



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN COMPUTACIÓN AVANZADA Y ELECTRÓNICA

TESIS

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE NIVEL DE
AGUA PARA DETECTORES CHERENKOV DEL OBSERVATORIO
SWG0**

**Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias en Computación Avanzada y Electrónica**

PRESENTA

Ing. Alejandro Monroy Avelino

Director

Dr. Pedro Amado Miranda Romagnoli

Comité tutorial

Dr. Virgilio López Morales

Dr. Juan Carlos González Islas

Dr. Pedro Amado Miranda Romagnoli

Mineral de la Reforma, Hgo., México, Agosto 2026



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

School of Engineering and Basic Sciences

Área Académica de Computación y Electrónica

Mineral de la Reforma, a 27 de agosto del 2026

Número de control: ICBI-AACyE/1153/2026

Asunto: Autorización de impresión de tesis.

DRA. OJUKY DEL ROCIO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAHEH

El comité Tutorial de TESIS del alumno **Alejandro Monroy Avelino**, con No. de cuenta: 276330, adscrito al Programa de Posgrado de la Maestría en Ciencias en Computación Avanzada y Electrónica, informa que después de leer y revisar el documento de tesis titulado **"DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE NIVEL DE AGUA PARA DETECTORES CHERENKOV DEL OBSERVATORIO SWGO"** y con base a lo estipulado en el Artículo 110 del reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

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

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Dr. Pedro Amado Miranda Romagnoli
Director de Tesis



Comité tutorial

Dr. Virgilio López Morales

Presidente

UAHEH

Dr. Juan Carlos González Islas

Secretario

UAHEH

Dr. Pedro Amado Miranda Romagnoli

Vocal

UAHEH

KAA/APL

"Amor, Orden y Progreso"



Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo
Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,
México. C.P 42184
Teléfono: 52 (771) 71 720 00 Ext. 40052, 40053
aacye_icbi@uaeh.edu.mx

uaeh.edu.mx

*A mis padres,
por apoyarme siempre.*

"To measure is to know."

— William Thomson, Lord Kelvin

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres y a mi familia, por su apoyo incondicional, paciencia y confianza a lo largo de este camino. Su acompañamiento y motivación fueron fundamentales para superar los retos que implicó este proceso y para alcanzar esta meta. Este logro también es fruto de su esfuerzo y dedicación.

Agradezco especialmente a mi asesor de tesis, el Dr. Pedro Amado Miranda Romagnoli, por su guía, apoyo y confianza durante el desarrollo de este trabajo. Sus conocimientos, comentarios y orientación fueron esenciales para la realización de este proyecto y contribuyeron significativamente a mi formación académica y profesional.

De igual manera, agradezco a los integrantes de mi comité tutorial, el Dr. Virgilio López Morales y el Dr. Juan Carlos González Islas, por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo, así como por sus observaciones y sugerencias, las cuales permitieron mejorar la calidad de esta tesis.

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, al Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería y a la Maestría en Ciencias en Computación Avanzada y Electrónica, por permitirme formar parte de esta comunidad académica. Agradezco profundamente a los profesores del programa por su dedicación, enseñanza y por contribuir con sus conocimientos al desarrollo de mi formación profesional y científica.

Agradezco a la colaboración del High Altitude Water Cherenkov Observatory y del Southern Wide-field Gamma-ray Observatory por brindar el contexto científico y tecnológico que motivó el desarrollo de este proyecto. La oportunidad de contribuir, desde la instrumentación electrónica, a los esfuerzos de investigación en el campo de la astrofísica de altas energías representa una experiencia invaluable

para mi formación.

Finalmente, agradezco a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo otorgado durante mis estudios de posgrado, el cual permitió mi dedicación a este proyecto y la culminación de mi formación como maestro en ciencias.

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo y validación de un sistema para el monitoreo de nivel de agua basado en sensores de presión MPX4250AP, microcontroladores ESP32 y comunicación CAN BUS, concebido en el contexto de los requerimientos de instrumentación del Southern Wide-field Gamma-ray Observatory (SWGGO, por sus siglas en inglés) [1], un observatorio de rayos gamma de próxima generación ubicado en el parque astronómico de Atacama, Chile [2]. El sistema propuesto permite la adquisición, transmisión y almacenamiento de datos provenientes de múltiples nodos de monitoreo mediante una arquitectura modular y escalable.

Como parte del desarrollo se diseñó e implementó una tarjeta electrónica de adquisición de datos, así como el firmware necesario para el procesamiento y transmisión de la información. Adicionalmente, se implementaron herramientas para la visualización y almacenamiento de los datos obtenidos durante las pruebas experimentales. El desempeño del sistema fue evaluado mediante pruebas de laboratorio y en condiciones reales de operación, considerando factores como la precisión de la medición, la estabilidad de la comunicación y la influencia de las variaciones de presión atmosférica.

Los resultados obtenidos muestran que la solución desarrollada es capaz de medir el nivel de agua con la precisión requerida para aplicaciones de monitoreo en detectores Cherenkov.

Abstract

This work presents the development and validation of a distributed water level monitoring system based on MPX4250AP pressure sensors, ESP32 microcontrollers, and CAN BUS communication, conceived within the context of the instrumentation requirements of the Southern Wide-field Gamma-ray Observatory (SWGGO) [1], a next-generation gamma-ray observatory to be located at the Atacama Astronomical Park in Chile [2]. The proposed system enables the acquisition, transmission, and storage of data from multiple monitoring nodes through a modular and scalable architecture.

As part of the development, a custom data acquisition board was designed and implemented, together with the firmware required for data processing and data transmission. Additionally, software tools were developed for the visualization and storage of the data collected during the experimental tests. The system performance was evaluated through both laboratory experiments and real operating conditions, considering factors such as measurement accuracy, communication stability, and the influence of atmospheric pressure variations.

The obtained results demonstrate that the proposed solution is capable of measuring water level with the accuracy required for monitoring applications in Cherenkov detectors.

Declaración sobre el uso de inteligencia artificial

Durante la elaboración de este manuscrito se utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa, específicamente ChatGPT (OpenAI), como apoyo para la corrección gramatical, la mejora de la redacción, la organización del contenido y la revisión de la coherencia del texto. Asimismo, se emplearon herramientas de inteligencia artificial para la generación de algunas ilustraciones conceptuales utilizadas con fines explicativos.

La concepción de las ideas, el diseño del sistema propuesto, el desarrollo experimental, el análisis de los resultados, las interpretaciones científicas y las conclusiones presentadas en este trabajo corresponden exclusivamente al autor. El autor asume la responsabilidad total sobre el contenido, la exactitud y la integridad de la información presentada en esta tesis.

Índice general

Agradecimientos	III
Resumen	V
Abstract	VI
Declaración sobre el uso de inteligencia artificial	VII
1. Introducción	2
1.1. Planteamiento del problema	3
1.2. Justificación	3
1.3. Criterios de diseño del sistema	4
1.4. Hipótesis	5
1.5. Objetivo general	5
1.6. Objetivos específicos	6
1.7. Organización del documento	6
2. Estado del arte	9
2.1. Observatorio de rayos gamma HAWC	9
2.2. Observatorio de rayos gamma SWGO	10
2.2.1. SWGO-A	10
2.3. Sistemas de monitoreo en observatorios Cherenkov	11
2.4. Sistemas de monitoreo de nivel de agua basados en sensores de bajo costo e IoT	14
2.5. Arquitecturas de adquisición distribuidas para monitoreo científico .	16
2.6. Comparación	17

3. Marco Teórico	18
3.1. Detección de rayos gamma mediante tanques Cherenkov	18
3.1.1. Principio de detección de radiación Cherenkov en agua: . . .	19
3.1.2. Diseño y simulación de tanques de detección de luz Cherenkov	19
3.1.3. Relación entre el nivel de agua y la eficiencia de detección .	20
3.2. Método de medición del nivel de agua	21
3.2.1. Elección del sensor	21
3.2.2. Relación entre nivel de agua y presión hidrostática	23
3.2.3. Sensor MPX4250AP	24
3.2.4. Obtención del nivel de agua a partir del voltaje de salida del sensor	25
3.3. Compensación de offset entre sensores	28
3.4. El protocolo CAN y la topología de bus	28
3.4.1. Controlador CAN MCP2515	30
3.4.2. Transceptor CAN TJA1050	31
3.5. El microcontrolador	32
3.6. Análisis económico	33
4. Desarrollo de sistema de monitoreo de nivel de agua.	35
4.1. SWGO-A	36
4.2. Topología de la red	36
4.3. Pathfinder	37
4.4. Hardware	38
4.4.1. Arquitectura del sistema	38
4.4.2. Diseño de la tarjeta de adquisición de datos	39
4.4.3. Firmware del nodo transmisor	46
4.4.4. Firmware del nodo receptor	47
4.4.5. Interfaz gráfica y sistema de almacenamiento de datos	49
4.5. Calibración	50
4.5.1. Calibración de los sensores	50
4.5.2. Calibración del ADC del ESP32	52
4.6. Medición del offset entre sensores	54
4.7. Prueba en laboratorio	54

4.8. Prueba de campo	55
5. Resultados	58
5.1. Calibración	58
5.1.1. Calibración de los sensores	58
5.1.2. Calibración del ADC del ESP32	62
5.2. Medición de offset entre sensores	63
5.3. Prueba en laboratorio	65
5.4. Medición de consumo energético del sistema	67
5.4.1. Nodo receptor	68
5.4.2. Nodo transmisor	69
5.4.3. Sistema completo	69
5.5. Verificación de la comunicación CAN mediante osciloscopio	71
5.6. Prueba de campo	73
6. Conclusiones y trabajo futuro	77
6.1. Trabajo futuro	78
A. Cotización	86
B. Firmware	87
B.1. Nodo transmisor	87
B.2. Nodo receptor	89

Índice de figuras

2.1. Detectores Cherenkov de agua del observatorio HAWC. La experiencia operativa obtenida con este tipo de detectores motivó el desarrollo de sistemas para el monitoreo continuo del nivel de agua. Fotografía tomada por el autor.	9
2.2. Imagen conceptual del arreglo SWGO-A. Fuente: Elaboración propia con asistencia de inteligencia artificial, basada en el arreglo descrito en [4].	11
3.1. Efecto Cherenkov.	18
3.2. Diagrama de flujo del árbol de decisión para elegir el sensor más adecuado. Fuente: Elaboración propia con base en [29].	22
3.3. Presión hidrostática en un tanque. Fuente: Elaboración propia con asistencia de inteligencia artificial.	23
3.4. Sensor MPX4250AP. Foto tomada por el autor.	24
3.5. Circuito de desacoplamiento sugerido por el fabricante. (IPS: Inline Pressure Sensor). Fuente: Elaboración propia con base en [30]. . . .	24
3.6. Función de transferencia del sensor MPX4250AP. Fuente: Elaboración propia con base en [30].	25
3.7. Comparación de la transmisión CAN: señal ideal vs. señal con ruido afectando a ambas líneas por igual.	30
3.8. MCP2515 fabricado por Microchip [34].	31
3.9. Transceptor CAN [35].	32
4.1. Metodología general empleada para el desarrollo del sistema de monitoreo de nivel de agua.	35

4.2. Interfaz de monitoreo de niveles de agua para SWGO-A. Verde: nivel ok (mayor a 3.5m), Rojo: nivel bajo (Mayor a 0 y menor a 3.5), Gris: sensor desconectado. Fuente: Elaboración propia.	36
4.3. Topología para la red de sensores. Fuente: Elaboración propia. . . .	37
4.4. Imagen conceptual del Pathfinder. Fuente: Elaboración propia con asistencia de inteligencia artificial con base en [36].	38
4.5. Diagrama de Pathfinder. Fuente: elaboración propia con base en [36].	39
4.6. Instalación del sensor en el tanque. Fuente: Elaboración propia. . .	40
4.7. Arquitectura del nodo. Fuente: elaboración propia.	44
4.8. Secciones de la PCB.	44
4.9. Diagrama electrónico del nodo. Fuente: Elaboración propia.	45
4.10. Diagrama de flujo para la adquisición y envío de datos implementado en el nodo transmisor.	47
4.11. Diagrama de flujo del firmware implementado en el nodo receptor. .	48
4.12. Captura de pantalla de la interfaz gráfica.	50
4.13. Montaje para calibración de los sensores.	51
4.14. Montaje experimental para la calibración del ADC del ESP32 con un multímetro de precisión.	52
4.15. Diagrama de conexiones entre el potenciómetro, el ESP32 y el multímetro de referencia. Fuente: elaboración propia.	53
4.16. Montaje experimental en laboratorio para probar el monitoreo de nivel de agua.	56
4.17. Montaje experimental para la prueba en un entorno real.	56
4.18. Red de monitoreo instalada en una cisterna doméstica.	57
5.1. Datos experimentales del sensor 1.	58
5.2. Datos experimentales del sensor 2.	59
5.3. Sensibilidad del sensor 1.	59
5.4. Sensibilidad del sensor 2.	60
5.5. Calibración del sensor 1.	61
5.6. Calibración del sensor 2.	61
5.7. ADC a 12 bits del ESP32.	62
5.8. Ajuste lineal en el rango de 0.5 a 2.3 volts.	63

5.9. Medición de la variación en el voltaje de salida de los sensores debido a cambios en la presión atmosférica.	64
5.10. Estabilidad en el voltaje de alimentación.	65
5.11. Voltajes de los sensores en condiciones controladas.	66
5.12. Medición del nivel de agua con deriva.	67
5.13. Señales con offset corregido.	67
5.14. Medición de la corriente de alimentación del nodo receptor a la entrada del convertidor Buck.	68
5.15. Medición de la corriente de alimentación del nodo transmisor sin sensores conectados, realizada a la entrada del convertidor Buck. . .	69
5.16. Medición de la corriente de alimentación del sistema completo, conformado por el nodo transmisor, el nodo receptor y cuatro sensores MPX4250AP comunicados mediante CAN BUS.	70
5.17. Puntos de prueba implementados en la PCB para la observación de las señales CAN-H y CAN-L mediante osciloscopio.	71
5.18. Captura de las señales diferenciales CAN-H y CAN-L durante la transmisión de una trama CAN a una velocidad de 100 kbps.	72
5.19. Voltaje de alimentación durante la prueba de campo.	73
5.20. Nivel de agua medido del 15 al 28 de mayo de 2026.	74
5.21. Voltajes de salida del sensor de nivel y del sensor de referencia atmosférica.	75
5.22. Nivel de agua calculado sin aplicar corrección por presión atmosférica. .	75

Índice de cuadros

2.1. Sistemas de monitoreo de nivel de agua basados en IoT recopilados en [12].	15
2.2. Comparación de estrategias de monitoreo de nivel de agua reportadas en observatorios Cherenkov y sistemas distribuidos de monitoreo.	17
3.1. Comparación económica para un clúster de 55 tanques.	34
4.1. Asignación de conductores del cable para comunicación CAN y alimentación del nodo de campo.	43
5.1. Variación de voltaje observada en los sensores durante el periodo de medición.	64

Capítulo 1

Introducción

Los detectores Cherenkov de agua (Water Cherenkov Detectors, o WCD, por sus siglas en inglés) utilizan grandes volúmenes de agua como medio activo para la detección de partículas secundarias producidas por rayos gamma y rayos cósmicos. Debido a que el nivel de agua forma parte de las condiciones de operación para las cuales estos detectores son diseñados y calibrados, resulta necesario supervisarlos de manera continua para identificar pérdidas ocasionadas por evaporación o fugas que puedan modificar las condiciones previstas de funcionamiento.

La importancia de este monitoreo ha quedado de manifiesto durante la operación del High Altitude Water Cherenkov (HAWC, por sus siglas en inglés) gamma ray observatory [3], donde la experiencia acumulada ha evidenciado la necesidad de contar con un sistema que permita conocer de forma continua el estado físico del medio de detección y detectar oportunamente variaciones en el nivel de agua de los tanques. Esta necesidad adquiere especial relevancia en el contexto del observatorio SWGO, que contempla la instalación de cientos de detectores distribuidos sobre una amplia extensión geográfica.

En este contexto, la presente tesis propone el desarrollo de un sistema distribuido para el monitoreo del nivel de agua basado en sensores de presión absoluta MPX4250AP, microcontroladores ESP32 y comunicación CAN BUS. La arquitectura propuesta permite la adquisición y transmisión remota de información mediante nodos modulares e independientes, facilitando su integración en arreglos de detectores de gran escala. La información generada por el sistema puede ser visualizada en tiempo real o almacenada para su posterior análisis, permitiendo dar

seguimiento continuo al estado de los detectores.

Si bien existen soluciones comerciales para la medición de nivel de líquidos, muchas de ellas no satisfacen simultáneamente los requisitos de costo, modularidad, facilidad de despliegue y adaptabilidad que demandan los experimentos científicos de gran escala instalados en entornos remotos y de gran altitud.

El trabajo presentado abarca el diseño electrónico del sistema, el desarrollo del firmware de adquisición y comunicación, la construcción de prototipos funcionales y la evaluación experimental de su desempeño. Se incluyen pruebas realizadas en laboratorio y en condiciones reales de operación, con el objetivo de determinar la capacidad del sistema para medir el nivel de agua con la precisión requerida para aplicaciones de monitoreo en detectores Cherenkov.

1.1. Planteamiento del problema

Actualmente, el observatorio SWGO se encuentra en fase de diseño y pruebas preliminares, y no contempla aún la implementación de un sistema dedicado para el monitoreo de niveles de agua en sus detectores Cherenkov.

Debido a que los observatorios de este tipo están conformados por un gran número de detectores distribuidos sobre extensas áreas geográficas, la supervisión manual y continua del nivel de agua en cada tanque resulta poco práctica y demanda recursos humanos considerables.

1.2. Justificación

El monitoreo de los niveles de agua es especialmente relevante durante las fases de construcción, instalación y puesta en marcha del observatorio, ya que en estas etapas existe una mayor probabilidad de fallas estructurales, defectos de fabricación o problemas asociados al ensamblaje de los tanques que pueden derivar en fugas. La detección oportuna de estos eventos resulta fundamental para evitar desperdicios de agua, pérdidas económicas y posibles retrasos en las actividades de despliegue y operación del experimento.

La experiencia operativa adquirida en el observatorio HAWC puso de manifiesto la importancia de contar con sistemas de supervisión que permitan conocer perió-

dicamente el estado de los detectores. En particular, la identificación temprana de anomalías relacionadas con la pérdida de agua constituye un aspecto relevante para preservar las condiciones de operación de los tanques y facilitar las labores de mantenimiento preventivo y correctivo.

El sistema de monitoreo implementado en HAWC se basa en sensores de presión analógicos sumergidos, cuyos datos son recolectados mediante una arquitectura centralizada. Si bien este enfoque ha demostrado ser funcional para las necesidades del observatorio, presenta limitaciones de escalabilidad al considerar la infraestructura propuesta para el SWGO, la cual contempla la instalación de miles de detectores distribuidos sobre una extensa área geográfica. En este escenario, la utilización de una arquitectura centralizada implicaría un incremento considerable en la cantidad de cableado requerido, así como una mayor complejidad de instalación, operación y mantenimiento.

Adicionalmente, el uso de largas líneas de transmisión para señales analógicas puede incrementar la susceptibilidad del sistema a interferencias electromagnéticas, degradación de la señal y dificultades asociadas a la distribución física de la infraestructura. Estas consideraciones motivan la búsqueda de soluciones basadas en arquitecturas distribuidas, capaces de procesar localmente la información de los sensores y transmitir los datos mediante protocolos de comunicación robustos y adecuados para grandes redes de dispositivos.

Por estas razones, resulta justificado el desarrollo de un sistema distribuido para el monitoreo de niveles de agua orientado a las necesidades de SWGO. La propuesta presentada en este trabajo busca reducir la cantidad de cableado requerido, mejorar la escalabilidad de la red de monitoreo y facilitar la integración de los sensores con sistemas modernos de adquisición de datos. Asimismo, la digitalización local de las mediciones y su transmisión mediante una red de comunicación distribuida contribuyen a disminuir la susceptibilidad al ruido eléctrico y favorecen una gestión más eficiente de la información generada por los detectores.

1.3. Criterios de diseño del sistema

El diseño de los detectores Cherenkov de HAWC considera una altura nominal de agua cercana a 4.5 m. Sin embargo, en la operación práctica, se considera con-

veniente realizar acciones de mantenimiento o rellenado cuando el nivel desciende aproximadamente por debajo de 4.2 m. Esto implica que el sistema de monitoreo debe ser capaz de detectar de manera confiable variaciones del orden de 30 cm en la altura de la columna de agua.

Con el fin de asegurar la detección de estas variaciones y minimizar la posibilidad de falsas alarmas o decisiones incorrectas de mantenimiento, se estableció como criterio de diseño una incertidumbre máxima de ± 5 cm. Este valor representa aproximadamente una sexta parte de la variación de interés (30 cm), proporcionando un margen suficiente para distinguir cambios reales en el nivel de agua respecto a las fluctuaciones asociadas al sistema de medición.

De manera complementaria, se fijó una resolución mínima de 10 cm, ya que esta permite identificar cambios progresivos en el nivel de agua con una estimación adecuada para las necesidades operativas del observatorio, sin requerir una precisión excesiva que incrementaría innecesariamente la complejidad y el costo del sistema.

1.4. Hipótesis

Una tarjeta de adquisición basada en el microcontrolador ESP32, sensores de presión MPX4250AP y comunicación CAN BUS permite estimar el nivel de agua en detectores Cherenkov con una incertidumbre no mayor a ± 5 cm, permitiendo detectar oportunamente disminuciones de nivel asociadas a fugas o pérdidas de agua que puedan afectar las condiciones normales de operación de los detectores.

1.5. Objetivo general

Diseñar, implementar y evaluar un sistema distribuido de monitoreo de nivel de agua basado en sensores de presión MPX4250AP, microcontroladores ESP32 y comunicación CAN BUS, capaz de medir el nivel de agua en detectores Cherenkov con la resolución e incertidumbre requeridas para aplicaciones de monitoreo en observatorios astrofísicos de gran escala.

1.6. Objetivos específicos

- Diseñar una arquitectura de comunicación basada en CAN BUS para la integración de múltiples nodos de monitoreo de nivel de agua en detectores Cherenkov.
- Diseñar e implementar una tarjeta de adquisición de datos basada en el microcontrolador ESP32 y sensores de presión MPX4250AP para la medición del nivel de agua y la transmisión de información mediante CAN BUS.
- Calibrar y caracterizar experimentalmente los sensores de presión empleados para la estimación del nivel de agua.
- Evaluar experimentalmente el desempeño del sistema desarrollado en términos de precisión, estabilidad y capacidad de comunicación para aplicaciones de monitoreo en detectores Cherenkov.

1.7. Organización del documento

La presente tesis está organizada en seis capítulos que abarcan desde los fundamentos teóricos y antecedentes del problema hasta el desarrollo experimental, los resultados obtenidos y las proyecciones futuras del trabajo realizado. A continuación, se describe brevemente el contenido de cada capítulo:

- Capítulo 1. Introducción: Se plantea el problema de investigación, la motivación detrás del desarrollo del proyecto, los objetivos generales y específicos, así como el alcance y las limitaciones del estudio.
- Capítulo 2. Estado del arte: Se presenta una síntesis de trabajos previos relacionados con la medición de nivel de agua en aplicaciones científicas, el uso de sensores en contextos experimentales, y estudios que vinculan el nivel del agua con la eficiencia de detección en detectores Cherenkov.
- Capítulo 3. Marco teórico: Se describen los fundamentos conceptuales necesarios para el desarrollo del trabajo, incluyendo la detección de rayos gamma y el principio de funcionamiento de los detectores Cherenkov basados en agua,

el protocolo de comunicación CAN BUS y su correspondiente topología, los métodos de medición de nivel de agua mediante sensores y la descripción de los componentes electrónicos utilizados.

- Capítulo 4. Desarrollo: Se describe la arquitectura del sistema propuesto, incluyendo el diseño electrónico, la integración de sensores y módulos de comunicación, y el desarrollo del software de adquisición y procesamiento de datos así como las pruebas en laboratorio y en campo del prototipo descrito.
- Capítulo 5. Resultados: Se presentan los datos recopilados durante las pruebas, así como los resultados del proceso de calibración y las observaciones obtenidas durante la implementación experimental.
- Capítulo 6. Conclusiones y trabajo futuro: Se resumen los principales hallazgos del trabajo, se evalúa el grado de cumplimiento de los objetivos y se establecen las conclusiones generales del estudio. Se proponen posibles líneas de desarrollo para mejorar el sistema, ampliar su aplicación o profundizar en su análisis dentro de otros contextos experimentales.

