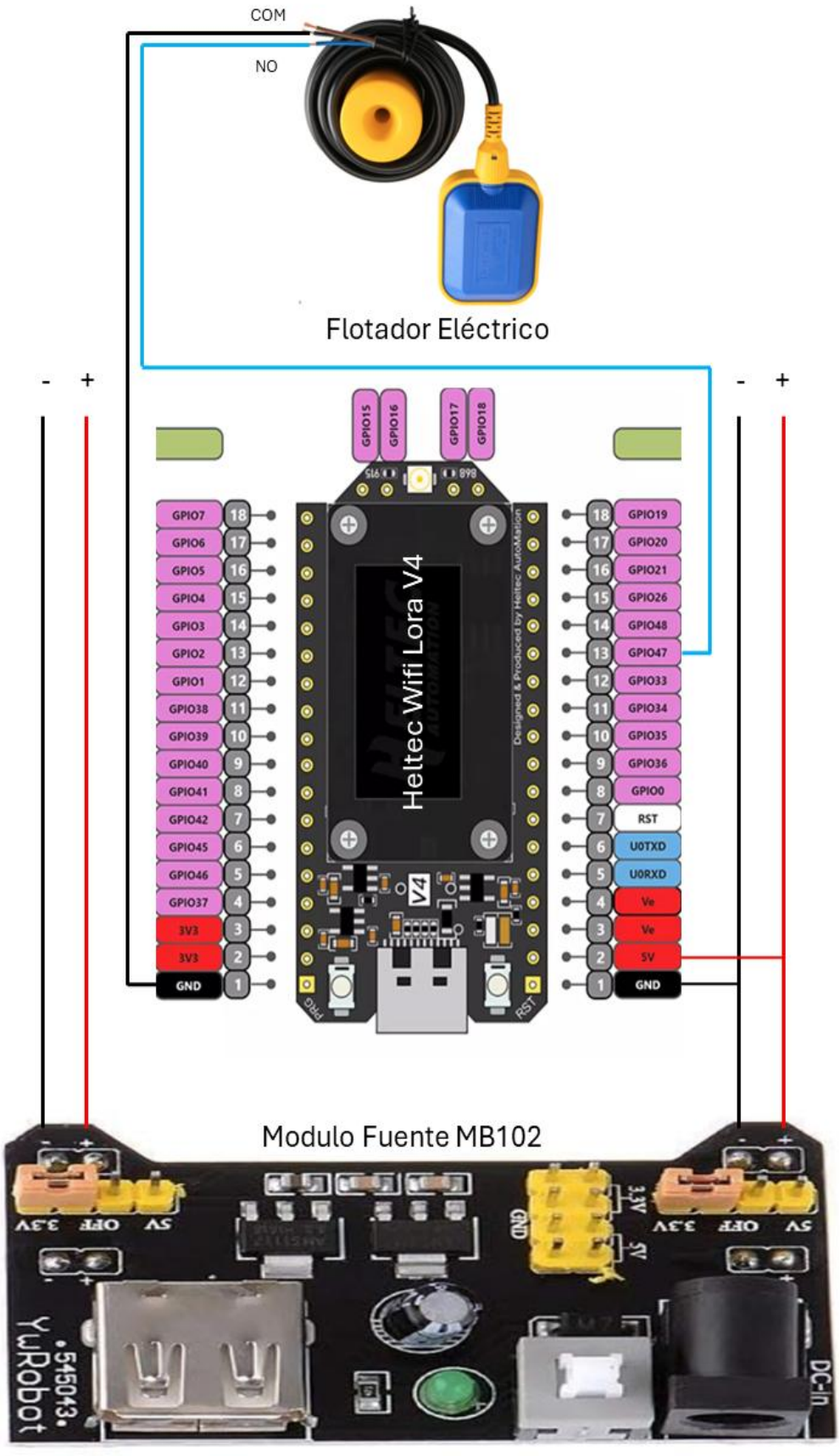
El montaje del nodo de monitoreo del tanque elevado se realizó mediante una placa Heltec WiFi LoRa 32 V4, un flotador eléctrico, una antena compatible con la frecuencia de comunicación LoRa y una fuente de alimentación adecuada para el funcionamiento del dispositivo. Este nodo se encargó de detectar el estado del nivel de agua y transmitir la información hacia el sistema de control ubicado junto a la cisterna.

El flotador eléctrico se colocó en un punto definido del tanque elevado para identificar la condición de nivel establecida en el sistema. Su señal se conectó a una entrada digital del microcontrolador, permitiendo detectar los cambios de estado del sensor. La placa Heltec procesó esta información y la transmitió mediante comunicación inalámbrica LoRa punto a punto hacia el nodo receptor.

Para el funcionamiento del nodo se utilizó alimentación eléctrica mediante una fuente apropiada para los requerimientos de la placa y sus componentes asociados. Esta configuración permitió mantener operativo el sistema de monitoreo sin utilizar baterías recargables ni paneles solares, manteniendo independiente la comunicación inalámbrica entre el tanque elevado y la cisterna.

Durante el montaje se organizaron las conexiones del microcontrolador, el flotador y la antena LoRa, considerando la protección de los componentes electrónicos frente a las condiciones del entorno. La disposición de los elementos permitió establecer el enlace inalámbrico con el nodo de control y desarrollar las pruebas de transmisión de los estados detectados en el tanque elevado.

Ilustración 1. Montaje del nodo de monitoreo ubicado en el tanque Elevado



Fuente: Elaboración propia.

4.1.4.2 Montaje del nodo de la cisterna y control

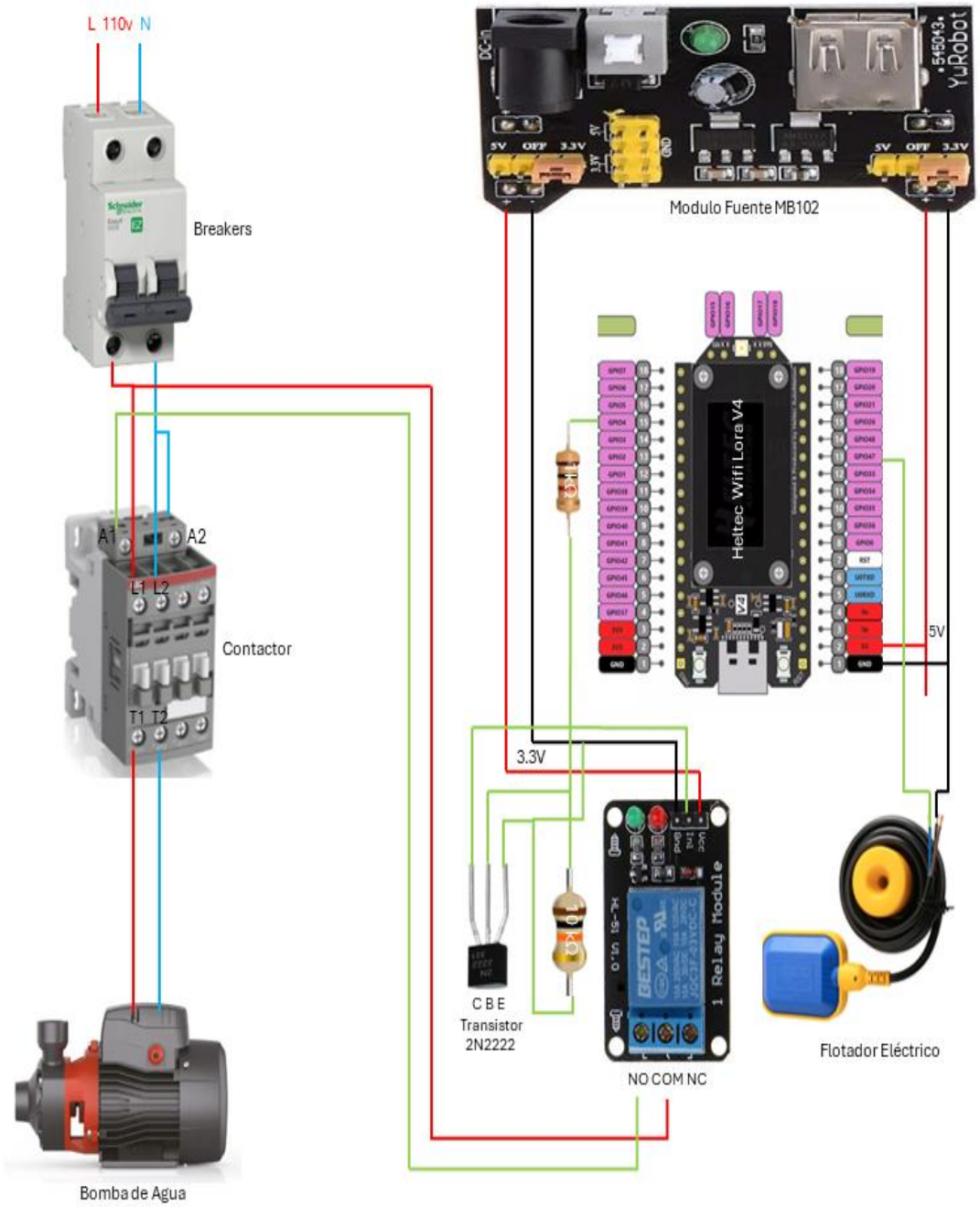
El montaje del nodo de la cisterna y control se realizó mediante una placa Heltec WiFi LoRa 32 V4, un flotador eléctrico, una antena compatible con la frecuencia de comunicación LoRa, un módulo relé y un contactor eléctrico para el accionamiento de la bomba de agua. Este nodo constituye la unidad principal de control del prototipo, debido a que procesa la información del sensor local y recibe los estados transmitidos inalámbricamente desde el tanque elevado.

El flotador eléctrico instalado en la cisterna se conectó a una entrada digital del microcontrolador, permitiendo identificar la disponibilidad de agua en el depósito. Simultáneamente, la placa Heltec recibe mediante comunicación LoRa punto a punto la información procedente del nodo del tanque elevado. A partir de ambas señales, el controlador ejecuta la lógica programada para determinar las condiciones de encendido y apagado de la bomba de agua.

