

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICA SANTA MARIA
SEDE VIÑA DEL MAR-JOSÉ MIGUEL CARRERA

SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL REMOTO-LOCAL PARA SALAS DE BOMBAS

Trabajo de Titulación para optar al Título de
Ingeniero de ejecución en Control e
Instrumentación Industrial.

Alumno:

Lientur Armando Arancibia Díaz.

Profesor Guía:

Mag. Víctor Cardenas Schweiger.

2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL REMOTO-LOCAL PARA SALAS DE BOMBAS

Nombre del candidato(a): Lientur Armando Arancibia Díaz

Carrera / Grado: ingeniería de ejecución en control e instrumentación industrial

Campus: Viña del mar Departamento: Electrotecnia e Informática

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Víctor Cárdenas Schweiger, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (marcar una opción):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

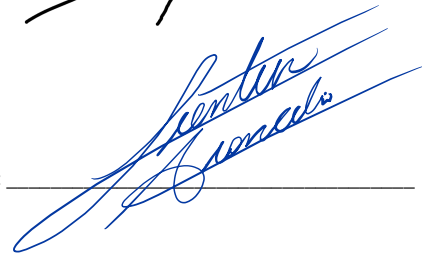
Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 11-12-2025 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 03-12-2025 Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

RESUMEN

KEYWORDS: GESTIÓN HÍDRICA, TELEMETRÍA, LORAWAN, IOT, AUTOMATIZACIÓN, CONTROL DE BOMBAS, SOSTENIBILIDAD, MICROCONTROLADORES, PLCs, MONITOREO REMOTO.

La gestión eficiente del agua es crítica en regiones con escasez hídrica como Valparaíso, Chile. En el Condominio Lafquen, la falta de automatización en la impulsión de agua ha generado altos costos operativos, rebalses y un uso ineficiente del recurso; por lo que, este proyecto propone una solución basada en tecnologías avanzadas como telemetría, LoRaWAN y PLCs para optimizar el manejo del agua. El sistema incluirá sensores y microcontroladores en cada estanque para medir niveles de agua, transmitiendo datos en tiempo real mediante LoRa a una interfaz web accesible remotamente. Esto permitirá monitoreo continuo, control automatizado y eliminación de intervenciones manuales, reduciendo costos y desperdicio. Además, LoRaWAN ofrece una comunicación eficiente y económica en zonas rurales con infraestructura limitada. Más allá de resolver el problema local, el proyecto busca ser replicable en otras comunidades rurales, contribuyendo a la sostenibilidad global en el contexto del cambio climático y la creciente demanda de agua. La integración tecnológica garantiza un manejo más eficiente del recurso, beneficiando tanto a las comunidades como al medio ambiente.

INDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.....2

1. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA 3

1.1. ANTECEDENTES GENERALES. 3

1.2. SISTEMAS DE TELEMETRÍA 3

1.3. COMPONENTES LORAWAN 4

1.4. SISTEMA DE MONITOREO TRADICIONALES 5

1.5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. 6

1.6. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA. 8

1.7. IMPORTANCIA DE RESOLVERLO.....9

1.8. INVOLUCRADOS.....9

1.9. SOLUCIÓN AL PROBLEMA.....9

1.10. REQUERIMIENTOS.....11

1.10.1. Requerimientos Técnicos 11

1.10.2. Requerimientos Operacionales..... 12

1.10.3. Requerimientos de Integración..... 12

1.11. ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN.....13

1.12. ALTERNATIVA SELECCIONADA.....14

1.12.1. Innovación y Eficiencia. 15

1.12.2. Escalabilidad. 16

1.12.3. Confiabilidad Operacional. 17

1.12.4. Reducción de Costos a Largo Plazo. 17

1.12.5. Seguridad y Protección de Datos. 18

1.12.6. Automatización Completa..... 18

1.12.7. Interfaz de Usuario Intuitiva..... 19

1.13. VALOR AGREGADO. 20

1.14. OBJETIVOS 21

1.14.1. Objetivo General 21

1.14.2. Objetivos Específicos..... 21

CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL REMOTO-LOCAL PARA SALAS DE BOMBAS 22

2. DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL REMOTO-LOCAL PARA SALAS DE BOMBAS 23

- 2.1. SISTEMA DE MONITOREO CONTROL REMOTO-LOCAL. 23**
- 2.2. FUNDAMENTO TEÓRICO. 23**
 - 2.2.1. LoRa. 24
 - 2.2.2. Modulación y parámetros LoRa. 24
 - 2.2.3. Componentes y topología de una red LoRa 26
 - 2.2.3.1. Dispositivos Finales (Nodos).....26
 - 2.2.3.2. Módulos LoRa (Transceptores). 27
 - 2.2.3.3. Gateways LoRa. 28
 - 2.2.3.4. Servidor de Red (Network Server). 29
 - 2.2.3.5. Plataforma de Aplicaciones (Application Server).....29
 - 2.2.3.6. Backhaul (Conexión de Retorno).....30
 - 2.2.3.7. Seguridad en la Red LoRa. 31
 - 2.2.3.8. Métodos de Activación de Dispositivos. 31
 - 2.2.3.9. Tipos de Topologías de Red.....32
 - 2.2.4. LoRa WAN.....36
- 2.3. HARDWARE Y SOFTWARE 37**
 - 2.3.1. Sensor ultrasónico 37
 - 2.3.2. Comunicación industrial.....39
 - 2.3.3. Nodo Central LoRaWAN 45
 - 2.3.4. Tarjetas de Desarrollo y Controladores 48
 - 2.3.5. Software a utilizar 51
- CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN ECONÓMICA.....55**
- 3. EVALUACIÓN ECONÓMICA 56**
- 3.1. DESGLOSE DE COSTOS DEL PROYECTO 56**
 - 3.1.1. Costos de Diseño 56
 - 3.1.2. Costos de Materiales.....57
 - 3.1.3. Costos de Mano de Obra.....58
 - 3.1.4. Costos de Mantenimiento.....59
 - 3.1.5. Costos hídricos 60
 - 3.1.6. Costos en combustible 61
 - 3.1.7. Costos Indirectos.....61
- 3.2. RESUMEN DE COSTOS TOTALES.....62**
- 3.3. INDICADORES DE VIABILIDAD ECONÓMICA. 63**
- 3.4. FLUJO DE CAJA DEL PROYECTO.....63**
- 3.5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....67**

3.6. JUSTIFICACIÓN DEL GASTO.....69

CONCLUSIÓN 71

BIBLIOGRAFÍA.....73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2. Distancia desde sala de monitoreo hacia sala cero de control de bombas. 6