Finalmente, se incluye una sección con las referencias bibliográficas utilizadas a lo largo del trabajo, organizadas conforme a los criterios establecidos para la elaboración de documentos académicos.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1. Observatorio de rayos gamma HAWC

El observatorio HAWC (Figura 2.1) es un observatorio de rayos gamma de muy alta energía ubicado en las laderas del volcán Sierra Negra, en el estado de Puebla, México, a una altitud aproximada de 4,100 m s.n.m.



Figura 2.1: Detectores Cherenkov de agua del observatorio HAWC. La experiencia operativa obtenida con este tipo de detectores motivó el desarrollo de sistemas para el monitoreo continuo del nivel de agua. Fotografía tomada por el autor.

Su propósito es detectar y estudiar rayos gamma y rayos cósmicos mediante la observación de las cascadas de partículas secundarias producidas cuando estas interactúan con la atmósfera terrestre. HAWC está compuesto por 300 detectores

Cherenkov de agua distribuidos sobre un área cercana a 22,000 m², cada uno equipado con tubos fotomultiplicadores encargados de registrar la radiación Cherenkov generada por las partículas cargadas que atraviesan el agua. Gracias a su amplio campo de visión y a su operación continua, HAWC ha contribuido significativamente al estudio de fuentes astrofísicas de alta energía, fenómenos transitorios y la física de rayos cósmicos.

2.2. Observatorio de rayos gamma SWGO

SWGO es un observatorio de rayos gamma de muy alta energía actualmente en desarrollo, se planea que su instalación sea en el Parque Astronómico del Desierto de Atacama, en el norte de Chile, a una altitud cercana a los 4,770 m s.n.m. Su objetivo principal es complementar las observaciones realizadas por experimentos como HAWC, proporcionando cobertura continua del cielo austral y acceso a regiones del firmamento que no pueden observarse desde el hemisferio norte. SWGO empleará detectores Cherenkov de agua distribuidos sobre una amplia superficie y estará orientado al estudio de fenómenos astrofísicos extremos, incluyendo principalmente el centro de la Vía Láctea, aceleradores cósmicos de partículas, fuentes galácticas y extragalácticas de rayos gamma, así como eventos transitorios de alta energía. Gracias a su ubicación a gran altitud y a su amplio campo de visión, SWGO contribuirá significativamente a la astronomía multimensajero y al monitoreo continuo del universo de alta energía. El arreglo de SWGO consiste en tres arreglos de diferentes densidades de tanques. La parte más central y más densa se denomina SWGO-A.

2.2.1. SWGO-A

SWGO-A (Figura 2.2) corresponde a la primera fase del observatorio SWGO. Este diseño consiste en un arreglo de 385 tanques metálicos organizados en 7 clusters de 55 tanques cada uno, dispuestos en una geometría aproximadamente hexagonal. Esta región central está diseñada para maximizar la sensibilidad a eventos de alta energía mediante una mayor cobertura espacial y una reducción en la separación entre detectores, lo que permite un muestreo más fino de las cascadas atmosféricas



Figura 2.2: Imagen conceptual del arreglo SWGO-A. Fuente: Elaboración propia con asistencia de inteligencia artificial, basada en el arreglo descrito en [4].

inducidas por rayos cósmicos y rayos gamma.

2.3. Sistemas de monitoreo en observatorios Cherenkov

El sistema de monitoreo de niveles de agua de HAWC, descrito de manera general en [5], constituye un referente importante para el diseño de sistemas de instrumentación en entornos científicos exigentes. Para esta tarea, se emplean sensores de presión absoluta MPX4250AP, encapsulados en resina epóxica para permitir su inmersión directa en el agua. Estos sensores cuentan además con una protección eléctrica interna mediante diodos supresores de voltaje transitorio (TVS, por su siglas en inglés) [6], conectados entre los pines de señal y tierra, así como entre alimentación y tierra, con el fin de mitigar los efectos de transitorios eléctricos

provocados por variaciones del campo eléctrico ambiental, frecuentes en zonas montañosas altas como el sitio de HAWC.

Cada sensor se conecta mediante un cable de cuatro hilos (negro para tierra, rojo para alimentación, verde para señal y blanco no conectado), con una longitud aproximada de 15 metros y terminación en un conector XLR. La topología de cableado desde el cuarto de electrónica principal, o *Counting House*, hasta los tanques es mediante cables UTP CAT5 en los cuales se transportan las señales de dos sensores por cable, utilizando tres hilos para cada uno (6 hilos en total).

En las proximidades de los tanques, los cables llegan a una caja de conexiones enterrada, que a su vez distribuye las señales hacia una *junction box* donde se conectan directamente a los sensores de nivel. Antes de ingresar al *Counting House*, los cables pasan por *spark gaps* para proporcionar una capa adicional de protección contra sobretensiones inducidas por descargas eléctricas o perturbaciones atmosféricas.

Dentro del *Counting House*, los cables se conectan a una serie de *switches* multiplexados por microcontroladores Arduino Mega, que permiten canalizar múltiples señales de sensores hacia un sistema de adquisición de datos basado en un LabJack U3-HV. Este dispositivo actúa como el multímetro digital encargado de medir los voltajes analógicos correspondientes a la señal de presión y al voltaje de alimentación de cada sensor.

El sistema incluye también una fuente de alimentación centralizada de 5V, desde la cual se distribuye la energía a todos los sensores. Tanto el LabJack como los switches están conectados mediante un HUB USB a la computadora denominada EMS (*Environmental Monitoring System*), encargada de la supervisión continua del entorno del experimento. Esta estación recolecta los datos, los almacena en una base de datos local, y posteriormente son enviados a dos bases de datos remotas, una situada en la Universidad Nacional Autónoma de México y la otra en la Universidad de Maryland, luego los datos son procesados para calcular la altura de la columna de agua en cada tanque. Los resultados son actualizados cada 20 minutos aproximadamente en una interfaz gráfica de monitoreo.

Este sistema ha estado en operación por más de ocho años en condiciones de campo, enfrentando variaciones extremas de temperatura, humedad y descargas eléctricas, lo que ha permitido identificar y documentar con precisión los principales

puntos críticos. Entre ellos destaca una tasa de falla del 8 % anual de los sensores MPX4250AP, atribuida principalmente a la inmersión prolongada, formación de sarro en los conectores, microfracturas en el encapsulado epóxico, deterioro en los cables que no son adecuados para uso en exterior y variaciones en el voltaje de alimentación, según lo reportado por el equipo técnico de HAWC.

En el caso del observatorio LHAASO (Large High Altitude Air Shower Observatory) [7], ubicado en Daocheng, en la provincia de Sichuan, China, a una altitud aproximada de 4410 m s.n.m., el experimento consiste en un complejo sistema híbrido para la detección de rayos gamma y rayos cósmicos de muy alta energía, que incluye arreglos de detectores de partículas, telescopios Cherenkov atmosféricos y el arreglo WCDA (Water Cherenkov Detector Array), compuesto por grandes estanques instrumentados con fotomultiplicadores. En la literatura científica disponible no se encuentra documentado un sistema dedicado al monitoreo continuo del nivel de agua en dicha instalación. Aunque se publica detalladamente la estructura del estanque (profundidad de aproximadamente 4.4 m) [8], no se mencionan sensores para registrar cambios en el nivel de agua a lo largo del tiempo. Esto sugiere que, si bien el llenado inicial y la calidad del agua se controlan [9] (por ejemplo, para evaluar la atenuación de la luz Cherenkov), no se utiliza un sistema específico para detectar variaciones del nivel tras la puesta en operación.

Por otro lado, en el observatorio Pierre Auger [10], ubicado en la provincia de Mendoza, Argentina, el cual constituye el arreglo más extenso de detección de rayos cósmicos de ultra alta energía con una superficie aproximada de 3000 km² y basado en detectores Cherenkov en agua distribuidos en una red de estaciones de superficie, tampoco se documenta la existencia de un sistema dedicado de medición continua del nivel de agua en sus tanques Cherenkov. No obstante, existe un estudio relevante [11] en el cual se infiere que el nivel del agua influye en la respuesta del detector. En dicho trabajo, se desarrolla una técnica basada en la curva de cargas del decaimiento de muones, lo que permite estimar el nivel de agua mediante la relación lineal entre la proporción de electrones de Michel (electrones o positrones provenientes del decaimiento de muones) y los muones detectados. Esta dependencia sugiere que, aunque no haya un sensor dedicado al nivel, este parámetro puede ser inferido y su variación monitorizada mediante los datos de física de partículas.

2.4. Sistemas de monitoreo de nivel de agua basados en sensores de bajo costo e IoT

El desarrollo de sensores electrónicos de bajo costo, microcontroladores y plataformas de comunicación digital ha favorecido la implementación de sistemas de monitoreo de nivel de agua en aplicaciones domésticas, industriales y ambientales [12]. En este contexto, diversos estudios han señalado que el uso de sensores de bajo costo en monitoreo ambiental presenta retos importantes relacionados con la calibración, la deriva temporal y la estabilidad a largo plazo, los cuales pueden afectar la calidad de las mediciones, especialmente cuando los sistemas no son evaluados de forma prolongada en condiciones reales [13]. De manera complementaria, se ha destacado que estos sistemas representan una alternativa prometedora para la generación de información hidrológica de alta resolución temporal, aunque persisten limitaciones en la documentación de su desempeño y en la comprensión de sus impactos económicos y ambientales [14].

Por otro lado, se han propuesto arquitecturas IoT de múltiples capas que integran sensores distribuidos, procesamiento local y servicios en la nube, con el objetivo de mejorar la escalabilidad y la gestión remota de sistemas de monitoreo hídrico [15]. Finalmente, se ha demostrado que la calidad, continuidad y resolución temporal de los datos de nivel de agua influyen de manera significativa en el desempeño de modelos predictivos para la gestión de recursos hídricos, lo que resalta la importancia de mantener sistemas de monitoreo confiables y estables a largo plazo [16].

En el trabajo de Jan et al. [12] se realizó una revisión sistemática de soluciones basadas en Internet de las Cosas (IoT) para monitoreo de nivel, detección de fugas y control automático de sistemas de bombeo en tanques de almacenamiento de agua. Los autores analizaron 49 trabajos publicados entre 2016 y 2021, identificando las arquitecturas, sensores y plataformas de comunicación más utilizadas en este tipo de aplicaciones.

La Tabla 2.1 resume algunos de los sistemas representativos recopilados por dicho trabajo.

Tabla 2.1: Sistemas de monitoreo de nivel de agua basados en IoT recopilados en [12].

Referencia	Sensor de nivel	Plataforma de adquisición	Comunicación / Nube	Características principales
Shankar y Dakshayini [17]	Sensor ultrasónico	NodeMCU	Wi-Fi, ThingSpeak y SMS	Monitoreo remoto del nivel de agua, notificaciones al usuario y protección contra funcionamiento en seco de la bomba.
Daadoo y Daraghmi [18]	US-020 (ultrasónico) + sensores de fuga	Arduino Mega 2560	GSM (SIM900)	Monitoreo de nivel, detección de fugas en múltiples puntos, control automático de válvulas y recarga automática del tanque.
Jaiad y Ghayyib [19]	Sensores discretos de nivel + sensores de flujo	Arduino Nano + Raspberry Pi 2	GSM, Adafruit IoT	Monitoreo de nivel, detección de robo de agua o fugas mediante sensores de flujo y control automático de válvulas.
Sowmya et al. [20]	Sensor ultrasónico	Raspberry Pi 3 B+	Wi-Fi, ThingSpeak	Visualización remota del nivel de agua mediante aplicación móvil y actualización periódica de datos.
Asif et al. [21]	Sensor ultrasónico + sensores de flujo	NodeMCU	Wi-Fi, ThingSpeak	Monitoreo de nivel, detección de fugas mediante fusión de sensores y algoritmos de aprendizaje automático.

Puede observarse que la mayoría de las implementaciones utilizan sensores ultrasónicos debido a su bajo costo y facilidad de integración, mientras que plataformas como Arduino, NodeMCU y Raspberry Pi son frecuentemente empleadas para adquisición y procesamiento de datos. Asimismo, la transmisión de información suele realizarse mediante Wi-Fi o GSM, complementándose con plataformas en la nube para visualización remota y almacenamiento de datos.

2.5. Arquitecturas de adquisición distribuidas para monitoreo científico

Las arquitecturas de adquisición distribuidas han sido ampliamente adoptadas en sistemas de monitoreo científico de gran escala debido a su capacidad de escalabilidad, tolerancia a fallos y reducción de la complejidad del cableado en campo. En este paradigma, la adquisición de datos no depende de una única unidad central, sino de múltiples nodos autónomos que integran sensores, conversión analógico-digital, procesamiento local y comunicación en red [22, 23].

A diferencia de los sistemas centralizados, donde todas las señales analógicas deben ser transportadas hacia un punto único de adquisición, las arquitecturas distribuidas permiten realizar procesamiento en el nodo de origen, incluyendo filtrado, acondicionamiento de señal y reducción de datos. Esto disminuye la carga de comunicación hacia el sistema central y mejora la robustez frente a fallos parciales del sistema [24].

En entornos experimentales de física de astropartículas y monitoreo ambiental extremo, este tipo de arquitecturas resulta particularmente relevante debido a las condiciones adversas de operación, como ruido electromagnético, grandes distancias entre sensores y restricciones de mantenimiento. En estos sistemas, la falla de un nodo individual no compromete la operación global, lo cual incrementa la confiabilidad del sistema de adquisición [25].

En cuanto a la comunicación entre nodos, se han implementado diversos protocolos de comunicación industrial y embarcada, incluyendo el RS-485, Ethernet industrial y CAN (Controller Area Network). Entre estos, el protocolo CAN BUS ha demostrado ser particularmente adecuado para sistemas distribuidos embarcados debido a su inmunidad al ruido, eficiencia en el arbitraje del bus y alta confiabilidad en entornos eléctricos adversos [25].

En arquitecturas modernas, es común la integración de sistemas híbridos donde la adquisición distribuida se combina con nodos centrales de procesamiento y almacenamiento, permitiendo un balance entre escalabilidad, control global del sistema y capacidad de análisis en tiempo real.

2.6. Comparación

La Tabla 2.2 muestra que HAWC constituye el único observatorio Cherenkov para el cual se encontró una descripción de un sistema dedicado al monitoreo continuo del nivel de agua mediante sensores de presión. En contraste, para LHAASO no se encontraron reportes específicos sobre sistemas de monitoreo de nivel de agua, mientras que en Pierre Auger el nivel puede inferirse indirectamente a partir de parámetros asociados a la respuesta de los detectores.

Tabla 2.2: Comparación de estrategias de monitoreo de nivel de agua reportadas en observatorios Cherenkov y sistemas distribuidos de monitoreo.

Trabajo	Aplicación	Arquitectura	Comunicación	Medición de nivel
HAWC	Observatorio Cherenkov	Centralizada	Analógica	Sensor de presión
LHAASO	Observatorio Cherenkov	No reportada	No reportada	No reportada
Pierre Auger	Observatorio Cherenkov	Centralizada	Propietaria	Indirecta
Sistemas IoT	Monitoreo ambiental	Distribuida	Wi-Fi, GSM, LoRa	Sensor ultrasónico en su mayoría
Propuesta actual	SWGO	Distribuida	CAN BUS	Sensor de presión

Por otra parte, los sistemas IoT reportados en la literatura emplean arquitecturas distribuidas y diversas tecnologías de comunicación para aplicaciones de monitoreo ambiental. La propuesta desarrollada en este trabajo adopta una arquitectura distribuida basada en CAN BUS con el objetivo de proporcionar una solución escalable para el monitoreo continuo de los detectores de SWGO.

Capítulo 3

Marco Teórico

3.1. Detección de rayos gamma mediante tanques Cherenkov

El fenómeno conocido como radiación Cherenkov ocurre cuando una partícula cargada (como un electrón, muón o positrón) atraviesa un medio dieléctrico (como el agua) a una velocidad superior a la velocidad de la luz en dicho medio. Este efecto es análogo al “boom sónico” producido por un objeto que excede la velocidad del sonido en el aire, pero en el dominio electromagnético (Figura 3.1).

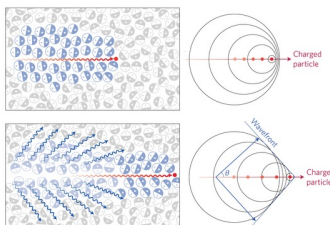


Figura 3.1: Efecto Cherenkov.

La condición para que se emita radiación Cherenkov se cumple cuando:

$$v > \frac{c}{n}, \quad (3.1)$$

donde v es la velocidad de la partícula, c es la velocidad de la luz en el vacío, y n es el índice de refracción del medio (para el caso del agua, $n \approx 1.33$).

3.1.1. Principio de detección de radiación Cherenkov en agua:

En los detectores tipo Water Cherenkov Detector (WCD, por sus siglas en inglés), los rayos gamma de alta energía provenientes del espacio no son detectados de forma directa, debido a que los fotones carecen de carga eléctrica. En cambio, al interactuar con la atmósfera terrestre, generan cascadas de partículas secundarias —conocidas como cascadas atmosféricas extensas (del inglés: Extensive Air Shower, acrónimo EAS) — que incluyen electrones, positrones y muones. Estas partículas pueden alcanzar los tanques Cherenkov ubicados en superficie a gran altitud y, al atravesar el agua del detector a velocidades suficientemente altas, producen radiación Cherenkov.

La porción visible de esta radiación, conocida como luz Cherenkov, se emite en forma de un cono con un ángulo característico respecto a la dirección de propagación de la partícula incidente. Esta luz puede ser detectada por tubos fotomultiplicadores (PMTs) instalados en el fondo de los tanques, los cuales convierten la señal óptica en impulsos eléctricos que son digitalizados y analizados posteriormente.

3.1.2. Diseño y simulación de tanques de detección de luz Cherenkov

El observatorio HAWC implementa un arreglo de 300 detectores WCD, diseñados para la detección indirecta de rayos gamma y rayos cósmicos de alta energía. Cada tanque está completamente sellado, revestido internamente con material reflector difuso y lleno de agua purificada, con el objetivo de maximizar la producción y captura de luz Cherenkov.

Cada WCD contiene cuatro PMTs: uno central de diez pulgadas (Hamamatsu R7081) y tres de ocho pulgadas (Hamamatsu R5912) dispuestos en forma triangular alrededor del PMT central. Estos se colocan a una profundidad aproximada de 0.5 metros desde el fondo del tanque, lo cual permite la detección eficiente de los fotones Cherenkov generados por partículas cargadas que atraviesan la columna de agua.

El diseño del arreglo y la optimización de parámetros como el número de tanques, la separación entre ellos y la altura de la columna de agua fueron validados

mediante simulaciones detalladas [27]. HAWC emplea HAWCSim, una herramienta basada en GEANT4 que simula la propagación de partículas generadas por CORSIKA (simulador de cascadas atmosféricas) y su interacción con los detectores. HAWCSim incluye el modelado completo de la producción, propagación, dispersión, absorción de la luz Cherenkov y la respuesta física de los PMTs, hasta el nivel de un solo fotoelectrón.

Estas simulaciones permitieron determinar que una columna de agua de aproximadamente 4 metros sobre los PMTs —equivalente a 10 longitudes de radiación¹. — representa una configuración óptima. Esta altura proporciona una respuesta eficiente del sistema, equilibrando adecuadamente la sensibilidad, la resolución energética y la cobertura espacial.

3.1.3. Relación entre el nivel de agua y la eficiencia de detección

La profundidad del agua en cada detector Cherenkov de agua (WCD, por sus siglas en inglés) constituye un parámetro fundamental para el desempeño del observatorio, ya que influye directamente en la producción, propagación y detección de la luz Cherenkov generada por las partículas secundarias de las cascadas atmosféricas extensas (EAS). Para el diseño de HAWC, la profundidad del agua fue seleccionada de manera que el detector funcionara como un calorímetro efectivo para las partículas electromagnéticas de las EAS, optimizando la sensibilidad a la luz Cherenkov y permitiendo una adecuada reconstrucción de los eventos [5, 27].

Una profundidad excesiva incrementa la distancia entre la región de producción de luz y los tubos fotomultiplicadores (PMTs), reduciendo la señal detectada debido a la absorción de los fotones en el agua y a efectos geométricos asociados a la propagación de la luz. Por el contrario, si la profundidad es demasiado pequeña, las partículas secundarias pueden aproximarse excesivamente a los fotocátodos de los PMTs, generando señales desproporcionadamente grandes respecto a la energía depositada. En esta condición, la respuesta del detector deja de depender únicamente

¹La longitud de radiación (X_0) en el agua líquida es de aproximadamente 36.1 g/cm², lo que equivale a unos 36.1 cm considerando su densidad. Esta magnitud indica la distancia promedio que recorre un electrón de alta energía antes de perder el 63 % ($1 - \frac{1}{e}$) de su energía por bremsstrahlung (radiación de frenado).

de la energía de la partícula y pasa a depender también de su posición dentro del tanque, afectando la proporcionalidad entre la energía depositada y el número de fotoelectrones² (PE) detectados [5, 27, 28].

Para la configuración adoptada en HAWC, con aproximadamente 4 m de agua sobre los PMTs, simulaciones Monte Carlo indican una respuesta cercana a 40 fotoelectrones por GeV de energía depositada por partículas del componente electromagnético de las EAS [5]. Este valor fue obtenido considerando las características de los PMTs, una pérdida de energía de aproximadamente 2 MeV/cm y una producción de alrededor de 390 fotones Cherenkov por centímetro de trayectoria en el intervalo espectral comprendido entre 300 y 700 nm [5]. Estas características permiten mantener una respuesta adecuada para la estimación de energía y la reconstrucción de eventos, por lo que el monitoreo continuo del nivel de agua constituye un aspecto importante para preservar las condiciones nominales de operación del detector [5, 27].

3.2. Método de medición del nivel de agua

3.2.1. Elección del sensor

La selección adecuada del tipo de sensor para el monitoreo de niveles de agua depende en gran medida de las condiciones específicas del entorno en el que será implementado.

En el reporte Water Level Sensor Testing del Irrigation Training and Research Center (ITRC) [29], se presenta una guía detallada que incluye diagramas de flujo para apoyar la toma de decisiones respecto a la elección del sensor más apropiado según el contexto operativo. En dicho estudio se analizan diversos tipos de sensores, incluyendo sensores de flotador, sensores de presión hidrostática, sensores ultrasónicos y sensores del tipo “bubbler”, evaluando parámetros como precisión, mantenimiento requerido, costo, facilidad de instalación y condiciones ambientales compatibles. El estudio se resume en el diagrama de flujo de la Figura 3.2.

²Los fotoelectrones son electrones emitidos desde la superficie de un material cuando este absorbe fotones con energía suficiente para superar la función de trabajo del material. Este fenómeno, conocido como efecto fotoeléctrico, constituye la base del funcionamiento de los tubos fotomultiplicadores utilizados en los detectores Cherenkov.

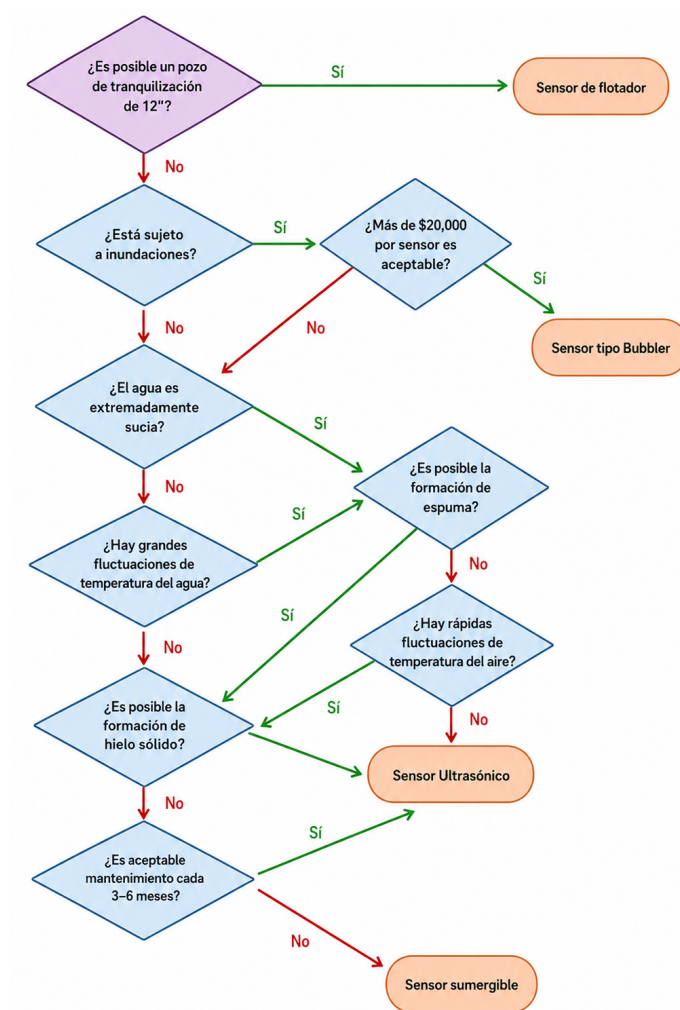


Figura 3.2: Diagrama de flujo del árbol de decisión para elegir el sensor más adecuado. Fuente: Elaboración propia con base en [29].

