



Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería en Electrónica
Licenciatura en Ingeniería Electrónica

Medición de consumo y calidad de agua en la planta de matanza del Campus Tecnológico Local San Carlos

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniería
en Electrónica con el grado académico de Licenciatura

Autor

Diego Armando Ramírez Mata
2018179431

Profesor asesor

Dra. Paola Vega Castillo

II Semestre 2025
Cartago, Costa Rica

Este trabajo está licenciado bajo CC BY-NC 4.0. Para ver una copia de esta licencia, visita:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
ACTA DE APROBACIÓN**

**Defensa de Proyecto de Graduación
Requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica
Grado Académico de Licenciatura
Instituto Tecnológico de Costa Rica**

El Tribunal Evaluador aprueba la defensa del proyecto de graduación denominado *Medición de consumo y calidad de agua en la planta de matanza del Campus Tecnológico Local San Carlos*, realizado por el señor **Diego Armando Ramírez Mata**, carné **2018179431**, y hace constar que cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal

WILLIAM
FAUSTO QUIROS
SOLANO
(FIRMA)

Firmado digitalmente
por WILLIAM FAUSTO
QUIROS SOLANO
(FIRMA)
Fecha: 2025.11.20
14:50:24 -06'00'



Firmado digitalmente
por HUGO ANDRES
SANCHEZ ORTIZ (FIRMA)
Fecha: 2025.11.20
21:42:04 +01'00'

Dr. Ing. William Quirós Solano
Profesor lector

M.Sc. Hugo Sánchez Ortiz
Profesor lector

PAOLA VEGA CASTILLO (FIRMA)
PERSONA FISICA, CPF-01-0937-0493.
Fecha declarada: 20/11/2025 01:33:05 PM
Esta representación visual no es fuente
de confianza. Valide siempre la firma.

Dr.-Ing. Paola Vega Castillo
Profesora asesora

Cartago, 20 de noviembre del 2025

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
TRIBUNAL EVALUADOR
ACTA DE EVALUACIÓN**

**Defensa de Proyecto de Graduación
Requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica
Grado Académico de Licenciatura
Instituto Tecnológico de Costa Rica**

Estudiante: Diego Armando Ramírez Mata

Carné: 2018179431

Nombre del Proyecto: *Medición de consumo y calidad de agua en la planta de matanza del Campus Tecnológico Local San Carlos.*

Los miembros de este Tribunal hacen constar de que este proyecto de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica y es merecedor de una nota de:

Nota de Proyecto de Graduación: __100__

Miembros del Tribunal

WILLIAM
FAUSTO QUIROS
SOLANO (FIRMA)
Firmado digitalmente por
WILLIAM FAUSTO QUIROS
SOLANO (FIRMA)
Fecha: 2025.11.20 14:51:06
-06'00'

Dr.-Ing. William Quirós Solano
Profesor lector

TEC
Firmado digitalmente por
HUGO ANDRES SANCHEZ
ORTIZ (FIRMA)
Fecha: 2025.11.20 21:42:51
+01'00'

M.Sc. Hugo Sánchez Ortiz
Profesor lector

PAOLA VEGA CASTILLO (FIRMA)
PERSONA FISICA, CPF-01-0937-0493.
Fecha declarada: 20/11/2025 02:38:34 PM
Esta representación visual no es fuente
de confianza. Valide siempre la firma.

Dr.-Ing. Paola Vega Castillo
Profesora asesora

Cartago, 20 de noviembre del 2025

Declaratoria de autenticidad

Yo, **Diego Armando Ramírez Mata**, con cédula de identidad número **305250767** y carné estudiantil **2018179431**, declaro que el presente informe titulado:

*“Medición de consumo y calidad de agua en la planta de matanza del Campus Tecnológico
Local San Carlos”*

ha sido elaborado por mí como parte del Trabajo Final de Graduación para optar por el título de **Licenciatura en Ingeniería Electrónica**, en el Instituto Tecnológico de Costa Rica. Aseguro que, salvo las referencias debidamente indicadas, este documento es producto de mi propio trabajo y libre de plagio.

Diego Armando Ramírez Mata

Cédula: 305250767

Carné estudiantil: 2018179431

Cartago, Octubre 2025

Resumen

El presente trabajo describe el diseño e implementación de un sistema de monitoreo de consumo y calidad de agua para la planta de matanza del Instituto Tecnológico de Costa Rica, sede San Carlos. El sistema integra sensores de pH, ORP, TDS y caudal, junto con un módulo de comunicación LoRa y una pantalla LCD, permitiendo la adquisición y visualización de datos en tiempo real cada 15 segundos. El firmware desarrollado en Arduino incluyó rutinas de calibración basadas en soluciones patrón y compensaciones por temperatura, además de la posibilidad de ajustar parámetros localmente o de forma remota.

Durante la validación experimental, el sistema demostró un desempeño estable y confiable. El sensor de pH presentó un error promedio cercano al 0.3 %, el sensor de ORP un error promedio de 8.3 %, el sensor de TDS un error de 2.0 % y el caudalímetro un error promedio de 5.2 %. Por su parte, el módulo LoRa mantuvo una tasa de error en la transmisión de apenas 0.68 %, confirmando su idoneidad para aplicaciones de monitoreo en tiempo real. Estos resultados evidencian que la solución propuesta alcanza un nivel de precisión aceptable para aplicaciones industriales y académicas.

El prototipo desarrollado constituye una herramienta práctica y de bajo costo que contribuye a la gestión eficiente del recurso hídrico, apoyando tanto el cumplimiento de normativas sanitarias como la sostenibilidad ambiental. Además, su arquitectura modular y escalable permite su adaptación a nuevas condiciones de operación o la incorporación de sensores adicionales, lo que abre la posibilidad de extender su aplicación a otros entornos industriales o de investigación.

Palabras clave: Monitoreo de calidad de agua, Sensor de pH, Sensor ORP, Sensor TDS, Sensor de caudal, Comunicación LoRa, Arduino, Sensores de bajo costo, Gestión del recurso hídrico, Sostenibilidad.

Abstract

This project presents the design and implementation of a water quality and consumption monitoring system for the slaughterhouse plant of the Costa Rica Institute of Technology, San Carlos campus. The system integrates pH, ORP, TDS, and flow sensors, together with a LoRa communication module and an LCD display, enabling real-time data acquisition and visualization every 15 seconds. The Arduino-based firmware included calibration routines based on reference solutions and temperature compensation, as well as the ability to adjust parameters locally or remotely.

During experimental validation, the system demonstrated stable and reliable performance. The pH sensor achieved an average error of approximately 0.3 %, the ORP sensor an average error of 8.3 %, the TDS sensor an error of 2.0 %, and the flow sensor an average error of 5.2 %. Additionally, the LoRa module maintained a transmission error rate as low as 0.68 %, confirming its suitability for real-time monitoring applications. These results show that the proposed solution provides acceptable accuracy for both industrial and academic contexts.

The developed prototype constitutes a practical and low-cost tool that contributes to the efficient management of water resources, supporting compliance with sanitary regulations as well as environmental sustainability. Furthermore, its modular and scalable architecture allows adaptation to new operating conditions and the incorporation of additional sensors, which opens the possibility of extending its application to other industrial or research environments.

Keywords: Water Quality Monitoring, pH Sensor, ORP Sensor, TDS Sensor, Flow Sensor, LoRa Communication, Arduino, Low-cost sensors, Water Resource Management, Sustainability.

Agradecimientos

Suele sonar un cliché, pero es fundamental reconocer a mi familia, quienes han sido el motor y la inspiración constante a lo largo de mi vida. Desde temprana edad me apoyaron incondicionalmente en el sueño de convertirme en ingeniero. En especial, quiero agradecer a mi madre, mi hermano y mi abuela, pilares fundamentales de mi formación personal y académica, cuyo cariño, paciencia y ejemplo me motivaron a superar cada obstáculo.

Más que simples agradecimientos, estas palabras son una carta de memorias. Al escribirlas, no solo expreso gratitud, sino que también dejo plasmado el recuerdo de aquellas personas que, con su compañía, marcaron una etapa tan significativa de mi vida. Ellos fueron parte de mis momentos de estrés, alegrías, risas, y también de tristezas.

Durante estos años tuve la fortuna de conocer personas maravillosas, algunas me acompañaron desde los primeros semestres, mientras que otras llegaron en la etapa final, pero todas dejaron una huella imborrable en mi historia. Más que compañeros de carrera, se convirtieron en verdaderos amigos, con quienes compartí experiencias que siempre recordaré.

Marco Alfaro y Alberto Gonzales, a quienes conocí desde mis primeros años universitarios, fueron un apoyo fundamental, en especial durante los difíciles tiempos de la pandemia. También agradezco a Dylan Cornejo y Daniela Vargas, amistades que llegaron de manera inesperada y que, con sus consejos y compañía, siempre me motivaron a superarme. Del mismo modo, guardo un profundo aprecio por Sebastián Porras y Jesús Alfaro, quienes sin duda ocuparían un lugar destacado si tuviera que hacer un “top” de amistades. Asimismo, valoro a Brandon Gómez, Luis Castillo, Marco Contreras, Gabriel Chaves y Skarleth Herrera, con quienes compartí momentos que llenaron de alegría y fortaleza mis días, incluso en las etapas más difíciles.

En mi último semestre también tuve la dicha de conocer a Andrés Calvo y Carolina Zúñiga, personas con quienes no imaginé forjar una amistad tan grata y significativa. A pesar del poco tiempo compartido, espero que continúen siendo parte importante de mi vida en el futuro.

Estas no son las únicas personas que me ayudaron en el proceso; hay muchos más que podría mencionar. Sin embargo, los que nombro aquí son aquellos que, por su apoyo o por los momentos inolvidables que compartimos, se ganaron un espacio especial en mi vida.

Índice general

1. Introducción	12
1.1. Antecedentes	13
1.1.1. Tendencias en Monitoreo de Agua y Digitalización	13
1.1.2. Comparación con Sistemas Comerciales	14
1.1.3. Riesgos y Desafíos en el Monitoreo de Agua	14
1.1.4. Impacto Ambiental y Sostenibilidad	15
1.1.5. Marco Normativo Aplicable	15
1.2. Generalidades del Proyecto y su Entorno	17
1.2.1. Beneficios Institucionales	18
1.3. Problema a Tratar	19
1.4. Enfoque de Solución	20
1.5. Objetivos	21
1.5.1. Meta	21
1.5.2. Objetivo General	21
1.5.3. Objetivos Específicos	21
1.6. Estructura del Documento	22
2. Marco Teórico	23
2.1. Descripción General de la Solución	24
2.2. Requerimientos de la Solución	26
2.2.1. Requerimientos Funcionales	27
2.2.2. Requerimientos No Funcionales	27
2.3. Fundamentos Teóricos	28
2.3.1. Microcontrolador ATmega328P	28
2.3.2. Cristal de Cuarzo	29
2.3.3. Conversor USB a TTL	29
2.3.4. Protocolo I ² C para Comunicación con LCD	29

2.3.5.	Sensor de Potencial de Hidrógeno (pH)	30
2.3.6.	Sensor de Sólidos Disueltos Totales (TDS)	31
2.3.7.	Sensor de Potencial de Oxidación-Reducción (ORP)	31
2.3.8.	Caudalímetro	32
2.3.9.	Módulo LoRa	32
2.4.	Integración del Sistema de Monitoreo	34
3.	Desarrollo del Sistema	35
3.1.	Especificaciones Técnicas y Montaje del Sistema	36
3.1.1.	Sensor de pH	36
3.1.2.	Sensor de TDS	37
3.1.3.	Sensor de ORP	37
3.1.4.	Sensor de Caudal	38
3.1.5.	Módulo LoRa	39
3.1.6.	Módulo USB-TTL	40
3.1.7.	Montaje del Sistema	40
3.2.	Diseño del Circuito	41
3.2.1.	Descripción General del Esquemático	41
3.2.2.	Distribución de Señales	42
3.2.3.	Fabricación y Ensamblaje del PCB	42
3.2.4.	Diseño y Fabricación de Encapsulados en 3D	43
3.2.5.	Montaje Final	45
3.3.	Programación y Software Implementado	47
3.3.1.	Firmware en Arduino	47
3.3.2.	Software de Recepción y Análisis en Python	50
3.4.	Calibración de Sensores	54
3.4.1.	Buenas prácticas de calibración	54
3.4.2.	Calibración del sensor de pH	54
3.4.3.	Calibración del sensor ORP	55
3.4.4.	Calibración del sensor de TDS	55
3.4.5.	Calibración del sensor de caudal	56
4.	Validación de Mediciones	57
4.1.	Validación de Mediciones	58
4.2.	Evaluación del Desempeño	64
4.3.	Limitaciones encontradas	65

5. Conclusiones y Recomendaciones	66
5.1. Conclusiones	67
5.2. Recomendaciones	68
A. Diagramas del Sistema	74
A.1. Esquemas Conceptuales	74
A.2. Print Circuit Board	75
B. Tablas Complementarias	76
B.1. Resumen de Componentes del Sistema	76
B.2. Valores de buffer para pH en función de la temperatura	77
C. Códigos	78
C.1. GitHub	78
C.2. Detección de huecos en la comunicación LoRa	79

Índice de figuras

1.1. Planta de matanza	17
2.1. Diagrama de Primer Nivel	24
2.2. Diagrama de Segundo Nivel	25
3.1. Sensor de pH	36
3.2. Sensor de TDS	37
3.3. Sensor ORP	38
3.4. Caudalímetro	38
3.5. Módulo LoRa	39
3.6. Módulo USB-TTL	40
3.7. Esquemático del sistema de monitoreo	41
3.8. Vistas detalladas de la PCB: capa inferior y capa superior	43
3.9. Encapsulado principal diseñado para el nodo de sensado	44
3.10. Encapsulado secundario diseñado para el nodo de recepción de señal	45
3.11. Vistas generales del dispositivo de monitoreo tras el montaje final	46
3.12. Montaje final del nodo de recepción LoRa	46
3.13. Interfaz gráfica del software de recepción y análisis en Python	50
4.1. Prueba experimental de validación del sensor de pH utilizando solución buffer de referencia	59
4.2. Soluciones buffer empleadas en la calibración del sensor de pH	59
4.3. Dispositivo de monitoreo	60
4.4. Electrodo de ORP sumergido en soluciones de referencia	60
4.5. Agua recolectada para validar el volumen medido	62
4.6. Lectura del volumen de agua en 407 L/m	62
4.7. Captura en <i>PuTTY</i> mostrando la recepción de datos enviados por el módulo LoRa	63
4.8. Detección de huecos en la transmisión LoRa mediante script en Python	63

A.1. Esquema conceptual de los componentes del sistema de monitoreo	74
A.2. Vista enmascarada de la PCB mostrando áreas de soldadura y vías	75

Índice de tablas

3.1. Especificaciones técnicas del sensor de pH SEN0161 [1]	36
3.2. Especificaciones técnicas del sensor TDS SEN0244 [2]	37
3.3. Especificaciones técnicas del sensor ORP de Atlas Scientific [3]	38
3.4. Especificaciones técnicas del sensor de caudal YF-S201 [4]	39
3.5. Especificaciones técnicas del módulo LoRa SX1278 Ra-02 [5]	39
3.6. Especificaciones técnicas del módulo USB-TTL CH340G [6]	40
4.1. Lecturas de pH en comparación con valores de referencia a 24.3 °C	59
4.2. Lecturas de ORP en comparación con valores de referencia	60
4.3. Comparación de las lecturas de TDS frente a un equipo de referencia	61
4.4. Lecturas de caudal comparadas con valores de referencia	62
4.5. Resultados de la prueba de comunicación LoRa	63
B.1. Resumen de componentes del sistema de monitoreo	76
B.2. Valores de soluciones buffer de pH en función de la temperatura [7]	77

Capítulo 1

Introducción

Este capítulo presenta el contexto y la motivación del proyecto, destacando la importancia del monitoreo de calidad de agua en entornos industriales. Se describen las tendencias tecnológicas actuales, los beneficios ambientales, los desafíos inherentes y el marco normativo aplicable. Además, se expone el problema principal a abordar, el enfoque de solución adoptado y la estructura general del documento.