Figura 1-3. Sala cero. 7

Figura 1-4. Visualización Google earth salas de bombeo.....7

Figura 1-5. Visualización Google maps ubicación salas de bombeo. 8

Figura 1-6. Diagrama de ishikawa. 10

Figura 2-1. Sensor ultrasónico Dragino LDD575 LoRaWAN.....38

Figura 2-2. CBOX de Haiwell. 43

Figura 2-3. Gateway LoRawan LPS8v2.....46

Figura 2-4. rs485-In.....47

Figura 2-5. LT-22222-L LORA I/O CONTROLLER.....49

Figura 2-6. Prueba realizada de comunicación 50

Figura 2-7. Verificación de mediciones 50

Figura 2-8. DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA.....53

Figura 3-1. Gráfico de sensibilidad del proyecto.....69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Puntuación y selección de alternativa.....15

Tabla 2-1. Características del Gateway LoRa. 46

Tabla 2-2. Componentes principales del sistema. 52

Tabla 3-1. Resumen de costos de materiales.....58

Tabla 3-2. Carta Gantt del proyecto.....59

Tabla 3-3. Resumen de costos sin proyecto.....61

Tabla 3-4. Resumen de costos totales. 62

Tabla 3-5. Flujo de caja puro. 65

Tabla 3-6. Flujo de caja 25% Financiamiento 65

Tabla 3-7. Flujo de caja 50% Financiamiento 66

Tabla 3-8. Flujo de caja 75% Financiamiento 66

Tabla 3-9. Cuadro comparativo final.....67

Tabla 3-10. Sensibilidad del proyecto.....68

SIGLAS Y SIMBOLOGÍAS

SIGLA

IOT	:	Internet of Things (Internet de las cosas)
UTFSM	:	Universidad Técnica Federico Santa María
LoraWan	:	Long Range Wide Area Network
Lora	:	Long Range
SCADA	:	Supervisory Control and Data Acquisition
PLC	:	Programmable Logic Controller (Controlador lógico programable)
CSS	:	Chirp Spread Spectrum
TTN	:	The Things Network
MQTT	:	Message Queuing Telemetry Transport
VAN	:	Valor Actual Neto
TIR	:	Tasa Interna de Retorno
TMAR	:	Tasa Mínima Aceptable de Retorno
UF	:	Unidades de Fomento
SPI	:	Interfaz Periférica Serial
UART	:	Transmisor-Receptor Asíncrono Universal
TTIG	:	The Things Indoor Gateway
4G/LTE	:	Cuarta Generación de Comunicaciones Móviles/ Evolución a Largo Plazo
OTAA	:	Over-The-Air Activation}
RTU	:	Unidad Terminal Remota
WIFI	:	Wireless Fidelity
Ethernet	:	Tecnología que conecta dispositivos en una red cableada

SIMBOLOGÍA

A	:	Amperios
mA	:	Mili-Amper
VAC	:	Voltaje alterno
VDC	:	Voltaje continuo
M	:	Metros
CM	:	Centímetros
Mm	:	Milímetros

kWh	:	kilo-Watts-Hora
MHz	:	Mega-Hertz
GHz	:	Giga-Hertz
Ms	:	milisegundo
l/m	:	Litros por minuto

INTRODUCCIÓN

La gestión eficiente del recurso hídrico constituye un desafío crítico a nivel global, especialmente en regiones con escasez de agua como la Región de Valparaíso, Chile; por ejemplo, en el Condominio Lafquen, Oasis La Campana, la ausencia de un sistema automatizado para la administración de la impulsión de agua desde estanques acumuladores ha generado problemas recurrentes, como el rebalse de estanques y la necesidad de intervenciones manuales constantes para el control de las bombas. Donde, estas deficiencias no solo elevan los costos operativos, sino que también resultan en un uso ineficiente y en el desperdicio de un recurso tan valioso como el agua.

Por lo cual, la incorporación de tecnologías avanzadas, como los sistemas de telemetría, LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) y controladores lógicos programables (PLCs), se presenta como una solución integral y eficiente frente a estos desafíos; dado que, los sistemas de telemetría permiten la transmisión de datos en tiempo real, facilitando el monitoreo y el control remoto de infraestructuras críticas, eliminando así la necesidad de intervenciones manuales continuas. Asimismo, LoRaWAN, con su capacidad para ofrecer comunicaciones inalámbricas de largo alcance y bajo consumo energético, representa una alternativa ideal para zonas rurales donde las conexiones cableadas son inviables o excesivamente costosas. Además, los microcontroladores y los PLC garantizan un alto nivel de automatización y precisión en el manejo de procesos industriales, como el control de bombas de agua.

Por lo tanto, el proyecto propone la instalación de microcontroladores y sensores en cada estanque, los cuales medirán los niveles de agua y transmitirán los datos en tiempo real a través de la red LoRa; adicionalmente, se desarrollará una interfaz web que permitirá a los usuarios monitorear y gestionar el sistema desde cualquier dispositivo con acceso a internet. Esta combinación de herramientas tecnológicas asegura un manejo optimizado de los recursos hídricos, disminuyendo tanto el desperdicio como los costos asociados.

Más allá de la solución local que se plantea para el Condominio Lafquen, este proyecto busca sentar un precedente replicable en otras zonas rurales con problemáticas similares, por lo que, en un contexto global marcado por el cambio climático y el aumento de la demanda hídrica, la integración de tecnologías modernas en la gestión de recursos naturales no solo es deseable, sino imprescindible. Este trabajo de título aspira a demostrar cómo la innovación tecnológica puede contribuir de manera significativa a la sostenibilidad y eficiencia en el uso del agua, beneficiando tanto a las comunidades locales como al medio ambiente en general.

CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

1. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

La gestión del recurso hídrico enfrenta desafíos crecientes en el contexto actual de cambio climático, urbanización y demandas cada vez mayores sobre los sistemas de abastecimiento; como en la Región de Valparaíso, Chile, estas problemáticas se manifiestan de manera aguda en comunidades rurales donde la infraestructura para el manejo del agua carece de modernización y automatización. Tal es el caso del Condominio Lafquen, Oasis La Campana, donde la ausencia de un sistema eficiente de control y monitoreo en los estanques acumuladores ha derivado en problemas operativos significativos. Ya que rebalses frecuentes, intervención manual constante y un manejo ineficiente de las bombas de agua son síntomas de una gestión limitada que incrementa costos, desperdicia recursos y pone en riesgo la sostenibilidad del abastecimiento. Este capítulo aborda la descripción detallada de esta problemática, destacando las implicancias sociales, económicas y ambientales derivadas de la falta de soluciones tecnológicas adecuadas.