Para el accionamiento del sistema de bombeo se integró un módulo relé conectado a la etapa de control del microcontrolador. Este elemento permite activar o desactivar el circuito de mando del contactor eléctrico, encargado de realizar la maniobra de alimentación de la bomba. La configuración implementada mantiene separados los circuitos electrónicos de baja tensión y el circuito eléctrico de potencia, evitando que el microcontrolador accione directamente el motor.

Como parte de la supervisión del prototipo, se incorporó una pantalla táctil Waveshare ESP32-S3-Touch-LCD-4.3B de 4,3 pulgadas, destinada a presentar localmente los estados del tanque elevado, la cisterna y la bomba de agua. Asimismo, se integró un Dashboard web que permite consultar esta información mediante conectividad Wi-Fi desde un dispositivo con navegador web. Ambas interfaces complementan el sistema de monitoreo y facilitan la visualización de las condiciones de funcionamiento del prototipo.

Ilustración 2. Montaje del nodo de control ubicado junto a la cisterna



Fuente: Elaboración propia.

4.1.5 Programación y lógica de funcionamiento del prototipo

La programación del prototipo IoT se desarrolló considerando las funciones específicas de los dos nodos Heltec WiFi LoRa 32 V4 y su participación en el monitoreo y control inalámbrico del nivel de agua. El nodo ubicado en el tanque elevado se encarga de detectar el estado del flotador eléctrico y transmitir la información mediante tecnología LoRa, mientras que el nodo situado junto a la cisterna recibe los datos enviados, supervisa el estado del flotador local y ejecuta la lógica de control correspondiente al funcionamiento de la bomba de agua.

El firmware de los nodos se estructuró para establecer un intercambio de información mediante comunicación LoRa punto a punto, permitiendo que el controlador utilice el estado del tanque elevado y la disponibilidad de agua en la cisterna para determinar las condiciones de funcionamiento del sistema de bombeo. La programación también contempla el procesamiento de las señales digitales de los sensores, el accionamiento del relé de control y la actualización de la información presentada en las interfaces de supervisión, conformadas por el Dashboard web y la pantalla táctil Waveshare ESP32-S3-Touch-LCD-4.3B de 4,3 pulgadas.

4.1.5.1 Programación del nodo del tanque elevado

La programación del nodo del tanque elevado se desarrolló para supervisar el estado del flotador eléctrico instalado en el depósito y transmitir la información obtenida hacia el nodo de control ubicado junto a la cisterna. Para ello, se configuró la placa Heltec WiFi LoRa 32 V4 con las instrucciones necesarias para realizar la lectura digital del sensor, procesar su estado y establecer la comunicación inalámbrica mediante tecnología LoRa punto a punto.

Durante su funcionamiento, el microcontrolador realiza la lectura del flotador eléctrico y determina la condición de nivel de agua correspondiente. La información procesada se utiliza para generar un mensaje que es transmitido mediante LoRa hacia el nodo receptor. De esta manera, el controlador de la cisterna dispone de información remota para evaluar las condiciones de encendido y apagado de la bomba de agua.

La secuencia general de funcionamiento del nodo comprende la lectura del flotador eléctrico, el procesamiento de su estado, la preparación del mensaje y la transmisión inalámbrica mediante LoRa. Este procedimiento permite mantener el intercambio de información entre los dos nodos y constituye una de las funciones principales del sistema de monitoreo.

Debido a que el flotador eléctrico funciona como un sensor discreto, el programa identifica únicamente los estados definidos por su posición física. Por consiguiente, el nodo no realiza mediciones continuas del volumen de agua ni determina valores porcentuales de llenado, sino que transmite la condición detectada para su procesamiento en el sistema de control.

4.1.5.2 Programación del nodo de cisterna y control

La programación del nodo de la cisterna y control se desarrolló para gestionar el funcionamiento automático de la bomba de agua a partir de la información obtenida de los dos depósitos. Para ello, se configuró la placa Heltec WiFi LoRa 32 V4 como unidad principal de procesamiento, encargada de recibir los mensajes transmitidos desde el tanque elevado mediante comunicación LoRa punto a punto y de realizar la lectura del flotador eléctrico instalado en la cisterna.

Durante el funcionamiento del sistema, el microcontrolador evalúa el estado recibido desde el tanque elevado y la disponibilidad de agua detectada por el flotador de la cisterna. A partir de estas señales, el programa determina si se cumplen las condiciones establecidas para activar la bomba. El encendido se permite cuando el tanque elevado requiere llenado y la cisterna dispone de agua suficiente para realizar el bombeo.

Cuando se cumplen las condiciones de funcionamiento, el controlador genera una señal digital que activa el módulo relé conectado al circuito de mando del contactor eléctrico. El contactor realiza la maniobra de alimentación de la bomba, permitiendo el traslado de agua desde la cisterna hacia el tanque elevado. Esta configuración evita que el microcontrolador accione directamente el motor y permite controlar el sistema de bombeo mediante una etapa de interfaz.

La lógica de programación también contempla las condiciones necesarias para detener el bombeo. La bomba se desactiva cuando el tanque elevado alcanza el nivel de llenado establecido o cuando el flotador de la cisterna identifica una disponibilidad insuficiente de agua. Asimismo, la supervisión del enlace inalámbrico permite establecer una condición de seguridad ante interrupciones sostenidas de comunicación, evitando que la bomba permanezca funcionando sin información válida del tanque elevado.

Finalmente, el nodo de control procesa los estados del sistema para proporcionar información a las interfaces de supervisión. Los datos correspondientes a la cisterna, el tanque elevado y la bomba se presentan mediante el Dashboard web y la pantalla táctil Waveshare ESP32-S3-Touch-LCD-4.3B de 4,3 pulgadas, facilitando el seguimiento de las condiciones de funcionamiento del prototipo.

4.1.5.3 Supervisión de la comunicación

La supervisión de la comunicación inalámbrica constituye una función de seguridad del prototipo, debido a que el nodo de control necesita recibir información válida del tanque elevado para determinar las condiciones de funcionamiento de la bomba. Para ello, la programación contempla un mecanismo de vigilancia del enlace LoRa punto a punto, basado en la recepción periódica de mensajes transmitidos por el nodo remoto.

Durante el funcionamiento del sistema, el nodo ubicado junto a la cisterna verifica la recepción de los mensajes procedentes del tanque elevado y controla el tiempo transcurrido desde la última comunicación válida. Cuando este intervalo supera el tiempo máximo establecido en la programación, el controlador identifica una interrupción del enlace inalámbrico y aplica una condición de seguridad que impide mantener activa la bomba de agua.

Este comportamiento responde al principio de funcionamiento seguro (*fail-safe*), mediante el cual la bomba permanece desactivada mientras no se dispone de información válida del nodo remoto. Una vez restablecida la comunicación, el controlador vuelve a evaluar el estado del tanque elevado y la disponibilidad de agua en la cisterna antes de permitir nuevamente el bombeo. De esta manera, la supervisión del enlace contribuye a prevenir el funcionamiento no controlado de la bomba ante interrupciones de comunicación.

4.1.5.4 Programación de las interfaces de supervisión

La programación de las interfaces de supervisión se desarrolló con el propósito de facilitar la visualización de los estados de funcionamiento del prototipo IoT. Para ello, se integraron dos medios de consulta: un Dashboard web accesible mediante conectividad Wi-Fi y una pantalla táctil Waveshare ESP32-S3-Touch-LCD-4.3B de 4,3 pulgadas, destinada a la supervisión local del sistema. Ambas interfaces presentan información relacionada con el nivel de agua del tanque elevado, la disponibilidad de agua en la cisterna y el estado de funcionamiento de la bomba.

El Dashboard web se desarrolló como una interfaz de visualización que permite consultar la información procesada por el nodo de control. Mediante la conectividad Wi-Fi, el sistema proporciona acceso a los estados de los depósitos y de la bomba desde un dispositivo compatible con navegador web. La información presentada corresponde a las

condiciones detectadas por los flotadores eléctricos y a las decisiones ejecutadas por la lógica de control.

Por otra parte, la programación de la pantalla táctil Waveshare ESP32-S3-Touch-LCD-4.3B se orientó a presentar la información del prototipo mediante una interfaz gráfica local. Su funcionamiento permite consultar los estados de los depósitos y de la bomba sin depender de la visualización mediante un navegador web, complementando las funciones de supervisión disponibles en el Dashboard.

La integración de ambas interfaces permite disponer de diferentes alternativas para consultar las condiciones de operación del prototipo. De esta manera, la información generada por los nodos electrónicos se utiliza tanto para el control automático del bombeo como para la supervisión de los estados del sistema, contribuyendo a facilitar el seguimiento de su funcionamiento.

4.1.6 Integración del prototipo

La integración del prototipo IoT consistió en establecer el funcionamiento conjunto de los subsistemas de detección, comunicación inalámbrica, procesamiento, accionamiento y supervisión. Para ello, se conectaron funcionalmente los dos nodos Heltec WiFi LoRa 32 V4, los flotadores eléctricos, la etapa de control de la bomba y las interfaces de visualización, conformando un sistema de monitoreo y control inalámbrico del nivel de agua entre la cisterna y el tanque elevado.

Durante la integración se verificó que la información transmitida por el nodo del tanque elevado mediante LoRa fuera recibida e interpretada por el nodo de la cisterna. Asimismo, se comprobó que el controlador utilizara los estados de ambos flotadores para ejecutar las órdenes de activación y desactivación de la bomba a través del módulo relé y el contactor eléctrico. Estas verificaciones permitieron establecer la coordinación entre los componentes electrónicos y el sistema de bombeo.

Finalmente, se integraron el Dashboard web y la pantalla táctil Waveshare ESP32-S3-Touch-LCD-4.3B de 4,3 pulgadas para presentar los estados de funcionamiento del prototipo. La integración de estos elementos permitió disponer de un sistema funcional, cuya operación fue evaluada posteriormente mediante las pruebas descritas en el apartado 4.4.

4.2 Presentación del prototipo

El prototipo IoT desarrollado se presenta como un sistema funcional de monitoreo y control inalámbrico del nivel de agua entre una cisterna y un tanque elevado. Su implementación está conformada por dos nodos electrónicos Heltec WiFi LoRa 32 V4, ubicados en los respectivos depósitos, y una etapa de accionamiento eléctrico encargada de controlar el funcionamiento de la bomba de agua.