1.1. Antecedentes

El agua es un recurso fundamental para la vida y un insumo crítico en numerosos procesos productivos, especialmente en la industria agroalimentaria, donde su calidad impacta directamente en la seguridad y eficiencia de los productos [8]. En entornos industriales, el agua se utiliza en múltiples etapas como el lavado de equipos, la cocción, la limpieza y la desinfección, por lo que su control y monitoreo son esenciales para garantizar los estándares sanitarios y proteger la salud pública.

En este contexto, el desarrollo de sistemas de monitoreo digital ha cobrado especial relevancia. Tecnologías basadas en microcontroladores como Arduino y microcomputadoras como Raspberry Pi han permitido el acceso a soluciones de bajo costo, fáciles de implementar y adaptables a diversas necesidades operativas. Estas plataformas permiten la creación de sistemas de adquisición de datos en tiempo real capaces de medir variables.

La incorporación de tecnologías de comunicación inalámbrica, especialmente LoRa (Long Range) [9], ha potenciado la viabilidad de estos sistemas al permitir la transmisión de datos a largas distancias con bajo consumo energético, característica fundamental en entornos rurales donde la conectividad Wi-Fi o móvil es limitada. Esto ha favorecido el desarrollo de soluciones de monitoreo ambiental, agrícola y alimentario más eficientes y sostenibles.

Frente a estas necesidades, el presente proyecto plantea el diseño e implementación de un sistema de monitoreo automatizado para registrar tanto el consumo como la calidad del agua utilizada en la planta de matanza del Campus Tecnológico Local San Carlos del Instituto Tecnológico de Costa Rica [10]. El sistema busca ofrecer una solución precisa, robusta y adaptable que contribuya a una gestión más eficiente, segura y sostenible del recurso hídrico.

1.1.1. Tendencias en Monitoreo de Agua y Digitalización

La industria agroalimentaria avanza hacia la adopción de tecnologías de **Industria 4.0**, incorporando soluciones basadas en **Internet de las Cosas (IoT)**, **Big Data** y **analítica avanzada** para el monitoreo ambiental.

Estos sistemas permiten:

- Registro continuo de datos en tiempo real.
- Visualización remota de parámetros críticos.
- Análisis predictivo basado en tendencias históricas.

La digitalización mejora la eficiencia operativa, reduce el consumo de recursos y facilita el cumplimiento de normativas mediante registros automáticos y trazabilidad. En particular,

la agricultura y la industria alimentaria han comenzado a adoptar estrategias de monitoreo inteligente para optimizar el uso del agua y aumentar la sostenibilidad de sus procesos [11].

La incorporación de tecnologías como **LoRa** amplía estas capacidades, permitiendo la transmisión de datos en entornos rurales con infraestructura de red limitada, lo que extiende la autonomía y cobertura de estos sistemas de monitoreo.

1.1.2. Comparación con Sistemas Comerciales

Los sistemas comerciales de monitoreo de calidad de agua basados en tecnologías SCADA¹ proporcionan soluciones altamente robustas, escalables y con amplia capacidad de integración. Sin embargo, su adopción implica costos elevados, la necesidad de infraestructura de red especializada y personal técnico capacitado, factores que dificultan su implementación en entornos rurales o de recursos limitados.

En contraste, las plataformas basadas en microcontroladores como Arduino representan una alternativa accesible y flexible. Aunque presentan limitaciones en capacidad de procesamiento y ancho de banda de transmisión, resultan adecuadas para aplicaciones donde se priorizan la portabilidad, el bajo consumo energético y la facilidad de implementación. Estas características las convierten en opciones ideales para proyectos de monitoreo ambiental de pequeña escala.

1.1.3. Riesgos y Desafíos en el Monitoreo de Agua

A pesar de las ventajas de implementar sistemas de monitoreo digital basados en microcontroladores, existen varios desafíos técnicos a considerar. Uno de ellos es la necesidad de calibración frecuente de los sensores de calidad de agua, ya que variables como el pH y el ORP tienden a desviarse con el tiempo [12], especialmente en ambientes industriales donde las condiciones pueden ser severas.

Otro desafío es la estabilidad de la comunicación inalámbrica. Aunque la tecnología LoRa es robusta y de bajo consumo energético, puede verse afectada por interferencias electromagnéticas en instalaciones con maquinaria pesada o estructuras metálicas [13]. Además, asegurar una correcta protección física del hardware contra humedad, salpicaduras y vibraciones es fundamental para garantizar su durabilidad operativa.

La confiabilidad del sistema depende también de una adecuada gestión de la energía, especialmente si en futuras fases se pretende migrar hacia soluciones autónomas basadas en baterías o energía solar.

¹Supervisory Control and Data Acquisition es un sistema de control usado para supervisar y gestionar procesos industriales de forma remota.

1.1.4. Impacto Ambiental y Sostenibilidad

El presente proyecto contribuye directamente a los **Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)** de la **Agenda 2030** de Naciones Unidas, en particular:

- **ODS 6:** Agua limpia y saneamiento.
- **ODS 12:** Producción y consumo responsables.

La implementación de un sistema de monitoreo automatizado mejora la gestión eficiente del recurso hídrico, minimizando el desperdicio y aumentando la eficiencia en su utilización dentro de los procesos productivos. Esto apoya tanto la sostenibilidad ambiental como la inocuidad alimentaria, al fomentar prácticas responsables en el manejo de agua [14].

Un control riguroso del consumo y de la calidad del agua resulta fundamental para preservar los acuíferos locales y garantizar que los efluentes generados cumplan con las normativas ambientales vigentes, contribuyendo así a la protección de los ecosistemas acuáticos y terrestres de la región [15].

1.1.5. Marco Normativo Aplicable

La calidad del agua destinada a procesos agroindustriales está regulada por normativas nacionales e internacionales que establecen parámetros estrictos para su uso seguro en la producción de alimentos.

En Costa Rica, el **Reglamento para la Calidad del Agua Potable** (Decreto Ejecutivo N° 38924-S) establece límites para parámetros fisicoquímicos y microbiológicos esenciales [16]:

- **Potencial de hidrógeno (pH):** entre 6 y 8.
- **Sólidos disueltos totales (TDS):** máximo 1000 mg/L.
- **Cloro residual libre:** 0.3–0.6 mg/L.
- **Coliformes fecales:** ausencia en 100 mL de muestra.

Además, el **Servicio Nacional de Salud Animal (SENASA)**, entidad adscrita al Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), regula de manera específica las condiciones sanitarias de los mataderos, estableciendo requisitos obligatorios para la calidad del agua utilizada en los procesos de faena y limpieza [17]. SENASA exige que el agua cumpla con los parámetros de potabilidad vigentes y que los establecimientos cuenten con registros periódicos de su control, siendo estos aspectos evaluados durante las auditorías sanitarias de inspección.

El control adecuado de la calidad del agua está regulado internacionalmente por normativas como las directrices de la **Organización Mundial de la Salud (OMS)** [8], el **Codex Alimentarius**² [18] y estándares de inocuidad alimentaria como **ISO 22000** [19] y **HACCP**³. Estos lineamientos establecen parámetros críticos como el potencial de hidrógeno (pH), los sólidos disueltos totales (TDS), el cloro residual y la ausencia de contaminantes microbiológicos para asegurar la inocuidad en la producción de alimentos.

²Normas internacionales de alimentos elaboradas por la FAO y la OMS para protección al consumidor.

³Por sus siglas en inglés: Hazard Analysis and Critical Control Point.

1.2. Generalidades del Proyecto y su Entorno

La planta de matanza del Campus Tecnológico Local San Carlos, perteneciente a la Escuela de Agronomía, desempeña un papel estratégico en la producción de alimentos y en la formación académica de los estudiantes. Esta instalación se dedica al sacrificio de bovinos y porcinos, así como al procesamiento de productos cárnicos derivados, como embutidos —salchichas, chorizos, salchichón, mortadelas, queso de chanco— y carnes ahumadas o en salmuera de pollo, cerdo, res y búfalo de agua.

La historia de la planta se remonta a 1983, cuando se decidió construir una nueva instalación para sustituir al antiguo rastro municipal de Ciudad Quesada, el cual enfrentaba un cierre inminente por razones sanitarias. En 1986, el Tecnológico de Costa Rica inauguró sus instalaciones en Santa Clara de San Carlos, y en 1991 se inició formalmente la operación de la planta de matanza [10], brindando servicios a productores de diversas comunidades de la Zona Norte. Además de su función productiva, la planta funciona como unidad de entrenamiento para carniceros, productores artesanales de embutidos y estudiantes de la carrera de Agronomía en el área de Tecnología de Carne.



Figura 1.1: Planta de matanza

La operación de esta planta requiere un consumo intensivo de agua. Este recurso es utilizado en etapas críticas como el escaldado, el lavado de canales y la higienización de equipos y superficies. La calidad del agua es un factor esencial no solo para garantizar la inocuidad de los productos, sino también para cumplir con las exigencias de normativas nacionales como las establecidas por el **Servicio Nacional de Salud Animal (SENASA)** y el **Reglamento para la Calidad del Agua Potable** [17, 16].

Una gestión deficiente del agua puede derivar en la proliferación de microorganismos patógenos, contaminación cruzada de productos y sanciones regulatorias que incluyen decomisos, multas o cierre temporal de las instalaciones. Además, la falta de control impacta negativamente en la sostenibilidad del proceso, al dificultar la implementación de estrategias de ahorro y optimización del recurso hídrico.

En respuesta a estos desafíos, el presente proyecto propone el desarrollo de un sistema de monitoreo electrónico basado en microcontroladores, integrando sensores para medir parámetros⁴ críticos como pH, cloro residual, TDS y caudal de agua. Esta solución está concebida como un nodo, resistente a las condiciones de la planta, capaz de transmitir datos en tiempo real mediante comunicación LoRa, optimizando así la gestión del recurso hídrico y garantizando el cumplimiento de las normativas sanitarias vigentes.

1.2.1. Beneficios Institucionales

Además de su impacto operativo, el sistema de monitoreo propuesto proporcionará múltiples beneficios institucionales:

- **Formación académica:** Servirá como herramienta práctica para la formación de estudiantes de las carreras de Agronomía e Ingeniería Electrónica en áreas como monitoreo ambiental, automatización y procesamiento de señales.
- **Responsabilidad social universitaria:** Fortalecerá el compromiso del Instituto Tecnológico de Costa Rica con la sostenibilidad ambiental y las buenas prácticas agroindustriales.
- **Reputación institucional:** Mejorará la imagen de la institución frente a organismos certificadores de calidad, agencias sanitarias y la comunidad en general, consolidando su liderazgo en innovación tecnológica aplicada al sector agroindustrial.

⁴La medición de coliformes fecales generalmente requiere métodos microbiológicos especializados, por lo que su integración mediante sensores podría ser objeto de futuras investigaciones.

1.3. Problema a Tratar

La planta de matanza del Campus Tecnológico Local San Carlos enfrenta limitaciones relevantes en el monitoreo de su recurso hídrico. Aunque el agua es un insumo fundamental en todas las etapas del proceso —desde el sacrificio hasta la limpieza y desinfección de equipos—, actualmente no se cuenta con dispositivos instalados para medir de forma precisa el volumen de agua utilizada en tiempo real.

Respecto a la calidad del agua, si bien las mediciones realizadas son confiables, estas requieren la extracción de muestras que deben ser trasladadas hasta laboratorios o instalaciones específicas para su análisis.

La ausencia de un sistema que permita realizar mediciones locales oportunas afecta la capacidad de la planta para detectar desviaciones en parámetros como pH, sólidos disueltos totales (TDS), cloro residual y coliformes fecales de manera eficiente. Además, la falta de medición directa del caudal impide conocer con exactitud el volumen de agua consumido en las distintas etapas del proceso, lo cual limita la posibilidad de implementar estrategias de optimización del recurso hídrico.

Esta situación genera diversas implicaciones:

- **Riesgo sanitario:** La falta de mediciones locales oportunas incrementa el tiempo de respuesta ante desviaciones en la calidad del agua, comprometiendo la inocuidad de los productos.
- **Riesgo normativo:** La carencia de registros automáticos dificulta la generación de evidencia confiable para auditorías sanitarias, exponiendo a la planta a posibles sanciones.
- **Ineficiencia operativa:** La ausencia de datos en tiempo real limita la capacidad para monitorear el consumo de agua y aplicar estrategias de ahorro, favoreciendo el desperdicio de recursos.

Síntesis del Problema

La planta de matanza del Campus Tecnológico Local San Carlos carece de un sistema automatizado para medir en tiempo real el consumo y la calidad del agua, dificultando la precisión de las mediciones y limitando la gestión eficiente del recurso hídrico.

1.4. Enfoque de Solución

Para abordar las limitaciones actuales en la gestión del agua en la planta de matanza, se propone el diseño e implementación de un sistema de monitoreo electrónico basado en micro-controlador, capaz de registrar de forma precisa y en tiempo real tanto el consumo como la calidad del recurso hídrico.

El sistema estará compuesto por un conjunto de sensores especializados:

- **Sensores de calidad:** Medición de parámetros críticos de pH, sólidos disueltos totales (TDS) y potencial de oxidación-reducción (ORP), utilizando sensores con la precisión requerida. Estos sensores serán empleados mediante la extracción de muestras en recipientes acondicionados, permitiendo mediciones puntuales y evitando la exposición prolongada de los sensores en línea.
- **Sensor de caudal:** Instalado directamente en la línea de agua para un monitoreo continuo del flujo, permitiendo registrar el volumen total consumido durante las operaciones.

La información recolectada es visualizada en tiempo real mediante una pantalla LCD integrada, proporcionando retroalimentación inmediata al operador. Además, el sistema contará con un módulo de comunicación inalámbrica basado en tecnología LoRa, que permitirá la transmisión remota de datos a una estación base, favoreciendo la gestión centralizada y la trazabilidad de los registros.

Entre los principales beneficios esperados del sistema se destacan:

- **Mejora en la eficiencia operativa:** Datos precisos de consumo permitirán implementar estrategias de optimización y reducción del desperdicio de agua.
- **Fortalecimiento del control sanitario:** Monitoreo digital de parámetros críticos de calidad para garantizar la inocuidad de los productos cárnicos.
- **Facilitación del cumplimiento normativo:** Generación automática de registros que podrán ser presentados en auditorías sanitarias.
- **Fomento de la sostenibilidad:** Uso responsable y eficiente del recurso hídrico, alineado con políticas institucionales de sostenibilidad.

1.5. Objetivos

1.5.1. Meta

Diseñar e implementar un dispositivo que sea apto para las condiciones del entorno que integre sensores para la medición precisa de la calidad del agua en la planta de matanza en el Instituto Tecnológico de Costa Rica de San Carlos.

1.5.2. Objetivo General

Desarrollar un nodo de sensado robusto, accesible y eficiente que permita el monitoreo del consumo y la calidad del agua en la planta.

1.5.3. Objetivos Específicos

- Diseñar e implementar un sistema electrónico basado en un microcontrolador, capaz de medir y registrar con alta precisión el consumo de agua y los parámetros clave relacionados con su calidad.
- Monitorear parámetros de contenido de cloro, el pH (acidez) y la presencia de sólidos disueltos en niveles de ppm, asegurando que el agua utilizada cumpla con los requisitos de la planta.
- Implementar un sistema que permita la visualización de los datos recolectados en dispositivos con conexión a internet, facilitando su análisis detallado una vez procesados y almacenados.