1.1. ANTECEDENTES GENERALES.

En el Condominio Lafquen, Oasis La Campana, ubicado en la Región de Valparaíso, la gestión hídrica enfrenta desafíos críticos exacerbados por la escasez de agua y la limitada infraestructura tecnológica; puesto que, los estanques acumuladores, situados a más de 100 metros de distancia entre sí y en su mayoría sin conexión alámbrica, presentan serias dificultades para garantizar una administración eficiente del recurso. La ausencia de un sistema automatizado ha dado lugar a problemas recurrentes, como el rebalse de estanques y la necesidad constante de intervenciones manuales para el control de las bombas, lo que incrementa los costos operativos y genera un uso ineficiente del agua.

En este contexto, la implementación de sistemas de telemetría, tecnologías LoRaWAN y herramientas avanzadas de monitoreo surge como una solución viable para modernizar y optimizar la gestión hídrica en este tipo de instalaciones; debido a que, estas tecnologías no solo facilitan la transmisión de datos en tiempo real y el control remoto, sino que también reducen la dependencia de intervenciones manuales, promoviendo una gestión más eficiente y sostenible del recurso hídrico en entornos rurales.

1.2. SISTEMAS DE TELEMETRÍA

Los sistemas de telemetría se han consolidado como herramientas esenciales en el monitoreo y control remoto de datos en diversas aplicaciones industriales y de infraestructura; dado que su capacidad para recopilar, transmitir y procesar información a distancia los hace

indispensables en entornos donde es necesaria una supervisión constante y precisa sin intervención humana directa, optimizando tanto los recursos como los procesos operativos.

El funcionamiento de estos sistemas se sustenta en la integración de varios componentes clave; en primer lugar, los *sensores* desempeñan un papel fundamental al capturar datos físicos como temperatura, nivel de agua o presión, transformando estas variables en información legible para los sistemas electrónicos. Estos datos son transmitidos mediante *transmisores* hacia una estación central, que puede estar ubicada a grandes distancias, lo que amplía significativamente el alcance operativo. A su vez, los *receptores*, aseguran la recepción eficiente de la información y la dirigen hacia sistemas de control o almacenamiento, donde se analizan y archivan los datos para su uso posterior. Finalmente, las *unidades de control* procesan esta información y permiten tomar decisiones automatizadas, garantizando un manejo eficiente y en tiempo real de las operaciones supervisadas.

Por lo tanto, la implementación de sistemas de telemetría no solo mejora la precisión y la eficiencia operativa, sino que también reduce la dependencia de la intervención humana, minimiza errores y optimiza los recursos, lo que los convierte en una solución clave para la modernización de infraestructuras críticas (Figura 1-1).

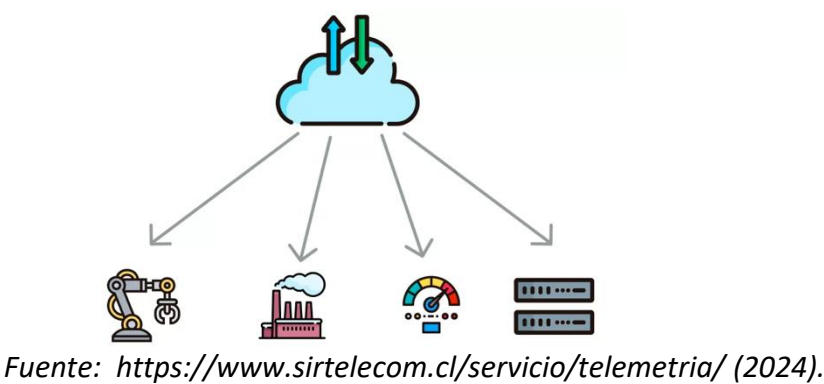


Figura 1-1. Telemetría del sistema.

1.3. **COMPONENTES LORAWAN**

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) es una tecnología de comunicación inalámbrica diseñada para ofrecer conectividad de largo alcance y bajo consumo energético, lo que la hace especialmente adecuada para aplicaciones de telemetría y monitoreo remoto en entornos extensos y rurales. Debido a que, su capacidad para operar en áreas con infraestructura limitada y mantener un consumo mínimo de energía, permite la implementación de soluciones eficientes y sostenibles para el manejo de datos en tiempo real.

El funcionamiento de un sistema LoRaWAN se sustenta en la interacción de varios componentes fundamentales; como los *nodos de sensores* constituyen el primer nivel del sistema, recopilando datos físicos, como temperatura, humedad o niveles de agua, y transmitiéndolos mediante el protocolo LoRa. Estos datos son recibidos por los *gateways*, dispositivos que actúan como intermediarios entre los nodos y la red central, enviando la información recopilada a través de internet. Igualmente, la *red central*, frecuentemente basada en plataformas en la nube, procesa y almacena los datos para su posterior análisis, garantizando accesibilidad y escalabilidad. Por último, las *interfaces de usuario*, como aplicaciones web o móviles, ofrecen a los usuarios una visualización clara y herramientas de análisis para tomar decisiones informadas.

De modo que, la integración de estos componentes permite a LoRaWAN superar las limitaciones de conectividad en zonas remotas, ofreciendo una solución versátil y de bajo costo para la gestión de datos. Su enfoque modular y su capacidad para operar con alta eficiencia energética la posicionan como una tecnología clave para abordar los desafíos de monitoreo y control en el contexto de la creciente demanda de soluciones tecnológicas sostenibles.

1.4. SISTEMA DE MONITOREO TRADICIONALES

Los sistemas de monitoreo tradicionales, como SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), han sido pilares fundamentales en la supervisión y control de infraestructuras críticas; esto por su capacidad para recopilar datos en tiempo real y permitir el control remoto de equipos ha proporcionado a diversas industrias una herramienta robusta y confiable para gestionar procesos complejos. Sin embargo, aunque SCADA ha demostrado ser eficaz en múltiples aplicaciones, enfrenta limitaciones significativas frente a los avances tecnológicos recientes, lo que plantea interrogantes sobre su viabilidad a largo plazo en ciertos entornos.

Entre las principales limitaciones de los sistemas tradicionales destaca su *alto costo*, tanto en términos de instalación como de mantenimiento, lo que puede resultar prohibitivo para proyectos de menor escala o en regiones con recursos limitados; asimismo, la *dependencia de conexiones alámbricas* representa un desafío importante, ya que restringe la flexibilidad y el alcance operativo, especialmente en áreas rurales o de difícil acceso, donde el despliegue de cables es inviable o excesivamente costoso. Finalmente, el *consumo energético elevado* de estos sistemas los coloca en desventaja frente a tecnologías emergentes como LoRaWAN, que ofrecen una eficiencia energética significativamente mayor y se adaptan mejor a los requerimientos de sostenibilidad actuales.

Si bien SCADA continúa siendo una solución confiable en muchos contextos industriales, la evolución de las necesidades operativas y la creciente adopción de tecnologías más modernas subrayan la importancia de explorar alternativas que combinen eficiencia, sostenibilidad y

flexibilidad. La transición hacia sistemas más avanzados podría no solo optimizar el desempeño operativo, sino también reducir costos y minimizar el impacto ambiental en el manejo de infraestructuras críticas.