La presentación del prototipo permite identificar la disposición de sus principales componentes, las conexiones establecidas y los medios de supervisión incorporados. Para facilitar la visualización de los estados del sistema, se implementaron un Dashboard web y una pantalla táctil Waveshare ESP32-S3-Touch-LCD-4.3B de 4,3 pulgadas, los cuales forman parte de la solución desarrollada.

En los siguientes subapartados se presenta la configuración final de los elementos que conforman el prototipo, destacando su organización física y las interfaces utilizadas para supervisar su funcionamiento. Esta descripción complementa el proceso de construcción expuesto anteriormente, sin repetir los procedimientos de montaje y programación.

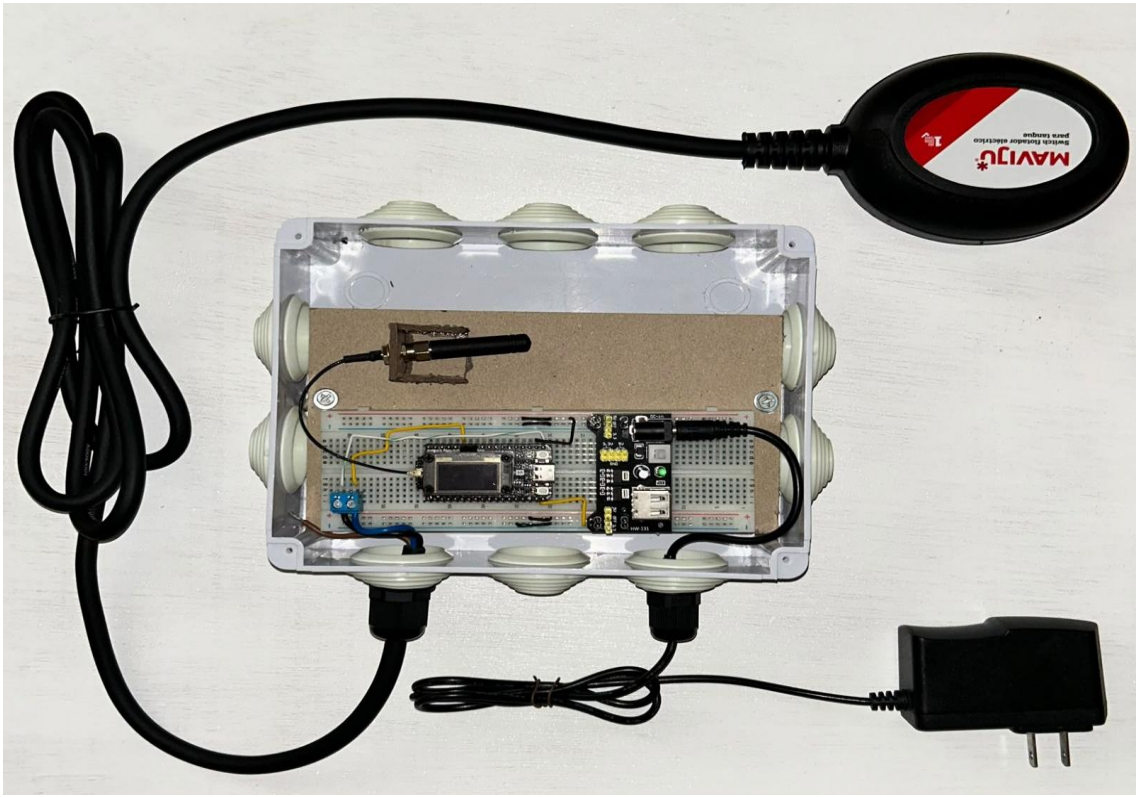
4.2.1 Presentación del nodo del tanque elevado

La configuración física final del prototipo está conformada por dos nodos Heltec WiFi LoRa 32 V4, distribuidos entre la cisterna y el tanque elevado. Cada nodo dispone de un flotador eléctrico conectado a sus entradas de detección, mientras que el nodo ubicado en la cisterna incorpora los elementos de accionamiento eléctrico de la bomba, integrados mediante un módulo relé y un contactor.

Los componentes fueron organizados de acuerdo con sus funciones dentro del sistema, diferenciando las conexiones de alimentación, detección y control. Esta disposición permite identificar los elementos que intervienen en el monitoreo del nivel de agua y en el accionamiento del equipo de bombeo.

La configuración presentada corresponde al prototipo implementado y utilizado durante las pruebas funcionales, en las cuales se verificó la operación conjunta de los nodos y de los elementos de control.

Ilustración 3. Nodo de monitoreo correspondiente al tanque elevado



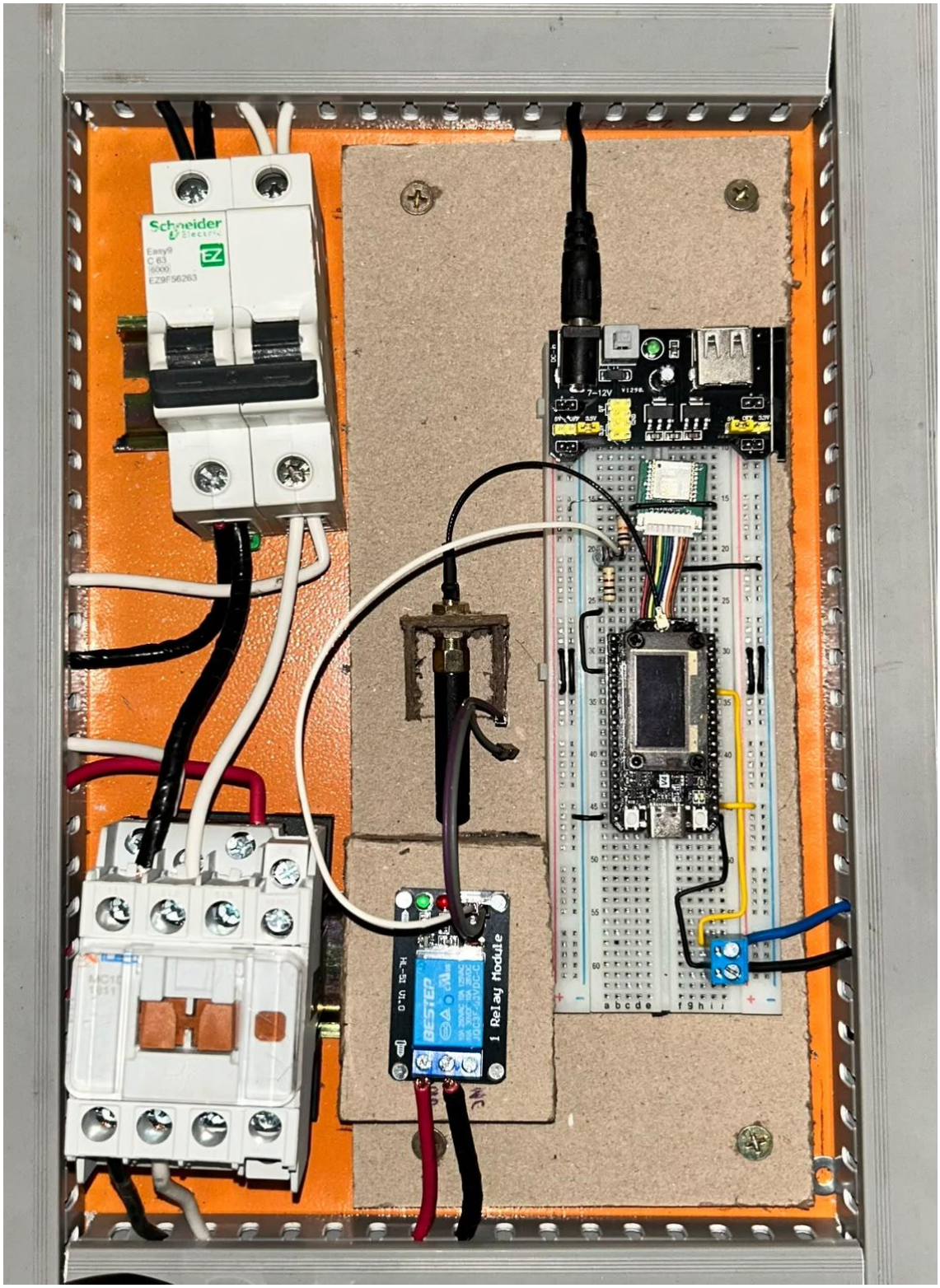
Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Presentación del nodo de cisterna y control

El nodo de la cisterna constituye la unidad central de control del prototipo y está conformado por una placa Heltec WiFi LoRa 32 V4, un flotador eléctrico, una antena LoRa y las conexiones de alimentación correspondientes. En su configuración final se integraron los elementos electrónicos necesarios para recibir la información del tanque elevado y supervisar las condiciones de nivel de agua en la cisterna.

Como parte de esta unidad, se incorporaron un módulo relé y un contactor eléctrico para el accionamiento de la bomba de agua. La disposición de estos componentes permite distinguir la etapa electrónica de control de la etapa de potencia, conformando un conjunto funcional que fue utilizado durante las pruebas del prototipo.