Siguiendo el diagrama de decisión se concluye que el sensor más adecuado para esta aplicación es un sensor sumergible, ya que no es posible realizar un pozo dentro del tanque, no está sujeto a inundaciones, el agua no es extremadamente sucia, no se esperan grandes fluctuaciones de temperatura del agua en periodos cortos, no se espera que haya formación de hielo sólido y se espera que el mantenimiento se haga después de 6 meses. El sensor sumergible mide la presión del agua al fondo del tanque y a partir de esa medición se puede estimar el nivel de agua.

3.2.2. Relación entre nivel de agua y presión hidrostática

Para el agua en reposo dentro de un tanque, la presión medida al fondo de éste, está directamente relacionada al peso de la columna del líquido situada por encima del punto de medición (Figura 3.3).

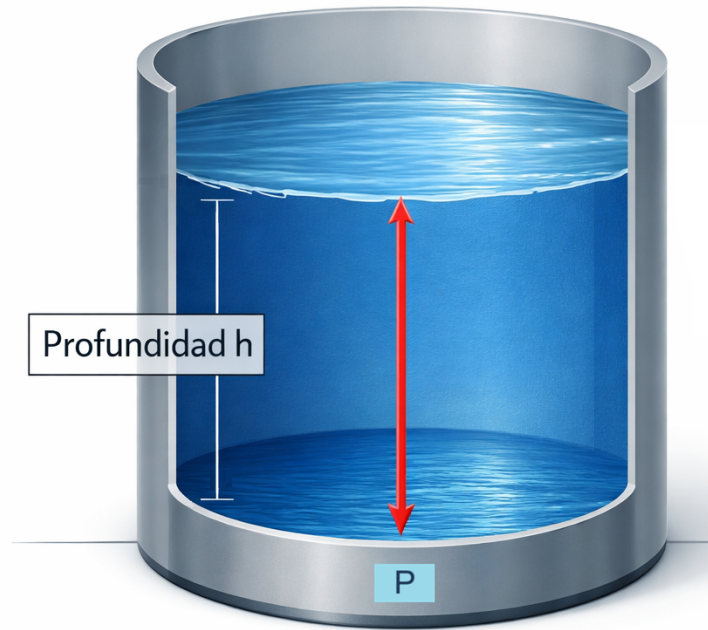


Figura 3.3: Presión hidrostática en un tanque. Fuente: Elaboración propia con asistencia de inteligencia artificial.

Esta relación es lineal y puede expresarse mediante la Ecuación (3.2):

$$P = \rho gh, \quad (3.2)$$

donde P es la presión hidrostática al fondo del tanque, h es el nivel de agua, ρ es la densidad del agua, y g es la aceleración de la gravedad. Considerando una densidad de 997 kg/m^3 para el agua destilada, que es la que se utiliza en este tipo de detectores; y una aceleración de la gravedad de 9.78 m/s^2 , se obtiene una conversión práctica de alrededor de 9.81 kPa por cada metro de altura de agua, equivalente a aproximadamente 0.098 kPa por centímetro. Esta proporcionalidad constituye la base del método de medición de nivel empleado en este trabajo.

3.2.3. Sensor MPX4250AP

El transductor de presión MPX4250AP (Figura 3.4) es un sensor piezoresistivo de silicio con salida analógica lineal cuyo rango operativo abarca desde 20 hasta 250 kPa, alimentado típicamente a 5.1 V, con una corriente de operación del orden de 7 mA según especifica el fabricante.

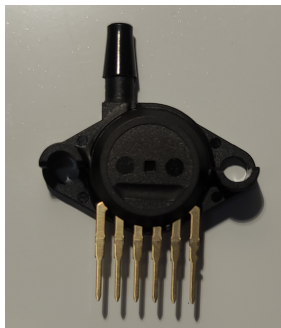


Figura 3.4: Sensor MPX4250AP. Foto tomada por el autor.

La salida del sensor presenta un voltaje de offset (V_{off}) del orden de 0.2 V y un voltaje a plena escala (V_{FSO}) próximo a 4.9 V, con una sensibilidad de 20 mV/kPa, lo que define el rango útil de señal para la conversión analógico-digital. El circuito de operación recomendado por el fabricante (Figura 3.5) incluye desacoplamiento en la alimentación con capacitores de 1 μ F y 0.01 μ F y un capacitor de 470 pF en la salida para supresión de ruido de alta frecuencia (EMI), cumpliendo con las especificaciones eléctricas y de estabilidad del dispositivo.

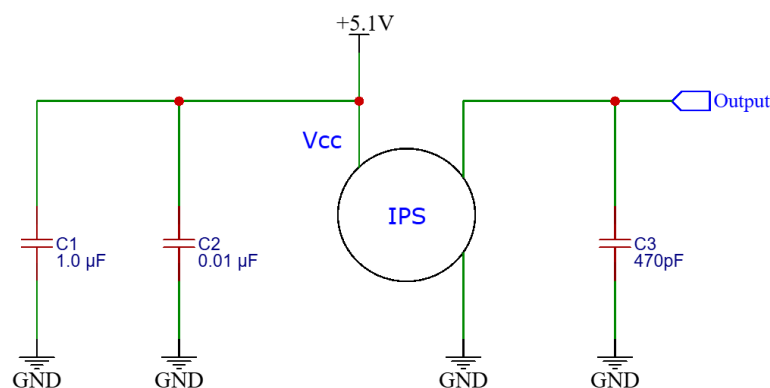


Figura 3.5: Circuito de desacoplamiento sugerido por el fabricante. (IPS: Inline Pressure Sensor). Fuente: Elaboración propia con base en [30].

La respuesta del sensor se expresa mediante su función de transferencia lineal entre la presión aplicada (P) y el voltaje de salida (V_{out}), la cual puede representarse idealmente como:

$$V_{out} = V_{CC} \times (P \times 0.004 - 0.04) \pm Error. \quad (3.3)$$

La función completa en el rango de operación se muestra en la Figura 3.6.

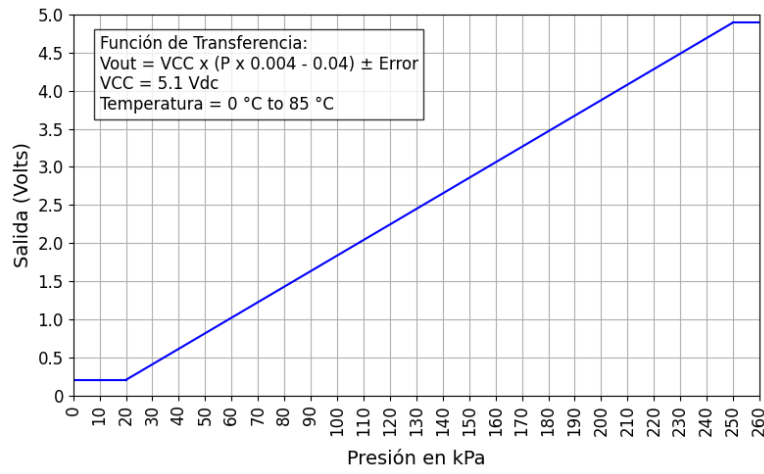


Figura 3.6: Función de transferencia del sensor MPX4250AP. Fuente: Elaboración propia con base en [30].

3.2.4. Obtención del nivel de agua a partir del voltaje de salida del sensor

La presión hidrostática ejercida por una columna de agua puede describirse mediante la Ecuación 3.4.

$$P = \rho gh, \quad (3.4)$$

donde P es la presión hidrostática, ρ es la densidad del agua, g es la aceleración de la gravedad y h es la altura de la columna de agua. Despejando la altura se obtiene

$$h = \frac{P}{\rho g}, \quad (3.5)$$

En el sistema propuesto se utilizan dos sensores de presión: uno mide la presión

total en el fondo del tanque (P_{h2o}) y el otro mide la presión atmosférica (P_{air}). De esta manera, la presión hidrostática debida únicamente a la columna de agua se obtiene a través de la Ecuación (3.6).

$$P = P_{h2o} - P_{air}, \quad (3.6)$$

Sustituyendo en la Ecuación 3.5, se obtiene la Ecuación (3.7):

$$h = \frac{P_{h2o} - P_{air}}{\rho g}. \quad (3.7)$$

De acuerdo con la hoja de datos del sensor MPX4250AP, la relación entre el voltaje de salida y la presión aplicada está dada por la Ecuación (3.8).

$$V_{out} = V_s(0.004P - 0.04), \quad (3.8)$$

donde V_{out} es el voltaje de salida del sensor, V_s es el voltaje de alimentación y P es la presión en kPa.

Dividiendo la Ecuación (3.8) entre V_s :

$$\frac{V_{out}}{V_s} = 0.004P - 0.04, \quad (3.9)$$

y sumando 0.04 a ambos lados:

$$\frac{V_{out}}{V_s} + 0.04 = 0.004P, \quad (3.10)$$

dividiendo entre 0.004:

$$P = \frac{\frac{V_{out}}{V_s} + 0.04}{0.004}, \quad (3.11)$$

y aplicando esta expresión a cada sensor:

$$P_{h2o} = \frac{\frac{V_{h2o}}{V_s} + 0.04}{0.004}, \quad (3.12)$$

$$P_{air} = \frac{\frac{V_{air}}{V_s} + 0.04}{0.004}. \quad (3.13)$$

La presión hidrostática se obtiene restando ambas mediciones:

$$P = P_{h2o} - P_{air}, \quad (3.14)$$

sustituyendo (3.12) y (3.13) en (3.14):

$$P = \left(\frac{\frac{V_{h2o}}{V_s} + 0.04}{0.004} \right) - \left(\frac{\frac{V_{air}}{V_s} + 0.04}{0.004} \right), \quad (3.15)$$

agrupando términos:

$$P = \frac{\left(\frac{V_{h2o}}{V_s} + 0.04 \right) - \left(\frac{V_{air}}{V_s} + 0.04 \right)}{0.004}, \quad (3.16)$$

Finalmente, simplificando, se obtiene la presión hidrostática a través de la Ecuación 3.18:

$$P = \frac{\frac{V_{h2o}}{V_s} - \frac{V_{air}}{V_s}}{0.004}, \quad (3.17)$$

$$P = \frac{V_{h2o} - V_{air}}{0.004V_s}, \quad (3.18)$$

donde P se obtiene en kPa.

Para utilizar la Ecuación hidrostática es necesario expresar la presión en Pascales:

$$P_{Pa} = 1000P. \quad (3.19)$$

Sustituyendo (3.18) en la Ecuación (3.5) y tomando en cuenta (3.19):

$$h = \frac{1000}{\rho g} \left(\frac{V_{h2o} - V_{air}}{0.004V_s} \right), \quad (3.20)$$

agrupando constantes:

$$h = \frac{1000}{0.004\rho g} \frac{(V_{h2o} - V_{air})}{V_s}, \quad (3.21)$$

considerando $\rho = 997 \text{ kg/m}^3$ y $g = 9.81 \text{ m/s}^2$:

$$\rho g \approx 9780, \quad (3.22)$$

por lo que finalmente se obtiene:

$$h \approx 25.56 \frac{(V_{h2o} - V_{air})}{V_s}, \quad (3.23)$$

donde h se expresa en metros.

Esta expresión permite estimar directamente la altura de la columna de agua a partir de la diferencia de voltajes medidos por ambos sensores y del voltaje de alimentación medido en tiempo real.

3.3. Compensación de offset entre sensores

En sistemas de medición reales es común que existan diferencias de voltaje de lectura inicial entre sensores del mismo modelo, aun cuando se encuentren sometidos a condiciones idénticas de presión. Estas variaciones pueden originarse debido a tolerancias de fabricación, desviaciones del punto cero, ruido electrónico, diferencias de sensibilidad y variaciones asociadas al sistema de adquisición de datos. Por esta razón, en aplicaciones de instrumentación es habitual incorporar términos de corrección que permitan compensar desviaciones sistemáticas entre dispositivos y mejorar la precisión de las mediciones diferenciales. Considerando la presencia de estas desviaciones instrumentales, la Ecuación (3.23) se modifica incorporando un término de corrección adicional, obteniéndose finalmente:

$$h = 25.55 \frac{(V_{h2o} - V_{air} - Offset)}{V_s}, \quad (3.24)$$

donde Offset representa la diferencia de voltaje residual entre sensores medida experimentalmente bajo condiciones de presión atmosférica.

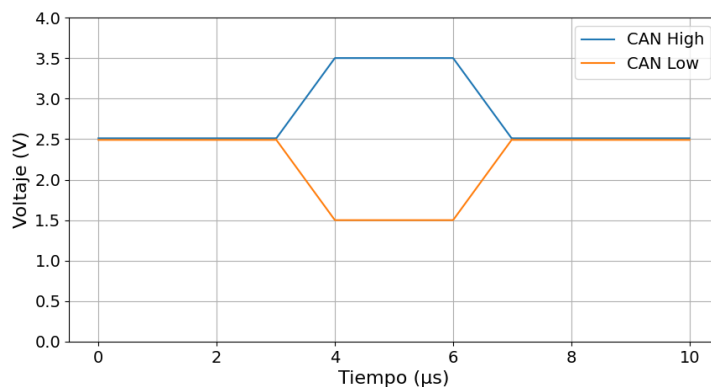
3.4. El protocolo CAN y la topología de bus

El protocolo Controller Area Network (CAN) fue desarrollado originalmente por Robert Bosch GmbH en 1986 para aplicaciones automotrices. La especificación CAN 2.0, publicada por Bosch en 1991 [31], formalizó las características fundamentales del protocolo, incluyendo el formato de las tramas, el mecanismo de arbitraje y los procedimientos de detección de errores. Posteriormente, el protocolo

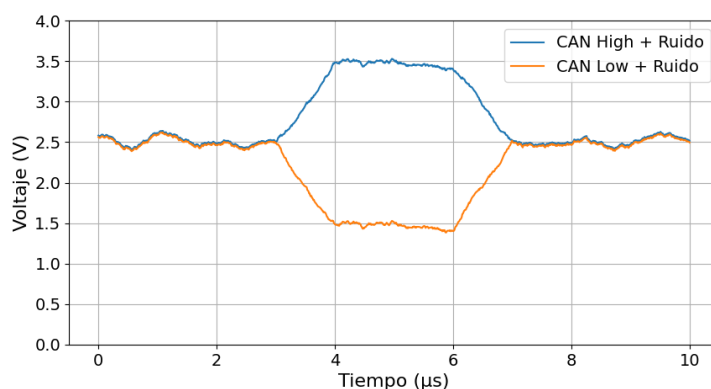
fue estandarizado mediante la familia de normas ISO 11898. Dentro de esta familia, la norma ISO 11898-1 [32] especifica la capa de enlace de datos, definiendo la estructura de las tramas, el arbitraje basado en la prioridad de los identificadores, los mecanismos de detección y manejo de errores, así como los procedimientos de sincronización y codificación de bits. Por su parte, la norma ISO 11898-2 [33], define la capa física de alta velocidad, estableciendo la transmisión diferencial de señales mediante dos líneas denominadas CAN_H y CAN_L . En estado dominante, el voltaje típico de CAN_H es aproximadamente 3.5 V y el de CAN_L alrededor de 1.5 V, mientras que en estado recesivo ambas líneas se sitúan cerca de 2.5 V, permitiendo una alta inmunidad al ruido electromagnético.

La Figura 3.7 ilustra el principio de transmisión diferencial empleado por CAN. En la Figura 3.7a se muestra el comportamiento ideal de las líneas CAN_H y CAN_L , donde la información se representa mediante la diferencia de potencial entre ambas señales.

Por su parte, la Figura 3.7b muestra un caso más realista en el que ruido electromagnético externo afecta simultáneamente a ambas líneas. Debido a que los receptores CAN detectan la diferencia de voltaje entre CAN_H y CAN_L , las perturbaciones comunes presentes en ambas señales tienden a cancelarse, lo que incrementa la inmunidad al ruido y contribuye a la confiabilidad de la comunicación. La velocidad de transmisión en redes CAN depende de la longitud del bus, alcanzando hasta 1 Mbps en distancias cortas (del orden de decenas de metros), y disminuyendo conforme aumenta la longitud del cableado (por ejemplo, cientos de metros a menores velocidades), debido a limitaciones en la propagación y sincronización de la señal. Asimismo, la comunicación se organiza en tramas estructuradas que incluyen identificadores de 11 o 29 bits, los cuales no solo determinan la dirección lógica del mensaje, sino también su prioridad en el proceso de arbitraje, permitiendo un acceso eficiente y determinístico al medio compartido. Desde el punto de vista de la implementación física, la red CAN emplea una topología de bus lineal con terminación en ambos extremos mediante resistencias típicamente de 120 Ω , lo cual permite adaptar la impedancia del medio y minimizar reflexiones de señal. Además, se recomienda que las derivaciones laterales (stubs) que conectan los nodos al bus principal sean lo más cortas posible, generalmente menores a 0.3 m en aplicaciones de alta velocidad, ya que longitudes mayores pueden introducir



(a) Transmisión ideal a través del protocolo CAN. Fuente: Elaboración propia.



(b) Transmisión diferencial realista a través del protocolo CAN. Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.7: Comparación de la transmisión CAN: señal ideal vs. señal con ruido afectando a ambas líneas por igual.

desadaptaciones e interferencias que degradan la integridad de la señal.

3.4.1. Controlador CAN MCP2515

El MCP2515 (Figura 3.8) es un controlador CAN desarrollado por Microchip, el cual implementa la capa de enlace de datos del protocolo CAN conforme a la norma ISO 11898-1. Este dispositivo es compatible con la especificación CAN 2.0B, permitiendo el manejo de tramas tanto en formato estándar (11 bits) como extendido (29 bits). Su arquitectura interna incluye buffers de transmisión y recepción, filtros y máscaras de aceptación, así como un motor de control que gestiona automática-

mente el arbitraje del bus, la generación de tramas, la detección de errores y los mecanismos de retransmisión.

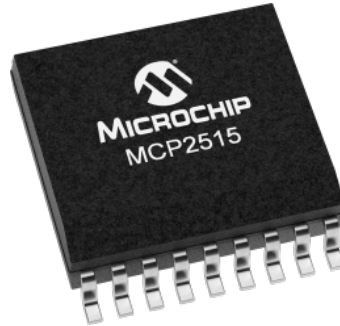


Figura 3.8: MCP2515 fabricado por Microchip [34].

El MCP2515 se comunica con el microcontrolador principal a través de una interfaz SPI, lo que permite desacoplar la carga de procesamiento asociada al protocolo CAN y facilita su integración en sistemas embarcados. En cumplimiento con la norma ISO 11898-1, el dispositivo implementa funciones clave como el bit stuffing, la verificación mediante código de redundancia cíclica (CRC), el reconocimiento de tramas (ACK) y la gestión de errores mediante contadores internos, permitiendo la transición a estados de error activo, pasivo o bus-off según las condiciones de la red.

Cabe destacar que este controlador no incluye la capa física, por lo que requiere un transceptor externo para la adaptación de niveles eléctricos y la transmisión diferencial en el CAN BUS. Asimismo, el MCP2515 opera bajo el estándar CAN clásico, con velocidades de hasta 1 Mbps y una longitud máxima de datos de 8 bytes por trama, sin soporte para extensiones modernas como CAN FD.

3.4.2. Transceptor CAN TJA1050

El TJA1050 (Figura 3.9) es un transceptor CAN de alta velocidad desarrollado por NXP, diseñado para implementar la capa física del protocolo conforme a la norma ISO 11898-2. Su función principal es adaptar las señales lógicas provenientes del controlador CAN a niveles eléctricos diferenciales adecuados para su transmisión sobre el bus, así como realizar la conversión inversa durante la recepción de datos.

Este dispositivo opera mediante dos líneas diferenciales, CAN_H y CAN_L , generando un nivel dominante cuando existe una diferencia de potencial entre ambas



Figura 3.9: Transceptor CAN [35].

líneas, y un nivel recesivo cuando dichas tensiones son aproximadamente iguales. Esta técnica de señalización diferencial proporciona una alta inmunidad al ruido electromagnético, lo cual resulta fundamental en entornos industriales y automotrices. El TJA1050 es capaz de soportar velocidades de transmisión de hasta 1 Mbps, en concordancia con las especificaciones de CAN de alta velocidad.

Además, el transceptor incorpora mecanismos de protección y robustez, tales como limitación de corriente, protección contra cortocircuitos y filtrado de perturbaciones transitorias, contribuyendo a la estabilidad de la red. Su operación es transparente respecto al protocolo, ya que no interpreta las tramas CAN, sino que actúa únicamente a nivel eléctrico, permitiendo que el controlador CAN, como el MCP2515, gestione completamente la lógica de comunicación definida en la norma ISO 11898-1.

3.5. El microcontrolador

Para la selección del microcontrolador se analizaron cinco plataformas: Arduino Mega, Arduino Uno, Arduino Nano, ESP32 y Teensy 4.0. La comparación se realizó considerando principalmente la resolución del convertidor analógico-digital (ADC), las capacidades de comunicación, el procesamiento disponible, las dimensiones físicas, el costo y la disponibilidad comercial.

Los microcontroladores de la familia Arduino considerados presentan una amplia disponibilidad y facilidad de programación; sin embargo, sus capacidades de procesamiento (procesador de 16 MHz) y resolución del ADC de 10 bits son más

limitadas. Por su parte, el Teensy 4.0 ofrece una capacidad de procesamiento considerablemente superior (procesador de 600 Mhz), pero estas prestaciones exceden los requerimientos de la aplicación propuesta y su costo es significativamente mayor. Por lo tanto, el incremento en capacidad de procesamiento no representa una ventaja relevante para el sistema desarrollado.

El ESP32 presentó el mejor equilibrio entre las características requeridas. Este microcontrolador integra un ADC con resolución de hasta 12 bits. Además, incorpora conectividad WiFi de manera nativa. Esta capacidad permite que el dispositivo no se limite a la comunicación mediante CAN BUS, sino que pueda emplearse posteriormente en aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés), particularmente en sistemas de monitoreo de nivel de agua para instalaciones domésticas.

Adicionalmente, el ESP32 presenta dimensiones reducidas, un costo relativamente bajo y una amplia disponibilidad comercial, factores relevantes para el desarrollo de un sistema distribuido en el que potencialmente se requiera implementar un número elevado de nodos.

3.6. Análisis económico

Con el objetivo de evaluar la viabilidad económica del sistema propuesto, se realizó una estimación de costos considerando los principales componentes electrónicos requeridos para la implementación de la arquitectura de monitoreo de nivel de agua. El análisis incluye el sensor de presión, el microcontrolador, el transceptor de comunicación CAN, la tarjeta de circuito impreso (PCB), así como los componentes pasivos, conectores y elementos auxiliares necesarios para la operación del sistema.

La arquitectura propuesta está basada en nodos de adquisición capaces de gestionar hasta cuatro canales de medición cada uno. Esta configuración permite una distribución eficiente de los sensores dentro de la red, reduciendo la cantidad de nodos necesarios en comparación con una arquitectura uno a uno.

Para el sistema completo se considera un cluster compuesto de 55 tanques con un sensor cada uno, así como 4 sensores adicionales destinados a la medición de presión atmosférica, los cuales se implementan en un nodo independiente con el objetivo de proporcionar una referencia común para la compensación barométrica

y mejorar la confiabilidad mediante redundancia. En consecuencia, el sistema está compuesto por un total de 59 sensores.

Dado que cada nodo de adquisición posee una capacidad de cuatro canales, el sistema requiere un total de 15 nodos para cubrir la totalidad de las mediciones. Esta configuración proporciona una capacidad total de 60 canales disponibles, de los cuales 59 son utilizados activamente.

La Tabla 3.1 presenta el desglose estimado de costos para el sistema completo. Los precios corresponden a valores de mercado obtenidos durante el desarrollo del prototipo y deben considerarse como una aproximación con fines comparativos.

Tabla 3.1: Comparación económica para un clúster de 55 tanques.

Concepto	Sistema propuesto	Sistema comercial
Costo por sensor	100 USD (con encapsulado)	600 USD (Keller Serie 26X)
Número de sensores de nivel	55	55
Sensores de referencia atmosférica	4	No requerido
Total de sensores	59	55
Número de nodos de adquisición	15 nodos (4 canales c/u)	PLC central + módulos analógicos
Electrónica de adquisición	ESP32 + transceptor CAN (75 USD por nodo, 1,125 USD total)	No requerida
Control y adquisición central	Nodo maestro CAN	PLC Siemens S7-1200 + módulos analógicos 4–20 mA
Costo PLC y módulos	No requerido	PLC S7-1200 (490–650 USD) + 7 módulos SM1231 (8 AI) (420–550 USD c/u)
Comunicación	CAN	4–20 mA
Topología	Bus distribuido	Star
Costo total aproximado	7,000 USD	37,000 USD

El análisis muestra que el costo asociado a los sensores comerciales supera en un 529 % el costo total del sistema propuesto. Adicionalmente, la arquitectura distribuida basada en CAN elimina la necesidad de módulos de adquisición analógica industriales y reduce significativamente la complejidad del cableado al evitar la topología centralizada tipo estrella.