1.5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El principal desafío identificado es la ausencia de un sistema de comunicación y control automatizado entre las salas de bombas del condominio Lafquen, ubicado en la reserva natural oasis la campana de la Región de Valparaíso. Esta deficiencia genera situaciones como el rebalse de estanques y desperdicio de agua, un recurso de vital importancia en esta zona.

El problema se ve agravado por la actual dependencia de un sistema de control manual, lo cual no solo incrementa considerablemente los costos operativos, sino que también perpetúa la ineficiencia en la gestión del recurso hídrico.

La falta de una solución tecnológica integrada limita la capacidad de respuesta ante eventos críticos y reduce la eficacia del monitoreo y regulación. Esto evidencia la urgencia de incorporar estrategias modernas, que aseguren un uso eficiente, sostenible y automatizado del agua. En las siguientes imágenes se presenta la georreferenciación del lugar donde se implementará el sistema. (Figura 1-2)



Fuente: www.googleearth.com

Figura 1-2. Distancia desde sala de monitoreo hacia sala cero de control de bombas.

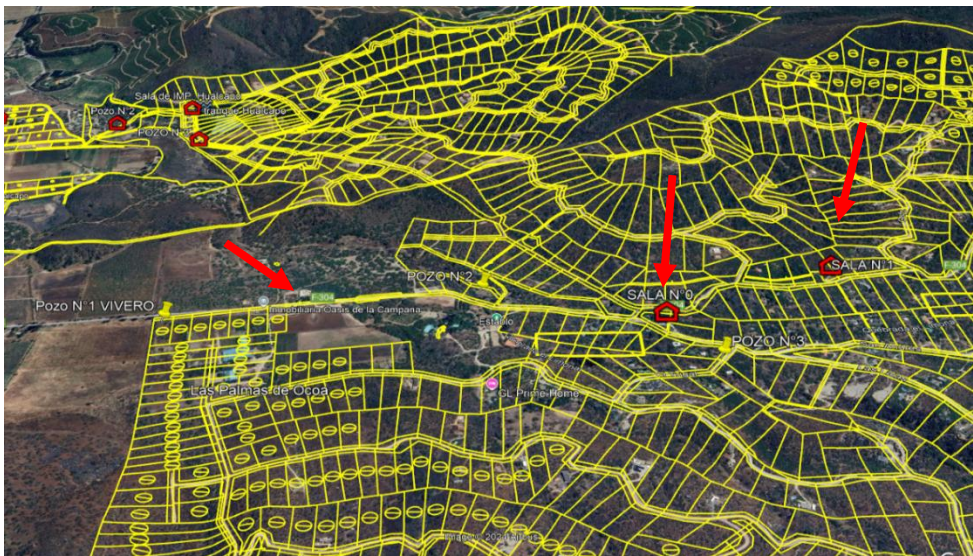
Sala cero del sistema en donde se encuentra el tablero de control de bombas, (Figura 1-3).



Fuente: elaboración propia

Figura 1-3. Sala cero.

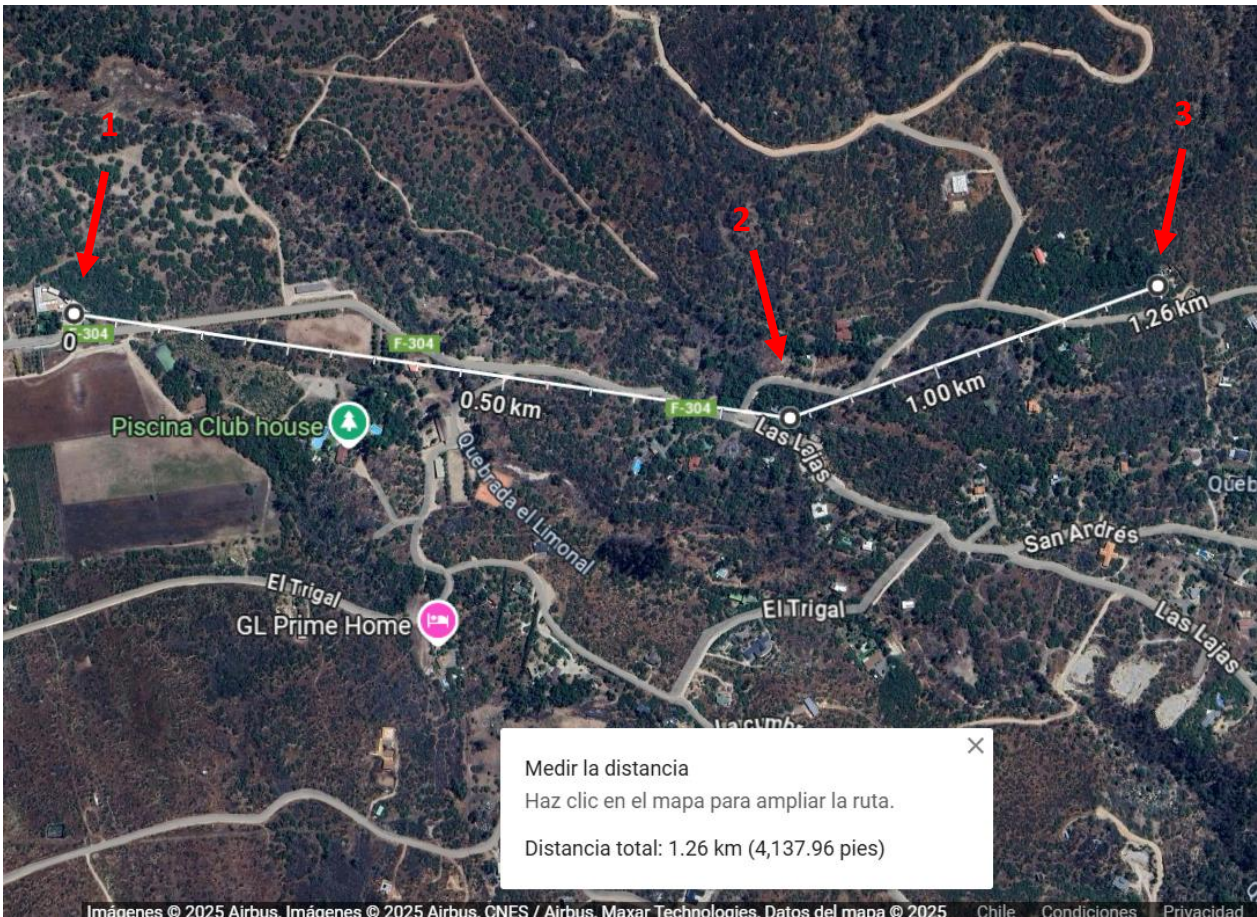
Mediante Google earth pro se obtienen las siguientes ubicaciones y vistas de las salas y pozos (Figura 1-4).