Ilustración 4. Nodo de recepción y control correspondiente a la cisterna



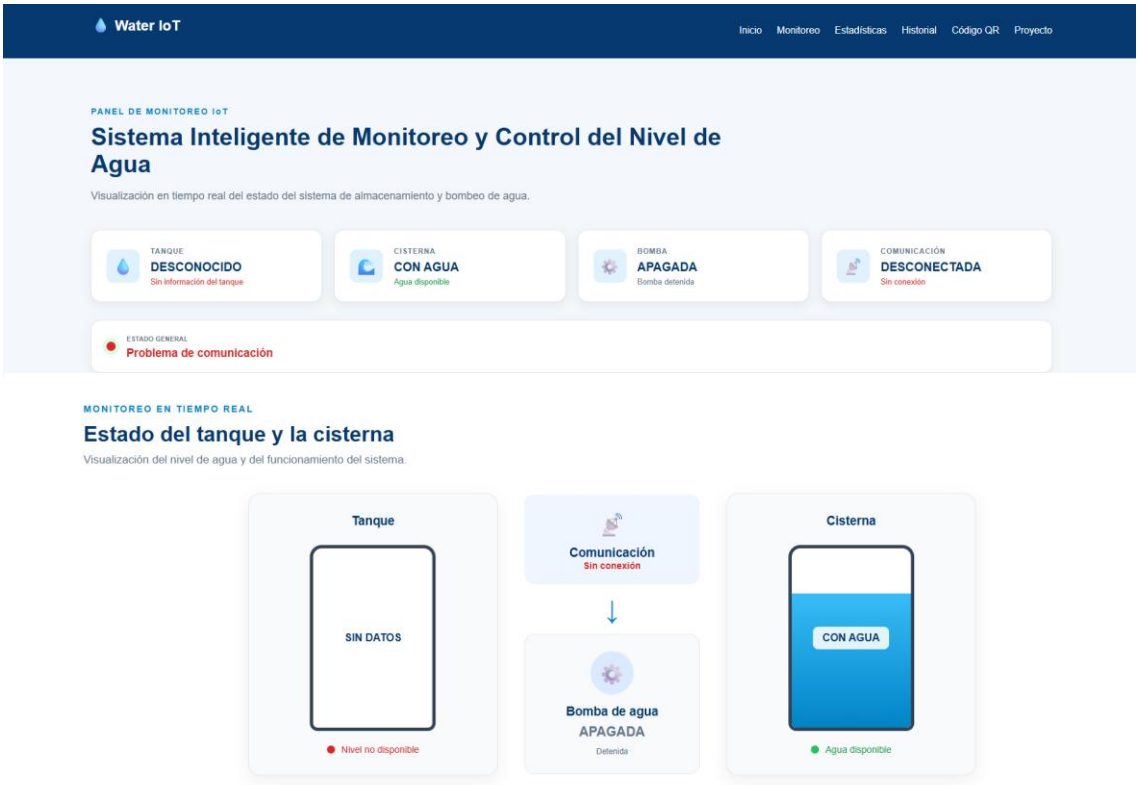
Fuente: Elaboración propia.

4.2.3 Presentación de la interfaz de visualización

El prototipo IoT incorpora dos interfaces de supervisión: un Dashboard web y una pantalla táctil Waveshare ESP32-S3-Touch-LCD-4.3B de 4,3 pulgadas. Ambas fueron implementadas para presentar gráficamente los estados del tanque elevado, la cisterna y la bomba de agua, permitiendo al usuario consultar las condiciones de funcionamiento del sistema.

El Dashboard web permite acceder a la información mediante un navegador y conectividad Wi-Fi, mientras que la pantalla táctil Waveshare ofrece una alternativa de visualización local. Estas interfaces fueron integradas y verificadas durante las pruebas funcionales, facilitando la supervisión del prototipo sin necesidad de consultar directamente los registros del monitor serial.

Ilustración 5. Interfaz de visualización del sistema de monitoreo y control.



Fuente: Elaboración propia.

4.2.4 Presentación del prototipo integrado

El prototipo integrado constituye el resultado de la implementación conjunta de los subsistemas de monitoreo, comunicación inalámbrica, procesamiento, control y visualización. Su estructura está conformada por dos nodos Heltec WiFi LoRa 32 V4, ubicados en el tanque elevado y la cisterna, respectivamente, los cuales intercambian información mediante comunicación LoRa punto a punto para coordinar el funcionamiento del sistema de bombeo.

Durante la operación, el nodo del tanque elevado detecta el estado del flotador eléctrico y transmite dicha información hacia el nodo de control. Este último recibe los datos, verifica la condición del flotador instalado en la cisterna y ejecuta la lógica programada para determinar el encendido o apagado de la bomba mediante el módulo relé y el contactor eléctrico. De esta manera, el sistema permite automatizar el proceso de llenado del tanque elevado de acuerdo con las condiciones detectadas en ambos depósitos.

Como parte de la integración, el prototipo dispone de un Dashboard web y una pantalla táctil Waveshare ESP32-S3-Touch-LCD-4.3B de 4,3 pulgadas, que permiten visualizar los estados de funcionamiento del sistema. La incorporación de estas interfaces complementa las funciones de monitoreo y control, proporcionando medios de supervisión para consultar las condiciones de los depósitos y de la bomba de agua.

La implementación conjunta de estos componentes permitió obtener un prototipo funcional orientado al monitoreo y control inalámbrico del nivel de agua en instalaciones domésticas. Su funcionamiento integra la adquisición de señales, la transmisión de información, la evaluación de condiciones y el accionamiento de la bomba, conforme a los objetivos establecidos para el desarrollo del proyecto.

4.3 Funcionamiento del prototipo

El funcionamiento del prototipo IoT se basa en la detección de los estados de nivel de agua mediante dos flotadores eléctricos, instalados en el tanque elevado y la cisterna. Cada sensor proporciona una señal discreta que permite identificar la condición correspondiente de su depósito. Esta información es procesada por los nodos Heltec WiFi LoRa 32 V4 para determinar la operación del sistema de bombeo.

El nodo ubicado en el tanque elevado realiza la lectura de su flotador y transmite periódicamente el estado detectado hacia el nodo de control mediante comunicación LoRa punto a punto. Al recibir el mensaje, el controlador comprueba la validez de la

comunicación y consulta el estado del flotador de la cisterna, disponiendo así de la información necesaria para evaluar las condiciones de funcionamiento.

La bomba de agua se activa únicamente cuando el tanque elevado requiere llenado, la cisterna dispone de agua suficiente y la comunicación entre los nodos se mantiene válida. Para ello, el controlador acciona un módulo relé que gobierna el contactor eléctrico de la bomba. Por el contrario, el sistema desactiva o mantiene apagada la bomba cuando el tanque alcanza la condición de llenado, la cisterna presenta un nivel insuficiente o se interrumpe la comunicación LoRa. De esta manera, se prioriza un estado seguro de funcionamiento.

Los estados del tanque elevado, la cisterna y la bomba se presentan mediante el Dashboard web y la pantalla táctil Waveshare ESP32-S3-Touch-LCD-4.3B de 4,3 pulgadas. Estas interfaces permiten supervisar la operación del prototipo y consultar las condiciones detectadas durante el proceso de llenado, complementando las funciones automáticas de control.

4.3.1 Funcionamiento del nodo del tanque

El nodo ubicado en el tanque elevado realiza la lectura del flotador eléctrico conectado a la placa Heltec WiFi LoRa 32 V4. A partir de esta señal, el microcontrolador identifica si el depósito requiere llenado o si ha alcanzado la condición establecida para detener el suministro de agua. El estado detectado se procesa y transmite al nodo de control de la cisterna mediante comunicación LoRa punto a punto, sin necesidad de utilizar cableado de señal entre ambos depósitos.

La transmisión de información se realiza periódicamente, incluso cuando no existen cambios en el estado del flotador. Este mecanismo permite mantener actualizada la información del tanque elevado y proporciona al nodo receptor mensajes con los que puede supervisar la continuidad del enlace inalámbrico. De esta manera, el nodo remoto cumple las funciones de detección y transmisión necesarias para el control automático del sistema de bombeo.

4.3.2 Funcionamiento del nodo de la cisterna

El nodo ubicado junto a la cisterna, implementado mediante una placa Heltec WiFi LoRa 32 V4, actúa como unidad principal de control del prototipo. Durante su funcionamiento, recibe los estados transmitidos desde el tanque elevado mediante comunicación LoRa punto a punto y realiza la lectura del flotador eléctrico instalado en

la cisterna. Con esta información, el microcontrolador evalúa las condiciones necesarias para controlar el sistema de bombeo.

La activación de la bomba se autoriza únicamente cuando el tanque elevado requiere llenado, la cisterna dispone de agua suficiente y la comunicación entre ambos nodos es válida. Si el tanque alcanza la condición de llenado, se detecta un nivel insuficiente en la cisterna o se pierde la comunicación LoRa, el controlador mantiene o establece la bomba en estado apagado. Para ejecutar las órdenes de control, el microcontrolador acciona un módulo relé que gobierna el contactor eléctrico encargado de conectar o desconectar la alimentación de la bomba.

Adicionalmente, el nodo de control proporciona la información utilizada por el Dashboard web y la pantalla táctil Waveshare ESP32-S3-Touch-LCD-4.3B de 4,3 pulgadas. Ambas interfaces presentan los estados de los depósitos y de la bomba, permitiendo supervisar el funcionamiento del prototipo durante su operación.

4.3.3 Estados de funcionamiento del sistema

Para facilitar la comprensión de la lógica implementada, el funcionamiento puede representarse mediante una matriz de estados.

Tabla 10. Estados generales de funcionamiento del prototipo

Estado del tanque	Estado de la cisterna	Comunicación LoRa	Acción del sistema
Requiere llenado	Agua disponible	Disponible	Autorizar la activación de la bomba.
No requiere llenado	Agua disponible	Disponible	Mantener bomba apagada
Requiere llenado	Agua no disponible	Disponible	Bloquear el funcionamiento de la bomba
No requiere llenado	Agua no disponible	Disponible	Mantener bomba apagada
Cualquier estado	Cualquier estado	Comunicación perdida	Mantener bomba apagada por seguridad

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 10 resume las decisiones de control establecidas para las distintas combinaciones de estados de los depósitos y de la comunicación LoRa. Se observa que la activación de la bomba está condicionada al cumplimiento simultáneo de los requisitos de llenado, disponibilidad de agua y comunicación válida. Asimismo, se establece un comportamiento seguro ante condiciones que impiden el bombeo, especialmente cuando

se pierde el enlace inalámbrico. Esta matriz constituye una referencia para la verificación de la lógica implementada durante las pruebas funcionales del prototipo.

4.3.4 Funcionamiento ante pérdida de comunicación

La comunicación inalámbrica LoRa punto a punto constituye un elemento fundamental para el funcionamiento del prototipo, debido a que permite transmitir la información del nivel de agua desde el tanque elevado hacia el nodo de control ubicado junto a la cisterna. Para supervisar la disponibilidad de este enlace, la programación contempla la recepción periódica de mensajes procedentes del nodo remoto, permitiendo identificar posibles interrupciones de comunicación.