1.6. Estructura del Documento

El presente documento está organizado en seis capítulos, estructurados de la siguiente manera:

- **Capítulo 1: Introducción.** Se presentan los antecedentes teóricos y tecnológicos relacionados con el proyecto, incluyendo una comparación con sistemas comerciales, normativas aplicables, riesgos asociados, tendencias en el monitoreo digital del agua y el impacto ambiental. Además, se describe el entorno de aplicación y los beneficios institucionales, definiendo finalmente el problema a tratar y el enfoque de solución adoptado.
- **Capítulo 2: Marco Teórico.** Se detalla la solución propuesta y se establecen los requerimientos funcionales y no funcionales que debe cumplir el sistema. Asimismo, se explican los fundamentos teóricos de los componentes electrónicos y las tecnologías empleadas.
- **Capítulo 3: Desarrollo del Sistema.** Se describen las especificaciones técnicas de los sensores y módulos utilizados, el diseño del circuito, la fabricación y ensamblaje del PCB, el proceso de prototipado, el software implementado y la calibración de los sensores.
- **Capítulo 4: Resultados.** Se presentan los resultados obtenidos durante las mediciones realizadas, se evalúa el desempeño del sistema y se discuten las principales limitaciones encontradas.
- **Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones.** Se resumen las principales conclusiones alcanzadas y se plantean recomendaciones para futuras mejoras o líneas de trabajo relacionadas.

Capítulo 2

Marco Teórico

En este capítulo se desarrolla el sustento teórico necesario para comprender el diseño del sistema propuesto. Se describe detalladamente la solución planteada, sus requerimientos funcionales y no funcionales, así como los principios de funcionamiento de los componentes principales. Asimismo, se explica la integración de los diferentes módulos que conforman el sistema de monitoreo de calidad de agua.

2.1. Descripción General de la Solución

La solución propuesta consiste en el diseño e implementación de un sistema electrónico portátil y robusto, capaz de monitorear de manera automatizada, continua y en tiempo real variables críticas asociadas al consumo y la calidad del agua. Este sistema tiene como propósito ofrecer una herramienta precisa para el registro y control de parámetros esenciales, utilizando una arquitectura modular que facilite su despliegue en diversos entornos industriales o de monitoreo ambiental.

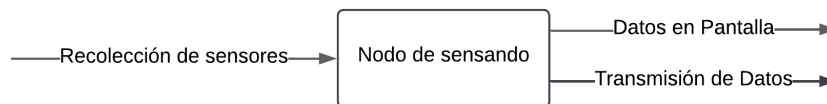


Figura 2.1: Diagrama de Primer Nivel

El núcleo de la propuesta es un nodo de sensado diseñado para operar bajo las condiciones específicas de la planta. Este nodo se concibe como un dispositivo compacto, resistente y de bajo consumo energético, con la posibilidad de funcionar en el futuro mediante baterías recargables. En la etapa actual, opera conectado a una fuente de alimentación directa, lo que brinda flexibilidad en su instalación y uso. Para maximizar la autonomía energética, se seleccionaron componentes de bajo consumo, priorizando la eficiencia en todo el diseño. Aunque aún no se contempla la incorporación de sistemas de energía renovable, como paneles solares, el sistema ha sido concebido con un perfil energético compatible con dichas tecnologías, lo que permitirá su integración de forma sencilla en caso de que las necesidades operativas lo requieran.

Entre las funcionalidades principales del sistema destaca la medición precisa del caudal de agua, permitiendo registrar de manera continua el volumen consumido en los procesos monitoreados. La obtención de estos datos en tiempo real resulta fundamental para identificar patrones de consumo, detectar desviaciones o fugas, y facilitar la implementación de estrategias de optimización de recursos. A diferencia de métodos tradicionales basados en inspecciones periódicas, el enfoque continuo proporciona una visión integral y dinámica del comportamiento hídrico a lo largo del tiempo.

Adicionalmente, el nodo incorpora sensores específicos para la medición de parámetros de calidad de agua como el potencial de hidrógeno (pH), el potencial de oxidación-reducción (ORP) y la concentración de sólidos disueltos totales (TDS). Estos sensores proporcionan mediciones directas y precisas de las condiciones fisicoquímicas del agua, parámetros críticos para asegurar su idoneidad en diversos procesos industriales, agrícolas o de monitoreo ambiental. La disposición de los sensores permite realizar análisis en el sitio, minimizando el tiempo de respuesta ante eventuales anomalías.

La transmisión de los datos con LoRa resulta especialmente ventajoso en escenarios donde

la infraestructura de red convencional es limitada o inexistente. La comunicación entre nodos y un gateway central permite estructurar una red escalable y flexible, en la cual es posible integrar nuevos puntos de monitoreo sin afectar el desempeño global del sistema.

El nodo central o gateway es responsable de la recopilación y organización de los datos transmitidos por el nodo de sensado. El esquema de proyecto contempla la posibilidad de integrar los datos recolectados en sistemas de análisis más avanzados, permitiendo visualizar tendencias históricas, detectar desviaciones en los parámetros y generar reportes que faciliten la toma de decisiones basadas en datos reales y actualizados.

El diseño modular y escalable del sistema posibilita su fácil expansión y adaptación. Es posible incorporar nuevos sensores para la medición de variables adicionales o extender la cobertura de monitoreo simplemente añadiendo nodos adicionales a la red existente. Además, el mantenimiento y la calibración periódica de los sensores han sido considerados desde la etapa de diseño, empleando módulos de fácil acceso y reemplazo, lo cual reduce tiempos de inactividad y facilita las labores de servicio técnico.

En conjunto, el sistema propuesto busca proporcionar una herramienta flexible, escalable y eficiente para el monitoreo automatizado de consumo y calidad de agua, capaz de integrarse en entornos operativos variados y de adaptarse a los requerimientos de monitoreo futuros, promoviendo la gestión inteligente y sostenible del recurso hídrico.

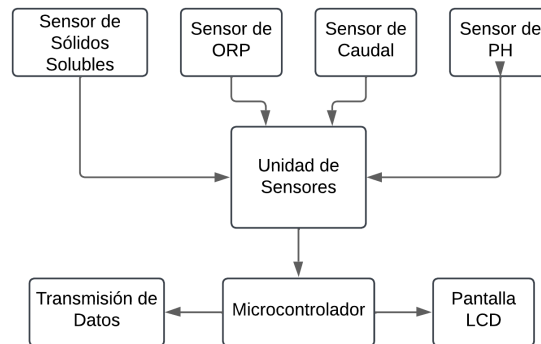


Figura 2.2: Diagrama de Segundo Nivel

2.2. Requerimientos de la Solución

Para garantizar el cumplimiento de los objetivos planteados, se han definido una serie de requerimientos que la solución debe satisfacer. Estos requisitos responden a la necesidad de contar con un sistema eficiente, confiable, de bajo costo y adaptable a condiciones reales de operación industrial, con la posibilidad de ser replicado o ampliado en el futuro.

El sistema debe permitir mediciones diferenciadas según la naturaleza de la variable monitoreada:

- **Medición continua del caudal de agua** mediante un sensor de flujo tipo Hall, registrando de forma constante el volumen utilizado en las distintas etapas del proceso.
- **Medición puntual bajo demanda** de parámetros de calidad como pH, ORP y TDS, a partir de muestras recolectadas manualmente en recipientes adecuados.

La información obtenida debe ser procesada y visualizada localmente mediante una pantalla LCD integrada, permitiendo al personal técnico consultar los valores directamente en sitio. Esto facilitará un control oportuno y una respuesta inmediata ante cualquier desviación detectada. Para la transmisión de datos, el sistema integrará tecnología inalámbrica LoRa (Long Range), que posibilita la comunicación a largas distancias con bajo consumo energético.

Un requerimiento es la viabilidad económica del sistema. Se priorizará el uso de tecnologías abiertas, componentes comerciales de bajo costo y un diseño modular, permitiendo no solo un despliegue inicial accesible, sino también una futura expansión o actualización con facilidad.

El nodo de sensado deberá ser de bajo consumo energético, con el fin de que en el futuro pueda operar de forma inalámbrica mediante baterías recargables o, en su defecto, a través de fuentes de alimentación externas. Su estructura física debe ser capaz de soportar las condiciones típicas de la planta. Además, el diseño debe garantizar una instalación, mantenimiento y calibración sencillos, de manera que pueda ser gestionado por personal técnico con formación básica.

Desde el punto de vista energético, se seleccionarán componentes de bajo consumo: el microcontrolador ATmega328P presenta un consumo aproximado de 20 mA en operación activa; los sensores de calidad de agua, entre 3 y 10 mA; el módulo LoRa Ra-02, unos 120 mA durante la transmisión; y la pantalla LCD consume entre 2 y 3 mA. En conjunto, el consumo total estimado ronda los 200–250 mA a 5 V, garantizando la viabilidad de operación prolongada con baterías recargables o fuentes externas estables.

2.2.1. Requerimientos Funcionales

Los *requerimientos funcionales* definen las capacidades esenciales que el sistema debe cumplir para garantizar su operatividad:

- Monitorear de manera continua el caudal de agua utilizando un sensor de flujo.
- Realizar mediciones puntuales de potencial de hidrógeno, cloro residual y sólidos disueltos totales mediante muestras recolectadas manualmente.
- Registrar y gestionar los datos recolectados para su análisis y trazabilidad.
- Proporcionar visualización local de los valores medidos mediante una pantalla LCD integrada.
- Transmitir los datos recolectados de forma inalámbrica utilizando tecnología LoRa.
- Generar alertas automáticas en caso de detectar valores fuera de los rangos establecidos.

2.2.2. Requerimientos No Funcionales

Los *requerimientos no funcionales* abarcan las características de calidad y las condiciones de operación que el sistema debe garantizar:

- Bajo consumo energético para maximizar la autonomía operativa.
- Diseño resistente y duradero, adecuado para ambientes industriales exigentes.
- Modularidad que permita el reemplazo o actualización de sensores y módulos.
- Interfaz de usuario sencilla e intuitiva que facilite su operación y mantenimiento.
- Escalabilidad e integración futura con sistemas de monitoreo o gestión de datos.

2.3. Fundamentos Teóricos

2.3.1. Microcontrolador ATmega328P

El **ATmega328P** es un microcontrolador de 8 bits con arquitectura RISC, perteneciente a la familia AVR de Microchip. Es ampliamente utilizado en plataformas de desarrollo como Arduino Uno debido a su bajo consumo energético, confiabilidad y disponibilidad. Opera hasta 20 MHz y dispone de 32 kB de memoria Flash, 2 kB de SRAM y 1 kB de EEPROM, características que lo hacen ideal para aplicaciones de monitoreo y automatización [20].

A continuación, se detallan los principales tipos de pines y su utilidad dentro del sistema:

- **GPIO (Entradas/Salidas Digitales):** Cuenta con 23 pines digitales configurables como entradas o salidas. Entre sus funcionalidades adicionales destacan la salida PWM en los pines D3, D5, D6, D9, D10 y D11; la capacidad de generar interrupciones externas mediante los pines D2 e INT1 (en D3); y el soporte para comunicación SPI en los pines D10 a D13.
- **Entradas Analógicas (ADC):** Dispone de 6 canales de entrada analógica de 10 bits (A0 a A5), adecuados para señales de sensores como pH, TDS u ORP.
- **Pines de Alimentación:** Incluye el pin VCC como entrada principal de alimentación (típicamente 5 V) y el pin AVCC como fuente para el conversor ADC.
- **Cristal de Reloj Externo:** Los pines XTAL1 y XTAL2 permiten la conexión de un cristal de cuarzo de 16 MHz, acompañado de dos capacitores cerámicos de 22 pF conectados a tierra, asegurando una temporización precisa y estable.
- **Pin de Reinicio (RESET):** Permite reiniciar el microcontrolador forzando un estado bajo en el pin correspondiente.
- **Comunicación UART (Serial):** Incluye los pines TXD y RXD para la transmisión y recepción de datos mediante el protocolo UART, una comunicación serie asíncrona que no requiere señal de reloj.
- **Comunicación I²C:** Los pines SDA y SCL permiten establecer un bus de comunicación serie síncrona para conectar múltiples dispositivos con direcciones únicas.
- **Programación:** Puede programarse utilizando un módulo USB-TTL o mediante un grabador ISP empleando la interfaz SPI (MISO, MOSI, SCK y RESET).

2.3.2. Cristal de Cuarzo

El microcontrolador ATmega328P requiere un sistema de temporización preciso para la ejecución de instrucciones, la generación de señales de comunicación serial y la gestión de temporizadores internos. Este sistema de temporización es proporcionado por un reloj, que puede ser interno o externo. Para aplicaciones que requieren mayor precisión y estabilidad, se utiliza un cristal de cuarzo externo.

El cristal de cuarzo genera una señal de reloj oscilante a una frecuencia establecida, típicamente 16 MHz. Se conecta a los pines XTAL1 y XTAL2 del microcontrolador, junto con dos capacitores conectados a tierra, formando un oscilador de alta estabilidad [20].

Importancia del Cristal de Cuarzo

- **Precisión:** Ofrece una frecuencia de oscilación mucho más precisa que los osciladores internos basados en resistencias y capacitores.
- **Estabilidad térmica:** Mantiene su frecuencia estable a pesar de variaciones en la temperatura ambiente.
- **Fiabilidad en comunicaciones:** Fundamental para asegurar tasas de baudios precisas en protocolos como UART, SPI e I²C.
- **Consistencia de temporización:** Clave para el correcto funcionamiento de temporizadores, generación de retardos y control de periféricos.

2.3.3. Conversor USB a TTL

El conversor USB a TTL actúa como un puente de comunicación entre el microcontrolador y un ordenador, facilitando la programación del dispositivo y la visualización de datos en tiempo real. Convierte las señales de nivel TTL (Transistor-Transistor Logic) del microcontrolador a señales USB compatibles.

Este módulo es fundamental para el desarrollo y la depuración del sistema, ya que permite la transferencia de datos usando el protocolo UART sin requerir un programador especializado.

2.3.4. Protocolo I²C para Comunicación con LCD

El protocolo I²C (Inter-Integrated Circuit) es una interfaz de comunicación serie síncrona que emplea solo dos líneas: SDA (datos) y SCL (reloj). Permite la conexión de múltiples dispositivos esclavos a un único maestro mediante direccionamiento basado en direcciones únicas asignadas a cada dispositivo.

El módulo adaptador I²C para pantallas LCD convierte las señales paralelas en una comunicación serie, simplificando considerablemente el cableado y facilitando la integración con microcontroladores.

Ventajas del uso de I²C en LCD

- **Reducción de cableado:** Se requieren solo dos líneas para la comunicación, lo que disminuye la complejidad del sistema.
- **Dirección de múltiples dispositivos:** El protocolo admite la conexión de varios dispositivos esclavos en el mismo bus mediante direcciones únicas.
- **Simplicidad de comunicación:** Facilita la transmisión síncrona de datos entre el microcontrolador y los periféricos.
- **Amplio soporte de librerías:** Existen múltiples librerías disponibles para plataformas como Arduino, lo que agiliza el desarrollo e integración de proyectos.

El uso del protocolo I²C resulta ideal en aplicaciones donde se requiere eficiencia en el cableado y facilidad de expansión ([21]).

2.3.5. Sensor de Potencial de Hidrógeno (pH)

El pH es una medida de la actividad de los iones hidrógeno (H^+) en una solución acuosa, que determina su acidez o alcalinidad. Se define como el logaritmo negativo de la concentración molar de iones hidrógeno, es decir, $pH = -\log[H^+]$ [22]. Para medir el pH, se emplea típicamente un electrodo de vidrio, que es selectivamente permeable a los iones hidrógeno y genera una diferencia de potencial cuando se sumerge en la solución de interés. Este potencial es comparado con un electrodo de referencia, comúnmente de cloruro de plata o calomelanos, y está relacionado directamente con el pH mediante la ecuación de Nernst [23].