Capítulo 4

Desarrollo de sistema de monitoreo de nivel de agua.

El desarrollo del sistema se estructuró en seis etapas principales: definición de requerimientos, diseño, instrumentación y programación, calibración y validación. Las etapas de instrumentación y programación se realizaron de manera paralela, debido a la interacción entre el desarrollo del hardware y del software del sistema. Esto se muestra de manera general en la Figura 4.1.

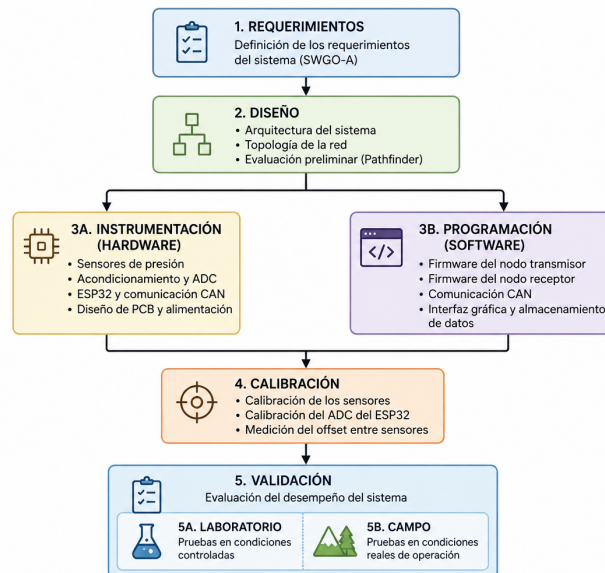


Figura 4.1: Metodología general empleada para el desarrollo del sistema de monitoreo de nivel de agua.

4.1. SWGO-A

Para el monitoreo de SWGO-A se propone el desarrollo de una interfaz gráfica tipo mapa que represente la geometría prevista para el arreglo (ver Figura 4.2). La visualización permitirá identificar en tiempo real el estado del nivel de agua de cada tanque mediante un sistema de codificación por colores: verde para niveles correctos situados entre 3.5 m y 4 m, rojo para niveles bajos en el intervalo de 0 a 3.5 m, y gris en caso de sensor desconectado o ausencia de datos. Adicionalmente, la interfaz incorporará un módulo de estadísticas que mostrará el número total y el porcentaje de tanques en condiciones adecuadas, tanques con nivel bajo y sensores desconectados, proporcionando así una herramienta intuitiva para el monitoreo global del arreglo y la detección rápida de anomalías operativas.

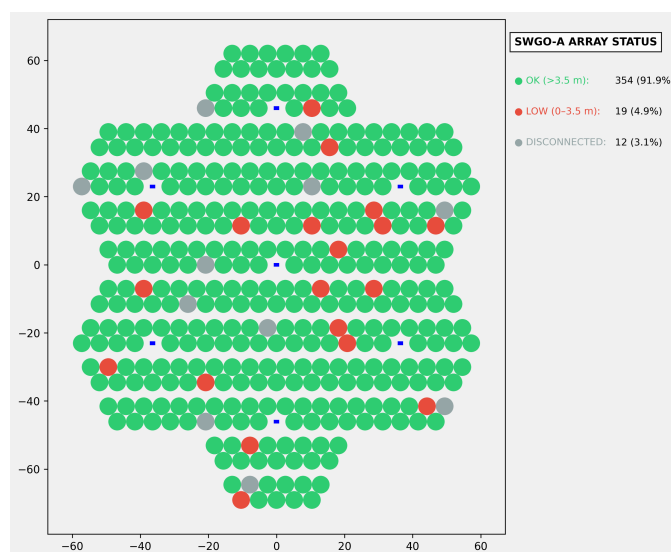


Figura 4.2: Interfaz de monitoreo de niveles de agua para SWGO-A. Verde: nivel ok (mayor a 3.5m), Rojo: nivel bajo (Mayor a 0 y menor a 3.5), Gris: sensor desconectado. Fuente: Elaboración propia.

4.2. Topología de la red

Se propone que la red de adquisición de datos para SWGO-A esté organizada en una topología jerárquica híbrida de estrella y bus (Figura 4.3). Los 55 tanques de cada cluster se conectan en topología de estrella a un nodo central de campo.

Posteriormente, los siete nodos centrales que conformarían la red de clusters se interconectan mediante un bus de comunicación para formar la capa superior de la red, permitiendo la agregación y el envío de la información hacia la base de datos del sistema de monitoreo principal. Esta arquitectura asegura una comunicación confiable y escalable, minimizando la longitud de los enlaces individuales, reduciendo la caída de voltaje y el ruido en las señales analógicas.

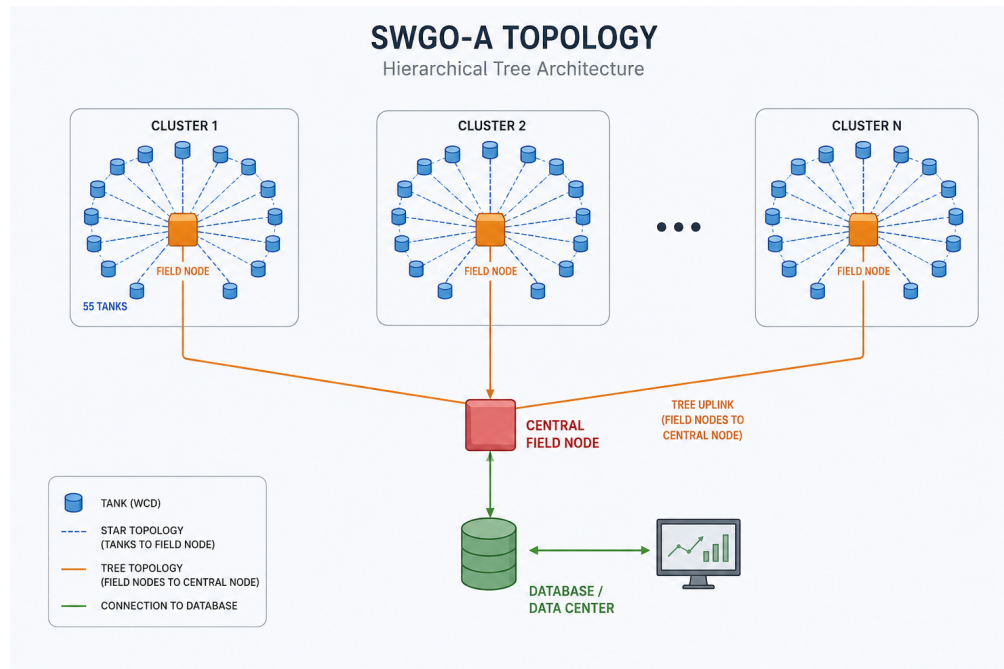


Figura 4.3: Topología para la red de sensores. Fuente: Elaboración propia.

4.3. Pathfinder

El Pathfinder de SWGO consiste en un campo de prueba instalado en el sitio del observatorio [36] diseñado para validar la instrumentación y la infraestructura que posteriormente serán implementadas en el arreglo a gran escala (ver Figura 4.4).

Este arreglo piloto permitirá evaluar el desempeño operativo de los diferentes subsistemas en condiciones reales de sitio, así como optimizar su integración. Dentro de esta etapa se contempla la prueba de un prototipo para el monitoreo de niveles de agua de los tanques, enfocado en un pequeño arreglo compuesto por dos

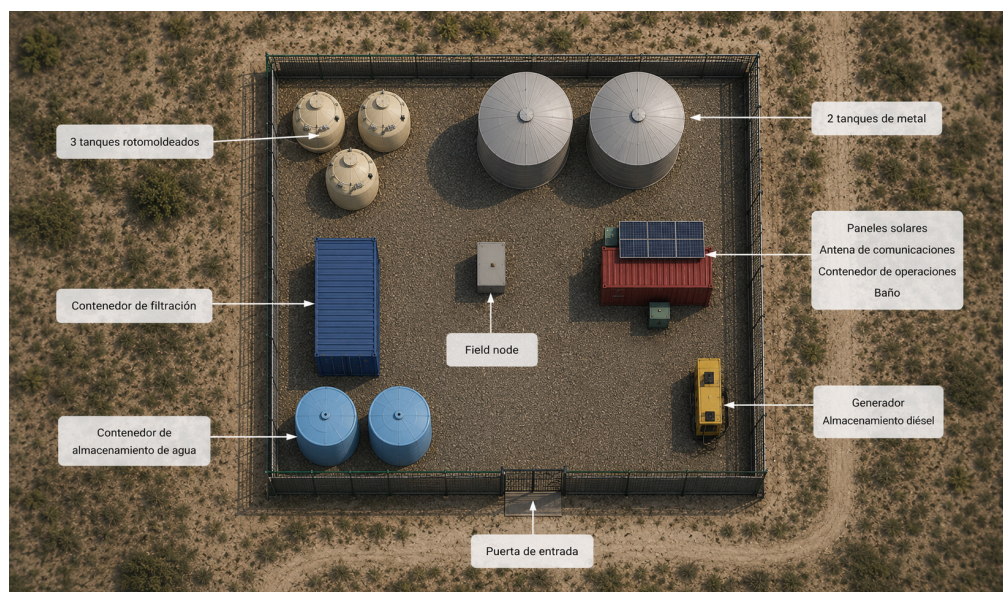


Figura 4.4: Imagen conceptual del Pathfinder. Fuente: Elaboración propia con asistencia de inteligencia artificial con base en [36].

tanques de acero y tres tanques rotomoldeados. Adicionalmente, la infraestructura incluye un nodo central, un contenedor para el filtrado de agua, dos tanques de almacenamiento de agua, un generador eléctrico con su contenedor de diésel, una estación meteorológica, un contenedor de operaciones, un sanitario, una antena de comunicaciones, paneles solares y una antena GPS, conformando así una plataforma integral para la validación tecnológica previa al despliegue definitivo.

4.4. Hardware

4.4.1. Arquitectura del sistema

En cada uno de los dos tanques de acero se instala un sensor de presión sumergible, el cual se conecta mediante un conector XLR a una junction box situada a un costado de cada tanque. Desde cada junction box se tiende un cable de cuatro conductores hacia el nodo central: dos conductores destinados a la alimentación del sensor, un conductor para la señal analógica de salida y un conductor adicional sin usar. En el nodo central se encuentra la tarjeta de adquisición de datos, encargada de digitalizar las señales analógicas provenientes de los sensores de nivel,

así como de medir el voltaje de alimentación del sistema y la presión atmosférica local mediante un sensor de presión adicional conectado a una de las entradas analógicas. A partir de estas mediciones, el nodo de campo realiza el cálculo del nivel de agua de cada tanque y transmite los valores a través del CAN BUS hacia un contenedor central. En dicho contenedor se ubica un nodo receptor de CAN BUS que actúa como mediador entre la red de campo y el sistema de almacenamiento, enviando la información a una base de datos para su visualización en una interfaz de monitoreo en tiempo real y para la consulta histórica de las mediciones. Esta arquitectura permite separar la adquisición y el preprocesamiento local de los datos de las tareas de almacenamiento y visualización, facilitando la operación continua y la escalabilidad del sistema.

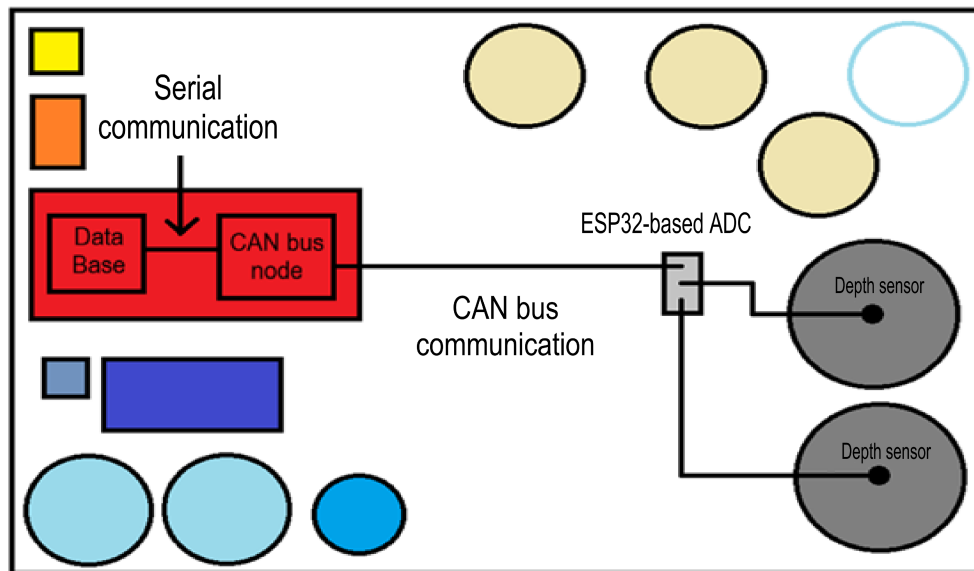


Figura 4.5: Diagrama de Pathfinder. Fuente: elaboración propia con base en [36].

4.4.2. Diseño de la tarjeta de adquisición de datos

La tarjeta de adquisición de datos fue diseñada para operar con un microcontrolador ESP32, utilizando su convertidor analógico-digital (ADC) interno de 12 bits para la digitalización de las señales provenientes de los sensores de presión. Considerando un rango de entrada de 0 a 3.3 V, la resolución de cuantización del ADC se obtiene a través de la Ecuación (4.1),

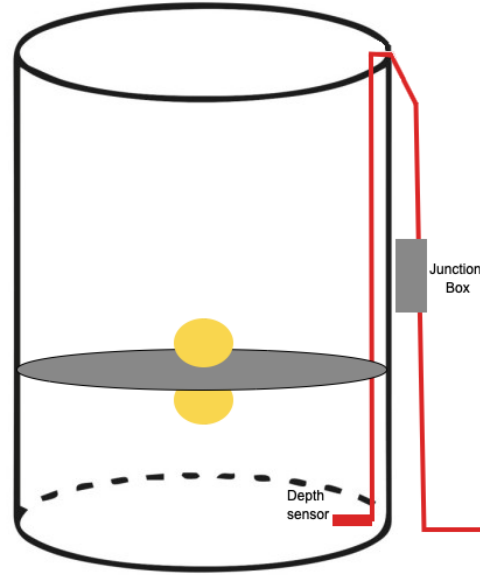


Figura 4.6: Instalación del sensor en el tanque. Fuente: Elaboración propia.

$$\Delta V_{\text{ADC}} = \frac{3.3 \text{ V}}{2^{12}} = 0.8057 \times 10^{-3} \text{ V}, \quad (4.1)$$

lo que corresponde aproximadamente a 0.8 mV por nivel.

Bajo el modelo lineal de transferencia del sensor, la relación entre el voltaje de salida y la presión se expresa mediante una sensibilidad S , definida en la Ecuación (4.2).

$$S = \frac{dV}{dP}. \quad (4.2)$$

De acuerdo con las especificaciones del sensor empleado, la sensibilidad nominal es de

$$S = 20 \text{ mV/kPa}, \quad (4.3)$$

por lo tanto, la mínima variación de presión detectable asociada a un nivel del ADC se define por la Ecuación (4.4),

$$\Delta P = \frac{\Delta V_{\text{ADC}}}{S} = \frac{0.8057 \text{ mV}}{20 \text{ mV/kPa}} = 0.0403 \text{ kPa}, \quad (4.4)$$

o, de forma equivalente,

$$\Delta P \approx 40.3 \text{ Pa}. \quad (4.5)$$

Una vez obtenida la resolución en presión, la conversión a nivel de agua se realiza a partir de la relación hidrostática.

$$P = \rho gh, \quad (4.6)$$

donde ρ es la densidad del agua, g la aceleración de la gravedad y h la altura de la columna de agua. De este modo, la resolución teórica en nivel se obtiene mediante la Ecuación (4.7).

$$\Delta h = \frac{\Delta P}{\rho g}, \quad (4.7)$$

Sustituyendo $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ y $\Delta P = 40.3 \text{ Pa}$, se obtiene la Ecuación (4.8)

$$\Delta h = \frac{40.3}{1000 \cdot 9.81} = 4.1 \times 10^{-3} \text{ m}, \quad (4.8)$$

lo que corresponde aproximadamente a una resolución teórica dada por la Ecuación (4.9)

$$\Delta h \approx 4 \text{ mm} \quad (4.9)$$

en la estimación del nivel de agua.

La alimentación del nodo se realiza mediante un convertidor reductor de tipo buck, con un rango de voltaje de entrada comprendido entre 7 V y 24 V. El voltaje de salida se fija en 5 V mediante una resistencia de realimentación de valor fijo, de acuerdo con la configuración recomendada por el fabricante del convertidor. Esta tensión de 5 V se emplea como alimentación principal de la electrónica del nodo así como de los sensores externos.

Con el objetivo de asegurar la estabilidad de la alimentación de los sensores,

se incorporaron capacitores de desacoplo y filtrado en los puntos de suministro de energía. Adicionalmente, se integraron diodos de supresión de transitorios (TVS) en las líneas de entrada provenientes del exterior, con el fin de proporcionar protección frente a descargas electrostáticas y sobretensiones inducidas. Asimismo, se incluyeron fusibles en las líneas de alimentación de los sensores, destinados a proteger los pines de entrada ante eventos de cortocircuito o sobrecorriente.

Cada señal analógica proveniente de los sensores es acondicionada mediante un filtro pasabaja de primer orden, cuyo propósito es atenuar componentes de alta frecuencia y reducir el acoplamiento de ruido antes de la digitalización. Además, el sistema incorpora la medición de la tensión de alimentación mediante un divisor de voltaje formado por dos resistencias de igual valor, de $100\text{ k}\Omega$ cada una, lo que permite supervisar en tiempo real la tensión suministrada a los sensores.

En la implementación actual, el canal correspondiente al pin 36 del ESP32 se utiliza para la medición del voltaje de alimentación, mientras que los pines 32, 33, 34 y 35 se destinan a la adquisición de las señales analógicas provenientes de los sensores de presión.

Para la comunicación sobre el CAN BUS, la tarjeta integra un controlador externo MCP2515, el cual se comunica con el ESP32 mediante el bus SPI. La transmisión física de los paquetes de datos se realiza a través de un transceptor CAN TJA1050, encargado de adaptar los niveles lógicos del controlador a los niveles diferenciales del bus. Esta configuración permite desacoplar la gestión del protocolo CAN de la capa física, proporcionando mayor robustez frente al ruido eléctrico propio del entorno de operación.

La interconexión entre el nodo de campo y el sistema central se realiza mediante cableado de par trenzado, tanto para las líneas de comunicación CAN como para la distribución de la alimentación del nodo. La asignación de conductores empleada en el cable utilizado se resume en la Tabla 4.1, siguiendo la secuencia de colores del estándar T-568B para conectores RJ45.

La arquitectura general del nodo de adquisición desarrollado se muestra en la Figura 4.7.

En ella se identifican los principales bloques funcionales de la tarjeta, incluyendo el sistema de alimentación basado en un convertidor buck, las etapas de acondicionamiento y adquisición de señales analógicas, el microcontrolador ESP32 encargado

Color del conductor	Señal asignada
B/N	CAN-H
N	CAN-L
B/V	N/A
A	V+
B/A	V+
V	N/A
B/C	GND
C	GND

Tabla 4.1: Asignación de conductores del cable para comunicación CAN y alimentación del nodo de campo.

del procesamiento local de los datos y el subsistema de comunicación CAN conformado por el controlador MCP2515 y el transceptor TJA1050. Asimismo, se ilustran las conexiones con los sensores de presión y con la red de comunicación utilizada para la transmisión de información hacia el sistema central.

La Figura 4.8 presenta las dimensiones generales de la tarjeta electrónica construida y sus principales secciones funcionales implementadas sobre la tarjeta, destacando el módulo de alimentación, el microcontrolador ESP32, el circuito de comunicación CAN y los conectores destinados a la conexión de sensores y alimentación externa. Estas imágenes permiten verificar la correspondencia entre el diseño electrónico propuesto y su implementación física.

El diagrama esquemático completo del circuito se presenta en la Figura 4.9. En este esquema se observan las conexiones eléctricas entre los distintos componentes que integran el nodo, incluyendo los circuitos de protección mediante fusibles y diodos TVS, los filtros pasabaja implementados en las entradas analógicas, el divisor resistivo destinado al monitoreo de la tensión de alimentación y las interfaces de comunicación SPI y CAN utilizadas por el sistema.

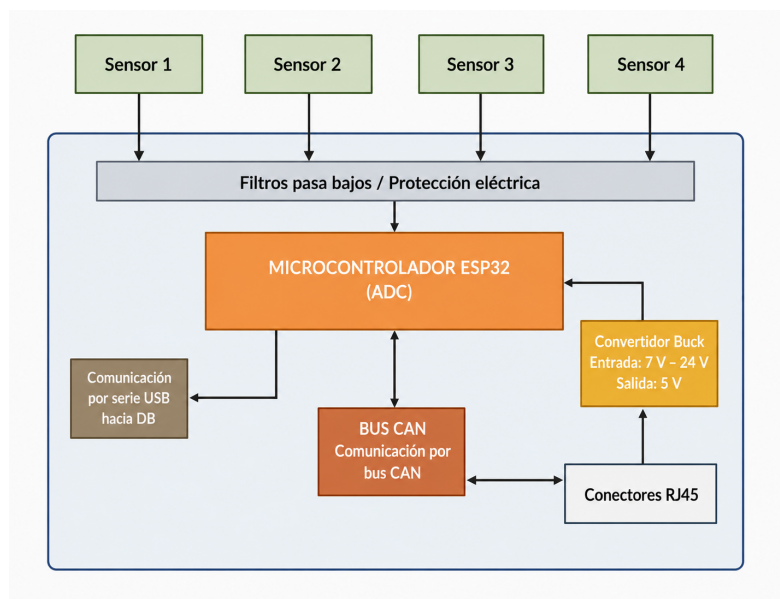


Figura 4.7: Arquitectura del nodo. Fuente: elaboración propia.