Fuente: www.googleearth.com

Figura 1-4. Visualización Google earth salas de bombeo.

En la Figura 1-5 se visualiza la ubicación del sistema. En el punto número 1 se indica el lugar donde estará ubicada la sala de control. Los puntos 2 y 3 corresponden a la sala 0 y sala 1, respectivamente. (Figura 1-5).



Fuente: <https://www.google.com/maps/place/Lafquen>

Figura 1-5. Visualización Google maps ubicación salas de bombeo.

1.6. **DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.**

El problema central se define como la falta de un sistema de comunicación y control automatizado entre las salas de bombas 0 y 1 del Condominio Lafquen. Esta deficiencia impacta negativamente la eficiencia en la gestión del recurso hídrico, generando consecuencias significativas como el rebalse de estanques, el uso ineficiente del agua, el cual es un recurso crítico en esta zona y el aumento de los costos operativos, derivados de un manejo manual y reactivo de las instalaciones.

El análisis de causas identifica factores clave como la ausencia de un sistema integrado de monitoreo y control remoto, una infraestructura de comunicación insuficiente para garantizar la conectividad entre los componentes del sistema, y una alta dependencia de la intervención manual en procesos que podrían automatizarse. Estas carencias no solo perpetúan la ineficiencia operativa, sino que también limitan la posibilidad de implementar estrategias sostenibles orientadas al uso racional del agua.

Por tanto, la resolución de este problema requiere la adopción de un sistema que permita superar las barreras existentes y avanzar hacia una gestión más eficiente, segura y sustentable del recurso hídrico.

1.7. IMPORTANCIA DE RESOLVERLO

Abordar este problema es esencial para garantizar una gestión eficiente y sostenible del agua, especialmente en una región afectada por la escasez hídrica; por esta razón, la optimización del uso del recurso, la reducción del desperdicio y la mejora de la eficiencia operativa no solo representan beneficios económicos, sino también un imperativo ambiental y social en el contexto actual de cambio climático y creciente demanda. En consecuencia, la implementación de un sistema automatizado y tecnológicamente avanzado no solo permitirá minimizar las pérdidas de agua, sino que también contribuirá a asegurar su disponibilidad a largo plazo, promoviendo una gestión sostenible y resiliente del recurso hídrico.

1.8. INVOLUCRADOS

Entre los involucrados están, los beneficiarios directos de un sistema más eficiente y sostenible, los cuales son los propietarios del Condominio Lafquen, quienes experimentarán una mejora significativa en la gestión del recurso hídrico, con la consiguiente reducción de costos operativos y el aprovechamiento más eficiente del agua.

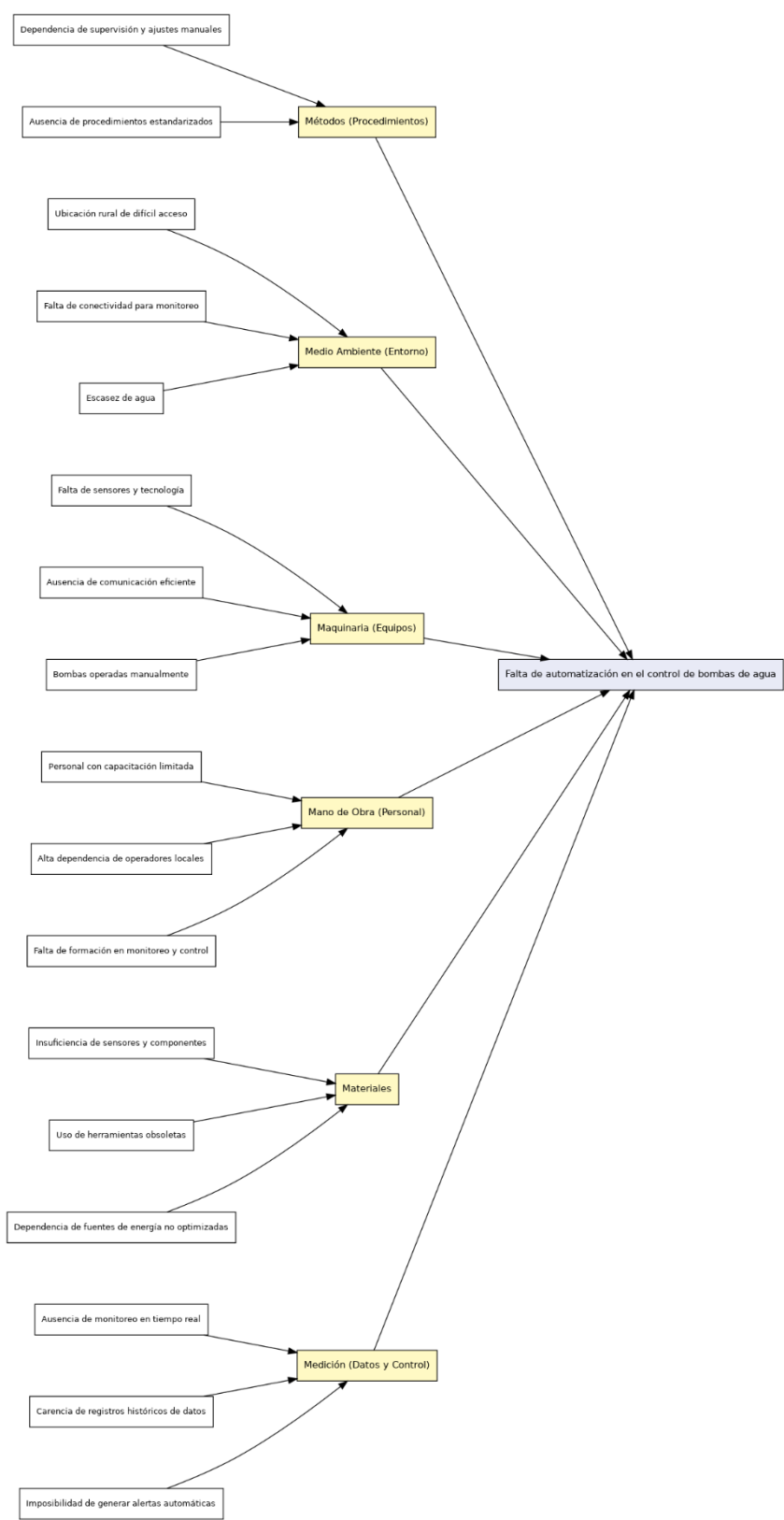
Por otra parte, los administradores del condominio desempeñan un papel crucial en la implementación y operación del sistema, siendo responsables de la gestión del agua, la supervisión del funcionamiento del sistema automatizado y la toma de decisiones operativas que garantizarán su eficacia. Su participación es fundamental para asegurar que el sistema se mantenga operativo y en funcionamiento adecuado.