Durante el funcionamiento del sistema, el nodo de control verifica el tiempo transcurrido desde la última recepción válida. Cuando dicho intervalo supera el tiempo máximo de espera establecido en la programación (*timeout*), se identifica una condición de pérdida de comunicación y se aplica una medida de seguridad que impide mantener activa la bomba de agua. Esta condición evita que el sistema continúe bombeando sin disponer de información actualizada sobre el estado del tanque elevado.

Una vez restablecida la comunicación LoRa, el controlador vuelve a evaluar la información recibida desde el tanque elevado y el estado del flotador instalado en la cisterna. La activación de la bomba solamente se permite cuando se cumplen nuevamente las condiciones establecidas en la lógica de control. Este mecanismo responde al principio de funcionamiento seguro (*fail-safe*), mediante el cual el sistema mantiene la bomba desactivada ante la ausencia de información válida del nodo remoto.

4.4 Pruebas del prototipo

Una vez finalizadas las etapas de construcción, programación e integración, se realizaron pruebas funcionales para verificar el comportamiento del prototipo IoT bajo diferentes condiciones de operación. Estas evaluaciones permitieron comprobar la detección de los estados de los flotadores eléctricos, la comunicación inalámbrica entre los nodos, el control automático de la bomba de agua y el funcionamiento de las interfaces de supervisión implementadas.

Las pruebas se desarrollaron tanto de manera individual, para verificar los principales subsistemas, como de forma integrada, para evaluar su funcionamiento conjunto. Se comprobaron las condiciones de encendido y apagado de la bomba, los mecanismos de protección ante la falta de agua y la pérdida de comunicación LoRa, así

como la actualización de información en el Dashboard web y la pantalla táctil Waveshare. También se evaluó el enlace inalámbrico en escenarios con diferentes distancias y presencia de obstáculos.

Los resultados se organizaron en una matriz de pruebas funcionales que registra las verificaciones realizadas, los resultados esperados, las observaciones obtenidas y su cumplimiento. Esta matriz permite contrastar el comportamiento del prototipo con los requerimientos establecidos e identificar las condiciones en las que se presentaron limitaciones, proporcionando una base para el análisis posterior de los resultados.

4.4.1 Pruebas de los flotadores eléctricos

Las pruebas de los flotadores eléctricos se realizaron mediante el accionamiento individual de los sensores instalados en el tanque elevado y la cisterna, con el propósito de verificar el reconocimiento de sus cambios de estado. En el nodo del tanque elevado se comprobó la lectura del flotador y la transmisión de la información hacia el nodo de control mediante comunicación LoRa punto a punto. En el nodo de la cisterna se verificó la detección de las condiciones de disponibilidad y falta de agua, utilizadas por la lógica de protección del sistema de bombeo.

Durante las verificaciones se observó que los microcontroladores reconocían los estados de los flotadores y que esta información podía utilizarse en las decisiones de control del prototipo. Debido a que los sensores empleados proporcionan señales discretas, las pruebas se centraron en identificar las condiciones de funcionamiento de cada depósito, sin realizar mediciones continuas del nivel de agua en centímetros, litros o porcentajes.

4.4.2 Prueba de comunicación LoRa

Las pruebas de comunicación LoRa se realizaron para verificar la transmisión y recepción de mensajes entre los dos nodos Heltec WiFi LoRa 32 V4 mediante un enlace punto a punto. La evaluación se desarrolló en dos escenarios con diferentes condiciones de propagación, con el propósito de observar el comportamiento de la comunicación inalámbrica entre el nodo del tanque elevado y el nodo de control de la cisterna.

En el primer escenario se realizó una prueba a una distancia aproximada de 100 metros con línea de vista entre los dispositivos, obteniéndose una recepción satisfactoria de los mensajes transmitidos. Este resultado permitió comprobar el funcionamiento del enlace LoRa en las condiciones evaluadas, sin requerir cableado de comunicación entre los nodos.

En el segundo escenario, los dispositivos se ubicaron en el interior de una vivienda de varios niveles, entre la planta baja y el tercer piso. En esta configuración no se obtuvo una comunicación satisfactoria, lo que evidenció una limitación del enlace ante las condiciones de propagación presentes en el inmueble. Los resultados muestran que el desempeño de la comunicación varió según el entorno de instalación, particularmente por la posible influencia de los obstáculos estructurales.

4.4.3 Pruebas de la lógica de control

Las pruebas de la lógica de control se realizaron mediante la simulación de diferentes condiciones de nivel de agua, accionando los flotadores eléctricos del tanque elevado y la cisterna. El propósito fue verificar que el nodo de control interpretara correctamente las señales recibidas y ejecutara las acciones de encendido o apagado de la bomba de acuerdo con las condiciones establecidas en la programación.

Durante las verificaciones se comprobó que la bomba podía activarse cuando el tanque elevado requería llenado, existía agua disponible en la cisterna y la comunicación LoRa era válida. Asimismo, se verificó que el sistema desactivara o mantuviera apagada la bomba cuando el tanque alcanzaba la condición de llenado o se detectaba falta de agua en la cisterna. Estos comportamientos permitieron comprobar la aplicación de las condiciones de control y protección establecidas para el prototipo.

Los resultados observados fueron coherentes con las combinaciones de funcionamiento descritas en la Tabla 10, evidenciando la correspondencia entre los estados de los flotadores y las acciones ejecutadas por el sistema de bombeo. La verificación específica del comportamiento ante la pérdida de comunicación inalámbrica se presenta en el apartado correspondiente a las pruebas de seguridad.

4.4.4 Prueba de seguridad ante pérdida de comunicación

La prueba de seguridad ante pérdida de comunicación se realizó mediante la interrupción intencional del enlace LoRa entre el nodo del tanque elevado y el nodo de control de la cisterna. El propósito fue verificar la respuesta del sistema de bombeo cuando el controlador deja de recibir información válida sobre el estado del tanque elevado.

Durante la evaluación se comprobó que, al interrumpirse la comunicación, el sistema desactivó automáticamente la bomba de agua como medida de protección. Este comportamiento corresponde al mecanismo de supervisión implementado en la programación, que utiliza un tiempo máximo de espera (*timeout*) para identificar la

ausencia de mensajes válidos y establecer la salida de control en estado apagado. De esta manera, se verificó que el prototipo evita mantener el bombeo cuando no dispone de información actualizada del tanque elevado.

Posteriormente, se restableció la comunicación LoRa y se comprobó que el nodo de la cisterna volvió a recibir los estados transmitidos desde el tanque elevado. La recuperación del enlace permitió que el controlador retomara la evaluación de las condiciones de funcionamiento, sin eliminar los requisitos de seguridad establecidos para la activación de la bomba. Estos resultados evidenciaron el funcionamiento del mecanismo de protección ante pérdida de comunicación (*fail-safe*) implementado en el prototipo.

4.4.5 Verificación de la respuesta funcional del sistema

La verificación de la respuesta funcional del prototipo se realizó mediante la observación de su comportamiento ante los cambios de estado de los flotadores eléctricos. Durante las pruebas se comprobó que el sistema reconocía las variaciones detectadas y ejecutaba las acciones de control correspondientes, evidenciando una respuesta funcional acorde con las condiciones programadas. La evaluación fue de carácter cualitativo, debido a que no se utilizaron instrumentos ni procedimientos para medir los tiempos de respuesta en segundos o milisegundos. Por tanto, los resultados permiten confirmar el comportamiento funcional observado, pero no establecer valores de latencia ni tiempos promedio de respuesta.

4.4.6 Matriz general de pruebas

La Tabla 11 presenta la matriz general de las 12 pruebas funcionales realizadas al prototipo IoT, incluyendo los resultados esperados, los comportamientos observados y su correspondiente cumplimiento. De las verificaciones registradas, 11 obtuvieron la condición «Cumple» y una fue clasificada como «No cumple», correspondiente a la comunicación LoRa entre la planta baja y el tercer piso de una vivienda de varios niveles.

Los resultados evidencian el funcionamiento satisfactorio de los subsistemas de detección, control automático, protección y supervisión en las condiciones evaluadas. Asimismo, la matriz permite identificar la limitación del enlace inalámbrico en presencia de obstáculos estructurales, aspecto que debe considerarse al analizar la instalación del prototipo en diferentes entornos residenciales.

Tabla 11. Matriz de pruebas funcionales del prototipo

N.º	Prueba realizada	Qué se evaluó	Resultado esperado	Resultado obtenido	Cumplimiento
1	Flotador del tanque	Detección del cambio de estado	Detectar correctamente las dos posiciones del sensor	El controlador identificó correctamente los cambios de estado del flotador	Cumple
2	Flotador de cisterna	Detección local	Reconocer disponibilidad/no disponibilidad de agua	El nodo identificó correctamente ambos estados del flotador	Cumple
3	Comunicación LoRa	Transmisión entre nodos	Recibir correctamente la información enviada desde el tanque	Se estableció comunicación satisfactoria entre ambos nodos a una distancia aproximada de 100 metros con línea de vista	Cumple
4	Comunicación LoRa con obstáculos	Comunicación entre la planta baja y el tercer piso de una vivienda.	Establecer comunicación entre los nodos en presencia de obstáculos estructurales.	No se logró establecer una comunicación satisfactoria entre los nodos en las condiciones evaluadas.	No cumple
5	Activación de bomba	Lógica de control	Activar la salida cuando el tanque requiera llenado y exista agua en la cisterna	La salida de control se activó al cumplirse ambas condiciones	Cumple
6	Detención de bomba	Respuesta al estado del tanque	Desactivar la salida cuando el tanque no requiera llenado	La salida fue desactivada al cambiar la condición del flotador del tanque	Cumple
7	Protección de cisterna	Seguridad ante falta de agua	Impedir el bombeo cuando la cisterna no disponga del nivel requerido	El controlador bloqueó la activación de la bomba ante esta condición	Cumple

N.º	Prueba realizada	Qué se evaluó	Resultado esperado	Resultado obtenido	Cumplimiento
8	Pérdida de comunicación	Mecanismo *fail-safe*	Mantener la bomba apagada al perder el enlace	Al interrumpir la comunicación LoRa entre los nodos, el sistema detectó la pérdida del enlace y desactivó automáticamente la bomba de agua	Cumple
9	Recuperación del enlace	Restablecimiento de comunicación	Recuperar los estados después de restablecer el enlace	Al restablecer la comunicación LoRa, el nodo de control volvió a recibir correctamente la información sobre el estado del tanque elevado	Cumple
10	Visualización mediante Dashboard web	Presentación de los estados del tanque elevado, cisterna, comunicación y bomba.	Visualizar correctamente los estados principales del prototipo mediante la interfaz web.	El Dashboard web presentó la información de funcionamiento del prototipo, permitiendo supervisar los estados del sistema.	Cumple
11	Visualización mediante pantalla táctil Waveshare	Presentación de la información de funcionamiento del prototipo en la pantalla física.	Visualizar correctamente los estados principales del sistema en la pantalla táctil	La pantalla Waveshare ESP32-S3-Touch-LCD-4.3B mostró la información de funcionamiento del prototipo mediante su interfaz de visualización	Cumple
12	Operación integrada	Funcionamiento completo	Ejecutar correctamente la secuencia sensado–comunicación–control	Los subsistemas funcionaron de manera coordinada durante la secuencia de operación	Cumple

Fuente: Elaboración propia.