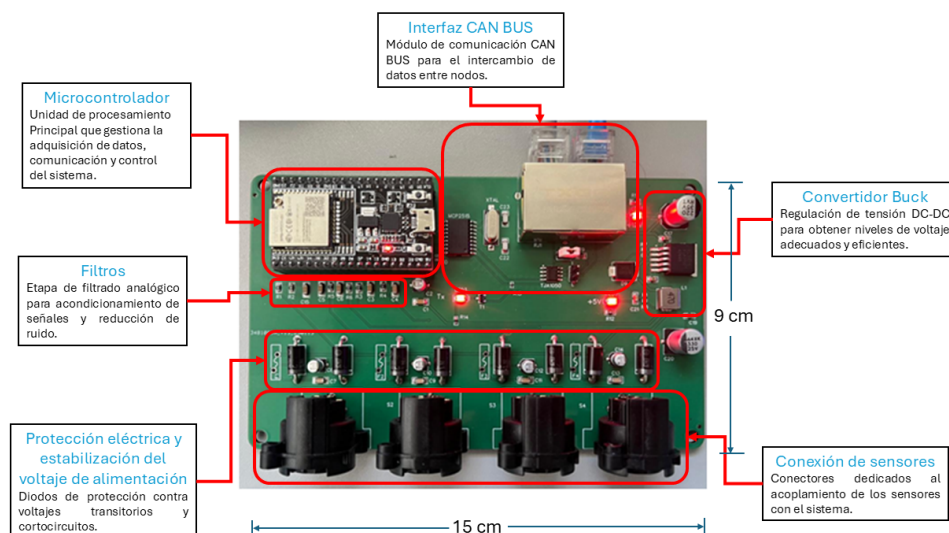
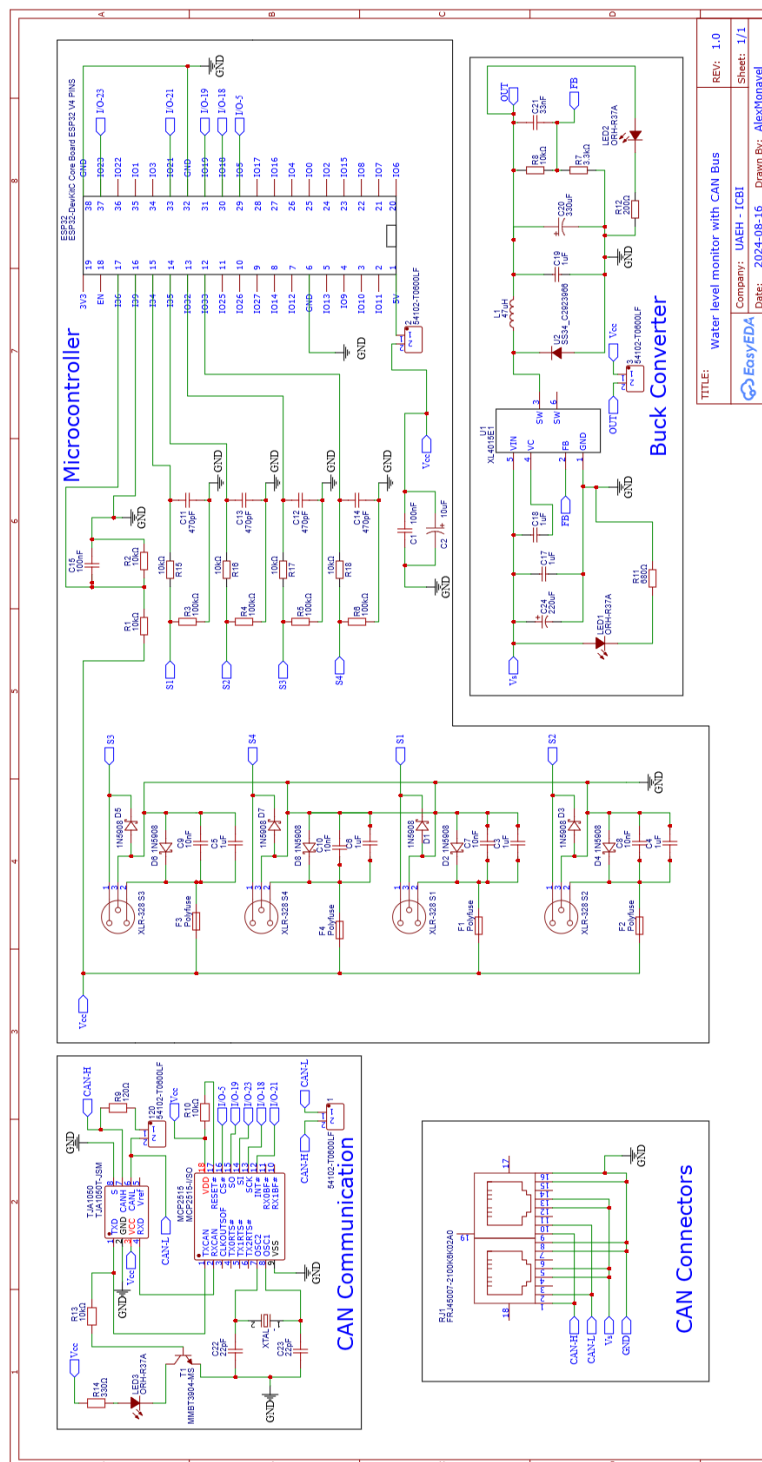


Figura 4.8: Secciones de la PCB.



4.4.3. Firmware del nodo transmisor

El firmware desarrollado para el nodo de adquisición de datos tiene como función principal adquirir las señales provenientes de los sensores de presión, procesarlas para estimar el nivel de agua y transmitir la información al sistema de monitoreo mediante la red CAN BUS.

Al iniciar su ejecución, el programa configura la comunicación serial para tareas de depuración, inicializa el controlador MCP2515 encargado de la comunicación CAN y establece los parámetros de operación de los canales analógicos utilizados para la lectura de los sensores. Una vez completada la etapa de configuración, el sistema entra en un ciclo de operación continuo.

Durante cada ciclo de adquisición se realiza la lectura simultánea de las señales analógicas correspondientes al voltaje de alimentación de los sensores, las salidas de los sensores de presión y la señal del sensor de referencia. Con el propósito de reducir el efecto del ruido eléctrico y mejorar la estabilidad de las mediciones, se obtiene un conjunto de muestras para cada canal y posteriormente se calcula su valor promedio.

El flujo general de operación implementado en el firmware se muestra en la Figura 4.10. En ésta se describen las etapas principales de inicialización, adquisición de datos, verificación del estado de los sensores, cálculo del nivel de agua, empaquetado de la información y transmisión de las mediciones mediante la red CAN BUS.

Como se observa en la Figura 4.10, una vez obtenidas las mediciones, el sistema verifica que las señales provenientes de los sensores se encuentren dentro de los rangos de operación esperados. Cuando la validación es satisfactoria, se realiza el cálculo del nivel de agua mediante las ecuaciones de calibración correspondientes. En caso contrario, el sistema registra la condición de falla y continúa con el proceso de transmisión incorporando la información de diagnóstico.

Posteriormente, las mediciones adquiridas y el estado de cada sensor son empaquetados en tramas CAN con identificadores específicos y transmitidos a través de la red para su almacenamiento, visualización o procesamiento posterior. Este procedimiento se repite periódicamente durante toda la operación del sistema con un intervalo de un segundo entre ciclos de adquisición.

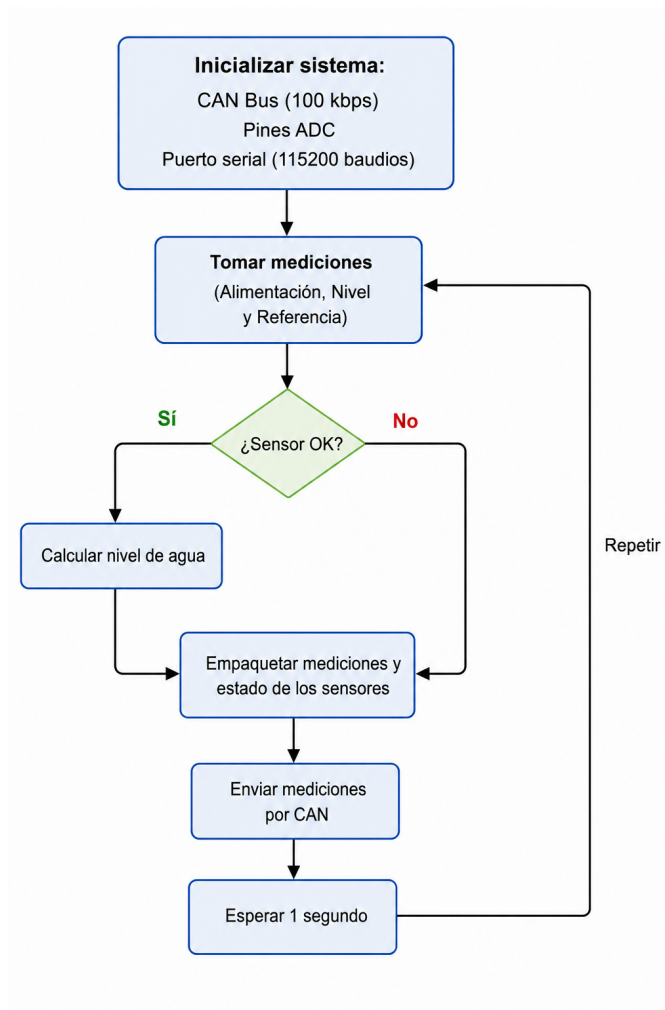


Figura 4.10: Diagrama de flujo para la adquisición y envío de datos implementado en el nodo transmisor.

Los algoritmos implementados para la adquisición de datos, validación de sensores, cálculo del nivel de agua y transmisión CAN se presentan con mayor detalle en el B.1.

4.4.4. Firmware del nodo receptor

El firmware del nodo receptor tiene como función principal recibir las mediciones transmitidas por la red CAN BUS, visualizarlas en una interfaz gráfica local, retransmitirlas mediante comunicación serial para su almacenamiento en una computadora y enviarlas periódicamente a la plataforma ThingSpeak a través de

una conexión WiFi.

Durante la etapa de inicialización se configuran la pantalla TFT, el controlador MCP2515 para la comunicación CAN, la interfaz serial y los parámetros de red inalámbrica almacenados en memoria no volátil. Si no es posible establecer una conexión WiFi válida, el sistema habilita un portal de configuración para el ingreso de nuevas credenciales de acceso.

El flujo general de operación implementado en el firmware se muestra en el diagrama de la Figura 4.11.

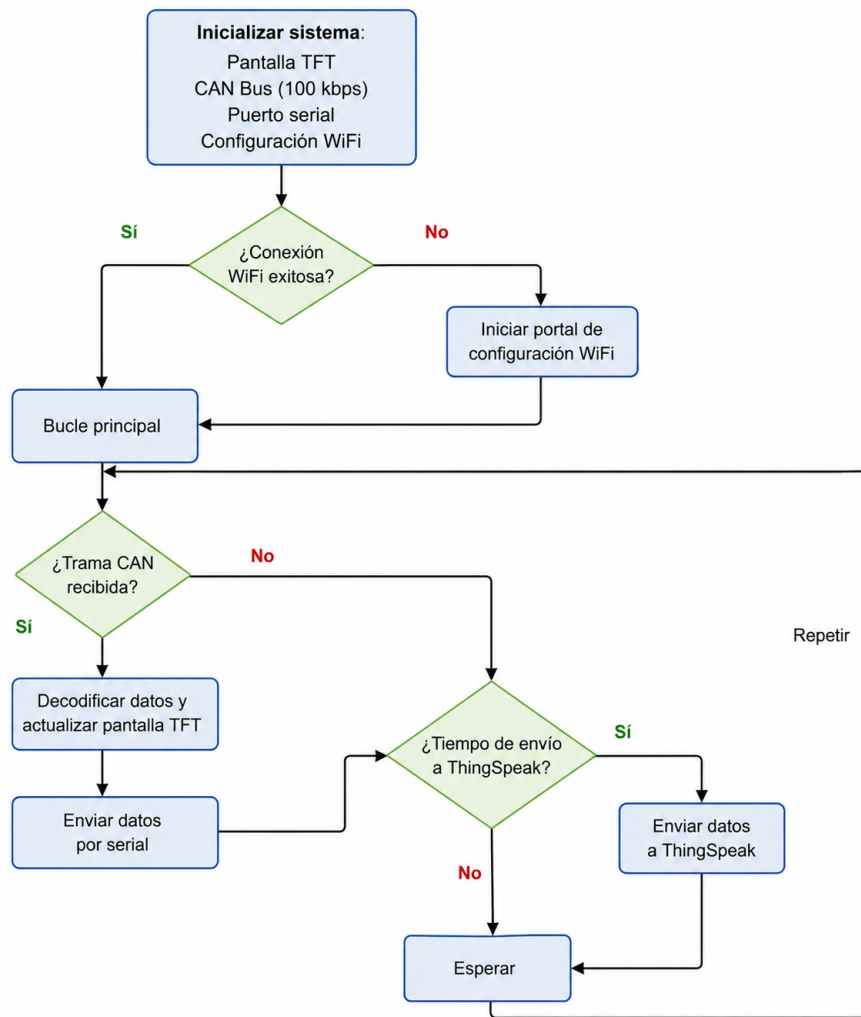


Figura 4.11: Diagrama de flujo del firmware implementado en el nodo receptor.

Como se observa en el diagrama anterior, el nodo receptor permanece en ejecución continua supervisando la recepción de mensajes CAN provenientes de los

nodos transmisores. Cuando se recibe una trama válida, la información es decodificada y utilizada para actualizar la interfaz gráfica mostrada en la pantalla TFT, permitiendo visualizar en tiempo real los niveles de agua, voltajes de alimentación y estados de los sensores.

De forma simultánea, las mediciones recibidas son transmitidas mediante el puerto serial para su almacenamiento y procesamiento en una computadora local. Adicionalmente, cuando existe conectividad WiFi, el sistema realiza el envío periódico de los datos a la plataforma ThingSpeak para su monitoreo remoto.

El firmware también incorpora mecanismos de supervisión que permiten detectar la pérdida de comunicación CAN, fallas en la conectividad inalámbrica y la ausencia de datos provenientes de los nodos sensores. Los algoritmos implementados para la recepción de tramas CAN, actualización de la interfaz gráfica, gestión de la conectividad WiFi y transmisión de datos a ThingSpeak se presentan con mayor detalle en B.2.

4.4.5. Interfaz gráfica y sistema de almacenamiento de datos

Como parte del sistema de monitoreo se desarrolló una aplicación de escritorio en Python para la adquisición, visualización y almacenamiento de los datos generados por los nodos de medición. La aplicación establece comunicación serial con el nodo maestro, recibe las lecturas provenientes de los sensores de presión y muestra el nivel de agua correspondiente en cada detector.

La interfaz gráfica permite visualizar en tiempo real el estado de múltiples tanques mediante indicadores gráficos de nivel, así como mostrar la evolución temporal de las mediciones a través de gráficas actualizadas continuamente (ver Figura 4.12).

Para el almacenamiento local de la información se implementó una base de datos SQLite, en la cual se registran la fecha y hora de cada medición, el identificador del sensor, el voltaje adquirido y el nivel de agua calculado. El uso de una base de datos relacional permite mantener un historial completo de las mediciones y simplifica las tareas de consulta, análisis y respaldo de la información.

Adicionalmente, la aplicación incorpora herramientas para la exportación de los registros a archivos en formato CSV, permitiendo su análisis posterior mediante

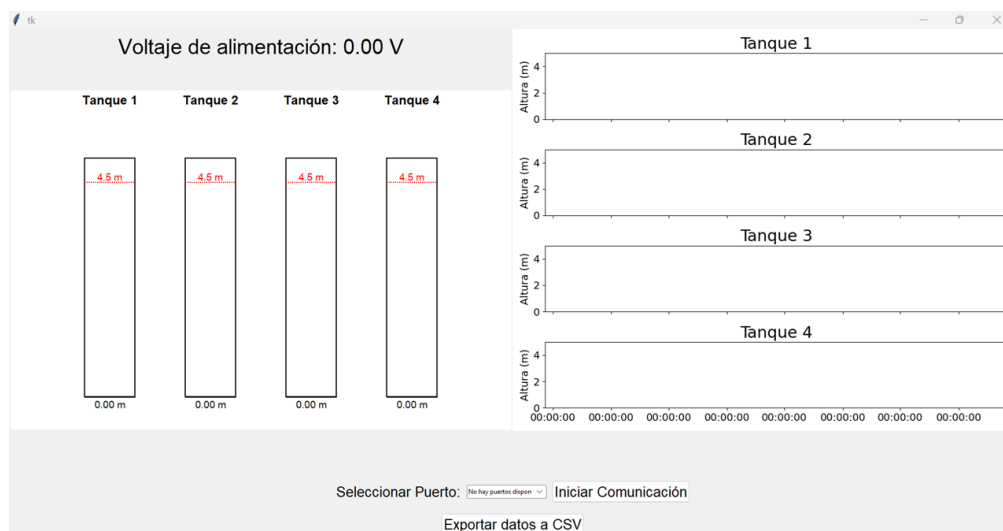


Figura 4.12: Captura de pantalla de la interfaz gráfica.

software externo. Esta arquitectura proporciona una solución integrada para la adquisición, visualización y almacenamiento de datos durante las etapas de desarrollo, calibración y validación experimental del sistema.

4.5. Calibración

4.5.1. Calibración de los sensores

Para la calibración de los sensores se propone un montaje como el mostrado en la Figura 4.13. Éste consiste en un tubo vertical de PVC de 1.5 m de altura. Desde el fondo del tubo se conecta una manguera transparente, la cual se dispone de manera paralela al tubo en su parte exterior, permitiendo visualizar el nivel de agua.

Se colocan marcas cada 10 cm a lo largo de la manguera, comenzando desde la parte inferior. Posteriormente, se agrega agua hasta alcanzar la primera marca y se mide el voltaje registrado por el sensor, previamente colocado en el fondo del tubo. Este procedimiento se repite de manera incremental, añadiendo agua hasta alcanzar las marcas subsiguientes y registrando el voltaje correspondiente en cada nivel, con el fin de caracterizar el comportamiento del sensor en función de la altura de la columna de agua.

De manera simultánea, se mide el voltaje de un sensor externo encargado de



Figura 4.13: Montaje para calibración de los sensores.

registrar la presión atmosférica, así como el voltaje de alimentación de ambos sensores.

Posteriormente, de acuerdo con la Ecuación (3.23), se calcula la variable reducida:

$$V = \frac{V_{h2o} - V_{air}}{V_s}. \quad (4.10)$$

A partir de esta variable, se realiza un ajuste lineal para determinar las constantes de calibración en la siguiente relación:

$$h = mV + b, \quad (4.11)$$

donde h es el nivel de agua, V es la variable reducida, y m y b son las constantes de calibración asociadas a cada sensor.

Finalmente, se realizan múltiples mediciones en cada punto para obtener una mejor estimación de los valores antes de llevar a cabo el ajuste lineal.

4.5.2. Calibración del ADC del ESP32

Para garantizar que el conversor analógico-digital (ADC) del ESP32 registre valores precisos, se realizó una calibración utilizando un multímetro de precisión como referencia y un montaje experimental como el que se muestra en la Figura 4.14.

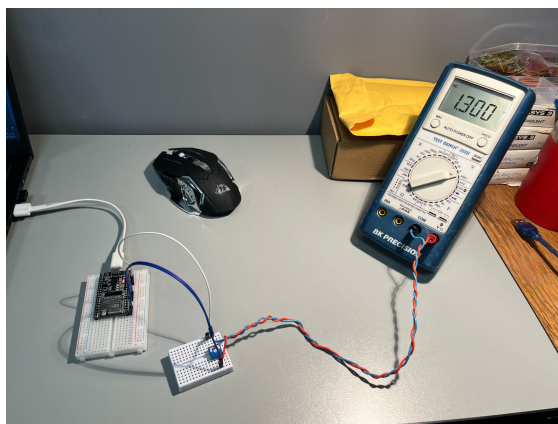


Figura 4.14: Montaje experimental para la calibración del ADC del ESP32 con un multímetro de precisión.

El montaje consiste en un potenciómetro de precisión de 50 k Ω cuyos extremos se conectan a tierra y a una fuente de +3.3 V, mientras que el terminal central se conecta a un pin del ADC1 del ESP32. El esquemático de conexiones se presenta en la Figura 4.15.

Se realizaron mediciones en todo el rango de voltaje del ADC, desde 0 V hasta 3.3 V, con incrementos de 100 mV. En cada punto de medición, se ajustó el potenciómetro hasta alcanzar el valor deseado según la lectura del multímetro, registrando simultáneamente el valor leído por el ESP32. Para mejorar la precisión, se realizaron múltiples mediciones en cada punto y posteriormente se ajustaron los datos mediante un modelo lineal.

El algoritmo implementado en el ESP32 promedia 200 lecturas del ADC tomadas cada 10 ms, de modo que se obtiene un valor de voltaje estable aproximadamente cada 2 segundos. El pseudocódigo correspondiente se muestra en el Algoritmo 1.

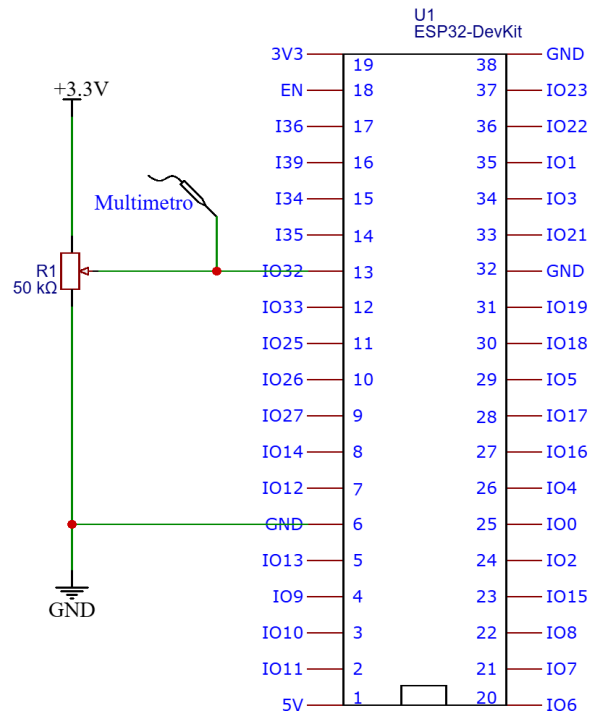


Figura 4.15: Diagrama de conexiones entre el potenciómetro, el ESP32 y el multímetro de referencia. Fuente: elaboración propia.

Algoritmo 1: Lectura y promedio de voltaje del ADC1 del ESP32.

Input: Pin ADC: `analogPin = 32`, Número de muestras: `numSamples = 200`,
Retardo: `delayMs = 10 ms`

Output: Voltaje promedio registrado por el ADC

1 Función Setup():

- 2 | Inicializar comunicación serial a 115200 bps;
- 3 | Configurar resolución del ADC a 12 bits;

4 Función Loop():

- 5 | `voltageSum ← 0.0;`
- 6 | **for** $i \leftarrow 0$ **to** `numSamples - 1` **do**
- 7 | `rawValue ← LeerADC(analogPin);`
- 8 | `voltage ← (rawValue / 4095.0) * 3.3;`
- 9 | `voltageSum ← voltageSum + voltage;`
- 10 | `Esperar(delayMs);`
- 11 | **end**
- 12 | `averageVoltage ← voltageSum / numSamples;`
- 13 | `averageVoltage ← Redondear(averageVoltage, 3 decimales);`
- 14 | `Imprimir(averageVoltage);`

4.6. Medición del offset entre sensores

Con el propósito de evaluar la estabilidad de los sensores y analizar las diferencias de offset entre dispositivos del mismo modelo, se realizó una prueba experimental utilizando cinco sensores de presión absoluta MPX4250AP expuestos simultáneamente a presión atmosférica. Durante un periodo de varios días se registró continuamente el voltaje de salida de cada sensor, permitiendo observar las variaciones asociadas a los cambios naturales de presión atmosférica a lo largo del día. Para medir el voltaje de los sensores se utilizará el ADC del ESP32 previamente calibrado.

4.7. Prueba en laboratorio

Con el objetivo de evaluar el desempeño, estabilidad y confiabilidad del sistema de medición desarrollado, se diseñó una prueba experimental controlada en laboratorio (Figura 4.16.). Esta prueba tuvo como finalidad analizar la posible deriva temporal de los sensores de presión, así como verificar la integridad del sistema de adquisición, transmisión y almacenamiento de datos. Adicionalmente, se estudió el comportamiento de las mediciones bajo diferentes esquemas de procesamiento y calibración, considerando los casos:

- Sin corrección de presión atmosférica,
- Con corrección de presión atmosférica pero sin corrección de offset,
- Con corrección atmosférica y corrección de offset,

utilizando tanto una constante de calibración obtenida experimentalmente como una constante teórica calculada a partir de las características nominales del sensor. En todos los casos, el nivel de agua esperado dentro del contenedor fue de aproximadamente 29 cm, valor utilizado como referencia para evaluar la precisión y estabilidad de las mediciones obtenidas.

El montaje experimental consistió en un contenedor plástico cilíndrico de color azul, utilizado comúnmente para almacenamiento de líquidos, el cual fue llenado con agua hasta alcanzar un nivel estático constante. En el interior del contenedor se colocaron dos sensores de presión. Los sensores permanecieron sumergidos de

manera continua durante un periodo de entre 48 y 72 horas, durante el cual se registraron mediciones de manera periódica. El objetivo principal de este monitoreo prolongado fue identificar posibles efectos de deriva, ruido o inestabilidad en la señal de salida de los sensores a lo largo del tiempo.

De manera paralela, se evaluó el desempeño del sistema de comunicación basado en el protocolo CAN BUS, verificando la correcta transmisión de los datos adquiridos desde los nodos de medición hacia el sistema central. Se prestó especial atención a la integridad de los mensajes, la ausencia de pérdidas de información y la consistencia temporal de los datos transmitidos. Asimismo, se validó el correcto almacenamiento de la información en una base de datos local, asegurando que los registros se generaran de forma continua, ordenada y sin inconsistencias. Este aspecto resulta fundamental para el análisis posterior de los datos y la trazabilidad de las mediciones.

Finalmente, se monitoreó la estabilidad del sistema de alimentación eléctrica de los sensores y del sistema de adquisición, verificando que las condiciones de voltaje se mantuvieran dentro de los rangos de operación especificados. Esto permitió descartar variaciones en la señal atribuibles a fluctuaciones en la fuente de alimentación.

En conjunto, esta prueba de laboratorio proporciona una base sólida para validar el comportamiento del sistema en condiciones controladas, permitiendo identificar posibles fuentes de error y garantizar la confiabilidad de las mediciones antes de su implementación en campo.