La medición precisa del pH es esencial en aplicaciones de control de calidad del agua, dado que valores fuera del rango neutro pueden indicar contaminación química, proliferación bacteriana o fallas en los procesos de tratamiento [24]. No obstante, los electrodos de pH son sensibles a variaciones de temperatura, ensuciamiento y degradación, por lo que requieren calibraciones periódicas con soluciones patrón de pH conocido (usualmente pH 4, 7 y 10) y un almacenamiento adecuado en medio acuoso para evitar la deshidratación del electrodo de vidrio, la cual ocurre debido a la pérdida de la fina capa hidratada que recubre el sensor y que es esencial para su correcto funcionamiento [25].

2.3.6. Sensor de Sólidos Disueltos Totales (TDS)

El contenido de sólidos disueltos totales (TDS, por sus siglas en inglés) representa la suma de todas las sustancias inorgánicas y orgánicas disueltas en el agua, como sales, minerales y metales. El valor de TDS se estima generalmente a partir de la medición de la conductividad eléctrica del agua, ya que existe una relación proporcional entre la concentración de iones disueltos y su capacidad de conducción [26].

Los sensores de TDS aplican un pequeño voltaje entre dos electrodos e interpretan la corriente resultante como una medida de conductividad, que luego es convertida a TDS usando un factor de conversión, típicamente en partes por millón (ppm). Este factor depende de la composición específica del agua, por lo que la calibración adecuada es esencial [27].

La medición de TDS es crucial en sistemas de tratamiento de agua potable, procesos industriales y monitoreo ambiental, ya que valores elevados pueden señalar contaminación, mientras que niveles extremadamente bajos podrían afectar procesos sensibles. Adicionalmente, debido a la dependencia de la conductividad con la temperatura, es recomendable aplicar compensación térmica para obtener lecturas más precisas [28].

2.3.7. Sensor de Potencial de Oxidación-Reducción (ORP)

El potencial de oxidación-reducción (ORP) es una medida de la capacidad de una solución para actuar como un agente oxidante o reductor, expresado en milivoltios (mV). Se determina utilizando un electrodo inerte, generalmente de platino u oro, en combinación con un electrodo de referencia, como el de cloruro de plata [23]. El potencial medido refleja la tendencia del medio a aceptar o ceder electrones, y proporciona una visión integral de su estado de reducción.

En aplicaciones de monitoreo de calidad del agua, valores elevados de ORP suelen asociarse con la presencia de agentes oxidantes, como cloro u ozono, fundamentales en procesos de desinfección [29]. Por otro lado, valores bajos pueden indicar la presencia de agentes reductores o materia orgánica contaminante.

Aunque el ORP no mide directamente la concentración de desinfectantes, proporciona una indicación rápida y eficaz de la efectividad de los procesos de tratamiento. La señal generada suele variar entre 0 mV a 1000 mV y, al igual que en sensores de pH, requiere ser amplificada para su adquisición por sistemas electrónicos [30]. La precisión de la medición depende del adecuado mantenimiento del electrodo, ya que puede degradarse por incrustaciones o ensuciamiento, requiriendo limpieza periódica y recalibración.

2.3.8. Caudalímetro

El caudalímetro utilizado en este proyecto es un sensor de efecto Hall, diseñado para medir el flujo volumétrico de líquidos en tuberías pequeñas. El principio de funcionamiento se basa en una turbina interna que gira al paso del líquido; esta turbina tiene un imán acoplado. A medida que el imán rota, genera impulsos eléctricos detectados por un sensor de efecto Hall, el cual convierte los cambios en el campo magnético en una señal eléctrica proporcional [31].

El número de pulsos generados es directamente proporcional al volumen de líquido que pasa por el sensor. Por ejemplo, un sensor YF-S201 genera alrededor de 450 pulsos por litro de flujo de agua. Midiendo la frecuencia de estos pulsos, el sistema puede calcular el caudal instantáneo en litros por minuto (L/min).

Sin embargo, es importante considerar que el sensor debe ser instalado en una posición horizontal y evitar burbujas de aire o partículas grandes que puedan alterar su medición. Además, aunque ofrece buena precisión, los sensores de efecto Hall tienden a tener un rango de error de aproximadamente 3–5 % [31].

2.3.9. Módulo LoRa

LoRa (Long Range) es una tecnología de comunicación inalámbrica diseñada para transmitir datos a largas distancias con un consumo energético muy bajo. Utiliza una técnica de modulación de espectro (Chirp Spread Spectrum, CSS), permitiendo alcanzar distancias de varios kilómetros en condiciones óptimas, incluso en entornos urbanos o industriales [9].

El módulo utilizado en este proyecto, el SX1278 Ra-02, opera en bandas ISM¹ de libre uso, como la de 915 MHz, autorizada en Costa Rica para aplicaciones de baja potencia sin necesidad de licencia, siempre que se respeten los límites regulatorios establecidos.

Entre sus principales características destacan:

- **Largo alcance:** Alcances típicos de 2 a 5 km en zonas urbanas y hasta 15 km en zonas rurales con línea de vista.
- **Bajo consumo:** Ideal para aplicaciones que deben operar largos periodos con baterías o fuentes de energía limitadas.
- **Alta robustez:** Resistente a interferencias gracias al uso de modulación de espectro ensanchado y corrección de errores.

Consideraciones: Aunque LoRa ofrece excelente alcance y bajo consumo, su tasa de transmisión es limitada (normalmente entre 0.3 y 50 kbps), lo cual la hace más adecuada para aplica-

¹Bandas de radio ISM (Industrial, Scientific and Medical, por sus siglas en inglés).

ciones de monitoreo periódico en lugar de transmisiones de alta frecuencia o grandes volúmenes de datos.

2.4. Integración del Sistema de Monitoreo

El sistema integra múltiples sensores y módulos electrónicos que operan de manera coordinada para registrar y transmitir los parámetros críticos del recurso hídrico.

Los sensores de calidad de agua —pH, TDS y ORP— generan señales analógicas que son digitalizadas mediante el conversor ADC interno del ATmega328P. El caudalímetro proporciona una señal de pulsos que se interpreta para calcular el flujo de agua en tiempo real.

La información se visualiza localmente en una pantalla LCD mediante comunicación I²C, permitiendo al operador supervisar las lecturas. Además, los datos son transmitidos mediante el módulo LoRa a una estación base para su almacenamiento y análisis posterior.

Aunque el ATmega328P dispone de recursos adicionales, es decir, quedan disponibles hasta 7 pines analógicos extra y 1 pin digital adicional que en teoría permitirían la conexión de nuevos sensores, el diseño actual del sistema no contempla esta expansión. La PCB fue diseñada específicamente para los sensores definidos inicialmente, por lo que agregar nuevos módulos requeriría una reestructuración completa del circuito impreso, incluyendo nuevas pistas, etapas de acondicionamiento de señal y ajustes en la distribución eléctrica.

Asimismo, la integración de nuevos sensores implicaría modificaciones en el firmware del Arduino y en las rutinas de procesamiento implementadas en Python para la recepción, decodificación, almacenamiento y visualización de datos. Esto incluye cambios en la lógica de adquisición, calibración, empaquetado y validación del protocolo de comunicación con el sistema LoRa.

Por lo anterior, aunque el microcontrolador dispone físicamente de más pines utilizables, **el sistema en su estado actual no posibilita la integración de sensores adicionales sin un rediseño del hardware y del software.**

Para una descripción de los componentes que conforman el sistema de monitoreo, consulte la Tabla B.1 incluida en el Anexo.

Capítulo 3

Desarrollo del Sistema

Este capítulo aborda el proceso de implementación del sistema, incluyendo la selección y montaje de los sensores, el diseño del circuito electrónico y la fabricación del PCB. Se detallan las técnicas de prototipado y ensamblaje final, así como la programación de los dispositivos y la calibración de los sensores para asegurar un funcionamiento confiable.

3.1. Especificaciones Técnicas y Montaje del Sistema

3.1.1. Sensor de pH

El sensor de pH SEN0161 permite medir la acidez o alcalinidad de soluciones líquidas. Este sensor utiliza un electrodo de vidrio sensible a los iones de hidrógeno (H^+), generando una señal eléctrica de bajo nivel proporcional a la concentración de estos iones. Para su correcta lectura, es necesario un módulo adaptador que integra un amplificador operacional de alta impedancia, elevando la señal a un rango compatible con la entrada analógica del microcontrolador.



Figura 3.1: Sensor de pH

Especificación	Valor
Rango de medición	0–14 pH
Precisión	± 0.1 pH (a 25 °C)
Voltaje de operación	5 V DC
Temperatura de operación	0–60 °C
Tiempo de respuesta	≤ 1 minuto
Conector de sonda	BNC
Salida analógica	0–3.0 V
Dimensiones del módulo	43 mm $\times$ 32 mm

Tabla 3.1: Especificaciones técnicas del sensor de pH SEN0161 [1]

3.1.2. Sensor de TDS

El sensor de sólidos disueltos totales (TDS) SEN0244 de DFRobot mide la conductividad del agua, parámetro asociado a la concentración de sales y minerales disueltos. Este modelo fue seleccionado por su compatibilidad con microcontroladores de 3.3 V a 5.5 V, y su rango de medición adecuado para aguas de calidad potable. Su señal analógica se acondiciona a través de su módulo adaptador antes de ser leída por el microcontrolador.

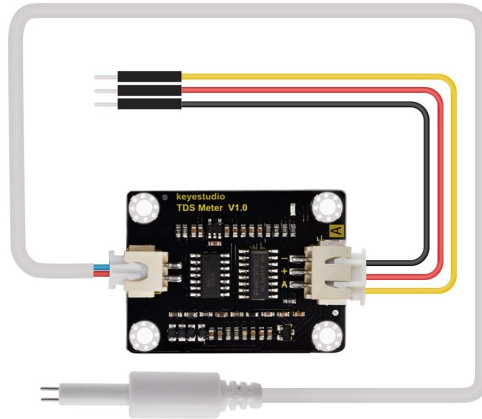


Figura 3.2: Sensor de TDS

Especificación	Valor
Rango de medición	0–1000 ppm
Precisión	$\pm 10\%$ F.S. (a 25 °C)
Voltaje de operación	3.3–5.5 V DC
Corriente de trabajo	3–6 mA
Salida analógica	0–2.3 V
Dimensiones del módulo	42 mm $\times$ 32 mm
Longitud del cable de la sonda	83 cm

Tabla 3.2: Especificaciones técnicas del sensor TDS SEN0244 [2]

3.1.3. Sensor de ORP

Este sensor fue seleccionado por su precisión y compatibilidad directa con sistemas de adquisición analógica de 0–5.0 V. Se utiliza en muestreos manuales debido a su sensibilidad a contaminantes y necesidad de calibraciones periódicas con soluciones patrón de ORP.

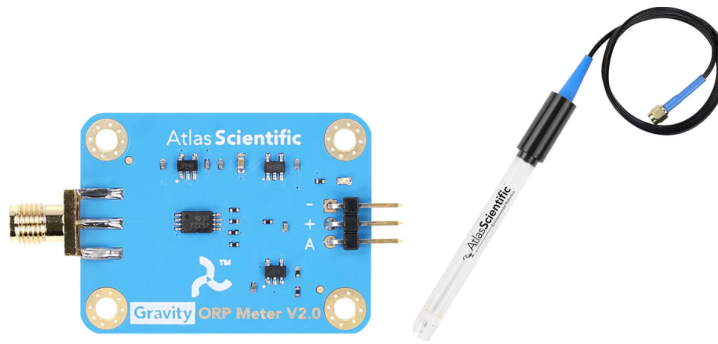


Figura 3.3: Sensor ORP

Especificación	Valor
Rango de medición	± 1020 mV
Precisión	± 1 mV
Voltaje de operación	3.3–5.5 V DC
Salida analógica	0–3.0 V
Tiempo de respuesta	1 lectura por segundo
Temperatura de operación	1–99 °C
Dimensiones del módulo	56.2 mm $\times$ 32 mm

Tabla 3.3: Especificaciones técnicas del sensor ORP de Atlas Scientific [3]

3.1.4. Sensor de Caudal

El sensor de caudal YF-S201 utiliza un rotor interno con un imán que, al girar por el paso del agua, genera pulsos eléctricos a través de un sensor Hall. Seleccionado por su bajo costo, robustez y capacidad de medición continua, este sensor se conecta a una entrada digital del microcontrolador para conteo de pulsos, usando interrupciones para una mayor precisión de lectura.



Figura 3.4: Caudalímetro

Especificación	Valor
Rango de caudal	1–30 L/min
Voltaje de operación	5–18 V DC
Corriente de trabajo	≤ 15 mA (a 5 V)
Presión máxima de agua	≤ 1.75 MPa
Temperatura de operación	≤ 80 °C
Salida de señal	Pulsos digitales (5 V TTL)
Constante de calibración	450 pulsos por litro
Dimensiones	62 mm $\times$ 36 mm $\times$ 35 mm

Tabla 3.4: Especificaciones técnicas del sensor de caudal YF-S201 [4]

3.1.5. Módulo LoRa

El módulo LoRa SX1278 Ra-02 fue seleccionado por su bajo consumo energético y su alcance superior a 2 kilómetros en condiciones rurales. Estas características lo convierten en una opción ideal para implementar un sistema de monitoreo distribuido sin necesidad de recurrir a redes WiFi o celulares.

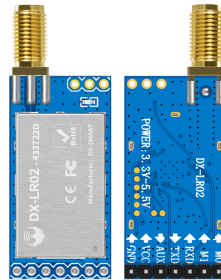


Figura 3.5: Módulo LoRa

Especificación	Valor
Frecuencia de operación	433 MHz
Voltaje de operación	1.8–3.7 V DC
Potencia de transmisión	+18 dBm
Sensibilidad de recepción	−139 dBm
Interfaz de comunicación	SPI
Velocidad de datos	0.018–37.5 kbps
Modulación	LoRa™/FSK/GFSK/OOK

Tabla 3.5: Especificaciones técnicas del módulo LoRa SX1278 Ra-02 [5]

3.1.6. Módulo USB-TTL

El módulo USB-TTL basado en el chip CH340G facilita la programación y depuración del microcontrolador ATmega328P, actuando como un puente entre el microcontrolador y una computadora a través de una interfaz USB-UART.



Figura 3.6: Módulo USB-TTL

Especificación	Valor
Voltaje de operación	3.3 V / 5 V DC
Interfaz de comunicación	UART (TXD, RXD)
Velocidad de transmisión	Hasta 12 Mbps
Compatibilidad	Windows, macOS, Linux

Tabla 3.6: Especificaciones técnicas del módulo USB-TTL CH340G [6]

3.1.7. Montaje del Sistema

El montaje integra los sensores de pH, TDS y ORP al microcontrolador mediante sus entradas analógicas, usando sus respectivos módulos adaptadores. El sensor de caudal se conecta a una entrada digital configurada para conteo de pulsos, y el módulo LoRa se conecta vía interfaz SPI, utilizando pines específicos de comunicación (MOSI, MISO, SCK y NSS).

El microcontrolador es programado y depurado a través del módulo USB-TTL. La alimentación general del sistema se realiza con una fuente externa de 5 V DC, asegurando estabilidad operativa.

Para proteger el sistema de la humedad y el polvo es importante utilizar conectores sellados para las sondas. Esta configuración garantiza un monitoreo eficiente y confiable de la calidad y el consumo de agua, y permite un ensamblaje y desensamblaje relativamente sencillo en caso de ser necesario, para el mantenimiento del mismo.