4.5 Resultados obtenidos

El desarrollo del prototipo IoT permitió obtener un sistema funcional capaz de supervisar las condiciones de nivel de agua en una cisterna y un tanque elevado, así como controlar automáticamente el funcionamiento de una bomba de agua. Mediante las pruebas realizadas se comprobó la detección de los estados de los flotadores eléctricos, la ejecución de las órdenes de bombeo y la aplicación de mecanismos de protección ante condiciones que impiden su funcionamiento seguro.

Los resultados también evidenciaron una comunicación LoRa satisfactoria a una distancia aproximada de 100 metros con línea de vista, así como una limitación del enlace entre la planta baja y el tercer piso de una vivienda. Adicionalmente, se verificó el funcionamiento del Dashboard web y de la pantalla táctil Waveshare ESP32-S3-Touch-LCD-4.3B como interfaces de supervisión. Estos hallazgos permiten valorar el desempeño funcional del prototipo en los escenarios evaluados y constituyen la base para el análisis de resultados presentado posteriormente.

4.5.1 Resultados de detección de nivel

Los resultados obtenidos evidenciaron que los flotadores eléctricos instalados en el tanque elevado y la cisterna permitieron identificar correctamente los estados de nivel establecidos para el funcionamiento del prototipo. En ambos casos, los cambios de estado fueron reconocidos por los respectivos nodos de control, cumpliendo con las condiciones de detección evaluadas. Estos resultados confirman la funcionalidad de los sensores como elementos de entrada para el sistema de monitoreo y control automático. Debido a su funcionamiento discreto, la información obtenida corresponde a condiciones de nivel y no a mediciones continuas de volumen o altura de agua.

Tabla 12. Resultados funcionales de los sensores de nivel

Sensor	Estados evaluados	Resultado de referencia	Cumplimiento
Flotador del tanque	Requiere / no requiere llenado	Los cambios fueron reconocidos por el nodo correspondiente	Cumple
Flotador de cisterna	Agua disponible / no disponible	Los cambios fueron reconocidos por el nodo de control	Cumple

Fuente: Elaboración propia.

4.5.2 Resultados del enlace inalámbrico

Los resultados de las pruebas de comunicación LoRa punto a punto evidenciaron que los nodos Heltec WiFi LoRa 32 V4 lograron intercambiar satisfactoriamente información a una distancia aproximada de 100 metros en condiciones de línea de vista. En este escenario, el nodo de control de la cisterna recibió los estados transmitidos desde el tanque elevado, confirmando la funcionalidad del enlace inalámbrico bajo las condiciones evaluadas.

En contraste, la prueba realizada entre la planta baja y el tercer piso de una vivienda no presentó una comunicación satisfactoria, lo que permitió identificar una limitación del enlace en presencia de obstáculos estructurales. Estos resultados evidencian que el comportamiento de la comunicación depende de las condiciones del entorno y de la ubicación de los dispositivos. La evaluación fue de carácter funcional, ya que no se realizaron mediciones cuantitativas de intensidad de señal (RSSI), pérdida de paquetes o tasas de recepción que permitan determinar estadísticamente el desempeño del enlace.

4.5.3 Resultados de la lógica de control

Los resultados de las pruebas funcionales evidenciaron que la lógica de control implementada respondió correctamente a las condiciones evaluadas para el sistema de bombeo. Se comprobó la activación de la salida de control cuando el tanque elevado requería llenado, la cisterna disponía de agua y la comunicación LoRa era válida. Asimismo, se verificó la desactivación o el bloqueo de la bomba ante condiciones que impedían su funcionamiento seguro.

La Tabla 13 resume las cinco condiciones verificadas, todas registradas con resultado satisfactorio. Entre ellas destacan el apagado automático de la bomba ante la pérdida de comunicación LoRa y la recuperación de la recepción de información al restablecerse el enlace. Estos resultados permiten confirmar el funcionamiento de la lógica de control y de los mecanismos de protección implementados en los escenarios evaluados**.**

Tabla 13. Resultados funcionales de la lógica de control

Condición evaluada	Respuesta del sistema	Resultado
Tanque requiere llenado + cisterna con agua + comunicación válida	Activación de la salida de control	Cumple
Tanque no requiere llenado	Desactivación de la salida	Cumple
Cisterna sin condición adecuada de agua	Bloqueo de la bomba	Cumple
Pérdida de comunicación LoRa	Apagado de la salida	Cumple
Recuperación de comunicación	Actualización de estados antes de continuar la operación	Cumple

Fuente: Elaboración propia.

4.5.4 Resultados del mecanismo de seguridad

Los resultados de las pruebas funcionales confirmaron el funcionamiento de los mecanismos de protección implementados en el prototipo. Se verificó que el controlador bloqueaba la activación de la bomba cuando el flotador de la cisterna indicaba una condición insuficiente de agua, independientemente de la solicitud de llenado del tanque elevado. Este comportamiento permitió comprobar que el sistema prioriza la disponibilidad de agua como requisito para autorizar el bombeo.

Asimismo, se comprobó que la interrupción de la comunicación LoRa provocaba la desactivación automática de la bomba, evitando que el sistema continuara funcionando sin información actualizada del tanque elevado. Al restablecerse el enlace, el controlador recuperó la recepción de los estados transmitidos. En conjunto, estos resultados evidencian la aplicación de medidas de protección frente al funcionamiento en seco y la pérdida de comunicación, contribuyendo a mejorar la seguridad operativa del prototipo en las condiciones evaluadas.

4.5.5 Resultados de la interfaz de visualización

Las pruebas funcionales confirmaron el funcionamiento de las dos interfaces de supervisión implementadas en el prototipo: el Dashboard web y la pantalla táctil Waveshare ESP32-S3-Touch-LCD-4.3B de 4,3 pulgadas. Ambas permitieron visualizar los estados del tanque elevado, la cisterna y la bomba de agua, así como consultar la información de funcionamiento disponible en el sistema.

El Dashboard web presentó la información mediante un navegador con conectividad Wi-Fi, mientras que la pantalla táctil Waveshare proporcionó una alternativa de visualización local. Los resultados evidenciaron que ambas interfaces se integraron

satisfactoriamente al prototipo y facilitaron la supervisión de sus condiciones operativas, complementando el funcionamiento automático del sistema de bombeo.

4.6 Análisis de resultados

El análisis de resultados se realizó a partir de las pruebas funcionales del prototipo IoT, con el propósito de interpretar su desempeño en las condiciones evaluadas. Los resultados permitieron identificar el cumplimiento de las funciones de detección, control automático, protección y supervisión, así como reconocer las limitaciones presentadas en la comunicación inalámbrica. A partir de estos hallazgos, se examinan las condiciones que favorecieron el funcionamiento del sistema, los factores que influyeron en su desempeño y las posibilidades de mejora para su aplicación en entornos residenciales.

4.6.1 Análisis del sistema de detección

Los resultados obtenidos evidenciaron que los flotadores eléctricos fueron adecuados para identificar las condiciones de nivel de agua necesarias para el funcionamiento del prototipo. La combinación de las señales del tanque elevado y la cisterna permitió establecer decisiones de control basadas tanto en la necesidad de llenado como en la disponibilidad de agua para el bombeo. Esto constituye una ventaja funcional, ya que evita que la activación de la bomba dependa únicamente del estado del tanque elevado y permite incorporar una condición de protección asociada a la cisterna.

No obstante, el uso de flotadores eléctricos limita la información disponible a estados discretos, sin proporcionar mediciones continuas del nivel de agua. Por esta razón, el prototipo no permite determinar directamente el volumen almacenado, la altura del agua ni el porcentaje de llenado de los depósitos. Esta característica no impidió cumplir las funciones de detección y control evaluadas, pero delimita el alcance del sistema frente a soluciones que requieren conocer valores cuantitativos del nivel de agua.

4.6.2 Análisis de la comunicación LoRa

Los resultados obtenidos evidenciaron que la comunicación LoRa punto a punto fue funcional para transmitir los estados del tanque elevado hacia el nodo de control de la cisterna en condiciones favorables de propagación. La recepción satisfactoria de mensajes a una distancia aproximada de 100 metros con línea de vista demuestra la viabilidad del enlace en el escenario evaluado. Sin embargo, este resultado no permite

establecer un alcance máximo de comunicación ni garantizar un comportamiento equivalente en otras instalaciones.

La comunicación no satisfactoria entre la planta baja y el tercer piso de una vivienda puso de manifiesto la influencia que pueden tener las condiciones físicas del entorno sobre el enlace inalámbrico. La presencia de paredes, losas de hormigón y otros elementos estructurales constituye una posible causa de atenuación de la señal, aunque no fue posible determinar su influencia específica debido a la ausencia de mediciones cuantitativas de intensidad de señal (RSSI) y pérdida de paquetes. Por tanto, los resultados deben interpretarse como una evaluación funcional del enlace y no como una caracterización estadística de su desempeño.