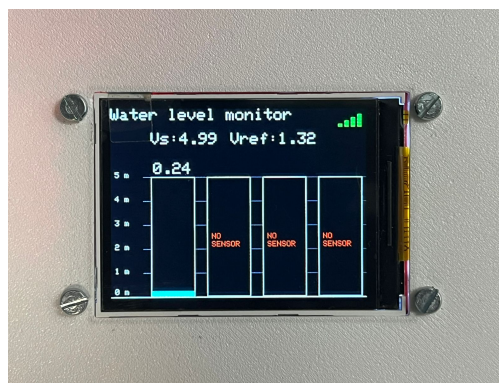
4.8. Prueba de campo

Con el propósito de validar el funcionamiento del sistema en condiciones reales de operación, se realizó una prueba de campo en una cisterna destinada al abastecimiento de agua de uso doméstico, la cual alimenta un tinaco principal (Figura 4.17). Este entorno permite evaluar el desempeño del sistema durante los ciclos normales de llenado y vaciado del tanque, así como durante periodos en los que el nivel del agua permanece prácticamente constante.

La red de monitoreo estuvo conformada por un nodo transmisor y un nodo receptor comunicados mediante el protocolo CAN BUS, como se muestra en la Figura



(a) Conexión entre nodos y sensor



(b) Pantalla local para visualización

Figura 4.16: Montaje experimental en laboratorio para probar el monitoreo de nivel de agua.



Figura 4.17: Montaje experimental para la prueba en un entorno real.

4.18. El nodo transmisor incorporó dos sensores de presión absoluta MPX4250AP: uno destinado a medir la presión hidrostática en el fondo de la cisterna y otro utilizado como sensor de referencia para registrar la presión atmosférica. El nodo receptor recibió las mediciones y las transmitió mediante una conexión WiFi a la plataforma ThingSpeak, donde los datos fueron registrados automáticamente cada 15 s.

A diferencia de las pruebas realizadas en laboratorio, el sistema permaneció expuesto a las condiciones ambientales propias del sitio, incluyendo variaciones de temperatura, humedad y presión atmosférica. La prueba tuvo una duración de dos semanas y permitió evaluar la estabilidad de las mediciones, la confiabilidad de la comunicación mediante CAN BUS y el almacenamiento continuo de la información



(a) Nodo receptor.



(b) Nodo transmisor.

Figura 4.18: Red de monitoreo instalada en una cisterna doméstica.

en la plataforma ThingSpeak bajo condiciones reales de operación.

Capítulo 5

Resultados

5.1. Calibración

5.1.1. Calibración de los sensores

Después de realizar un ajuste lineal a los datos experimentales, se encontró que el sensor MPX4250AP presenta un comportamiento lineal en el intervalo de 0 a 1.5 m de nivel de agua, con coeficientes de determinación de $R_1^2 = 0.99019$ y $R_2^2 = 0.99072$ para los sensores 1 y 2, respectivamente (Figuras 5.1 y 5.2).

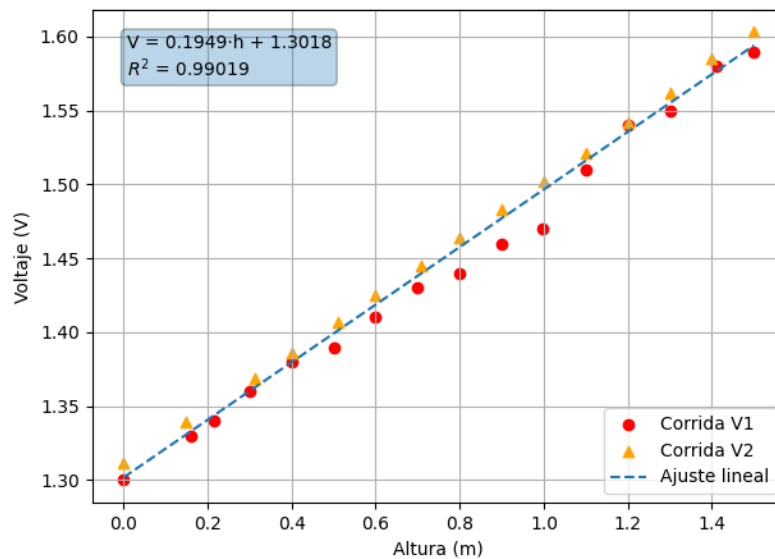


Figura 5.1: Datos experimentales del sensor 1.

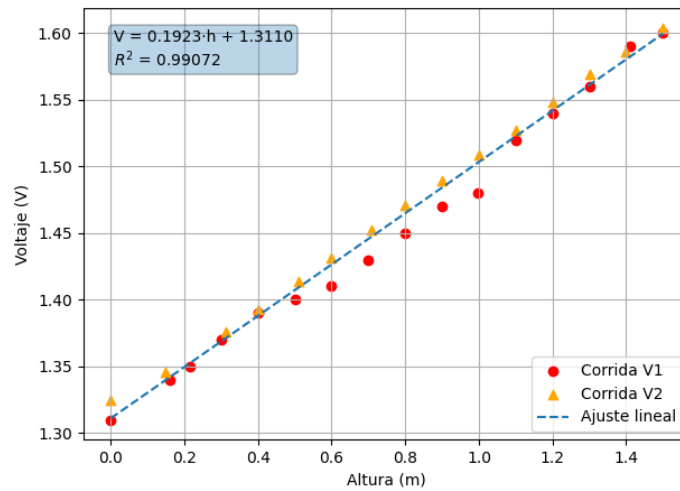


Figura 5.2: Datos experimentales del sensor 2.

Las pruebas fueron realizadas a una altitud aproximada de 2400 m s.n.m., correspondiente a una presión atmosférica de 76 kPa. Debido a que el MPX4250AP es un sensor de presión absoluta, dicha presión atmosférica contribuye directamente al voltaje de offset observado en ambos sensores.

Según la gráfica de la Figura 5.3, el sensor 1 presenta una sensibilidad de 0.1949 V/m y un offset de 1.3018 V, mientras que el sensor 2 presenta una sensibilidad de 0.1923 V/m y un offset de 1.311 V, como se muestra en la gráfica de la Figura 5.4.

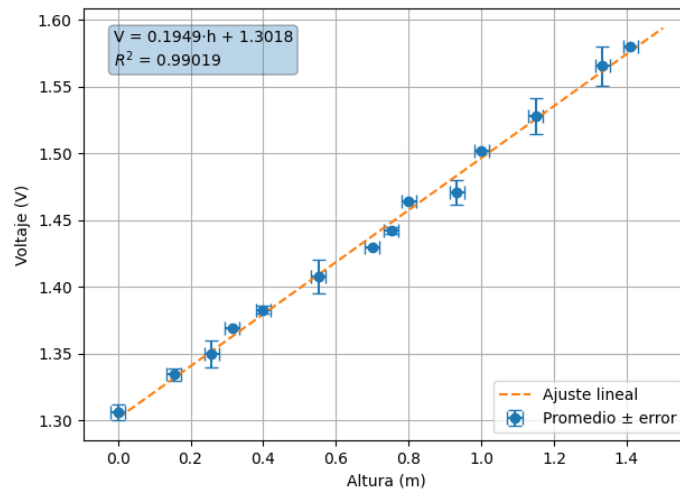


Figura 5.3: Sensibilidad del sensor 1.

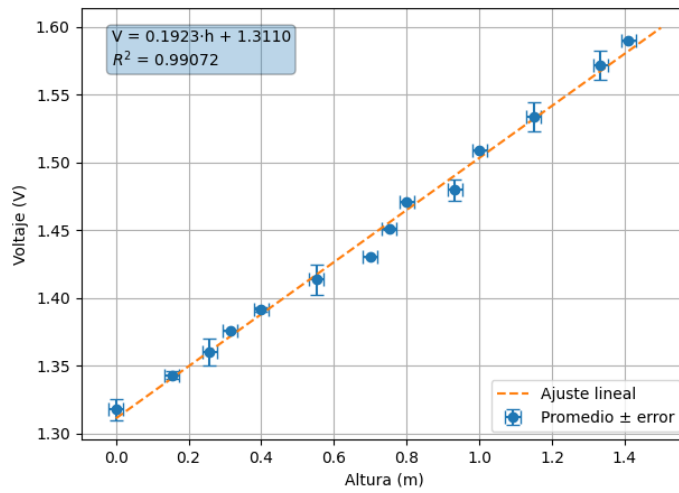


Figura 5.4: Sensibilidad del sensor 2.

Si se convierte la sensibilidad a unidades de mV/kPa, partiendo de la Ecuación 3.4, se tiene que:

$$\frac{dP}{dh} = \rho g = 997 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 9.780 \text{ kPa/m}, \quad (5.1)$$

por lo tanto, la sensibilidad del sensor 1 corresponde a:

$$\frac{0.1949 \text{ V/m} \times 1000 \text{ mV/V}}{9.780 \text{ kPa/m}} = 19.93 \text{ mV/kPa}, \quad (5.2)$$

mientras que la sensibilidad del sensor 2 es de:

$$\frac{0.1923 \text{ V/m} \times 1000 \text{ mV/V}}{9.780 \text{ kPa/m}} = 19.66 \text{ mV/kPa}. \quad (5.3)$$

Tomando como referencia la sensibilidad típica reportada por el fabricante para el sensor MPX4250AP, correspondiente a 20 mV/kPa (3.2.3), el error porcentual para el sensor 1 es de:

$$\text{Error}_{S1} = \left| \frac{19.93 - 20}{20} \right| \times 100 = 0.35 \%, \quad (5.4)$$

mientras que para el sensor 2 se obtuvo:

$$\text{Error}_{S2} = \left| \frac{19.66 - 20}{20} \right| \times 100 = 1.70 \%, \quad (5.5)$$

Los resultados muestran que ambos sensores presentan sensibilidades cercanas

al valor especificado por el fabricante, con errores menores al 2 %, lo que indica un comportamiento consistente y adecuado para aplicaciones de medición de nivel de agua.

Con el objetivo de obtener la constante de calibración necesaria para convertir la medición de voltaje en nivel de agua, se representó el nivel de agua como función de la variable reducida definida en la Ecuación 4.10. Posteriormente, se realizó un ajuste lineal a los datos experimentales, donde la pendiente obtenida corresponde a la constante de calibración del sistema (Figuras 5.5 y 5.6).

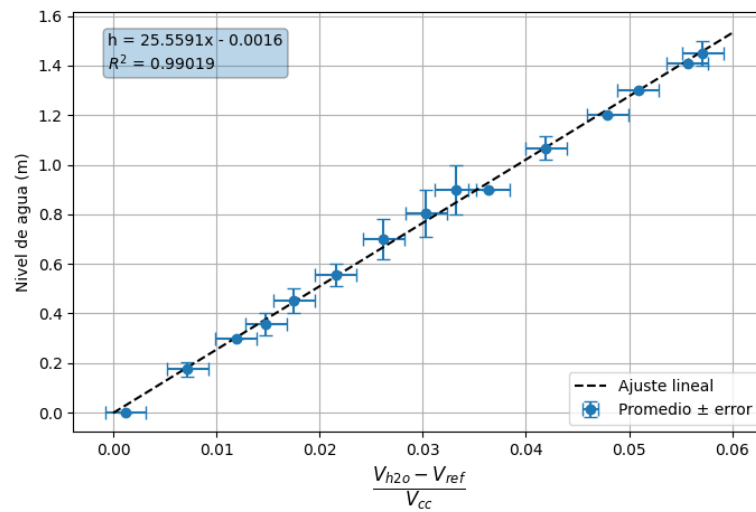


Figura 5.5: Calibración del sensor 1.

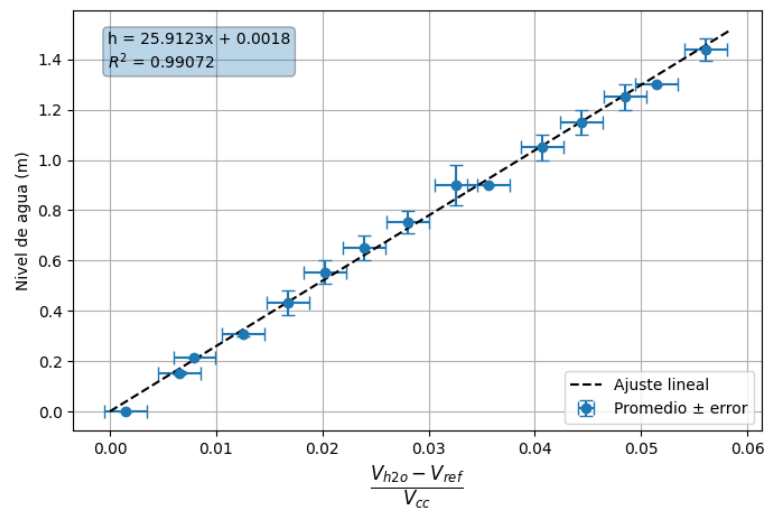


Figura 5.6: Calibración del sensor 2.

Se observa que la constante de calibración para el sensor 1 es 25.5591, mientras que para el sensor 2 es 25.9123. Estos valores difieren del valor teórico de la Ecuación (3.23), igual a 25.56, en un 0.004 % y 1.38 %, respectivamente. Debido a la relación lineal entre la altura y la constante de calibración, estas discrepancias representan un error sistemático aproximado de la misma magnitud en la estimación de altura. Para un rango de medición de 0 a 1.5m, esto corresponde aproximadamente a errores máximos de $\pm 0.006\text{cm}$ para el sensor 1 y $\pm 2.1\text{cm}$ para el sensor 2.

5.1.2. Calibración del ADC del ESP32

La Figura 5.7 muestra la respuesta del ADC del ESP32 configurado a 12 bits, donde se compara el voltaje medido por el ADC con el voltaje real aplicado. Puede observarse un comportamiento aproximadamente lineal en la región intermedia del rango de operación, con un coeficiente de determinación elevado ($R^2 = 0.9973$); sin embargo, también se aprecian desviaciones respecto al comportamiento lineal ideal en los extremos del rango, particularmente para valores cercanos a 0 V y próximos al límite superior de 3.3 V. Este efecto es consistente con las no idealidades reportadas para el ADC interno del ESP32, cuya linealidad disminuye cerca de los límites de conversión.

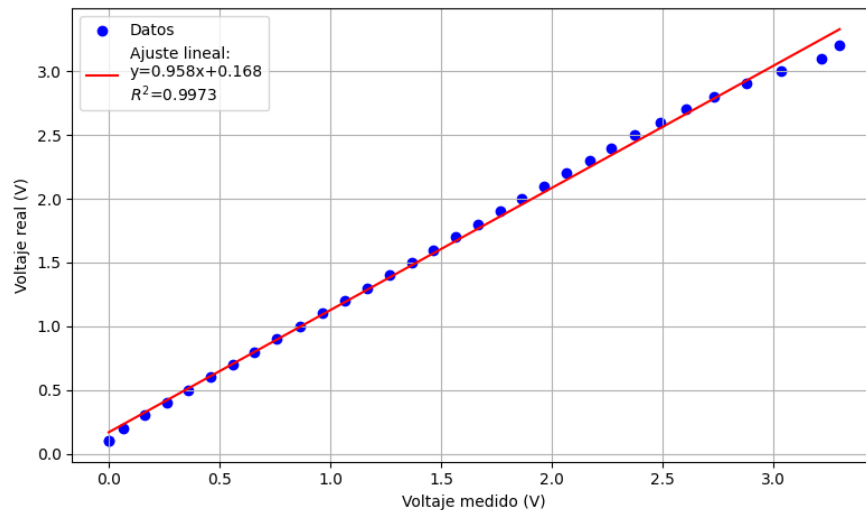


Figura 5.7: ADC a 12 bits del ESP32.

Debido a ello, para el proceso de calibración y adquisición de datos del sistema se seleccionó únicamente la región comprendida aproximadamente entre 0.5

V y 2.3 V (Figura 5.8), intervalo en el que se espera opere la señal proveniente del sensor de presión y donde la respuesta del ADC presenta un comportamiento significativamente más lineal y estable.

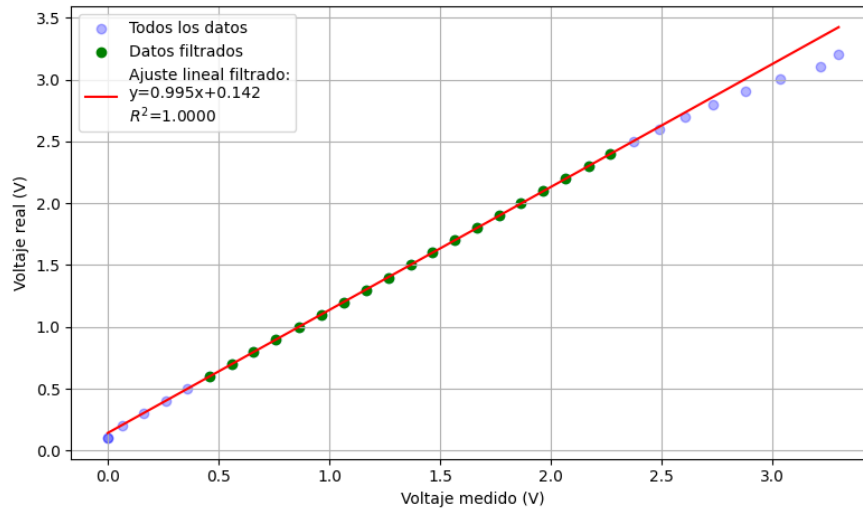


Figura 5.8: Ajuste lineal en el rango de 0.5 a 2.3 volts.

Al efectuar el ajuste lineal únicamente sobre esta región, la calibración del sistema mostró una mejora significativa, obteniéndose una respuesta prácticamente ideal, con una pendiente cercana a la unidad y una correlación notablemente superior respecto al ajuste realizado sobre el rango completo. Esto indica que, dentro de la ventana de operación seleccionada, el ADC presenta un comportamiento suficientemente lineal para las necesidades del sistema de monitoreo, permitiendo reducir considerablemente el error sistemático asociado a la conversión analógica-digital y mejorando la precisión de las mediciones de nivel de agua.

5.2. Medición de offset entre sensores

La Figura 5.9 muestra la serie temporal de los cinco sensores de presión durante el periodo de adquisición analizado. Puede observarse que todos los sensores presentan un comportamiento altamente correlacionado, manteniendo la misma tendencia temporal y respondiendo de manera simultánea a las variaciones de la presión atmosférica. Asimismo, se aprecia la presencia de una oscilación periódica con un periodo aproximado de 12 horas, caracterizada por la aparición de dos máximos y

dos mínimos por día.

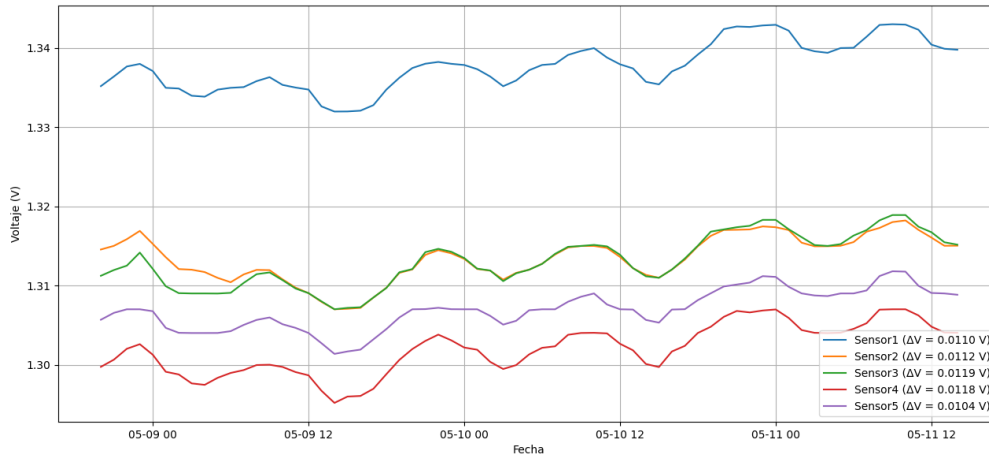


Figura 5.9: Medición de la variación en el voltaje de salida de los sensores debido a cambios en la presión atmosférica.

Sensor	Voltaje mínimo [V]	Voltaje máximo [V]	Variación ΔV [V]
Sensor 1	1.3320	1.3430	0.0110
Sensor 2	1.3070	1.3182	0.0112
Sensor 3	1.3070	1.3189	0.0119
Sensor 4	1.2952	1.3070	0.0118
Sensor 5	1.3014	1.3118	0.0104

Tabla 5.1: Variación de voltaje observada en los sensores durante el periodo de medición.

Los resultados mostrados en la Tabla 5.1 evidencian que todos los sensores presentan variaciones de voltaje del mismo orden de magnitud, con diferencias máximas cercanas a los 11 mV. Este comportamiento es consistente con las condiciones experimentales, ya que todos los sensores fueron sometidos simultáneamente al mismo entorno de medición y adquiridos utilizando la misma calibración del ADC del ESP32.

Las diferencias observadas en los niveles absolutos de voltaje corresponden principalmente a offsets inherentes al proceso de fabricación de cada sensor y a tolerancias internas de sus componentes electrónicos. Sin embargo, la similitud en las variaciones ΔV indica que la respuesta dinámica de los sensores es consistente y reproducible, lo cual respalda la estabilidad del sistema de adquisición implementado.

5.3. Prueba en laboratorio

La Figura 5.10 muestra la estabilidad del voltaje de alimentación suministrado a los sensores durante la prueba de laboratorio. A lo largo del periodo de medición se observó un comportamiento altamente estable, con un valor promedio de alimentación de aproximadamente 4.9926 V y una desviación estándar de únicamente 0.0003 V. La reducida dispersión de los datos alrededor de la media indica que la fuente de alimentación mantuvo condiciones prácticamente constantes durante toda la adquisición, minimizando la influencia de fluctuaciones eléctricas sobre la respuesta de los sensores.

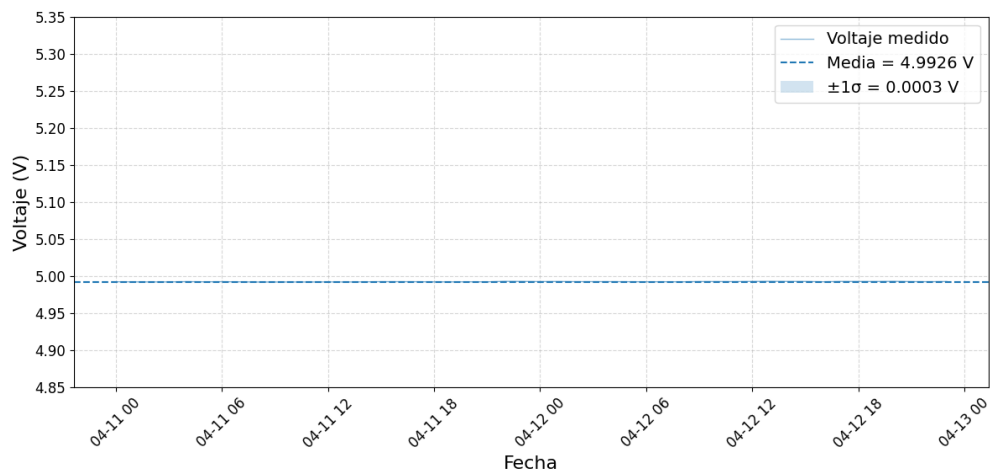


Figura 5.10: Estabilidad en el voltaje de alimentación.

La gráfica de la Figura 5.11 muestra la comparación temporal entre el voltaje medido por el sensor de referencia y el sensor de nivel durante un periodo aproximado de cinco días. Se observa que ambos sensores presentan un comportamiento estable, con variaciones pequeñas y tendencias similares a lo largo del tiempo, lo que sugiere una respuesta consistente del sistema de medición. El sensor de referencia mantiene valores promedio alrededor de 1.3154 V, mientras que el sensor de nivel registra valores ligeramente superiores, con un promedio cercano a 1.3553 V. Aunque existen fluctuaciones leves en ambas señales, estas permanecen dentro de un rango reducido, indicando buena estabilidad eléctrica y una respuesta continua de los sensores durante el monitoreo.