Para una mejor visualización de la disposición de los componentes y su interconexión, se presenta un esquema conceptual en el Anexo A (ver Figura A.1).

- **Caudalímetro:** Conectado a una entrada digital, proporciona una señal de pulsos proporcional al caudal de agua.
- **Módulo LCD vía I2C:** Utiliza las líneas SDA y SCL para la visualización local de los datos recolectados, permitiendo una interfaz de usuario sencilla y eficiente.
- **Módulo LoRa SX1278:** Conectado mediante el protocolo SPI (MISO, MOSI, SCK), facilita la transmisión inalámbrica de los datos hacia un nodo central de recolección o servidor.

El diseño del circuito prioriza una configuración compacta, robusta y sencilla, facilitando su instalación en entornos industriales donde el espacio puede ser limitado y las condiciones ambientales exigentes. Además, se ha buscado mantener el diseño lo suficientemente flexible para permitir futuras expansiones del sistema. Aunque en esta primera versión de la PCB sólo se han trazado las pistas necesarias para los sensores actuales, el microcontrolador mantiene pines disponibles que podrían ser utilizados posteriormente para la conexión de nuevos sensores u otros dispositivos, permitiendo así la escalabilidad del sistema.

3.2.2. Distribución de Señales

- **Alimentación:** Todos los sensores y módulos son alimentados con una tensión de 5 V proveniente de una fuente de alimentación regulada.
- **Entradas Analógicas:** Los sensores de pH, TDS y ORP se conectan a los canales ADC0, ADC1 y ADC2 respectivamente, permitiendo lecturas de voltaje proporcional al parámetro medido.
- **Entradas/Salidas Digitales:** El sensor de caudal entrega pulsos digitales y el módulo LoRa se comunica mediante el bus SPI.
- **Interfaz I2C:** El módulo LCD para la visualización local está conectado mediante las líneas SDA y SCL.

3.2.3. Fabricación y Ensamblaje del PCB

Para la implementación física del sistema de monitoreo, se diseñó una tarjeta de circuito impreso (PCB) utilizando el software **Autodesk Eagle**, empleando las licencias disponibles en el servidor académico de la Escuela de Ingeniería en Electrónica.

El diseño del PCB fue optimizado para ser compacto y facilitar la integración de los sensores y módulos necesarios, priorizando una distribución ordenada de las pistas y minimizando

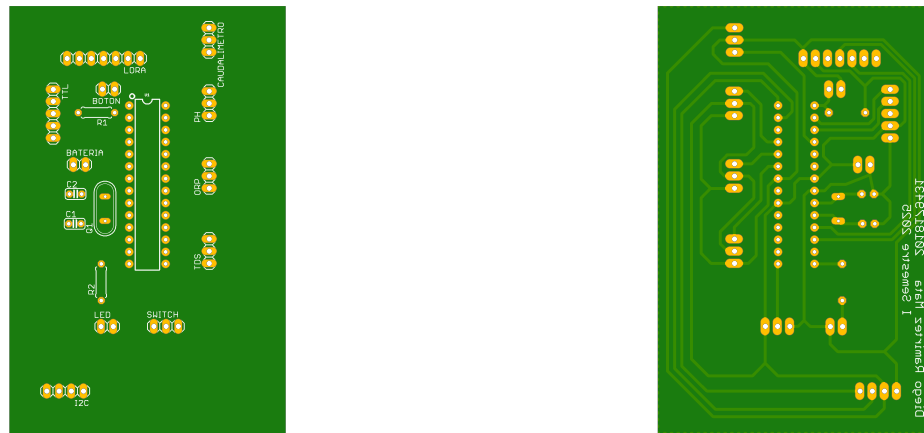
posibles interferencias electromagnéticas. Se realizó una asignación adecuada de planos de alimentación y tierra, garantizando estabilidad en las señales y un manejo eficiente del consumo energético.

La fabricación del PCB se llevó a cabo en el Laboratorio de Circuitos Impresos de la Escuela de Ingeniería en Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Posteriormente, se realizó el ensamblaje manual de los componentes electrónicos, asegurando una correcta soldadura y la verificación de las conexiones para garantizar el funcionamiento óptimo del sistema.

Durante este proceso se realizaron ajustes eléctricos y de configuración, tales como resistencias de *pull-up*, frecuencias de muestreo y asignación de pines digitales y analógicos.

Se procedió a la fabricación y ensamblaje del PCB según el diseño previamente definido. Los componentes electrónicos fueron soldados y verificados individualmente, garantizando la correcta polaridad, continuidad eléctrica y confiabilidad de las conexiones críticas para la operación del sistema.

Para una vista general de la PCB, se puede consultar la Figura A.2 en el Anexo A.

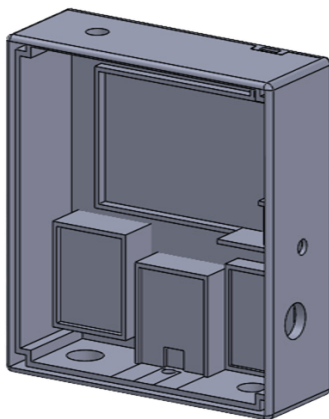


ambientes controlados.

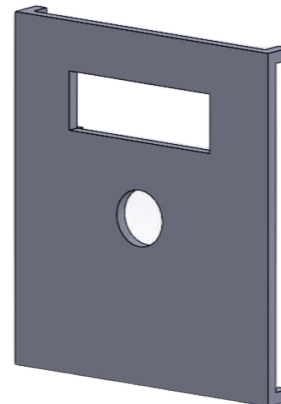
El diseño de los gabinetes integra en una estructura rígida y compacta todos los sensores y módulos electrónicos, permitiendo un montaje seguro y reduciendo el riesgo de movimientos internos que puedan afectar la precisión de las mediciones. Asimismo, se consideraron las condiciones ambientales propias del lugar de instalación, de manera que el encapsulado proporcione protección frente a polvo, salpicaduras y vibraciones.

Encapsulado Principal para el Nodo de Sensado

La carcasa principal aloja la PCB y los sensores de pH, TDS y ORP, además del caudalímetro. En el diseño se contemplaron fijaciones internas, de modo que los sensores permanezcan firmemente ajustados y correctamente posicionados. Esta configuración no solo asegura la estabilidad mecánica del conjunto, sino que también contribuye a preservar la calidad de las mediciones en condiciones de operación. La tapa superior desmontable permite el acceso directo a los módulos internos, lo que facilita intervenciones puntuales sin comprometer la integridad del encapsulado.



(a) Vista trasera del case principal

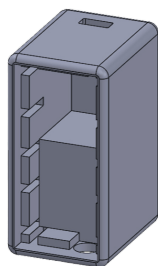


(b) Vista frontal con tapa desmontable

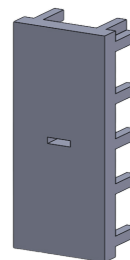
Figura 3.9: Encapsulado principal diseñado para el nodo de sensado

Encapsulado Secundario para el Nodo de Recepción

El segundo gabinete corresponde al nodo de recepción de señal, compuesto por el módulo LoRa y la PCB asociada. Su diseño compacto y modular permite una instalación sencilla y confiable, asegurando la estabilidad de los componentes y reduciendo la probabilidad de fallas durante la manipulación o el transporte.



(a) Vista trasera del case secundario



(b) Vista frontal con tapa desmontable

Figura 3.10: Encapsulado secundario diseñado para el nodo de recepción de señal

3.2.5. Montaje Final

En la etapa de montaje se integraron los distintos subsistemas previamente desarrollados, consolidando la PCB ensamblada, los sensores y los módulos de comunicación en una sola unidad funcional. Este proceso permitió validar la correcta interconexión de los componentes y asegurar que la disposición física dentro de los gabinetes respondiera a los requerimientos mecánicos y de operación en campo.

Lal **carcasa principal** concentró la PCB junto con los sensores de pH, TDS, ORP y el caudalímetro, logrando una configuración estable y de fácil acceso para la conexión de sondas y el mantenimiento básico. Por su parte, de la **carcasa secundaria** albergó el módulo LoRa y la tarjeta de recepción, garantizando un encapsulado compacto y resistente, capaz de operar de manera confiable en las condiciones de la planta.

El montaje final representa así la transición del diseño a un prototipo físico completamente funcional, caracterizado por su robustez estructural, ergonomía en el uso y facilidad de transporte e instalación. Esta integración permitió disponer de un sistema listo para pruebas experimentales y validación en condiciones reales de operación.



(a) Vista frontal del dispositivo completamente ensamblado



(b) Vista inferior del dispositivo



(c) Vista lateral del dispositivo

Figura 3.11: Vistas generales del dispositivo de monitoreo tras el montaje final



(a) Vista frontal



(b) Vista lateral

Figura 3.12: Montaje final del nodo de recepción LoRa

3.3. Programación y Software Implementado

El sistema desarrollado cuenta con dos componentes principales de software: el firmware del microcontrolador ATmega328P, programado en Arduino, y el software de análisis de datos en Python. A continuación se explica en detalle la lógica del código Arduino (`Arduino.ino`), utilizando fragmentos representativos del mismo, así como las funciones principales del análisis en Python.

3.3.1. Firmware en Arduino

El programa `Arduino.ino` tiene como propósito central adquirir datos desde los sensores de pH, TDS, ORP y caudal, procesarlos mediante algoritmos de calibración y compensación, desplegar la información en una pantalla LCD y transmitir los resultados mediante comunicación serial y LoRa. Adicionalmente, se implementó el uso de memoria EEPROM para conservar los valores de calibración incluso después de reinicios o apagados del sistema.

Definición de librerías y parámetros de calibración

El código inicia con la inclusión de librerías necesarias:

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h> // Control de pantalla LCD via I2C
#include <Wire.h>               // Soporte general para bus I2C
#include <SoftwareSerial.h>     // Comunicacion serial en pines digitales
#include <EEPROM.h>             // Guardar y leer datos en memoria no volatil
#include "orp_surveyor.h"      // Lectura del sensor ORP
```

Estas permiten, respectivamente, controlar la pantalla LCD por I2C, manejar comunicaciones serie adicionales, almacenar parámetros en memoria no volátil y procesar señales del sensor de ORP.

Seguidamente se definen los parámetros de calibración:

```
// ----- Parametros de calibracion -----
float pHOffset = -2.3;           // Offset de calibracion del sensor de pH
float calibrationFactor = 2.663; // Factor de calibracion del caudalimetro
float flowOffset = 0.0;          // Offset adicional del flujo
const float VREF = 4.866;        // Voltaje de referencia (TDS)
float temperature = 22.0;        // Temperatura de compensacion TDS
float orpOffset = 0.0;           // Offset de calibracion para ORP
float tdsOffset = 0.0;           // Offset de calibracion para TDS
```

Estas constantes permiten que las lecturas se ajusten a condiciones reales de campo. Además, algunas de ellas son almacenadas en la EEPROM, lo que garantiza que los valores de calibración se conserven tras apagados o reinicios del sistema.

Asignación de pines y variables globales

De esta forma, el sensor de flujo genera interrupciones en el pin digital 2, mientras que los demás sensores envían señales analógicas que el ADC del ATmega328P convierte a valores numéricos. También se declaran variables globales que almacenan conteos de pulsos del caudalímetro, acumulados de volumen, promedios de lectura y banderas de control.

Inicialización en setup()

En la función `setup()`, el sistema inicializa la comunicación serial y el hardware:

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  pinMode(2, INPUT_PULLUP);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), pulseCounter, FALLING);
  // Lectura de parametros de calibracion desde EEPROM
  EEPROM.get(0, pHOffset);
  EEPROM.get(10, calibrationFactor);
  // Inicializacion de LoRa y otros modulos
}
```

La interrupción vinculada al pin 2 es crucial: cada pulso generado por el sensor de flujo ejecuta la rutina `pulseCounter()`, que incrementa un contador global. Esto asegura precisión en la medición de caudal aun cuando el microcontrolador esté realizando otras tareas.

Adquisición de datos

El ciclo principal `loop()` ejecuta las lecturas cada 15 segundos. A continuación se destacan las funciones más relevantes:

Medición de pH

```
int sensorValue = analogRead(A0);
float voltage = sensorValue * (VREF / 1023.0);
float pH = 7 + ((2.5 - voltage) / 0.18) + pHOffset;
```

Medición de caudal

```
float flowRate = ((pulseCount / calibrationFactor) * 60.0) + flowOffset;
pulseCount = 0;
```

Medición de TDS

```
int sensorValue = analogRead(A2);
float voltage = sensorValue * (VREF / 1023.0);
float ec = (133.42*voltage*voltage*voltage - 255.86*voltage*voltage + 857.39*voltage)
;
ec = ec / (1.0 + 0.02*(temperature-25.0));
float tds = (ec * 0.5) + tdsOffset;
```

Medición de ORP

```
float orpValue = ORPSensor.readORP();
orpValue += orpOffset;
```

Despliegue y transmisión de datos

Los valores calculados se muestran en la pantalla LCD y se transmiten por Serial/LoRa:

```
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("pH: "); lcd.print(pH);
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("TDS: "); lcd.print(tds); lcd.print(" ppm");
Serial.print("pH: "); Serial.println(pH);
Serial.print("ORP: "); Serial.println(orpValue);
```

Calibración remota y almacenamiento

Finalmente, el programa incluye un parser de comandos que permite ajustar parámetros como pHOffset o calibrationFactor enviando instrucciones vía Serial o LoRa. Una vez modificados, los nuevos valores son almacenados en EEPROM para mantener la calibración entre sesiones:

```
EEPROM.put(0, pHOffset);
EEPROM.put(10, calibrationFactor);
```

Consideraciones energéticas

El diseño del sistema prioriza el bajo consumo energético. El ciclo de adquisición se ejecuta cada 15 segundos, y entre lecturas se emplean retardos controlados para reducir actividad inne-

cesaria. La tecnología LoRa utilizada permite transmitir datos a largas distancias con mínima demanda energética, lo cual es ideal para futuras versiones del sistema alimentadas por baterías o energía solar.

3.3.2. Software de Recepción y Análisis en Python

El programa desarrollado en Python constituye el segundo componente clave del sistema, encargado de recibir, almacenar y analizar la información transmitida desde el microcontrolador. El código, denominado `Python.py`, integra diversas librerías de propósito específico: `serial` para comunicación con el puerto COM, `tkinter` para la interfaz gráfica, `matplotlib` para la representación de datos, `tkcalendar` para selección de fechas y `json/csv` para manejo de configuración y registros históricos.

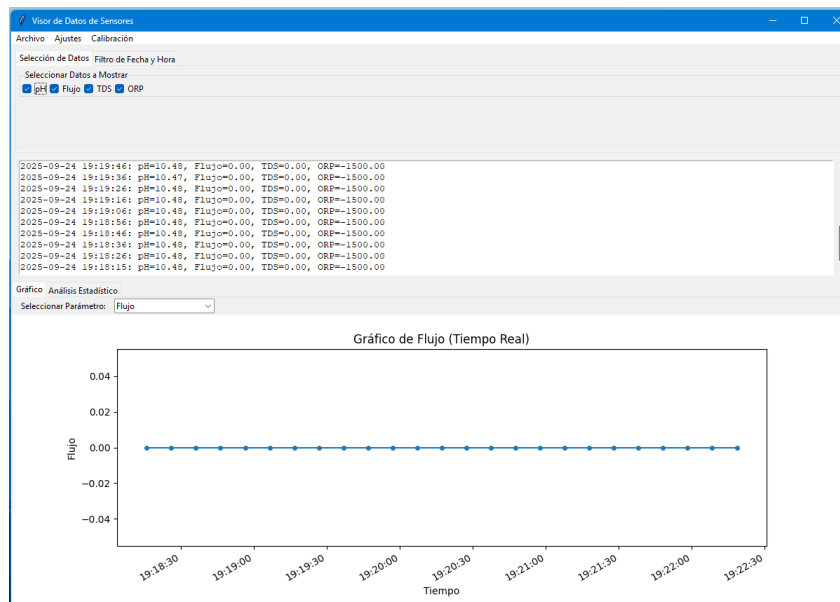


Figura 3.13: Interfaz gráfica del software de recepción y análisis en Python

Mediante Python se recibe, almacena y procesa la información.