Para abordar la limitación identificada, se consideran alternativas como la reubicación de las antenas en puntos con menos obstáculos, la evaluación de antenas de mayor ganancia, como las de 5 dBi, y la optimización de parámetros LoRa, incluyendo el factor de dispersión (SF), el ancho de banda (BW), la tasa de codificación (CR) y la potencia de transmisión, respetando los límites técnicos y normativos aplicables. También podría evaluarse una trayectoria de comunicación exterior protegida para reducir la cantidad de obstáculos entre los dispositivos. Estas alternativas requieren pruebas adicionales antes de determinar su efectividad en una instalación residencial.

4.6.3 Análisis de la lógica de control

Los resultados funcionales evidenciaron que la lógica de control implementada permitió coordinar las condiciones detectadas en el tanque elevado y la cisterna para determinar el funcionamiento de la bomba de agua. La activación dependió del cumplimiento simultáneo de la solicitud de llenado, la disponibilidad de agua en la cisterna y la validez de la comunicación LoRa. Esta combinación de condiciones constituye un aspecto fundamental del sistema, ya que evita que el bombeo dependa únicamente de la necesidad de agua en el tanque elevado y permite incorporar restricciones orientadas a una operación segura.

Por otra parte, la integración del módulo relé y el contactor eléctrico permitió vincular las decisiones del microcontrolador con el accionamiento de la bomba, manteniendo separadas las etapas de control y potencia. Los resultados obtenidos demostraron que esta configuración respondió adecuadamente a los estados evaluados, tanto para autorizar el bombeo como para impedirlo cuando no se cumplían las

condiciones establecidas. No obstante, estas pruebas permiten confirmar el comportamiento funcional de la lógica implementada, sin constituir una evaluación de la durabilidad de los componentes eléctricos ni de su desempeño durante períodos prolongados de operación.

4.6.4 Análisis del mecanismo de seguridad

Los resultados obtenidos evidenciaron que los mecanismos de seguridad implementados constituyen un componente esencial para el funcionamiento del prototipo, debido a que permiten restringir el bombeo ante condiciones que podrían comprometer su operación. La protección por falta de agua en la cisterna impidió la activación de la bomba cuando el flotador indicó una condición insuficiente, mientras que la supervisión de la comunicación LoRa permitió desactivar automáticamente el sistema de bombeo al interrumpirse el enlace inalámbrico. Ambas funciones contribuyen a reducir el riesgo de funcionamiento en seco y de operación sin información actualizada del tanque elevado.

Desde el punto de vista de la seguridad operativa, la desactivación automática ante la pérdida de comunicación representa una estrategia de estado seguro (*fail-safe*), ya que prioriza el apagado de la bomba frente a la ausencia de información válida. Asimismo, la recuperación de la recepción de datos al restablecerse el enlace demostró que el sistema podía volver a disponer de los estados transmitidos por el tanque elevado. Estos resultados respaldan la eficacia funcional de los mecanismos de protección en los escenarios evaluados, aunque no permiten garantizar la eliminación de todos los riesgos eléctricos, mecánicos o asociados al funcionamiento prolongado de la bomba.

4.6.5 Análisis de la interfaz de visualización

Los resultados obtenidos evidenciaron que la incorporación del Dashboard web y de la pantalla táctil Waveshare ESP32-S3-Touch-LCD-4.3B de 4,3 pulgadas mejoró las posibilidades de supervisión del prototipo al proporcionar dos medios de consulta de sus condiciones operativas. El Dashboard web permitió visualizar la información mediante un navegador, mientras que la pantalla táctil ofreció una alternativa de visualización local. Esta integración facilitó la identificación de los estados del tanque elevado, la cisterna y la bomba de agua, sin necesidad de inspeccionar físicamente ambos depósitos.

Desde el punto de vista funcional, las interfaces constituyen herramientas complementarias de supervisión y no elementos responsables de las decisiones de control. La activación y desactivación de la bomba continúa dependiendo de la lógica programada en el nodo de la cisterna y de las condiciones de seguridad establecidas. Por tanto, la

visualización de información aporta mayor facilidad de seguimiento al usuario, sin sustituir los mecanismos automáticos que regulan el funcionamiento del sistema de bombeo.

4.6.6 Limitaciones identificadas

El análisis de los resultados permitió identificar limitaciones relacionadas con el sistema de detección, la comunicación inalámbrica y el alcance de la evaluación experimental. En cuanto a los sensores, los flotadores eléctricos proporcionan señales discretas que permiten reconocer las condiciones necesarias para el control del bombeo, pero no ofrecen mediciones continuas de altura, volumen o porcentaje de llenado de los depósitos. Por tanto, el prototipo está orientado a la detección de estados específicos y no a la medición cuantitativa del nivel de agua.

Respecto a la comunicación LoRa, el funcionamiento satisfactorio observado a una distancia aproximada de 100 metros con línea de vista contrastó con las dificultades registradas entre la planta baja y el tercer piso de una vivienda. Esta diferencia evidencia que la ubicación de los nodos y las condiciones físicas del entorno deben considerarse antes de implementar el sistema en una instalación residencial. En consecuencia, los resultados no permiten garantizar una cobertura inalámbrica equivalente en viviendas con distintas características estructurales.

Finalmente, las pruebas realizadas se concentraron en verificar el funcionamiento del prototipo y sus mecanismos de protección, sin incluir mediciones cuantitativas de latencia, intensidad de señal (RSSI), pérdida de paquetes o consumo de agua y energía. Tampoco se evaluó su desempeño durante períodos prolongados de operación. Por ello, los resultados permiten sustentar la funcionalidad del sistema en los escenarios evaluados, pero no establecer indicadores estadísticos de comunicación, porcentajes de ahorro ni conclusiones sobre su confiabilidad a largo plazo.

4.6.7 Posibles aplicaciones del prototipo

La arquitectura del prototipo IoT desarrollado para viviendas del cantón La Troncal presenta posibilidades de adaptación a otros entornos que requieran controlar la transferencia de agua entre depósitos. La combinación de flotadores eléctricos, comunicación LoRa punto a punto y accionamiento automático de bombas constituye una alternativa tecnológica que podría aprovecharse en instalaciones con necesidades similares de almacenamiento y abastecimiento de agua.

Entre las posibles aplicaciones se encuentran los sistemas de riego agrícola, las fincas y plantaciones que utilizan reservorios, así como las instalaciones de acuicultura y camaroneras que requieren supervisar depósitos y sistemas auxiliares de bombeo. También podría considerarse su adaptación a sistemas comunitarios de abastecimiento de agua, establecimientos comerciales y pequeñas instalaciones industriales donde sea necesario controlar el llenado de tanques.

No obstante, estas aplicaciones representan posibilidades de adaptación y no implementaciones verificadas durante la investigación. Su desarrollo requeriría evaluar las distancias de comunicación, las condiciones ambientales, las características de los depósitos, la capacidad de las bombas y los requisitos de seguridad eléctrica. Por tanto, los resultados obtenidos en el entorno residencial constituyen una referencia inicial, pero no garantizan un funcionamiento equivalente en otros escenarios sin realizar las pruebas y adecuaciones correspondientes.

4.7 Cumplimiento de los objetivos específicos

El cumplimiento de los objetivos específicos se analizó mediante la relación entre las actividades desarrolladas y las evidencias obtenidas durante la investigación. Para ello, se consideraron los fundamentos teóricos, el diseño y la implementación del prototipo IoT, así como los resultados de las pruebas funcionales. Este análisis permite valorar el cumplimiento de cada objetivo planteado, reconociendo los avances alcanzados y las limitaciones identificadas durante el desarrollo y la evaluación del sistema.

4.7.1 Evaluación del cumplimiento de los objetivos

El primer objetivo específico se cumplió mediante la revisión bibliográfica y la elaboración del marco teórico desarrollado en el Capítulo II. La fundamentación de los sistemas de almacenamiento de agua, la automatización, los sistemas embebidos, los sensores discretos y la comunicación LoRa proporcionó las bases conceptuales necesarias para seleccionar las tecnologías empleadas en el prototipo.

El segundo objetivo específico se cumplió con el diseño de la arquitectura del sistema, estableciendo las funciones de los dos nodos Heltec WiFi LoRa 32 V4, la distribución de los sensores, la comunicación inalámbrica y la lógica de control. Asimismo, se definieron los elementos de accionamiento de la bomba y las condiciones de seguridad consideradas durante la implementación.

El tercer objetivo específico se cumplió mediante la construcción e integración del prototipo, incorporando los flotadores eléctricos, la comunicación LoRa punto a punto, el módulo relé, el contactor y las interfaces de visualización. Como resultado, se obtuvo un sistema funcional que permitió integrar las etapas de detección, comunicación, control y supervisión.

El cuarto objetivo específico se cumplió mediante la ejecución de pruebas funcionales que permitieron verificar el comportamiento del sistema e identificar sus limitaciones. Se comprobó el funcionamiento de los mecanismos de control y seguridad, así como la comunicación satisfactoria a una distancia aproximada de 100 metros con línea de vista. También se identificaron dificultades de comunicación entre la planta baja y el tercer piso de una vivienda, lo que permitió reconocer condiciones que requieren mejoras para futuras instalaciones.