Finalmente, la comunidad local se beneficia indirectamente de una gestión hídrica más eficiente, ya que la optimización del uso del agua contribuye a la sostenibilidad del recurso en la región, aliviando la presión sobre fuentes hídricas limitadas y promoviendo una cultura de conservación que puede extenderse a otras áreas cercanas. En conjunto, todos los involucrados juegan un rol clave en el éxito de la solución propuesta y en la mejora de la gestión del recurso hídrico en la región.

1.9. SOLUCIÓN AL PROBLEMA

Se propone la implementación de un sistema de monitoreo y control remoto basado en módulos LoRaWAN o tarjetas de desarrollo, acompañado de una interfaz virtual; así que este sistema tiene como objetivo principal habilitar la comunicación inalámbrica y automatizar el control de la etapa que se encuentra incomunicada, lo que no solo optimiza la eficiencia operativa, sino que también reduce de manera significativa el desperdicio de agua. La integración

de estas tecnologías permitirá una gestión más precisa y en tiempo real del recurso hídrico, eliminando la dependencia de intervenciones manuales y garantizando un uso más racional y sostenible del agua, lo que contribuirá a mejorar la supervisión y el rendimiento general del sistema (Figura 1-6).



Fuente: Elaboración propia
Figura 1-6. Diagrama de ishikawa.

1.10. REQUERIMIENTOS.

El desarrollo de esta solución requiere una cuidadosa consideración de múltiples requerimientos para garantizar la robustez, eficiencia y correcta implementación del sistema propuesto; donde estos requerimientos deben abordarse de manera integral, clasificándolos en términos técnicos, operativos y de integración, conforme a las necesidades específicas del proyecto y los estándares establecidos en la industria.

En el ámbito técnico, es fundamental garantizar la compatibilidad de los componentes, la estabilidad de la comunicación inalámbrica y la capacidad de procesamiento de los microcontroladores; debido a que, desde la perspectiva operacional, el sistema debe ser confiable, fácil de operar y mantener, y capaz de adaptarse a condiciones variables propias del entorno rural. Por último, en cuanto a la integración, es crucial que el sistema se conecte eficazmente con la infraestructura existente y permita una interoperabilidad fluida entre las diferentes tecnologías involucradas. Estas consideraciones aseguran no solo el éxito del proyecto, sino también su sostenibilidad a largo plazo.

1.10.1. Requerimientos Técnicos

Para garantizar el éxito del sistema propuesto, se deben cumplir ciertos requerimientos técnicos fundamentales que permitan su operatividad en entornos rurales y su adaptabilidad a futuras necesidades. En primer lugar, la *confiabilidad* es un aspecto crítico, ya que el sistema debe operar de manera continua y eficiente incluso en condiciones adversas, como fluctuaciones climáticas, limitaciones de conectividad y exposición al medio ambiente. Por lo que, la robustez de los componentes y la estabilidad de la comunicación son esenciales para asegurar la funcionalidad a largo plazo.

Asimismo, la *escalabilidad* es indispensable, permitiendo que el sistema pueda ampliarse para incluir más estanques y puntos de monitoreo sin necesidad de una reconfiguración compleja ni de inversiones sustanciales adicionales. Con este enfoque se asegura que el sistema pueda adaptarse al crecimiento de las necesidades del proyecto.

Para finalizar, el *bajo consumo energético* es crucial, especialmente en contextos rurales donde las fuentes de energía pueden ser limitadas o intermitentes. Por esta razón, los dispositivos, como los nodos LoRa y los sensores, deben operar de manera eficiente con un consumo mínimo, garantizando una operación prolongada y sostenible con baterías de larga duración o fuentes de energía renovable. Estos requerimientos técnicos no solo facilitan la implementación inicial del sistema, sino que también aseguran su viabilidad operativa y su sostenibilidad en el tiempo.

1.10.2. Requerimientos Operacionales

Para la implementación del sistema propuesto se requiere cumplir con ciertos *requerimientos operacionales* que aseguren su funcionalidad práctica y su facilidad de uso, considerando las necesidades de los usuarios y las condiciones del entorno. Primeramente, una *interfaz de usuario* intuitiva y accesible es esencial para el monitoreo y control eficiente del sistema; esta interfaz, se basa en una plataforma web, permitiendo a los usuarios acceder a la información desde cualquier dispositivo con un navegador, ofreciendo una experiencia amigable que facilite la supervisión de los estanques y bombas, incluso para usuarios con conocimientos técnicos limitados.

El sistema también debe incorporar un mecanismo de *alertas y notificaciones en tiempo real*, lo que permitirá a los administradores recibir información inmediata sobre el estado de los estanques y las bombas; por eso estas notificaciones son cruciales para la toma de decisiones oportuna ante posibles fallas o condiciones críticas, contribuyendo a minimizar riesgos y desperdicios.

Además, la facilidad de *mantenimiento* es un aspecto clave del diseño del sistema; por lo que los dispositivos deben ser instalados de manera que permitan un acceso sencillo para inspecciones, ajustes o reparaciones, reduciendo así los tiempos de inactividad y los costos asociados al mantenimiento. Los requerimientos operacionales son fundamentales para garantizar no solo la efectividad del sistema, sino también su adopción exitosa y su sostenibilidad a largo plazo, maximizando el impacto positivo en la gestión del recurso hídrico.

1.10.3. Requerimientos de Integración

La integración exitosa del sistema propuesto exige satisfacer criterios clave que aseguren su funcionalidad, interoperabilidad y seguridad. Estos requerimientos garantizan que los distintos componentes trabajen de manera coordinada para optimizar la gestión hídrica.

Primero, la *compatibilidad* es un aspecto primordial; debido a que, el sistema debe ser plenamente compatible con los equipos y tecnologías seleccionados, incluyendo microcontroladores, módulos LoRaWAN, gateways y la interfaz CBOX de Haiwell. Esta compatibilidad asegura una integración fluida entre los dispositivos, minimizando problemas técnicos y facilitando su implementación y operación.

Segundo, la *comunicación inalámbrica*, basada en la tecnología LoRaWAN, debe ser robusta, confiable y sin interrupciones, incluso en entornos adversos o con obstáculos físicos que puedan interferir con la señal. Por lo que, la estabilidad en la transmisión de datos es esencial para garantizar que el sistema opere en tiempo real y cumpla con los objetivos de monitoreo y control remoto.