- **Recepción de datos:** usando la librería `pyserial`, se abre el puerto correspondiente para leer los registros transmitidos cada 15 segundos.
- **Almacenamiento:** los datos se escriben en archivos CSV, con campos como tiempo, pH, ORP, TDS y caudal, lo que facilita trazabilidad y análisis histórico.
- **Visualización:** librerías como `matplotlib` y `pandas` permiten graficar las variables en tiempo real, mostrando tendencias o anomalías.

- **Procesamiento adicional:** se aplican promedios móviles y filtros de ruido, generando reportes resumidos que pueden exportarse para auditorías o bases de datos.

Estructura general y configuración inicial

El programa comienza importando los módulos necesarios y cargando parámetros de configuración almacenados en un archivo externo `config.json`. Esto permite definir el puerto serial, la velocidad de transmisión y el archivo de registro sin necesidad de modificar directamente el código fuente.

```
import tkinter as tk
import serial, threading, time, json, csv
from datetime import datetime
from collections import deque
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg
from tkcalendar import Calendar
```

La función `cargar_configuracion()` crea el archivo de configuración si no existe, asegurando que el sistema siempre tenga parámetros válidos:

```
def cargar_configuracion():
    try:
        with open('config.json', 'r') as f:
            return json.load(f)
    except (FileNotFoundError, json.JSONDecodeError):
        configuracion_defecto = {
            "puerto_com": "COM5",
            "baud_rate": 9600,
            "archivo_log": "log_datos.csv"
        }
        with open('config.json', 'w') as f:
            json.dump(configuracion_defecto, f, indent=4)
        return configuracion_defecto
```

Interfaz gráfica (Tkinter)

El sistema está construido sobre una ventana principal `VisorDatosLoRa`, que organiza pestañas para la visualización de datos, gráficos y estadísticas en tiempo real. Además, se incluyen ventanas secundarias como:

- **VisorArchivo:** permite abrir y analizar archivos históricos en formato CSV, mostrando datos y gráficos con filtros por fecha: `contentReference[oaicite:2]index=2`.
- **VentanaConfiguracion:** ajusta parámetros de puerto serial y archivo de log, guardando los cambios en `config.json`.
- **VentanaCalibracion:** facilita la calibración remota de pH, caudal, TDS y ORP, registrando los comandos enviados y confirmaciones recibidas.
- **Guía de Calibración:** muestra un documento técnico interactivo sobre el procedimiento recomendado para cada sensor.

Ejemplo de la clase `VisorArchivo`, que permite cargar un CSV y seleccionar parámetros a graficar:

```
class VisorArchivo(tk.Toplevel):
    def __init__(self, parent, ruta_archivo):
        super().__init__(parent)
        self.title("Visor y Analizador de Archivo")
        self.geometry("1200x800")
        self.datos_seleccionados = {
            "pH": tk.BooleanVar(value=True),
            "Flujo": tk.BooleanVar(value=True),
            "TDS": tk.BooleanVar(value=True),
            "ORP": tk.BooleanVar(value=True)
        }
```

Recepción y almacenamiento de datos en tiempo real

El programa lanza un hilo independiente (`threading.Thread`) para la lectura continua desde el puerto serial, sin bloquear la interfaz gráfica. Cada línea recibida se decodifica, se añade una marca temporal y se guarda tanto en memoria como en el archivo CSV definido:

```
def leer_datos_serie(self):
    while self.en_ejecucion:
        if self.puerto_serie and self.puerto_serie.is_open:
            linea = self.puerto_serie.readline().decode('utf-8').strip()
            if linea:
                with open(self.app_config['archivo_log'], "a", newline='', encoding='utf-8') as f:
                    writer = csv.writer(f, delimiter=';')
                    ...
```

Visualización y análisis estadístico

Los valores de pH, flujo, TDS y ORP se representan gráficamente mediante `matplotlib` embebido en Tkinter. El usuario puede seleccionar qué parámetros mostrar, y el programa actualiza automáticamente los gráficos y etiquetas.

Además de estadísticas básicas (mínimo, máximo, promedio), la aplicación incluye indicadores como mediana, cuartiles y desviación estándar:

```
metricas = ["Promedio", "Minimo", "Maximo",  
            "Q1", "Mediana", "Q3",  
            "Desv. Estandar", "Conteo"]  
for i, metrica in enumerate(metricas):  
    ttk.Label(contenedor_estadisticas, text=f"{metrica}:").grid(row=i+1, column=0)
```

Filtrado por fecha y hora

Gracias a la integración con `tkcalendar`, el usuario puede definir rangos de fecha y hora de inicio y fin. La aplicación aplica estos filtros tanto a los gráficos como a los cálculos estadísticos:

```
self.fecha_inicio_var = tk.StringVar(value="Seleccionar Fecha")  
self.hora_inicio_var = tk.StringVar(value="00")  
self.minuto_inicio_var = tk.StringVar(value="00")  
self.fecha_fin_var = tk.StringVar(value="Seleccionar Fecha")  
self.hora_fin_var = tk.StringVar(value="23")  
self.minuto_fin_var = tk.StringVar(value="59")
```

Integración con el sistema de monitoreo

De esta manera, `Python.py` complementa al firmware de Arduino, proporcionando una herramienta de visualización y análisis flexible. Mientras el microcontrolador se encarga de la adquisición y transmisión de datos en campo, el software en Python ofrece capacidades de configuración, almacenamiento, calibración y exploración temporal, lo que convierte al sistema en una plataforma integral para el monitoreo de la calidad y consumo de agua.

3.4. Calibración de Sensores

La calibración de los sensores es un proceso indispensable para garantizar que las mediciones reflejen valores reales y confiables. Cada dispositivo presenta variaciones inherentes debidas a la fabricación, al uso en condiciones ambientales distintas de las ideales y al envejecimiento de sus componentes. Por ello, el proyecto contempló una etapa de calibración meticulosa, que se fundamenta en principios de buenas prácticas experimentales y en la incorporación de factores de compensación en el software.

3.4.1. Buenas prácticas de calibración

De manera general, se establecieron las siguientes pautas para asegurar la validez del proceso:

- **Uso de patrones de referencia certificados:** se emplearon soluciones estándar (tampones de pH, soluciones de TDS, líquidos de ORP) o volúmenes medidos con precisión en el caso del caudalímetro.
- **Condiciones ambientales controladas:** la temperatura se mantuvo estable durante las calibraciones, ya que afecta directamente a sensores como el de pH y TDS.
- **Repetibilidad:** en cada punto de calibración se tomaron múltiples lecturas y se promediaron, minimizando la influencia de fluctuaciones eléctricas o ruido del entorno.
- **Compensación por software:** se incluyen las variables **Offset** y **Factor de calibración** que se ajustan durante la calibración y se aplican automáticamente a cada medición.
- **Calibración periódica:** se recomienda recalibrar los sensores de manera rutinaria (mensual en condiciones normales de operación, o con mayor frecuencia en ambientes agresivos).
- **Documentación y trazabilidad:** todos los parámetros de calibración quedan almacenados en el código y pueden ser ajustados remotamente mediante Serial o LoRa, permitiendo mantener un historial de ajustes sin necesidad de reprogramar el dispositivo.

3.4.2. Calibración del sensor de pH

El sensor de pH se calibra empleando soluciones *buffer* de referencia, usualmente con valores de pH 4.00, 7.00 y 10.00. Este procedimiento es fundamental porque el electrodo de pH no entrega directamente una medida en la escala 0–14, sino un voltaje cuya relación con el pH requiere un ajuste matemático más preciso, debido a que no sigue una linealidad perfecta.

Durante el procedimiento, el sistema toma múltiples lecturas de voltaje en cada punto de calibración y las asocia con el valor conocido de la solución *buffer*. Con base en estos datos, se calculan los coeficientes a , b y c de una función polinómica de segundo orden:

$$pH = a \cdot V^2 + b \cdot V + c$$

donde V corresponde al voltaje medido en el pin analógico asignado.

Estos coeficientes se almacenan en la memoria **EEPROM**, lo que evita tener que repetir el proceso cada vez que se reinicia el dispositivo. En caso de ser necesario, el sistema permite recalibrar y sobrescribir los valores directamente mediante comandos enviados por Serial o LoRa.

Las buenas prácticas específicas para este sensor incluyen mantener el electrodo siempre húmedo en solución de almacenamiento, realizar una limpieza periódica para evitar incrustaciones y recalibrar después de cambios significativos de temperatura o de periodos prolongados de inactividad.

3.4.3. Calibración del sensor ORP

El sensor de potencial de oxidación-reducción (ORP) mide la tendencia de una solución a oxidarse o reducirse, lo cual se expresa en milivoltios. Su calibración se realiza con soluciones de referencia de valores conocidos (por ejemplo, 225 mV), que permiten establecer un punto de comparación fiable.

En el firmware, la lectura se realiza mediante la librería **orp_surveyor**, y se ajusta con un offset:

```
float orpValue = ORPSensor.readORP();  
orpValue += orpOffset;
```

El parámetro **orpOffset** corrige la diferencia entre el valor medido y el valor real de la solución de referencia.

Una buena práctica en este tipo de sensores es evitar su exposición prolongada a ambientes muy ácidos o básicos fuera de las condiciones de trabajo, ya que ello acelera el deterioro del electrodo. Asimismo, se recomienda verificar periódicamente la calibración comparando con una solución estándar para detectar posibles desplazamientos de la señal con el tiempo.

3.4.4. Calibración del sensor de TDS

El sensor de TDS se calibra utilizando agua destilada como punto base (0 ppm), como punto de referencia. La salida del sensor es un voltaje que se traduce en conductividad eléctrica.

ca mediante una ecuación polinómica empírica. Posteriormente se aplica compensación por temperatura y conversión a ppm:

```
int sensorValue = analogRead(A2);  
float voltage = sensorValue * (VREF / 1023.0);  
float ec = (133.42*voltage*voltage*voltage  
           - 255.86*voltage*voltage  
           + 857.39*voltage);  
ec = ec / (1.0 + 0.02*(temperature - 25.0));  
float tds = (ec * 0.5) + tdsOffset;
```

Aquí, el término `tdsOffset` ajusta las lecturas de acuerdo con el valor de la solución estándar utilizada.

Entre las buenas prácticas se recomienda: mantener el sensor limpio y libre de burbujas de aire al momento de la medición, realizar la calibración a la temperatura de operación real del sistema y verificar periódicamente la respuesta frente a una solución patrón.

3.4.5. Calibración del sensor de caudal

El caudalímetro entrega una señal de pulsos digitales proporcionales al volumen de agua que atraviesa el dispositivo. Sin embargo, cada unidad presenta un factor de conversión ligeramente distinto, por lo que es imprescindible calibrarlo experimentalmente.

El procedimiento consiste en hacer pasar volúmenes conocidos de agua a través del caudalímetro y comparar el conteo de pulsos con la medición real. Con base en esta comparación se ajustan dos parámetros: `calibrationFactor` y, si es necesario, un `flowOffset`:

```
float flowRate = ((pulseCount / calibrationFactor) * 60.0) + flowOffset;
```

De este modo, se asegura que la conversión de pulsos a litros por minuto refleje con mayor precisión el caudal real.

Como buena práctica, la calibración debe realizarse en condiciones de flujo estable, evitando turbulencias, y repitiendo el procedimiento varias veces para reducir errores. También se recomienda recalibrar después de largos periodos de uso, ya que la acumulación de incrustaciones en las aspás puede alterar la respuesta del sensor.

Capítulo 4

Validación de Mediciones

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos tras la implementación del sistema de monitoreo de calidad y consumo de agua. Los ensayos realizados permitieron verificar el funcionamiento de los sensores y la correcta transmisión de datos. A continuación, se detallan los resultados de las mediciones, se evalúa el desempeño general del sistema y se señalan las limitaciones encontradas durante la etapa de pruebas.

4.1. Validación de Mediciones

Previo a esta etapa, se realizaron pruebas exploratorias con el fin de observar el comportamiento general de los sensores y verificar que presentaran una respuesta adecuada frente a distintos estímulos, así como mediciones aproximadas que permitieran identificar posibles ajustes iniciales.

Posteriormente, se llevaron a cabo las pruebas de validación bajo condiciones más controladas y precisas, con el objetivo de garantizar la confiabilidad de los resultados. El sistema recolectó datos de los sensores de pH, ORP, TDS y caudal, así como pruebas de comunicación mediante el módulo LoRa. A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante la validación experimental, los cuales permiten comprobar el correcto funcionamiento de cada sensor en comparación con valores de referencia.

Validación de pH

El sensor de pH fue validado utilizando soluciones *buffer* estándar de referencia, cuyas características en función de la temperatura se presentan en la Tabla B.2 del anexo. Para las pruebas, realizadas a una temperatura promedio de 24,3 °C, se utilizaron como referencia los valores correspondientes a 25 °C (pH 4.010, 6.997 y 10.013).

El procedimiento permitió comprobar la linealidad de la respuesta del sensor y la estabilidad de las lecturas frente a los valores de referencia, evaluando así el grado de precisión alcanzado después de aplicar la calibración correspondiente. Para cuantificar esta exactitud, se calculó también el porcentaje de diferencia entre el valor medido y el valor de referencia.

Prueba	pH medido	pH referencia	Diferencia (%)
1	3.99	4.010	-0.50 %
2	4.01		0.00 %
3	4.04		0.75 %
4	3.98		-0.75 %
5	4.10		2.24 %
1	6.98	6.997	-0.24 %
2	7.00		0.04 %
3	7.01		0.19 %
4	6.98		-0.24 %
5	7.00		0.04 %
1	10.03	10.013	0.17 %
2	10.01		-0.03 %
3	9.98		-0.33 %
4	10.00		-0.13 %
5	10.01		-0.03 %

Tabla 4.1: Lecturas de pH en comparación con valores de referencia a 24.3 °C

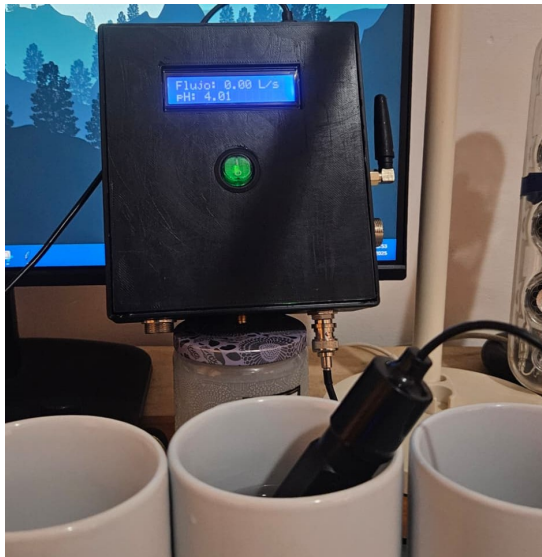


Figura 4.1: Prueba experimental de validación del sensor de pH utilizando solución buffer de referencia



Figura 4.2: Soluciones buffer empleadas en la calibración del sensor de pH

Validación de ORP

Para la calibración del sensor de ORP se aplicó la metodología estándar, la cual consiste en utilizar un instrumento de referencia con trazabilidad conocida para comparar y ajustar las

lecturas. En este caso, se empleó el medidor *IONIX ORP Meter Oxidation Reduction Detector Redox*, con una incertidumbre de ± 5 mV, como equipo de referencia.