Aunque el nivel de agua se mantuvo constante durante toda la prueba, la con-

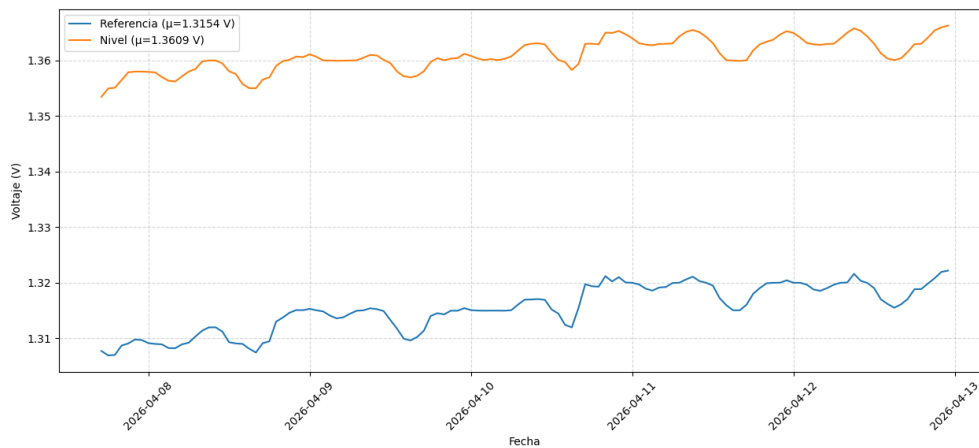


Figura 5.11: Voltajes de los sensores en condiciones controladas.

versión de voltaje a nivel mostró una ligera disminución aparente (ver Figura 5.20). Este comportamiento probablemente se debe a una deriva diferencial entre el sensor de nivel y el sensor de referencia. El sensor de referencia se encontraba conectado directamente a la PCB mediante los pines del socket y no contaba con el mismo acondicionamiento eléctrico implementado en el sensor de nivel, particularmente en términos de filtrado y resistencia pull-down. Estas diferencias pueden introducir pequeñas variaciones de offset, susceptibilidad al ruido o cambios térmicos en la lectura analógica, que al propagarse durante el cálculo del nivel producen una tendencia artificial en la medición final. Dado que las variaciones observadas son pequeñas y consistentes con errores de instrumentación, se considera que la disminución registrada no corresponde a un cambio real en el nivel del agua.

La Figura 5.13 muestra la comparación entre las señales del sensor de referencia y el sensor de nivel después de aplicar una normalización de offset, de modo que ambas compartan el mismo valor promedio. Tras este ajuste, se observa que ambas señales presentan una respuesta temporal muy similar, con fluctuaciones y variaciones que ocurren de manera prácticamente simultánea. Este comportamiento indica una fuerte correlación entre ambos canales de medición y sugiere que las variaciones observadas están dominadas principalmente por efectos comunes del sistema electrónico, tales como deriva térmica, variaciones del ADC, ruido eléctrico o cambios en la alimentación, más que por cambios reales en el nivel del agua. Asimismo, puede apreciarse una pequeña diferencia residual entre ambas señales, atribuible posiblemente a diferencias en el acondicionamiento eléctrico de cada ca-

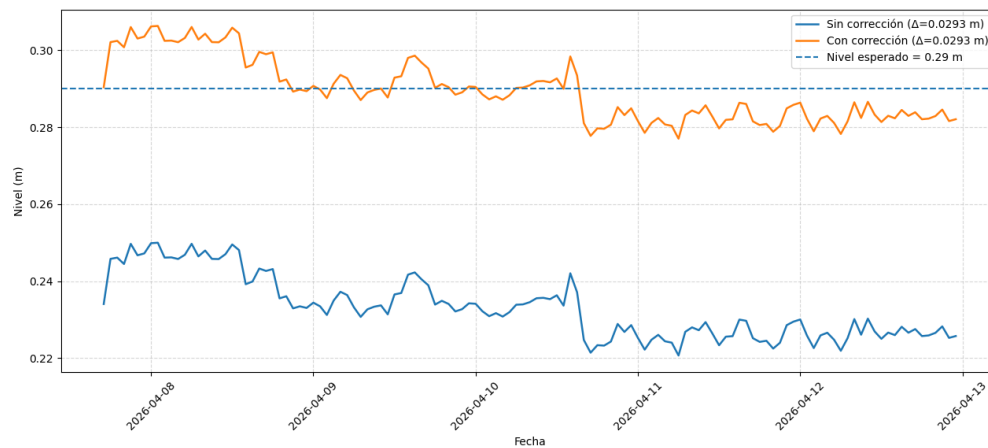


Figura 5.12: Medición del nivel de agua con deriva.

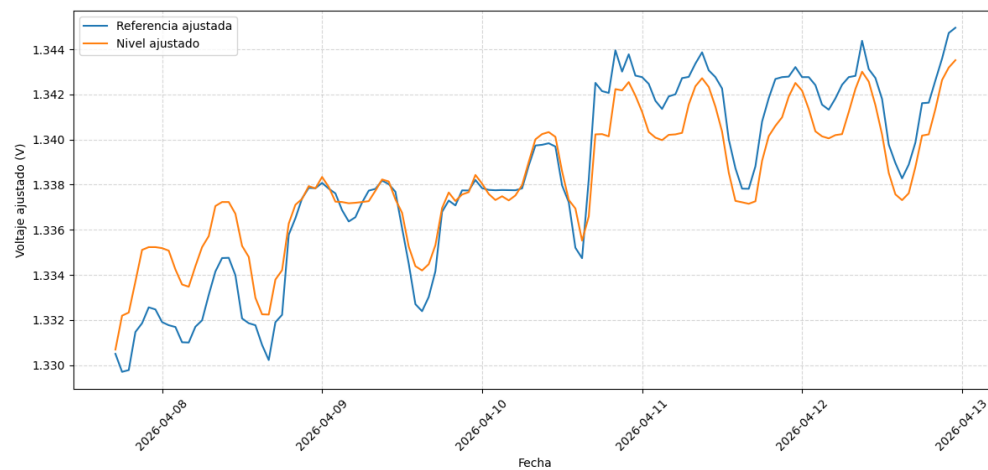


Figura 5.13: Señales con offset corregido.

nal, ya que el sensor de referencia no cuenta con el mismo filtrado ni configuración de resistencia pull-down que el sensor de nivel.

5.4. Medición de consumo energético del sistema

Con el fin de evaluar el consumo energético del sistema desarrollado, se realizaron mediciones de corriente en la entrada del convertidor Buck de cada uno de los nodos. Posteriormente, se determinó el consumo del sistema completo, conformado por el nodo transmisor, el nodo receptor y cuatro sensores de presión MPX4250AP comunicados mediante el protocolo CAN BUS. Todas las mediciones se realizaron

con una alimentación de 12 V, por lo que la potencia eléctrica consumida se obtuvo mediante la Ecuación (5.6).

$$P = VI. \quad (5.6)$$

5.4.1. Nodo receptor

La Figura 5.14 muestra la medición de corriente correspondiente al nodo receptor. En este caso se obtuvo una corriente de 139.4 mA, lo que corresponde a una potencia eléctrica de 1.673 W, como se muestra en la Ecuación (5.7).

$$P = (12 \text{ V})(139.4 \text{ mA}) = 1.673 \text{ W}. \quad (5.7)$$

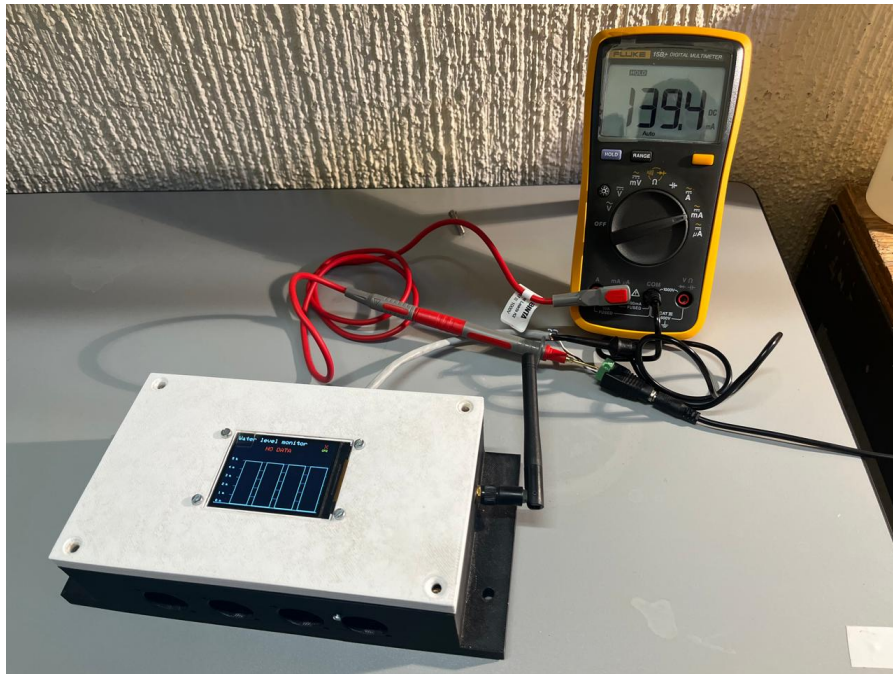


Figura 5.14: Medición de la corriente de alimentación del nodo receptor a la entrada del convertidor Buck.

La potencia consumida corresponde al funcionamiento conjunto del microcontrolador ESP32, el transceptor CAN, la pantalla TFT y los circuitos auxiliares de alimentación del nodo receptor.

5.4.2. Nodo transmisor

La Figura 5.15 presenta la medición realizada en el nodo transmisor sin sensores conectados. La corriente registrada fue de 63.3 mA, equivalente a una potencia eléctrica de 0.760 W, calculada mediante la Ecuación (5.8).

$$P = (12 \text{ V})(63.3 \text{ mA}) = 0.760 \text{ W.} \quad (5.8)$$

Este valor representa el consumo base del nodo transmisor antes de incorporar la carga asociada a los sensores de presión.

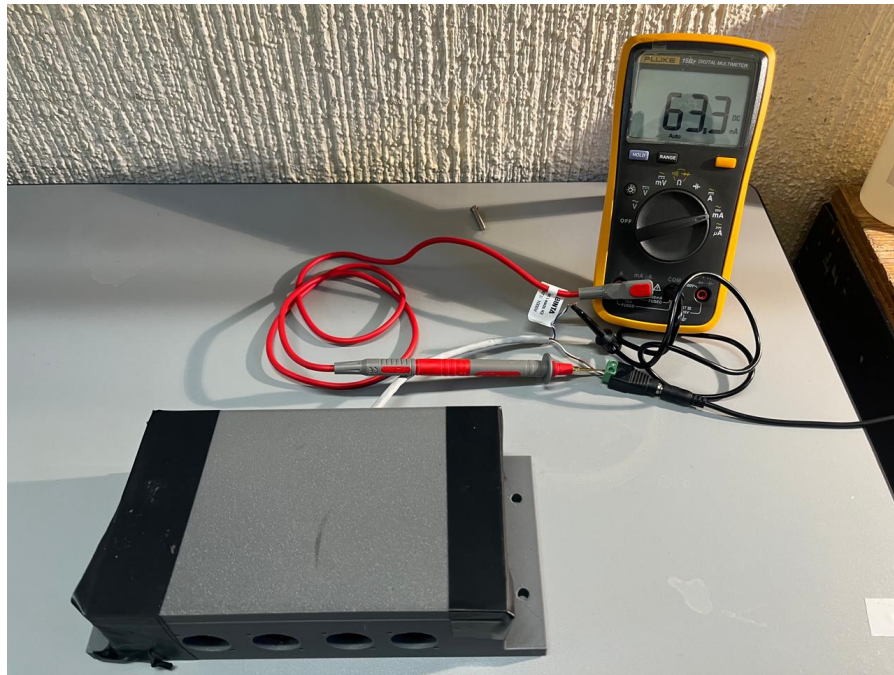


Figura 5.15: Medición de la corriente de alimentación del nodo transmisor sin sensores conectados, realizada a la entrada del convertidor Buck.

5.4.3. Sistema completo

Finalmente, se evaluó el sistema completo (Figura 5.16), integrado por el nodo transmisor, el nodo receptor, cuatro sensores MPX4250AP y el enlace de comunicación CAN BUS implementado mediante un cable UTP categoría 5e con conectores RJ45.. La corriente medida fue de 213.3 mA, obteniéndose una potencia eléctrica de 2.560 W, calculada mediante la Ecuación (5.9).

$$P = (12 \text{ V})(213.3 \text{ mA}) = 2.560 \text{ W.} \quad (5.9)$$



Figura 5.16: Medición de la corriente de alimentación del sistema completo, conformado por el nodo transmisor, el nodo receptor y cuatro sensores MPX4250AP comunicados mediante CAN BUS.

Al comparar este resultado con la suma de los consumos individuales del nodo receptor y del nodo transmisor (202.7 mA), se observa un incremento aproximado de 10.6 mA. Este aumento corresponde principalmente al consumo de los cuatro sensores de presión MPX4250AP durante la adquisición de datos, lo que indica que la incorporación de los sensores representa un incremento reducido respecto al consumo base del sistema. En conjunto, los resultados muestran que el consumo energético del sistema permanece dentro de valores adecuados para aplicaciones de monitoreo continuo.

5.5. Verificación de la comunicación CAN mediante osciloscopio

Con el fin de verificar el correcto funcionamiento de la capa física de la comunicación CAN BUS implementada en el sistema, se adquirieron las señales correspondientes a las líneas *CAN-H* y *CAN-L* utilizando un osciloscopio digital Tektronix. Para facilitar estas mediciones, la tarjeta electrónica incorpora dos puntos de prueba implementados mediante conectores tipo *header* macho, uno para cada línea del bus CAN, cuya ubicación se muestra en la Figura 5.17. Estos puntos de prueba permiten acceder directamente a las señales del bus sin interferir con el funcionamiento normal del sistema.

Durante la prueba, el Canal 1 del osciloscopio se conectó a la línea *CAN-H* y el Canal 2 a la línea *CAN-L*. Posteriormente, se estableció una comunicación continua entre dos nodos, transmitiendo tramas de datos a una velocidad de 100 kbps, correspondiente a un tiempo de bit de $10\ \mu s$. El osciloscopio se configuró con una base de tiempos de $25\ \mu s/div$ y una escala vertical de $2\ V/div$ para ambos canales, permitiendo observar simultáneamente el comportamiento de las dos líneas diferenciales del bus.

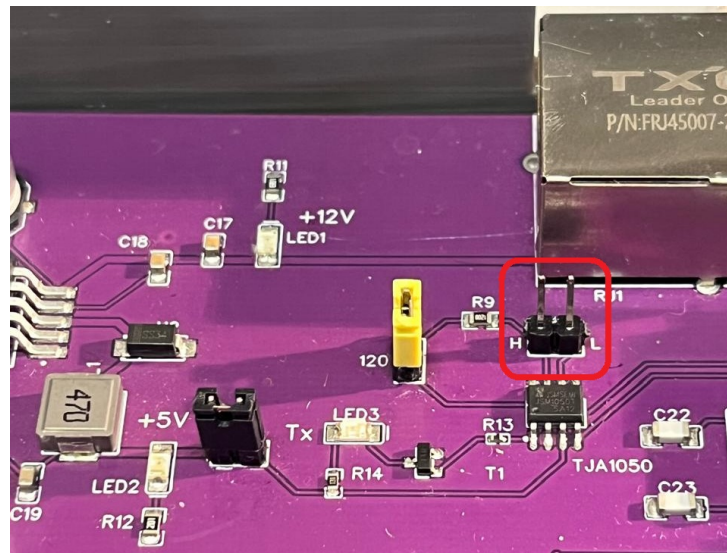


Figura 5.17: Puntos de prueba implementados en la PCB para la observación de las señales CAN-H y CAN-L mediante osciloscopio.

La captura obtenida durante la transmisión de una trama se presenta en la Figura 5.18. En ella se observa el comportamiento diferencial característico del protocolo CAN BUS, donde el incremento del nivel de tensión de la línea *CAN-H* ocurre simultáneamente con la disminución del nivel de tensión de la línea *CAN-L* durante la transmisión de los bits dominantes (0 lógico). En contraste, durante los bits recesivos (1 lógico), ambas señales convergen hacia un mismo nivel de tensión.

Este comportamiento es consistente con el principio de transmisión diferencial descrito en la Sección 3.4, confirmando el adecuado funcionamiento del transceptor CAN y la correcta implementación de la capa física de comunicación. Además, los niveles de tensión observados se encuentran dentro del rango esperado para este protocolo, lo que indica una adecuada integridad de la señal y una transmisión confiable de la información entre los nodos del sistema.

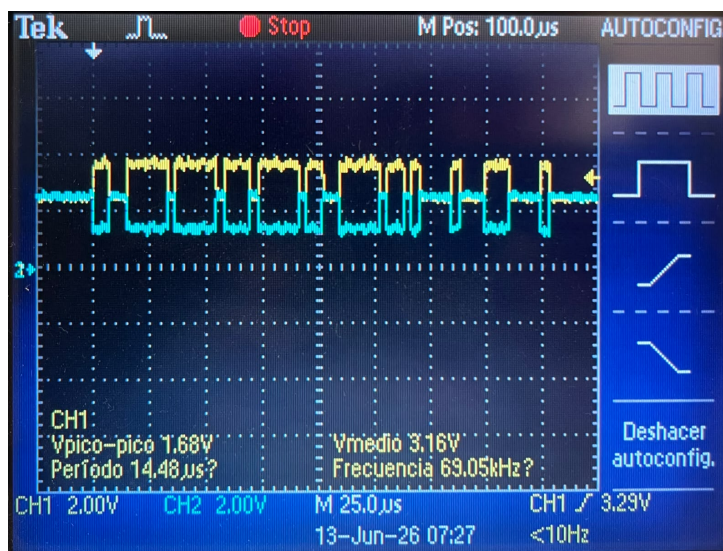


Figura 5.18: Captura de las señales diferenciales CAN-H y CAN-L durante la transmisión de una trama CAN a una velocidad de 100 kbps.

En conjunto, las mediciones realizadas corroboran el correcto funcionamiento del sistema desarrollado desde el punto de vista eléctrico y de comunicación. El bajo consumo energético obtenido favorece su implementación en aplicaciones de monitoreo continuo, mientras que las formas de onda observadas en las líneas CAN-H y CAN-L validan la correcta operación del enlace de comunicación entre ambos nodos.

5.6. Prueba de campo

La Figura 5.19 muestra la estabilidad del voltaje de alimentación suministrado a los sensores durante la prueba de campo.

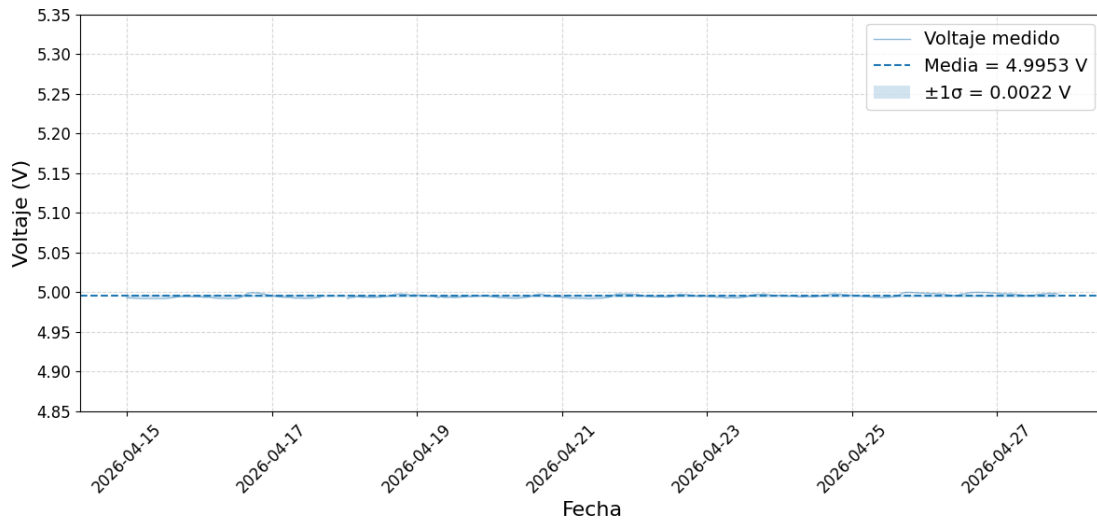


Figura 5.19: Voltaje de alimentación durante la prueba de campo.

A lo largo del periodo de adquisición se observa un comportamiento estable, con un valor promedio de aproximadamente 4.9953 V y una desviación estándar de 0.0022 V. Aunque las variaciones registradas son ligeramente mayores en comparación con las observadas durante la prueba de laboratorio, las fluctuaciones permanecen reducidas y sin cambios abruptos durante todo el intervalo de medición. Esto indica que el sistema de alimentación mantuvo condiciones adecuadas de operación incluso bajo las condiciones ambientales presentes en campo.

La Figura 5.20 muestra el nivel de agua medido a partir de la compensación de la presión atmosférica durante todo el periodo de monitoreo. Se observan claramente los ciclos de llenado y vaciado del tanque asociados al funcionamiento normal de la bomba que suministra agua desde la cisterna hacia el tinaco principal de la vivienda. Asimismo, durante los intervalos en los que el nivel permaneció constante, las variaciones registradas fueron inferiores a 2 cm, lo que evidencia una buena estabilidad en las mediciones del sistema.

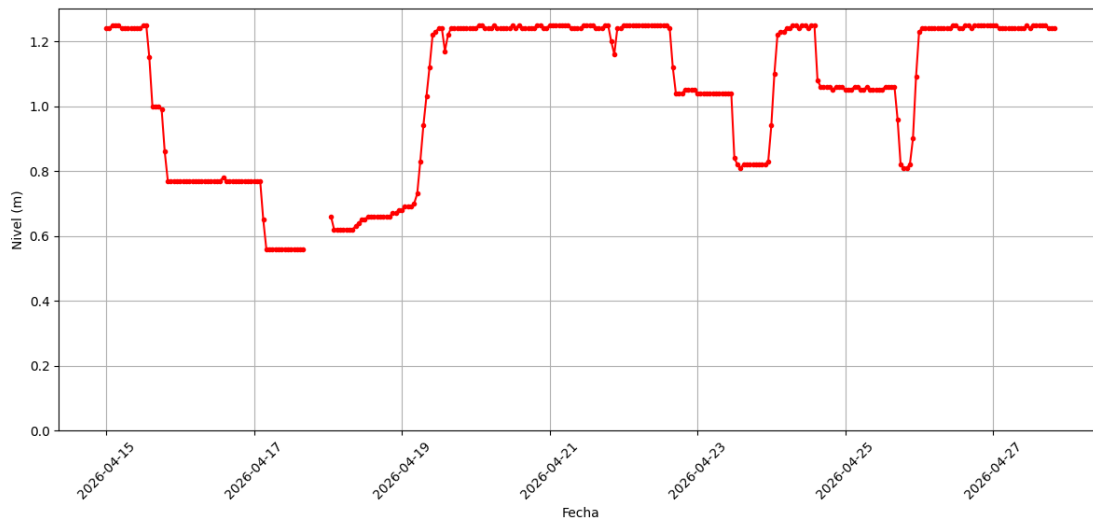


Figura 5.20: Nivel de agua medido del 15 al 28 de mayo de 2026.

Durante el periodo de medición, el sistema realizó monitoreo continuo y transmisión de datos mediante comunicación CAN BUS sin pérdidas significativas de información. La única interrupción observada ocurrió durante un intervalo aproximado de 9 horas, entre las 16:00 h del día 17 y la 01:00 h del día 18 de Mayo del 2026, debido a un corte general de energía eléctrica ocasionado por una falla en un transformador de la red eléctrica local. Una vez restablecido el suministro eléctrico, el dispositivo recuperó automáticamente la conexión y reanudó la adquisición de datos de manera normal, sin requerir intervención manual.

La Figura 5.21 presenta las señales de salida en voltaje tanto del sensor destinado a medir la presión hidrostática del agua como el sensor utilizado como referencia atmosférica. Se aprecia que ambos sensores siguen tendencias similares asociadas a las variaciones de la presión atmosférica, mientras que el sensor de nivel presenta además incrementos y decrementos producidos por los cambios en la altura de la columna de agua. La diferencia entre ambas señales corresponde precisamente a la presión hidrostática utilizada para estimar el nivel del agua.

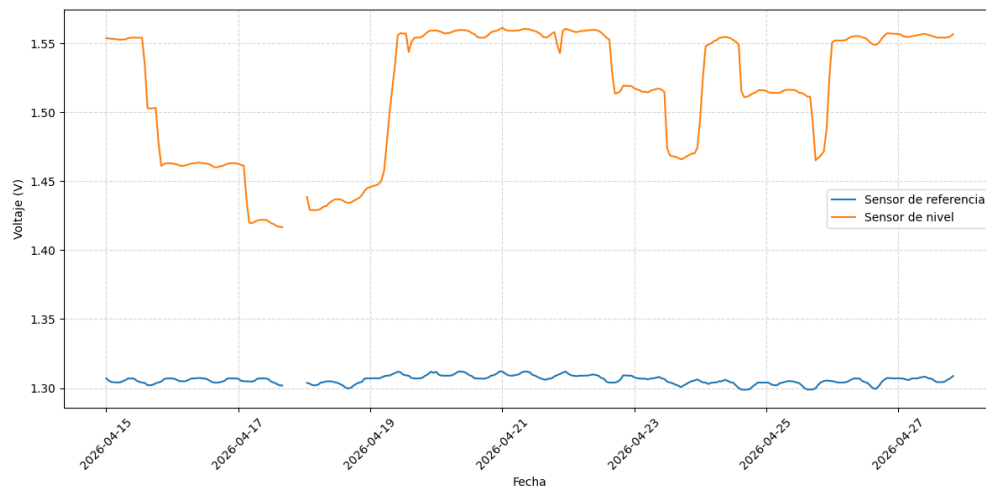


Figura 5.21: Voltajes de salida del sensor de nivel y del sensor de referencia atmosférica.