De último, la *seguridad de los datos* es un requisito crítico; por consiguiente, toda la información transmitida debe estar protegida contra accesos no autorizados, empleando estándares avanzados de cifrado y autenticación. Esto no solo preserva la integridad y confidencialidad de los datos, sino que también genera confianza en los usuarios sobre la fiabilidad del sistema. Los requerimientos de integración no solo aseguran la funcionalidad técnica del sistema, sino que también contribuyen a su sostenibilidad operativa y su alineación con los estándares modernos en tecnologías de monitoreo y control.

1.11. **ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN.**

Para abordar la problemática identificada, se evaluarán tres alternativas, cada una con diferentes niveles de intervención tecnológica y operativa. Estas opciones serán analizadas en términos de eficiencia, costo, viabilidad técnica y su impacto en la gestión del recurso hídrico.

- 1) ***Mantener el proceso manual actual:*** La alternativa implica continuar con el modelo de chequeo manual vigente; aunque representa la opción más económica en el corto plazo, perpetúa las limitaciones existentes, como la ineficiencia operativa, el desperdicio de agua y los elevados costos de intervención manual.
- 2) ***Realizar una mejora semi automatizado:*** Esta opción busca mejorar la eficiencia del sistema sin requerir una automatización completa. Se instalarán temporizadores y relés programables que permitan operar las bombas de manera más eficiente, reduciendo la dependencia de la intervención manual.

El sistema funcionará descargando en horarios punta, definidos mediante temporizadores digitales, permitiendo la activación de las bombas en momentos estratégicos para optimizar el uso del recurso hídrico. Se incorporará un sensor de nivel tipo pera para evitar que la bomba de impulsión funcione en vacío, protegiendo los equipos y asegurando su correcto desempeño.

Este método sigue teniendo algunas limitaciones, ya que la bomba operará de manera cíclica, según lo programado en el relé, sin considerar capacidad real de los estanques superiores, pudiendo rebalsar estos al no tener comunicación directa
- 3) ***Implementar un cambio total:*** Esta alternativa propone la adopción completa de un sistema automatizado de monitoreo y control, basado en tecnología de comunicación inalámbrica (LoraWan) y procesamiento centralizado, mediante sensor ultrasónico y controladores. Este enfoque permite una integración total de las tecnologías de sensado, transmisión de datos y control remoto,

optimizando la eficiencia operativa, reduciendo significativamente el desperdicio de agua y proporcionando una solución escalable y sostenible.

El análisis comparativo de estas alternativas permitirá seleccionar la solución más adecuada, priorizando no solo la resolución efectiva del problema, sino también su alineación con los principios de sostenibilidad y eficiencia a largo plazo.

1.12. ALTERNATIVA SELECCIONADA.

La evaluación de las alternativas se fundamenta en una escala cualitativa del 1 al 5, diseñada para valorar de manera sistemática y objetiva distintos parámetros clave relacionados con la viabilidad y la implementación de las soluciones propuestas. Permitiendo la escala, identificar las fortalezas y debilidades de cada alternativa, facilitando una selección basada en criterios sólidos y alineados con los objetivos del proyecto.

La escala se define de la siguiente manera:

- **Muy Deficiente (1):** Desempeño significativamente inadecuado. La alternativa no cumple con los requisitos mínimos necesarios y enfrenta dificultades críticas que comprometen su implementación.
- **Deficiente (2):** Rendimiento inferior al esperado. Aunque presenta ciertas características funcionales, requiere mejoras sustanciales para alcanzar niveles aceptables de viabilidad.
- **Aceptable (3):** Desempeño moderadamente satisfactorio. La alternativa cumple con los requisitos mínimos establecidos, pero aún tiene áreas relevantes de mejora para alcanzar una implementación efectiva.
- **Bueno (4):** Alternativa adecuada para su implementación. Cumple con los criterios definidos de manera eficiente, con solo mejoras menores necesarias para optimizar su desempeño.
- **Óptimo (5):** Desempeño excepcional que no solo cumple, sino que supera las expectativas. La alternativa es altamente viable y no requiere modificaciones adicionales.

Esta metodología de evaluación permite realizar un análisis comparativo riguroso, considerando criterios previamente establecidos como la factibilidad técnica, el impacto operativo, los costos asociados y la sostenibilidad de cada propuesta. Así, se asegura que la selección final esté fundamentada en un enfoque académico y argumentativo, priorizando la efectividad y alineación con los objetivos del proyecto (Tabla 1-1).

Tabla 1-1. Puntuación y selección de alternativa.

CARACTERÍSTICA/ALTERNATIVA	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
Innovación	1	3	5
Beneficio	1	3	5
Factibilidad	2	4	5
Total	4	10	15

Fuente: Elaboración propia.

Tras un análisis de las alternativas propuestas, se opta por implementar un cambio total como solución definitiva; con esta decisión se fundamenta esta alternativa que no solo representa el enfoque más innovador, sino que, también, maximiza los beneficios operativos, económicos y ambientales, al tiempo que garantiza una mayor factibilidad técnica.

La implementación completa del sistema automatizado basado en controladores y tecnología LoRaWAN proporciona una solución integral, escalable y sostenible que responde de manera eficiente a las necesidades identificadas. Además, esta opción permite superar las limitaciones del sistema actual y establecer una base tecnológica sólida para futuros desarrollos, consolidando una gestión hídrica más eficiente y acorde a los estándares modernos. La elección de esta alternativa se fundamenta en un análisis detallado que considera los siguientes aspectos clave, los cuales evidencian su superioridad en términos de viabilidad, eficiencia y alineación con los objetivos del proyecto:

1.12.1. Innovación y Eficiencia.

La Alternativa 3 se posiciona como la opción más innovadora y eficiente, al integrar tecnologías avanzadas que automatizan por completo el monitoreo y control del sistema de bombeo; debido a que, este enfoque aprovecha la comunicación inalámbrica de largo alcance, como LoRaWAN, junto con una plataforma de gestión remota, lo que permite una supervisión en tiempo real y un control preciso del sistema. Este nivel de automatización no solo reduce significativamente la necesidad de intervención humana, sino que también optimiza los recursos operativos al minimizar errores y desperdicios asociados con los métodos manuales.

A diferencia de las Alternativas 1 y 2, que consisten en mantener el sistema manual o realizar un sistema semi automatizado, la implementación total de esta solución tecnológica transforma la gestión hídrica en el condominio; por lo tanto, las alternativas menos avanzadas

presentan limitaciones inherentes, como la dependencia continua de revisiones manuales y la imposibilidad de actuar rápidamente ante emergencias o variaciones en las condiciones operativas. En cambio, la Alternativa 3 garantiza una capacidad de respuesta inmediata y una eficiencia sostenida, lo que resulta especialmente crítico en un contexto de creciente escasez hídrica y necesidad de sostenibilidad ambiental.