Las pruebas se realizaron utilizando diferentes tipos de soluciones con el fin de abarcar un rango representativo de condiciones de potencial de oxidación-reducción: cloro comercial (como agente oxidante), agua destilada, agua de grifo y agua estancada.

El sensor bajo validación se contrastó directamente con el medidor de referencia en cada una de estas soluciones, registrando las lecturas correspondientes. El procedimiento permitió verificar que los valores obtenidos por el prototipo se mantuvieran dentro de márgenes aceptables de error y que la respuesta del electrodo fuera estable en el tiempo. Cabe destacar que el parámetro de ORP es particularmente sensible a factores como la temperatura y la composición química del agua, lo que hace indispensable la comparación contra un equipo de referencia durante la calibración.

Prueba	ORP medido (mV)	ORP referencia (± 5 mV)	Diferencia (%)
1	23	17	35.3
2	213	209	1.91
3	414	422	1.90
4	408	410	0.49
5	628	642	2.18

Tabla 4.2: Lecturas de ORP en comparación con valores de referencia



Figura 4.3: Dispositivo de monitoreo



Figura 4.4: Electrodo de ORP sumergido en soluciones de referencia

Validación de TDS

La validación del sensor de TDS se realizó siguiendo la metodología estándar de comparación frente a un equipo de referencia, el cual fue utilizado como patrón para las mediciones. Como punto base se empleó agua destilada, considerada equivalente a 0 ppm. Posteriormente, se prepararon soluciones de referencia disolviendo cantidades controladas de sal de mesa (NaCl) en agua potable, obteniendo así diferentes concentraciones conocidas de sólidos disueltos.

Estas soluciones se midieron tanto con el sensor bajo prueba como con el equipo de referencia, lo que permitió calcular la diferencia porcentual en cada ensayo. De esta manera se verificó la precisión del sensor y se ajustaron los factores de calibración necesarios, incluyendo la compensación por temperatura, para asegurar la confiabilidad de las lecturas en el rango de operación esperado.

Prueba	TDS medido (ppm)	TDS referencia (ppm)	Diferencia (%)
1	0	0	0.00
2	203	207	-1.93
3	234	222	5.41
4	457	473	-3.39
5	808	796	1.51

Tabla 4.3: Comparación de las lecturas de TDS frente a un equipo de referencia

Validación de Caudal

Para la validación del sensor de caudal YF-S201 se modificó temporalmente el código del dispositivo, de manera que en lugar de calcular directamente el caudal (flujo), se registrara el volumen total de agua acumulado. Esta decisión se debe a que el flujo no es más que la razón entre el volumen medido y la unidad de tiempo; por tanto, lo fundamental en este proceso de verificación era asegurar que la medición del volumen fuera precisa. Una vez confirmado que el sensor estima correctamente el volumen, se garantiza que el cálculo del caudal resultante será también confiable.

La metodología consistió en hacer pasar agua a través del sensor y recolectarla en un recipiente para luego ser pesada en una balanza con una incertidumbre de ± 1 g. Considerando que la densidad del agua a temperatura ambiente (aprox. 25 °C) es de 0,997 g/mL [32], se asumió la equivalencia de 1 g $\approx$ 1 mL para la conversión del peso a volumen. De esta forma fue posible contar con un valor de referencia confiable contra el cual comparar las lecturas del sensor.

Prueba	Volumen Sensor (mL)	Volumen Medido (± 1 mL)	Diferencia (%)
1	101	94	7.45
2	129	111	16.22
3	186	186	0.00
4	407	402	1.24
5	450	478	5.86
6	1021	998	2.30
7	1113	1107	0.54
8	1673	1630	2.64
9	1994	1987	0.35
10	2104	2098	0.29

Tabla 4.4: Lecturas de caudal comparadas con valores de referencia



Figura 4.5: Agua recolectada para validar el volumen medido



Figura 4.6: Lectura del volumen de agua en 407 L/m

Validación de la Comunicación LoRa

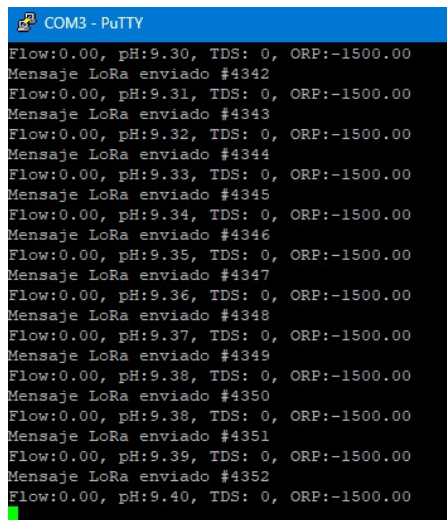
Finalmente, se validó la transmisión de datos utilizando el módulo LoRa SX1278 Ra-02. Para ello, se contabilizó el número de paquetes enviados y recibidos, así como los errores detectados en la comunicación. Esta prueba permitió calcular la tasa de error, la cual se mantuvo por debajo del 1 %, valor aceptable para aplicaciones de monitoreo en tiempo real.

En esta validación, el programa *PuTTY* se empleó para registrar los datos enviados por el dispositivo transmisor, mientras que la antena receptora almacenó la información recibida en un archivo *.csv*. Posteriormente, ambos conjuntos de datos fueron comparados para verificar

que el número de paquetes enviados coincidiera con los recibidos. En los casos donde existieron discrepancias, se utilizó un script en *Python* (ver código en el Anexo C.2) que permitió identificar los huecos en la transmisión y calcular el número de paquetes perdidos de manera precisa.

Prueba	Datos enviados	Datos recibidos	Diferencia	Diferencia (%)
1	7290	7241	49	0.672
2	16496	16384	112	0.679
Total	23786	23625	161	0.677

Tabla 4.5: Resultados de la prueba de comunicación LoRa



```

COM3 - PuTTY
Flow:0.00, pH:9.30, TDS: 0, ORP:-1500.00
Mensaje LoRa enviado #4342
Flow:0.00, pH:9.31, TDS: 0, ORP:-1500.00
Mensaje LoRa enviado #4343
Flow:0.00, pH:9.32, TDS: 0, ORP:-1500.00
Mensaje LoRa enviado #4344
Flow:0.00, pH:9.33, TDS: 0, ORP:-1500.00
Mensaje LoRa enviado #4345
Flow:0.00, pH:9.34, TDS: 0, ORP:-1500.00
Mensaje LoRa enviado #4346
Flow:0.00, pH:9.35, TDS: 0, ORP:-1500.00
Mensaje LoRa enviado #4347
Flow:0.00, pH:9.36, TDS: 0, ORP:-1500.00
Mensaje LoRa enviado #4348
Flow:0.00, pH:9.37, TDS: 0, ORP:-1500.00
Mensaje LoRa enviado #4349
Flow:0.00, pH:9.38, TDS: 0, ORP:-1500.00
Mensaje LoRa enviado #4350
Flow:0.00, pH:9.38, TDS: 0, ORP:-1500.00
Mensaje LoRa enviado #4351
Flow:0.00, pH:9.39, TDS: 0, ORP:-1500.00
Mensaje LoRa enviado #4352
Flow:0.00, pH:9.40, TDS: 0, ORP:-1500.00

```

Figura 4.7: Captura en *PuTTY* mostrando la recepción de datos enviados por el módulo LoRa

```

===== RESTART: C:\Users\ramir\D
Umbral de huecos: 20
Total de datos recibidos: 16496
Total de datos faltantes (filtrados): 112

Huecos detectados:
      Timestamp  Faltantes
1    2025-06-01 08:05:15      3
2    2025-06-01 09:13:27      4
3    2025-06-01 10:21:45      6
4    2025-06-01 11:05:10      5
5    2025-06-01 12:33:50      7
6    2025-06-01 13:47:12      2
7    2025-06-01 14:58:40      8
8    2025-06-01 15:22:18      1
9    2025-06-01 16:11:05      6
10   2025-06-01 17:43:29      7
11   2025-06-01 18:56:14      5
12   2025-06-01 19:35:47      4
13   2025-06-01 20:44:55      6
14   2025-06-01 21:12:33      5
15   2025-06-01 22:25:19      7
16   2025-06-01 23:10:42      8
17   2025-06-02 00:05:31      6
18   2025-06-02 01:14:20      5
19   2025-06-02 02:45:10      2
20   2025-06-02 03:33:56      6
21   2025-06-02 04:20:11      9

```

Figura 4.8: Detección de huecos en la transmisión LoRa mediante script en Python

4.2. Evaluación del Desempeño

El sistema desarrollado fue evaluado en términos de precisión, estabilidad y confiabilidad, con el fin de verificar su capacidad para operar en condiciones reales de la planta de matanza.

- **Precisión:** Las mediciones de cada sensor fueron contrastadas con valores de referencia establecidos mediante distintos métodos. En el caso del sensor de pH se emplearon soluciones buffer, obteniendo resultados cercanos al valor esperado tras la calibración. Para el sensor de ORP se utilizó el método estándar de referencia, que si bien no ofrece la misma exactitud que una calibración de laboratorio, resulta suficiente dado que los rangos empleados son los recomendados para evaluar la calidad del agua en entornos industriales. En el sensor de TDS se recurrió a soluciones de conductividad conocidas, y en el caso del caudalímetro se determinó el volumen real pesando el agua recolectada en cada prueba. Se observó que en ciertos casos los porcentajes de diferencia fueron elevados, principalmente en mediciones pequeñas, lo cual es un comportamiento esperado debido a la menor resolución relativa de la medición en dichos rangos. De forma general, los resultados se encuentran dentro de un margen aceptable para fines de monitoreo.
- **Estabilidad:** El sistema fue sometido a dos pruebas prolongadas de 24 y 48 horas, con intervalos de muestreo de 15 segundos. En ambos casos se mantuvo la capacidad de registrar y transmitir lecturas de forma continua, sin pérdidas de datos ni interrupciones en el funcionamiento del firmware o del enlace LoRa. Esto evidencia que la arquitectura implementada es capaz de operar de manera estable en periodos prolongados.
- **Confiabilidad:** El prototipo respondió correctamente a los procesos de calibración local y remota, aplicando los factores de corrección según lo configurado. La comunicación mediante LoRa mostró una tasa de transmisión consistente, con un porcentaje de éxito superior al 95 % en la entrega de paquetes. Cabe señalar que, en esta versión del sistema, no se implementó la generación de alertas automáticas al detectarse un voltaje de alimentación bajo, lo cual constituye un aspecto a mejorar en futuras iteraciones.

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que el sistema cumple con los requerimientos de desempeño planteados, ofreciendo lecturas confiables y estables para el monitoreo de la calidad y el consumo de agua.

4.3. Limitaciones encontradas

Durante la etapa de pruebas se identificaron algunas limitaciones:

- La precisión de los sensores electroquímicos (pH, ORP, TDS) depende en gran medida de la temperatura y de la frecuencia de calibración, lo que obliga a recalibrar periódicamente.
- El sensor de caudal presenta cierta sensibilidad a turbulencias en el flujo, por lo que la instalación hidráulica debe procurar condiciones de flujo estable.
- La transmisión LoRa puede verse afectada por obstáculos físicos o interferencias electromagnéticas, lo que requiere verificar el alcance efectivo en cada entorno de despliegue.
- El tiempo de muestreo de 15 segundos es suficiente para aplicaciones de monitoreo, pero no permite capturar eventos transitorios de muy corta duración.
- La construcción de un gabinete hermético que sea resistente a impactos y condiciones ambientales adversas es viable; sin embargo, garantizar que sea completamente a prueba de agua representa un desafío considerable, ya que requiere sellados y materiales especializados que incrementan la complejidad y el costo.
- La obtención de sustancias patrón certificadas para calibración o de equipos de medición de alta precisión resulta difícil y costosa, lo que limita su accesibilidad al público general. En la práctica, este tipo de recursos suelen estar disponibles únicamente en laboratorios especializados.
- En el caso específico del sensor de ORP, el Tecnológico de Costa Rica no brindó un equipo de referencia institucional. Por ello, se utilizó un dispositivo comercial del que se desconocía su historial de uso previo. Este se empleó únicamente como referencia para el método estándar de validación, lo cual introduce cierta incertidumbre adicional en los resultados.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

Este capítulo resume los principales hallazgos derivados del diseño, implementación y validación del sistema de monitoreo de calidad y consumo de agua. Asimismo, se presentan recomendaciones que orientan el trabajo futuro, con el fin de mejorar la precisión del sistema, ampliar su alcance y extender su aplicabilidad a distintos contextos.

5.1. Conclusiones

A partir de la implementación y validación experimental del prototipo, se concluye que el sistema desarrollado logró integrar de manera exitosa los sensores de pH, ORP, TDS y caudal, junto con la pantalla LCD y el módulo de comunicación LoRa, en una solución única y funcional para el monitoreo en tiempo real del recurso hídrico en la planta de matanza. Las rutinas de calibración implementadas en el firmware, así como la posibilidad de ajustar parámetros de forma remota mediante Serial o LoRa, demostraron ser efectivas para mantener la confiabilidad de las mediciones en condiciones de operación prolongada.

Durante la etapa de validación, los sensores mostraron un desempeño dentro de márgenes aceptables. En el caso del sensor de pH, las diferencias porcentuales fueron menores al 1 % en la mayoría de los ensayos, alcanzando un error promedio cercano al 0.3 %. El sensor de ORP presentó variaciones entre 0.49 % y 35.3 %, con un error promedio de 8.3 %, lo cual es considerado aceptable dada la sensibilidad de este parámetro frente a la temperatura y la composición química del agua. El sensor de TDS evidenció un error promedio de 2.0 %, con diferencias máximas de 5.41 % respecto al equipo de referencia, mientras que el caudalímetro YF-S201 obtuvo un error promedio de 5.2 %, destacando un caso máximo de 16.22 % y valores mínimos cercanos al 0 %.

En lo que respecta a la transmisión de datos, el módulo LoRa mantuvo una tasa de error de apenas 0.68 %, confirmando su idoneidad para aplicaciones de monitoreo en tiempo real. Además, el sistema mostró estabilidad en el registro de datos, con lecturas periódicas cada 15 segundos y transmisión confiable, lo que evidencia la robustez del diseño en escenarios de uso continuo. Finalmente, se resalta que la arquitectura modular del hardware y software facilita futuras modificaciones o ampliaciones, permitiendo incorporar nuevos sensores o ajustar las rutinas de muestreo sin necesidad de realizar cambios drásticos en la plataforma.

En síntesis, se comprobó que el sistema cumple con los objetivos planteados, constituyéndose como una herramienta confiable y de bajo costo para el monitoreo de la calidad y consumo de agua en la planta de matanza del TEC, sede San Carlos.