Finalmente, la Figura 5.22 muestra el nivel de agua obtenido sin aplicar la compensación por presión atmosférica.

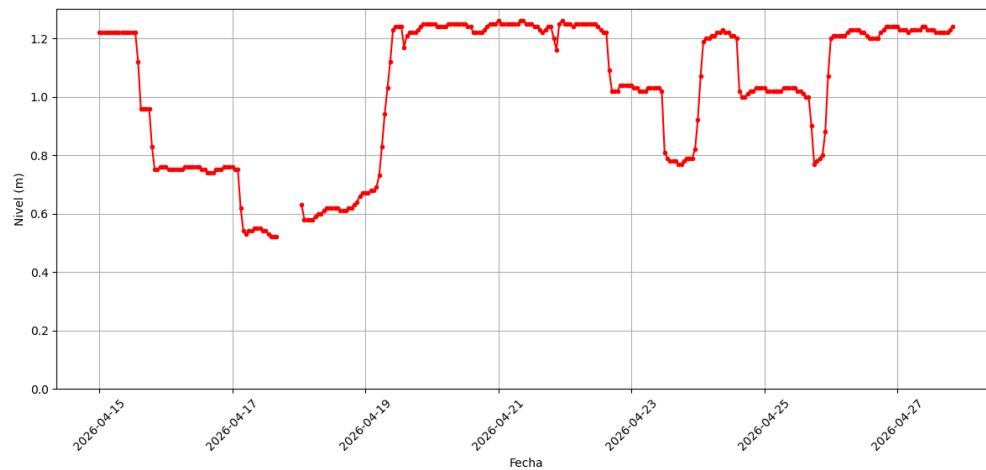


Figura 5.22: Nivel de agua calculado sin aplicar corrección por presión atmosférica.

A diferencia de la Figura 5.20, se observan pequeñas variaciones incluso cuando el nivel real del agua permanece constante. Estas oscilaciones son consecuencia directa de los cambios naturales de la presión atmosférica y ponen de manifiesto la importancia de incorporar un sensor de referencia para eliminar este efecto y mejorar la precisión de las mediciones.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajo futuro

Se desarrolló un prototipo funcional para el monitoreo continuo del nivel de agua en tanques detectores Cherenkov con una precisión aproximada de ± 1 cm. Los resultados obtenidos demostraron la viabilidad de utilizar directamente la constante de conversión teórica proporcionada por el fabricante del sensor, tomando como fundamento la relación de presión hidrostática descrita por la ley de Pascal. Esto representa una ventaja importante para la implementación a gran escala del sistema, ya que elimina la necesidad de realizar calibraciones individuales para cada sensor, reduciendo significativamente el tiempo y complejidad del proceso de instalación y puesta en operación, mientras el error se mantiene dentro de márgenes aceptables para la aplicación propuesta.

Durante las pruebas experimentales también se comprobó la sensibilidad reportada por el fabricante para el sensor MPX4250AP, obteniéndose una respuesta aproximada de 20 mV/kPa, consistente con las especificaciones técnicas del dispositivo. Asimismo, se verificó que el comportamiento del sensor es altamente lineal dentro del rango de operación estudiado, permitiendo detectar de manera confiable variaciones pequeñas en el nivel de agua. Debido a esta característica, el sistema desarrollado resulta apto no solamente para el monitoreo de nivel, sino también para la identificación de posibles fugas o pérdidas de agua en los tanques detectores.

Los resultados obtenidos durante las pruebas de laboratorio mostraron la presencia de una ligera deriva en la medición del nivel de agua, atribuida inicialmente a diferencias en el acondicionamiento eléctrico entre el sensor de nivel y el sensor de referencia. Posteriormente, durante la prueba de campo, se utilizó una entrada

con conector XLR también para el sensor de referencia, incorporando el mismo filtrado RC y resistencia pull-down presentes en las demás entradas del sistema. Bajo esta configuración, la estabilidad de la medición mejoró significativamente y la deriva observada anteriormente desapareció prácticamente por completo. A partir de estos resultados, se puede concluir que la perturbación observada en laboratorio estaba asociada a la omisión del filtro RC y la resistencia pull-down en la conexión original del sensor de referencia.

Estos resultados indican además que, para obtener mediciones más estables y precisas, la presión atmosférica debe medirse mediante una entrada externa acondicionada eléctricamente bajo las mismas condiciones que los sensores de nivel. Sin embargo, esta solución implica dedicar una de las entradas disponibles exclusivamente al sensor de referencia atmosférica, reduciendo así la capacidad de monitoreo simultáneo de la tarjeta de cuatro tanques a únicamente tres tanques por módulo de adquisición.

Adicionalmente, se analizó la estabilidad del voltaje de alimentación y su influencia sobre las mediciones del sistema, observándose un comportamiento suficientemente estable para garantizar mediciones consistentes durante periodos prolongados de operación. También se realizaron pruebas en condiciones reales de campo mediante la instalación y evaluación del sistema en entornos domésticos, permitiendo validar su funcionamiento fuera de condiciones controladas de laboratorio y observar variaciones reales del nivel de agua asociadas al consumo y recarga de los depósitos.

Las pruebas realizadas permitieron validar el correcto desempeño del prototipo tanto a nivel electrónico como en la adquisición y transmisión de datos. Como resultado de esta etapa de evaluación, el sistema fue considerado apto para su futura implementación y pruebas dentro del Pathfinder del proyecto SWGO.

6.1. Trabajo futuro

Como parte del trabajo futuro, será necesario evaluar el comportamiento del sistema bajo las condiciones ambientales presentes en el sitio del Pathfinder del SWGO, donde se presentan temperaturas inferiores a 0 °C. Se espera que estas variaciones térmicas afecten la precisión de las mediciones debido a la dependencia del sensor

con la temperatura. Por esta razón, será necesario incorporar sensores de temperatura cercanos al transductor de presión y desarrollar un modelo de corrección que permita compensar las variaciones introducidas por los cambios térmicos.

Otro aspecto importante corresponde a la sustitución del sensor MPX4250AP, debido a que este dispositivo se encuentra actualmente en proceso de obsolescencia y eventualmente dejará de fabricarse. Como posible alternativa, se propone el uso de sensores diferenciales de presión, empleando una manguera acoplada a una de las entradas del sensor para realizar una medición indirecta del nivel de agua a partir de la columna de aire generada dentro de la manguera. Esta configuración permitiría además aislar electrónicamente al sensor del contacto directo con el agua y facilitar su reemplazo o mantenimiento.

Para la implementación del sistema en el arreglo SWGO-A será necesario desarrollar una nueva tarjeta de adquisición de datos con capacidad para monitorear aproximadamente 55 tanques correspondientes a un cluster completo, en contraste con el prototipo actual diseñado para únicamente cuatro sensores. La arquitectura planteada considera una topología jerárquica tipo árbol, donde los nodos locales de cada cluster se comuniquen con un nodo central encargado de concentrar la información y transmitirla posteriormente hacia la estación principal y la base de datos del observatorio.

Bajo este escenario, el protocolo CAN BUS utilizado en el prototipo actual podría presentar limitaciones relacionadas con la velocidad de transferencia, longitud del bus y administración jerárquica de nodos. Debido a ello, será necesario explorar protocolos de comunicación alternativos con mayor capacidad de transmisión y escalabilidad, como Ethernet industrial o EtherCAT. Ethernet convencional ofrece mayores velocidades y flexibilidad de integración en redes distribuidas, mientras que EtherCAT proporciona sincronización determinista y tiempos de latencia mucho menores, características especialmente útiles en sistemas distribuidos de adquisición de datos en tiempo real.

Asimismo, para minimizar problemas asociados al ruido eléctrico inducido por cables analógicos largos, será conveniente desarrollar una tarjeta digitalizadora compacta que pueda colocarse directamente en cada tanque detector, conectándose localmente al sensor diferencial. De esta forma, la transmisión de datos hacia el nodo del cluster se realizaría ya en formato digital, reduciendo considerablemen-

te la susceptibilidad al ruido y mejorando la integridad de las mediciones. Para esta etapa también será necesario analizar y seleccionar un protocolo de comunicación adecuado entre los sensores digitalizados y el nodo central de cada cluster, considerando aspectos como distancia, velocidad de transmisión, sincronización y consumo energético.

Bibliografía

- [1] Southern Wide-field Gamma-ray Observatory (SWGO), "SWGO." [Web]. Disponible en: <https://www.swgo.org>. [Consultado: 2, Jul., 2026].
- [2] Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT), "Parque Astronómico de Atacama." [Web]. Disponible en: <https://www.conicyt.cl/astrofisica/sobre-el-parque/>. [Consultado el: 2, Jul., 2026].
- [3] High Altitude Water Cherenkov Observatory (HAWC), "HAWC Observatory." [Web]. Disponible en: <https://www.hawc-observatory.org/>. [Consultado el: 2, Jul., 2026].
- [4] SWGO Collaboration, P. Abreu, R. Alfaro *et al.*, "Science Prospects for the Southern Wide-field Gamma-ray Observatory: SWGO," *arXiv preprint arXiv:2506.01786*, 2025, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.01786>.
- [5] R. Alfaro *et al.*, "The High-Altitude Water Cherenkov (HAWC) Observatory in Mexico: The Primary Detector," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, vol. 943, Art. no. 162439, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168253>.
- [6] STMicroelectronics, "1N5908B, 1N5913B: Axial Leaded 5 W Zener Diodes," Datasheet. [Web]. Disponible en: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/cd00000664.pdf>. [Consultado el: 2, Jul., 2026].
- [7] Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO), "LHAASO." [Online]. Available: <https://english.ihep.cas.cn/lhaaso/>. [Accessed: Mar. 17, 2026].

-
- [8] Cao, Z., et al. (2022). *The Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO) Science Book. Chinese Physics C*, 46(3), 035001. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.02773>
 - [9] H. Li, M. Chen, B. Gao *et al.*, "Measurement of water quality in LHAASO-WCDA," *Radiat. Detect. Technol. Methods*, vol. 7, pp. 192–199, 2023, <https://doi.org/10.1007/s41605-022-00362-0>.
 - [10] Pierre Auger Observatory, "Pierre Auger Observatory." [Web]. Disponible en: <https://www.auger.org>. [Consultado el: 17, Mar., 2026].
 - [11] P. Allison *et al.*, "Observing muon decays in water Cherenkov detectors at the Pierre Auger Observatory," *arXiv:astro-ph/0509238*, 2005. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0509238>.
 - [12] F. Jan, M. Min-Allah, S. Düstegör y M. Alazab, "IoT-Based Solutions to Monitor Water Level, Leakage, and Motor Control for Smart Water Tanks," *Water*, vol. 14, no. 3, p. 309, 2022. doi:10.3390/w14030309. Available: <https://doi.org/10.3390/w14030309>.
 - [13] K. Chan, D. N. Schillereff, A. C. W. Baas, M. A. Chadwick, B. Main, M. Mulligan, F. T. O'Shea, R. Pearce, T. E. L. Smith y A. van Soesbergen, "Low-cost electronic sensors for environmental research: Pitfalls and opportunities," **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, vol. 45, no. 3, pp. 305–338, 2020. doi:10.1177/0309133320956567. Available: <https://doi.org/10.1177/0309133320956567>.
 - [14] P. Hamel, N. Ding, F. Cherqui, Q. Zhu, N. Walcker, J.-L. Bertrand-Krajewski, P. Champrasert, T. D. Fletcher, D. T. McCarthy, O. Navratil y B. Shi, "Low-cost monitoring systems for urban water management: Lessons from the field," **Water Research X**, vol. 22, p. 100212, 2024. doi:10.1016/j.wroa.2024.100212. Available: <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2024.100212>.
 - [15] M. K. Benhaoua, A. Dahane, R. Benameur, H. E. Zahaf, A. Elouissi, A. Benhariga, I. B. Benziane, C. Boudia y S. Souihi, "SW3T-IoT: Smart Water Monitoring Based on a Three-Tier IoT Architecture," *IEEE Access*, vol.

-
- 13, pp. 2063xx–206351, 2025. doi:10.1109/ACCESS.2025.3640507. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3640507>.
- [16] F. Frisk y O. Johansson, “Comparative Evaluation of Water Level Forecasting Using IoT Sensor Data: Hydrodynamic Model SWMM vs. Machine Learning Models Based on NARX Framework,” **Water**, vol. 16, no. 19, p. 2776, 2024. doi:10.3390/w16192776. Available: <https://doi.org/10.3390/w16192776>.
- [17] S. Shankar y M. Dakshayini, “IoT-Mobile Enabled Smart Water Level Controlling System to Regulate Water Wastage,” in *2018 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, Bangalore, India, pp. 2045–2048, 2018, <https://doi.org/10.1109/ICACCI.2018.8554373>.
- [18] M. Daadoo y Y.-A. Daraghmi, “Smart Water Leakage Detection Using Wireless Sensor Networks (SWLD),” *International Journal of Networks and Communications*, vol. 7, no. 1, pp. 1–16, 2017, <https://doi.org/10.5923/j.ijnc.20170701.01>.
- [19] A. T. Jaiad y H. S. Ghayyib, “Controlling and Monitoring of Automation Water Supply System Based on IoT with Theft Identification,” *International Journal of Research - Granthaalayah*, vol. 5, no. 5, pp. 320–325, 2017, <https://doi.org/10.29121/granthaalayah.v5.i5.2017.1863>.
- [20] K. P. S. Sowmya, K. Susmitha, N. A. Sai, N. Suma y N. Sivaiah, “Internet of Things (IoT) Enabled Water Monitoring System,” *Iconic Research and Engineering Journals*, vol. 1, no. 8, pp. 40–43, 2018.
- [21] S. A. S. Salman, S. R. Doddaguni, T. G. Kamagond, A. M. R. Anala y T. Mamatha, “Household Water Resource Monitoring and Leakage Detection,” *International Journal of Soft Computing and Engineering*, vol. 9, no. 6, pp. 12–17, 2020, <https://doi.org/10.35940/ijscce.F3393.059620>.
- [22] D. Zhao et al., *Distributed Filtering and Fault Detection for Sensor Networks*, Mathematical Problems in Engineering, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/858624>.

-
- [23] J. Zalewski, *From CAMAC to Wireless Sensor Networks and Time-Triggered Systems*, International Journal of Computing, 2016.
 - [24] A. Singh et al., *Evolution of Wireless Sensor Network Design*, Journal of Industrial Information Integration, 2020. <https://doi.org/10.1177/1550147720949138>.
 - [25] P. Deodhe et al., *Implementation of Sensor Network using Efficient CAN Interface*, arXiv preprint arXiv:1404.6612, 2014.
 - [26] X. Li et al., *Distributed Event-Triggered Estimation over Sensor Networks*, IEEE Transactions on Cybernetics, 2019. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2019.2917179>.
 - [27] Smith, A. J., *et al.*, “HAWC: Design, Operation, Reconstruction and Analysis,” *arXiv preprint* arXiv:1508.05826, 2015. Available: <https://arxiv.org/abs/1508.05826>.
 - [28] V. Vasileiou, *A Study on the Performance of Tanks for HAWC*, Version 2, Department of Physics, University of Maryland, HAWC Internal Technical Memorandum, Septiembre 2007.
 - [29] Irrigation Training and Research Center (ITRC), “Water Level Sensor Testing,” *ITRC Report No. 04-005*, California Polytechnic State University, 2004. Available: https://digitalcommons.calpoly.edu/bae_fac/132.
 - [30] NXP Semiconductors, "MPX4250AP Pressure Sensor Datasheet, Rev. 8.0 — 25 July 2017. Available: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MPX4250A.pdf>.
 - [31] Robert Bosch GmbH. CAN Specification Version 2.0. Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Germany, 1991. <https://www.circuitstate.com/wp-content/uploads/2023/01/CAN-Bus-Specifications-2.0-Bosch.pdf>
 - [32] Norma ISO 11898-1: <https://www.iso.org/standard/86384.html>
 - [33] Norma ISO 11898-2: <https://www.iso.org/standard/90697.html>

- [34] Microchip Technology Inc., "MCP2515 Stand-Alone CAN Controller", Available: <https://www.microchip.com/en-us/product/mcp2515>.
- [35] NXP Semiconductors, "TJA1050 High-Speed CAN Transceiver", Available: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/TJA1050.pdf>.
- [36] J. Hinton, "A Pathfinder for the Southern Wide Field Gamma-Ray Observatory (SWGO)," *Proceedings of Science (PoS)*, vol. ICRC2025, p. 676, 2025. doi: 10.22323/1.501.0676.

Apéndice A

Cotización

Equipozo

Equipozo S.A. de C.V.
EQU120614HB8

ventas@equipozo.com
(55) 5271 3925

México Toluca 5631
Cuajimalpa CDMX 05000

Cotización: **K241207**

Fecha: 9 dic, 2024
Vigente al: 23 dic, 2024

UAEH
Alejandro
mo276330@uaeh.edu.mx

Moneda: USD

Clave	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	Importe
26X1	Sensor de Nivel KELLER Serie 26X / Ø 21mm / precisión ± 0.1 %FS/ Salidas: RS485 y 4...20mA/ Rango: 0-1 Bar PR (10.2 m de columna de agua)	Pza	1	458.00	458.00
PECA	Cable para sensor KELLER / Recubrimiento de Polietileno (PE). 5 conductores. Con tubo capilar para sensores relativos.	m	15	5.89	88.35
ET	Sujetador de cable Keller, eliminador de tensión	Pza	1	50.00	50.00
26Y1	Sensor de Nivel KELLER Serie 26Y / Salida 4...20mA / Ø 21mm/ Rango: 0-1 Bar PR (10.2 m de columna de agua)	Pza	1	245.00	245.00
PECA	Cable para sensor KELLER / Recubrimiento de Polietileno (PE). 5 conductores. Con tubo capilar para sensores relativos.	m	15	5.89	88.35
ET	Sujetador de cable Keller, eliminador de tensión	Pza	1	50.00	50.00
46X300			1	1,073.00	1,073.00
PECAex	Cable para sensor KELLER / Recubrimiento de Polietileno (PE). 5 conductores. Con tubo capilar para sensores relativos/ por metro extra	m	15	6.38	95.70
ET	Sujetador de cable Keller, eliminador de tensión	Pza	1	50.00	50.00

El 46X tarda entre 7 y 9 semanas. Los demás los tenemos de inventario

Descarga la ficha técnica en: [equipozo.com/26y](#) , [equipozo.com/26x](#) ,

Condiciones de pago:	50% anticipo y 50% previo a entrega o embarque.	Envío	Por cobrar
Tiempo de entrega :	Ver Notas	Seguro (opcional)	
Entrega	Envío por cobrar, seguro opcional; o recoger en nuestras instalaciones	Subtotal	2,198.40
Moneda	Dólares Americanos	16% IVA	351.74
	Tipo de cambio FIX Banxico del día del pago (www.banxico.org.mx)	TOTAL	Dólares 2,550.14

Términos y condiciones en esta cotización y en [equipozo.com/terminosycondiciones](#)

Página 1 de 2

86

Apéndice B

Firmware

B.1. Nodo transmisor

Algoritmo 2: Configuración inicial del sistema

```
1 Setup()
2 Inicializar comunicación serial a 115200 baudios;
3 Inicializar CAN a 100 kbps;
4 Si CAN no se inicializa correctamente, detener ejecución;
5 Configurar pines de interrupción y entradas analógicas;
6 Configurar pin del sensor de referencia como entrada con pull-down;
7 Mostrar "Setup Complete" por serial;
```

Algoritmo 3: Bucle principal

```
1 Loop()
2 Llamar a takeMeasurementsSimultaneous();
3 Llamar a sendMeasurementPackages();
4 Esperar 1 segundo;
```

Algoritmo 4: Tomar mediciones simultáneas

```
1 takeMeasurementsSimultaneous()
2 Inicializar sumas de lecturas para cada sensor y el sensor de referencia;
3 Repetir N veces: // N = 200
4 Leer cada pin analógico y sumar al acumulador correspondiente;
5 Leer pin de referencia y sumar al acumulador;
6 Esperar 10 ms;
7 Para cada voltaje de sensor: Calcular promedio;
8 Convertir a voltaje usando Vref y resolución;
9 Aplicar corrección lineal ( $v = m \cdot v + b$ );
10 Redondear a 3 decimales;
11 Repetir lo mismo para el sensor de referencia;
12 Calcular Vs como el doble del voltaje del canal principal;
13 Para cada sensor real: Si el sensor está desconectado o Vs muy bajo,
    marcar nivel como NAN;
14 Si no, calcular nivel de agua usando fórmula de corrección y aplicar
    clampNivel();
15 Imprimir resultados por serial (voltajes, referencia, Vs, niveles);
```

Algoritmo 5: Enviar paquetes de medición por CAN

```
1 sendMeasurementPackages()
2 Para cada voltaje: Convertir a entero multiplicando por 1000;
3 Separar en bytes alto y bajo;
4 Enviar mensaje CAN con ID correspondiente;
5 Esperar 3 ms;
6 Repetir para el voltaje de referencia;
7 Para cada sensor real: Si está desconectado, continuar;
8 Convertir nivel de agua a entero multiplicando por 1000;
9 Separar en bytes y enviar mensaje CAN;
10 Esperar 3 ms;
11 Para cada sensor real: Preparar paquete de estado con ID del sensor y
    código de estado;
12 Enviar mensaje CAN;
13 Esperar 3 ms;
```

B.2. Nodo receptor

Algoritmo 6: Configuración inicial del sistema TFT, CAN y WiFi

```
1 Setup()
2 Inicializar comunicación serial;
3 Inicializar pantalla TFT y limpiar pantalla;
4 Dibujar título y barra base;
5 Si connectWiFi() es verdadero: Marcar WiFi conectado y modo de
  configuración desactivado;
6 Sino: Iniciar portal de configuración WiFi;
7 Inicializar CAN BUS;
8 Configurar CAN en modo normal;
```

Algoritmo 7: Conectar a WiFi

```
1 connectWiFi()
2 Si no hay SSID configurado, retornar falso;
3 Reiniciar módulo WiFi;
4 Iniciar conexión con SSID y contraseña guardados;
5 Esperar hasta 15 s o hasta que la conexión sea exitosa;
6 Retornar verdadero si conectado, falso si no;
```

Algoritmo 8: Iniciar portal de configuración WiFi

```
1 startConfigPortal()
2 Activar modo AP (ESP32_Config);
3 Configurar página web con formulario de SSID y contraseña;
4 Al enviar formulario: Guardar credenciales en preferencias;
5 Reiniciar ESP32;
6 Iniciar servidor web;
```

Algoritmo 9: Bucle principal del sistema

```

1 Loop()
2 Leer estado del botón WiFi;
3 Si botón presionado por más de 2 s: Llamar a resetWiFiAndReconfig();
4 Cada 2 s: Actualizar icono WiFi;
5 Manejar clientes HTTP del portal de configuración;
6 Cada 500 ms: Si CAN inactivo por más de CAN_TIMEOUT: Marcar
  CAN inactivo y mostrar "NO DATA";
7 Si hay mensaje CAN disponible: Leer ID y datos del mensaje;
  // Procesamiento según tipo de mensaje
8 Si ID = ID_VS: Calcular Vs, mostrar en TFT y serial;
9 Si ID = ID_REF: Guardar voltaje de referencia, mostrar en TFT y serial;
10 Si ID corresponde a nivel de sensor (ID_LEVEL_START a
  ID_LEVEL_END): Calcular índice del sensor, actualizar nivel, dibujar
  barra y mostrar en serial;
11 Si ID = ID_STATUS: Actualizar estado del sensor:
    ■ Si desconectado: marcar sensor como inactivo, dibujar barra en gris y
      mostrar mensaje
    ■ Si activo: marcar sensor como vivo y mostrar mensaje

```

Algoritmo 10: Resetear WiFi y reconfigurar

```

1 resetWiFiAndReconfig()
2 Borrar credenciales guardadas;
3 Reiniciar ESP32;

```

Algoritmo 11: Convertir RSSI a barras de WiFi

```

1 rssiToBars(rssi) Si rssi >= -55: retornar 4;
2 Si rssi >= -65: retornar 3;
3 Si rssi >= -75: retornar 2;
4 Si rssi >= -85: retornar 1;
5 Sino: retornar 0;

```

Algoritmo 12: Dibujar barra de sensor

```

1 drawBar(indice, altura) Limitar altura a 0..H_MAX;
2 Calcular pixeles correspondientes a la altura;
3 Limpiar área de la barra;
4 Dibujar barra llena según altura;
5 Dibujar marco de la barra;
6 Escribir valor numérico sobre la barra;

```