Matriz de cumplimiento de objetivos específicos

Tabla 14. Matriz de cumplimiento de los objetivos específicos

Objetivo específico	Actividad desarrollada	Evidencia o resultado	Cumplimiento
1. Fundamentar los principios relacionados con sistemas de almacenamiento de agua, automatización, sistemas embebidos, ESP32, LoRa, sensores discretos y accionamiento de bombas.	Revisión bibliográfica y elaboración del marco teórico.	Fundamentación teórica presentada en el Capítulo II y utilizada para sustentar la selección tecnológica.	Cumple
2. Diseñar la arquitectura del prototipo considerando nodos, sensores, actuadores, lógica de control, comunicación y seguridad.	Diseño de la arquitectura, definición de funciones de los nodos y elaboración de la lógica de funcionamiento.	Arquitectura del sistema, diagramas, matriz de requerimientos y lógica de control.	Cumple
3. Implementar un prototipo funcional para el monitoreo y control inalámbrico.	Construcción de los nodos, integración de sensores, comunicación LoRa, interfaz y etapa de control de la bomba.	Prototipo integrado y evidencias fotográficas de sus componentes y funcionamiento.	Cumple

Objetivo específico	Actividad desarrollada	Evidencia o resultado	Cumplimiento
4. Evaluar el funcionamiento y desempeño del prototipo.	Ejecución de pruebas funcionales de los flotadores, lógica de control, comunicación LoRa, mecanismos de seguridad e interfaces de visualización.	Matrices de pruebas funcionales, comunicación satisfactoria a 100 metros con línea de vista, identificación de limitaciones de comunicación entre pisos y verificación del apagado automático de la bomba ante pérdida del enlace.	Cumple

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

La fundamentación teórica permitió establecer las bases tecnológicas necesarias para el desarrollo del prototipo IoT, mediante el estudio de los sistemas embebidos, los sensores discretos de nivel, la comunicación inalámbrica LoRa y los mecanismos de accionamiento de bombas. Estos conocimientos facilitaron la selección de componentes y la definición de una solución orientada al monitoreo y control automático del abastecimiento de agua en viviendas.

El diseño e implementación de una arquitectura distribuida mediante dos placas Heltec WiFi LoRa 32 V4 permitió integrar las funciones de detección, comunicación y control entre la cisterna y el tanque elevado. La utilización de comunicación LoRa punto a punto hizo posible el intercambio inalámbrico de información sin requerir cableado de señal entre ambos depósitos, demostrando su viabilidad funcional en las condiciones favorables evaluadas.

Las pruebas funcionales confirmaron que la integración de dos flotadores eléctricos, un módulo relé y un contactor permitió controlar el accionamiento de la bomba de acuerdo con las condiciones detectadas en ambos depósitos. Asimismo, se comprobó que el sistema bloqueaba el bombeo ante una condición insuficiente de agua en la cisterna y desactivaba automáticamente la bomba cuando se interrumpía la comunicación LoRa, evidenciando el funcionamiento de los mecanismos de protección implementados.

La incorporación del Dashboard web y de la pantalla táctil Waveshare ESP32-S3-Touch-LCD-4.3B de 4,3 pulgadas permitió disponer de dos alternativas para supervisar los estados del tanque elevado, la cisterna y la bomba de agua. Estas interfaces facilitaron la consulta de las condiciones operativas del prototipo y complementaron el funcionamiento del control automático, sin sustituir las decisiones ejecutadas por el nodo de la cisterna.

La evaluación experimental permitió comprobar el funcionamiento del prototipo en los escenarios considerados, obteniéndose una comunicación LoRa satisfactoria a una distancia aproximada de 100 metros con línea de vista. Sin embargo, se identificaron dificultades de comunicación entre la planta baja y el tercer piso de una vivienda, lo que evidencia la necesidad de considerar los obstáculos y la ubicación de los dispositivos en futuras instalaciones. En consecuencia, el prototipo constituye una alternativa funcional para el control inalámbrico del abastecimiento de agua, aunque su aplicación en diferentes entornos residenciales requiere evaluar previamente las condiciones de comunicación.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar pruebas adicionales de comunicación LoRa en viviendas de varios niveles, considerando la reubicación de los nodos o sus antenas en puntos estratégicos, como zonas cercanas a ventanas o espacios exteriores protegidos. En instalaciones donde la cisterna se encuentre en la planta baja y el tanque elevado en la azotea, se propone evaluar una trayectoria de comunicación exterior que reduzca la cantidad de paredes y losas de hormigón atravesadas por la señal. Asimismo, se recomienda analizar el uso de antenas de mayor ganancia y la optimización de los parámetros LoRa. Si estas alternativas no proporcionan resultados satisfactorios, podría estudiarse la incorporación de un nodo repetidor como ampliación futura del sistema. Estas propuestas requieren pruebas adicionales para determinar su efectividad mediante mediciones de intensidad de señal (RSSI), pérdida de paquetes y tiempo de respuesta.

Se recomienda establecer un programa de mantenimiento preventivo de los flotadores eléctricos, verificando su limpieza, estado físico y correcta detección de las condiciones de agua. Asimismo, es conveniente inspeccionar periódicamente el módulo relé, el contactor y las conexiones eléctricas, con la finalidad de identificar posibles deterioros que puedan afectar el funcionamiento del sistema de bombeo. Las intervenciones sobre los circuitos de potencia deberán realizarse con la alimentación desconectada y por personal técnicamente capacitado.

Se recomienda verificar periódicamente las condiciones de los gabinetes de protección utilizados para alojar los componentes electrónicos, prestando especial atención al sellado de las entradas de cables, la presencia de humedad y la acumulación de polvo. También es conveniente revisar las conexiones de alimentación y las antenas para reducir el riesgo de fallas ocasionadas por factores ambientales o conexiones deficientes.

Finalmente, se recomienda evaluar, como mejora futura, la incorporación de un sistema de alimentación autónoma mediante paneles solares y baterías recargables para el nodo ubicado en el tanque elevado. Esta alternativa fue considerada durante el desarrollo del proyecto; sin embargo, no se implementó debido a las limitaciones del presupuesto disponible, por lo que el prototipo utilizó alimentación eléctrica convencional. Su incorporación podría facilitar la instalación del nodo en lugares donde no exista una fuente de energía cercana y reducir la dependencia de una conexión eléctrica permanente. Para determinar su viabilidad, sería necesario realizar un estudio del

consumo energético del dispositivo, la capacidad de almacenamiento de las baterías y las condiciones de radiación solar del lugar.

.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] J. L. Huayanay Villar, J. Oré García, and S. Y. Meneses Hiyo, "Diseño y construcción de un sistema automatizado de control de bombas de agua en un cultivo hidropónico en el entorno Arduino, UNSCH – Ayacucho," *Revista ECIPerú*, vol. 17, no. 2, pp. 67–73, Jun. 2020.

[2] R. C. Ulloa-de Souza, L. J. Reyna-Tenorio, and B. F. Chere-Quiñónez, "Sensor de nivel de líquidos para aplicaciones especiales como maquinaria agrícola o barcos," *Sapienza: International Journal of Interdisciplinary Studies*, vol. 3, no. 7, pp. 139–148, Oct. 2022, doi: 10.51798/sijis.v3i7.521.

[3] S. Devalal and A. Karthikeyan, "LoRa Technology - An Overview," in *2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, IEEE, Mar. 2018, pp. 284–290. doi: 10.1109/ICECA.2018.8474715.

[4] SEMTECH, "SEMTECH," SX1276IMLTRT Datasheet (PDF) - Semtech Corporation.

[5] Espressif Systems, "ESP32-WROOM-32E & ESP32-WROOM-32UE Datasheet," Espressif Systems.

[6] M. Ranjith, P. S. Kumar, M. P. S. Krishna, R. Vijay, and C. Lakshmi, "Wireless Liquid level indicator Using LORA and ESP32," *Tuijin Jishu/Journal of Propulsion Technology*, vol. 45, no. 1, Jan. 2024.

[7] E. Syrmos *et al.*, "An Intelligent Modular Water Monitoring IoT System for Real-Time Quantitative and Qualitative Measurements," *Sustainability*, vol. 15, no. 3, p. 2127, Jan. 2023, doi: 10.3390/su15032127.

[8] A. D. B. Jáquez, M. T. A. Herrera, A. E. M. Celestino, E. N. Ramírez, and D. A. M. Cruz, "Extension of LoRa Coverage and Integration of an Unsupervised Anomaly Detection Algorithm in an IoT Water Quality Monitoring System," *Water (Basel).*, vol. 15, no. 7, p. 1351, Apr. 2023, doi: 10.3390/w15071351.

[9] M. Lloys, J. L. Guixà, C. Dragoste, J. Cots, T. Escobet, and S. Grau, "Development of an Integrated System for Efficient Water Resource Management Using ESP32, MicroPython and the IoT," in *The 3rd International Joint Conference on Water Distribution Systems Analysis & Computing and Control for the Water Industry (WDSA/CCWI 2024)*, Basel Switzerland: MDPI, Sep. 2024, p. 170. doi: 10.3390/engproc2024069170.

[10] R. A. Fauzi and K. Irianto, “Sistem Pemantau Pencemaran Air Sungai Berbasis IoT dan Komunikasi Lora,” *Journal of Information System Research (JOSH)*, vol. 7, no. 1, pp. 160–167, Oct. 2025, doi: 10.47065/josh.v7i1.8520.

[11] P. Gokhale, O. Bhat, and S. Bhat, “Introduction to IoT,” *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 41–44, Jan. 2018.

[12] M. Babiuch, P. Foltynek, and P. Smutny, “Using the ESP32 Microcontroller for Data Processing,” in *2019 20th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, IEEE, May 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/CarpathianCC.2019.8765944.

[13] ARCOTEL, “Plan Nacional de Frecuencias del Ecuador 2021,” Quito, Ecuador, 2021.

[14] Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL), “Norma Técnica de Espectro de Uso Libre y de Espectro para Uso Determinado en Bandas Libres,” Quito, Ecuador, 2018.

[15] Asamblea Nacional del Ecuador, “Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua,” Quito, Ecuador, Aug. 2014.

[16] Asamblea Nacional del Ecuador, “Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica,” Quito, Ecuador, Jan. 2015.

ANEXOS

Universidad Católica de Cuenca	AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	CÓDIGO: F – DB – 30 VERSION: 01 FECHA: 2021-04-15 Página 1 de 1

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Juan José Guzmán Moposita portador(a) de la cédula de ciudadanía N.º **0302520531.** En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del proyecto de titulación **"DESARROLLO DE UN PROTOTIPO LOT BASADO EN ESP32 LORA PARA EL MONITOREO Y CONTROL INALÁMBRICO DEL NIVEL DE AGUA ENTRE CISTERNA Y TANQUE ELEVADO EN VIVIENDAS DEL CANTÓN LA TRONCAL"** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos y no comerciales. Autorizo además a la Universidad Católica de Cuenca, para que realice la publicación de éste proyecto de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

La Troncal, **12 de noviembre de 2026**

F: .....

Juan José Guzmán Moposita

C.I. 0302520531