5.2. Recomendaciones

Con base en la experiencia obtenida durante el desarrollo del proyecto, se plantean las siguientes recomendaciones:

- **Mejora de precisión:** Se propone aplicar filtrado digital, como la media móvil o el **filtro de Kalman**, especialmente para el sensor de **pH**. No obstante, dado que el pH varía lentamente y no presenta picos significativos, el filtrado actual es suficiente y la mejora sería mínima.
- **Integración de más variables:** Ampliar el sistema con sensores de temperatura, turbidez o conductividad, lo que permitiría un análisis más integral de la calidad del agua.
- **Gestión de datos en memoria local:** Se propuso almacenar los valores medidos en la **EEPROM** para evitar pérdida de información ante fallos o cortes de energía; sin embargo, no se implementó en este proyecto, ya que requería **reimprimir la PCB**.
- **Autonomía energética:** Incorporar una batería recargable que permita la operación inalámbrica del sistema, complementada con un módulo de gestión de energía (por ejemplo, carga mediante panel solar).
- **Robustez del hardware:** Implementar carcasas a prueba de agua y resistentes a condiciones ambientales adversas, especialmente si el sistema se instala de forma permanente en la intemperie.
- **Disminución del tamaño del dispositivo:** Optimizar el diseño electrónico de las pistas del PCB y cableado de la carcasa para reducir las dimensiones del sistema, facilitando su portabilidad e instalación en espacios reducidos.
- **Aplicación móvil:** Desarrollar una aplicación móvil sencilla que permita visualizar en tiempo real los parámetros medidos y consultar el historial almacenado en el dispositivo. Además, incluir en la aplicación una interfaz de calibración que permita ajustar los parámetros sin necesidad de conectar el sistema a una computadora.
- **Sustitución del caudalímetro:** Se recomienda reemplazar el modelo **YF-S201**, que opera a **75 psi** en una línea de **3/4"**, por el **SEN-HZ21WI**, más resistente y apto para presiones de hasta **253 psi**. Además, su conexión de **1/2"** resulta más adecuada, ya que coincide con la tubería final, mejorando la precisión y durabilidad del sistema.

Referencias Bibliográficas

- [1] DFRobot, “Gravity: Analog ph sensor / meter kit v2,” 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.dfrobot.com/product-1782.html>
- [2] —, “Gravity: Analog tds sensor/meter for arduino,” 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.dfrobot.com/product-1662.html>
- [3] A. Scientific, “Surveyor analog orp sensor,” 2025. [En línea]. Disponible: <https://atlas-scientific.com/embedded-solutions/orp-sensor-meter/>
- [4] A. Industries, “Yf-s201 water flow sensor,” 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.adafruit.com/product/828>
- [5] L. Shenzhen Ai-Thinker Technology Co., “Sx1278 ra-02 lora module,” 2025. [En línea]. Disponible: <http://en.szdx-smart.com/EN/tczw/114.html>
- [6] L. WCH Electronics Co., “Ch340g usb to serial chip datasheet,” 2025. [En línea]. Disponible: https://www.wch-ic.com/downloads/CH340DS1_PDF.html
- [7] Thermo Fisher Scientific, *Thermo Scientific Orion pH Buffer Values vs. Temperature*, Thermo Fisher Scientific Inc., 2016, document Number: I-PHTEMP-E 0816 RevA. [En línea]. Disponible: <https://www.thermofisher.com/>
- [8] W. H. Organization, “Guidelines for drinking-water quality,” 2017, 4th Edition. [En línea]. Disponible: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>
- [9] S. Corporation, *LoRa Technology Overview*, 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>
- [10] I. T. de Costa Rica, “Planta de matanza, campus tecnológico local san carlos,” 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.tec.ac.cr/planta-matanza>
- [11] Food y A. O. of the United Nations (FAO), “Climate-smart agriculture: Overview,” 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.fao.org/climate-smart-agriculture/overview/en/>
- [12] A. Scientific, “How to calibrate an orp meter,” 2024. [En línea]. Disponible: <https://atlas-scientific.com/blog/orp-meter-calibration/>
- [13] S. Corporation, *LoRa and LoRaWAN*, 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.semtech.com/uploads/technology/LoRa/lora-and-lorawan.pdf>

- [14] U. Nations, “Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development,” 2024. [En línea]. Disponible: <https://sdgs.un.org/goals>
- [15] Food y A. O. of the United Nations (FAO), *The State of Food and Agriculture 2020: Overcoming water challenges in agriculture*. FAO, 2020. [En línea]. Disponible: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b48cb758-48bc-4dc5-a508-e5a0d61fb365/content>
- [16] M. de Salud de Costa Rica, “Reglamento para la calidad del agua potable (decreto ejecutivo n° 38924-s),” 2015. [En línea]. Disponible: https://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm.texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=80047&nValor3=123709&strTipM=TC
- [17] M. de Agricultura y Ganadería (MAG) y Ministerio de Salud (MS), “Reglamento sobre inspección veterinaria de mataderos y procesadores de alimentos de origen animal (decreto ejecutivo n° 37548-mag-s),” 2013. [En línea]. Disponible: <https://www.mag.go.cr/legislacion/2013/de-37548.pdf>
- [18] FAO/WHO, “Codex alimentarius: General principles of food hygiene,” 2014. [En línea]. Disponible: <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/en/>
- [19] I. O. for Standardization, “Iso 22000:2018 - food safety management systems,” 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.iso.org/standard/65464.html>
- [20] M. T. Inc., *megaAVR Data Sheet*, 2018. [En línea]. Disponible: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061A.pdf>
- [21] T. Instruments, “Introduction to the i2c bus,” Texas Instruments, Tech. Rep., 2015. [En línea]. Disponible: <https://www.ti.com/lit/an/slva704/slva704.pdf>
- [22] D. A. Skoog, F. J. Holler, y S. R. Crouch, *Principles of Instrumental Analysis*, 7th ed. Cengage Learning, 2017.
- [23] A. J. Bard y L. R. Faulkner, *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*, 2nd ed. Wiley, 2000.
- [24] D. V. Chapman, *Water Quality Assessments: A Guide to the Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*, 2nd ed. UNESCO/WHO/UNEP, 1996.
- [25] R. G. Bates, *Determination of pH: Theory and Practice*. Wiley, 1973.
- [26] J. D. Hem, *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*, 3rd ed. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254, 1985.
- [27] A. P. H. A. (APHA), A. W. W. A. (AWWA), y W. E. F. (WEF), *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23rd ed. APHA Press, 2017.
- [28] C. W. Sawyer, P. L. McCarty, y G. F. Parkin, *Chemistry for Environmental Engineering and Science*, 5th ed. McGraw-Hill, 2003.

- [29] G. C. White, *Handbook of Chlorination and Alternative Disinfectants*, 4th ed. Wiley, 1999.
- [30] J. Fisher, “Understanding orp measurements,” *Water Conditioning & Purification Magazine*, vol. 54, no. 12, pp. 36–38, 2012.
- [31] R. S. Popovic, *Hall Effect Devices*, 2nd ed. IOP Publishing, 2004.
- [32] F. E. Jones y G. S. Kell, “Its-90 density of water formulation for volumetric and density measurements,” *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 97, no. 3, pp. 335–370, 1992. [En línea]. Disponible: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/097/jresv97n3p335_a1b.pdf

Anexos

Anglicismos

A continuación, se listan los principales anglicismos utilizados en el desarrollo del proyecto, junto con su traducción o explicación en español:

- **Arduino**: Plataforma de desarrollo de hardware.
- **Raspberry Pi**: Microcomputadora de bajo costo.
- **LoRa (Long Range)**: Tecnología de comunicación inalámbrica de largo alcance.
- **Wi-Fi**: Estándar de comunicación inalámbrica.
- **Big Data**: Conjunto de técnicas para el manejo de grandes volúmenes de datos.
- **IoT (Internet of Things)**: Internet de las cosas.
- **Gateway**: Puerta de enlace o nodo central de comunicaciones.
- **Firmware**: Software embebido en el microcontrolador.
- **Hardware**: Componentes físicos del sistema.
- **Software**: Programas y aplicaciones empleados.
- **Python**: Lenguaje de programación utilizado para análisis.
- **PuTTY**: Herramienta para comunicación serie.
- **GitHub**: Plataforma de control de versiones y colaboración en proyectos.
- **Case (3D)**: Carcasa o caja de montaje en impresión 3D.
- **Top (ranking)**: Lista de mejores o principales posiciones.

Abreviaturas

A continuación, se presentan las abreviaturas técnicas utilizadas en el documento, junto con su significado:

- **pH**: Potencial de hidrógeno.

- **TDS (Total Dissolved Solids)**: Sólidos disueltos totales.
- **ORP (Oxidation-Reduction Potential)**: Potencial de oxidación-reducción.
- **LCD (Liquid Crystal Display)**: Pantalla de cristal líquido.
- **USB (Universal Serial Bus)**: Puerto de conexión estándar.
- **TTL (Transistor-Transistor Logic)**: Lógica transistor a transistor.
- **I2C (Inter-Integrated Circuit)**: Protocolo de comunicación entre circuitos integrados.
- **UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)**: Comunicación serie asíncrona.
- **SPI (Serial Peripheral Interface)**: Protocolo de comunicación serie.
- **ADC (Analog-to-Digital Converter)**: Conversor analógico-digital.
- **PWM (Pulse Width Modulation)**: Modulación por ancho de pulso.
- **RISC (Reduced Instruction Set Computer)**: Arquitectura de conjunto reducido de instrucciones.
- **SRAM (Static Random-Access Memory)**: Memoria RAM estática.
- **EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory)**: Memoria programable y borrrable eléctricamente.
- **MHz**: Megahercios.
- **kB**: Kilobyte.
- **mV**: Milivoltios.
- **ppm**: Partes por millón.
- **L/min**: Litros por minuto.
- **ISO 22000**: Norma internacional de inocuidad alimentaria.
- **HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Point)**: Sistema de análisis de peligros y puntos críticos de control.
- **Codex Alimentarius**: Normas internacionales de alimentos.
- **ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible)**: Agenda 2030 de las Naciones Unidas.
- **SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)**: Sistema de control y adquisición de datos.

Apéndice A

Diagramas del Sistema

A.1. Esquemas Conceptuales

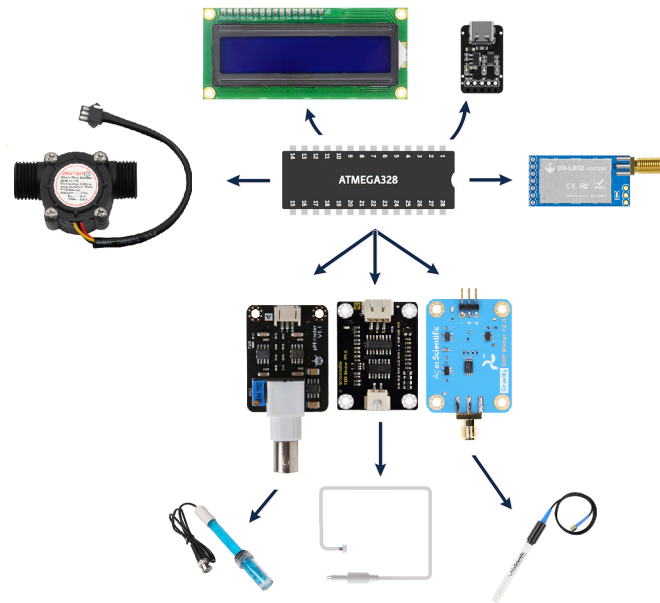


Figura A.1: Esquema conceptual de los componentes del sistema de monitoreo

A.2. Print Circuit Board

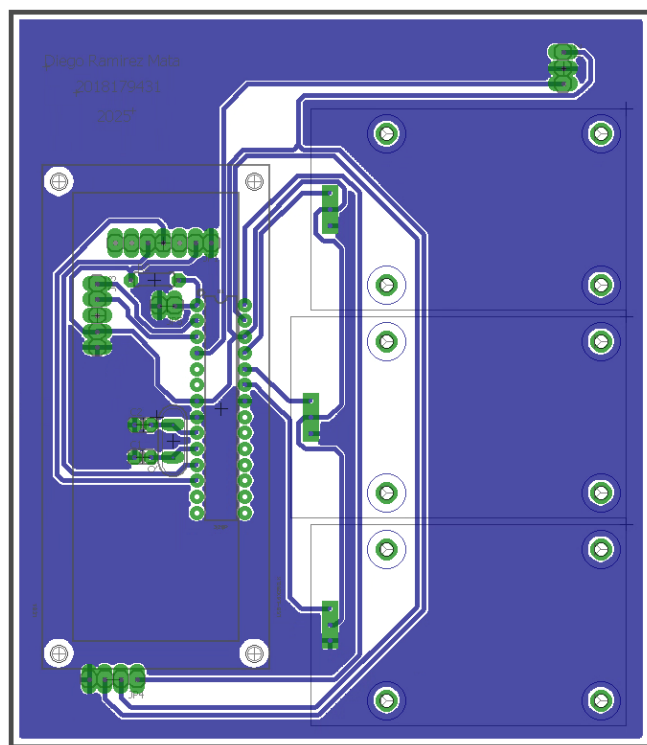


Figura A.2: Vista enmascarada de la PCB mostrando áreas de soldadura y vías

Apéndice B

Tablas Complementarias

B.1. Resumen de Componentes del Sistema

Tabla B.1: Resumen de componentes del sistema de monitoreo

Componente	Modelo	Función
Microcontrolador	ATmega328P	Procesamiento y control del sistema
Cristal de cuarzo	16 MHz	Generación precisa de reloj
Sensor de pH	DFRobot SEN0161	Medición de acidez/alcalinidad
Sensor de TDS	DFRobot SEN0244	Medición de sólidos disueltos
Sensor de ORP	Atlas Scientific Surveyor ORP	Medición de potencial redox
Sensor de caudal	YF-S201	Medición del flujo de agua
Conversor USB-TTL	CH340G	Comunicación con PC para programación
Pantalla LCD	16x2 con adaptador I ² C	Visualización local de datos
Módulo LoRa	SX1278 Ra-02	Transmisión inalámbrica de datos

B.2. Valores de buffer para pH en función de la temperatura

Tabla B.2: Valores de soluciones buffer de pH en función de la temperatura [7]

Temperatura (°C)	pH 4.01	pH 7.00	pH 10.01
0	4.000	7.111	10.320
5	3.999	7.082	10.249
10	3.999	7.056	10.182
15	4.001	7.033	10.121
20	4.005	7.013	10.064
25	4.010	6.997	10.013
30	4.016	6.984	9.967
35	4.024	6.974	9.925
40	4.033	6.967	9.889
45	4.044	6.964	9.858
50	4.057	6.963	9.832

Apéndice C

Códigos

C.1. GitHub

El código y los recursos asociados al sistema de monitoreo se encuentran disponibles en el siguiente repositorio de GitHub:

`https://github.com/dLimerencia/Calidad\_del\_agua\_y\_consumo-TFG.git`

- **Códigos en Arduino (.ino):** Implementación del firmware para el microcontrolador ATmega328P, encargado de la adquisición de datos de los sensores y la transmisión de información mediante el módulo LoRa.
- **Códigos en Python (.py):** Programas de recepción y análisis de los datos transmitidos, así como rutinas de verificación y detección de huecos en la comunicación.
- **Diseño del case en 3D:** Archivos de modelado para la impresión en 3D de la carcasa que protege el nodo de sensado, optimizada para soportar condiciones propias del entorno industrial.

C.2. Detección de huecos en la comunicación LoRa

```
import pandas as pd

archivo = "log_datos.csv"
intervalo_esperado = 15
umbral_max_huecos = 20

df = pd.read_csv(archivo, sep=";")
df["Timestamp"] = pd.to_datetime(df["Timestamp"], errors="coerce")
df = df.sort_values("Timestamp").reset_index(drop=True)

df["Delta"] = df["Timestamp"].diff().dt.total_seconds()
huecos = df[df["Delta"] > intervalo_esperado].copy()
huecos["Faltantes"] = ((huecos["Delta"] // intervalo_esperado) - 1).astype(int)
huecos_filtrados = huecos[huecos["Faltantes"] <= umbral_max_huecos]

total_datos = len(df)
total_faltantes = huecos_filtrados["Faltantes"].sum()

print(f"Umbral de huecos: {umbral_max_huecos}")
print(f"Total de datos recibidos: {total_datos}")
print(f"Total de datos faltantes (filtrados): {total_faltantes}\n")

print("Huecos detectados:")
print(huecos_filtrados[["Timestamp", "Faltantes"]].head(20))
```