Además, la automatización completa no solo representa un salto tecnológico, sino que también introduce beneficios económicos a largo plazo. Aunque la inversión inicial es mayor, el ahorro operativo derivado de la reducción de costos de mano de obra, menor desperdicio de agua y optimización energética supera ampliamente los costos iniciales, haciendo de esta alternativa una solución rentable y sostenible.

1.12.2. Escalabilidad.

La escalabilidad se erige como una de las ventajas más significativas de la Alternativa 3, posicionándola como una solución tecnológica que no solo resuelve las necesidades actuales, sino que también anticipa los requerimientos futuros; debido a este atributo, es posible la implementación de LoRaWAN, una tecnología diseñada para ofrecer comunicación inalámbrica de largo alcance y bajo consumo energético. Su arquitectura permite añadir nuevos nodos o puntos de monitoreo al sistema sin necesidad de reconfiguraciones técnicas complejas ni de intervenciones costosas, características que son fundamentales para garantizar la sostenibilidad operativa a largo plazo.

Esta capacidad de expansión resulta especialmente relevante en contextos como el del Condominio Lafquen, donde la gestión hídrica puede requerir ajustes ante el aumento de demanda o cambios en las condiciones climáticas; mientras que las alternativas previas, mantenimiento del sistema manual o mejoras parciales, presentan limitaciones estructurales que complican o encarecen la integración de nuevos componentes, la Alternativa 3 destaca por su flexibilidad y adaptabilidad. En estos enfoques menos avanzados, la expansión requeriría inversiones significativas en infraestructura o la duplicación de recursos, lo que restringe su viabilidad económica y operativa.

La escalabilidad no solo asegura la longevidad del sistema, sino que también maximiza su retorno de inversión al adaptarse a escenarios futuros sin incurrir en costos desproporcionados. Esto, sumado a la optimización operativa inmediata que ofrece, hace que la Alternativa 3 sea no solo una solución tecnológica avanzada, sino también una estrategia integral y visionaria para la gestión eficiente y sostenible de los recursos hídricos.

1.12.3. Confiabilidad Operacional.

El sistema automatizado propuesto se distingue por su capacidad para garantizar una operación continua y altamente confiable, incluso en entornos rurales con condiciones adversas; ya que esto es posible gracias a la integración de tecnologías avanzadas como la telemetría en tiempo real y la comunicación inalámbrica de largo alcance, las cuales permiten un monitoreo constante y un control preciso del sistema de bombeo y distribución de agua. Esta capacidad no solo asegura la continuidad del servicio, sino que también reduce significativamente los riesgos asociados a fallas operativas o a un manejo ineficiente del recurso hídrico.

En comparación, las alternativas previas, que carecen de automatización integral, presentan limitaciones críticas en términos de confiabilidad; por ejemplo, la necesidad de intervenciones manuales recurrentes en estos sistemas no solo incrementa el riesgo de errores humanos, sino que también dificulta la detección temprana de problemas como fugas o niveles críticos de agua. Además, en condiciones rurales donde los recursos técnicos y humanos pueden ser limitados, estas alternativas resultan ineficaces para enfrentar desafíos operativos inesperados.

El sistema automatizado no solo mitiga estos riesgos, sino que también garantiza un uso más eficiente y sostenible del recurso hídrico al prevenir el desperdicio mediante la activación oportuna de bombas y el monitoreo continuo de los niveles de agua. Esta confiabilidad operativa se traduce en beneficios tangibles tanto para los usuarios, que experimentan una reducción de costos y esfuerzo, como para el medio ambiente, al promover una gestión hídrica más responsable y sostenible.

1.12.4. Reducción de Costos a Largo Plazo.

La Alternativa 3, si bien requiere una inversión inicial más alta, demuestra ser una opción financieramente beneficiosa a largo plazo debido a su capacidad para optimizar los procesos operativos; gracias a que, la automatización completa del sistema elimina la necesidad de intervenciones manuales recurrentes, lo que no solo reduce la carga de trabajo del personal, sino que también minimiza los errores humanos, como los rebalses de estanques. La reducción de estos errores, a su vez, evita pérdidas de agua y costos adicionales relacionados con la reparación de fallas, lo que se traduce en un ahorro sustancial a lo largo del tiempo. Esta mejora en la eficiencia operativa no solo resulta en menores costos de mantenimiento, sino también en una gestión más sostenible del recurso hídrico, contribuyendo a la preservación del agua, un bien cada vez más escaso.

En contraste, las alternativas que proponen mantener el sistema actual o implementar soluciones parciales continúan dependiendo de procesos manuales y de la intervención constante

de personal para controlar las bombas y prevenir el rebalse de estanques: a lo que, estas opciones perpetúan los costos asociados a la mano de obra y aumentan el riesgo de errores operativos, lo que podría generar desperdicios significativos de agua y costos adicionales para la corrección de fallos. La falta de una automatización integral impide que el sistema alcance niveles óptimos de eficiencia, dejando una considerable oportunidad de ahorro y mejora que la Alternativa 3 sí consigue, posicionándose como una opción más rentable y adecuada para enfrentar los desafíos operativos a largo plazo.

1.12.5. Seguridad y Protección de Datos.

La seguridad de los datos constituye un elemento fundamental en cualquier sistema de monitoreo y control, y en este sentido, la Alternativa 3 destaca por incorporar estándares avanzados de cifrado y protocolos de seguridad en la transmisión de datos a través de la tecnología LoRaWAN; a su vez esta capacidad de protección asegura la integridad y confidencialidad de la información transmitida, un factor esencial en sistemas de operación remota que manejan datos críticos sobre el estado y funcionamiento de las infraestructuras. La implementación de estos protocolos de seguridad garantiza que los datos no solo sean accesibles de manera eficiente, sino que también estén protegidos contra accesos no autorizados, minimizando el riesgo de ciberataques o manipulaciones malintencionadas que puedan afectar la operatividad del sistema o la gestión de recursos hídricos.

Por el contrario, las alternativas previas no abordan adecuadamente la seguridad de la información, lo que las hace vulnerables a brechas de seguridad que podrían comprometer tanto el funcionamiento del sistema como la integridad de los datos; igualmente, la falta de medidas robustas de protección de datos deja el sistema expuesto a posibles ataques informáticos, poniendo en riesgo la fiabilidad de las operaciones y la privacidad de los usuarios. Al no integrar medidas de seguridad avanzadas como las que se proponen en la Alternativa 3, estas opciones no solo representan una deficiencia técnica, sino también un riesgo potencial en términos de seguridad, lo que las hace menos recomendables en un contexto donde la protección de la información es un requisito esencial para el éxito y la sostenibilidad del sistema.

1.12.6. Automatización Completa.

La automatización integral proporcionada por la Alternativa 3 representa un avance significativo en la gestión de sistemas de bombeo, ya que permite una supervisión continua y eficiente a través de alertas y notificaciones en tiempo real; debido a esta capacidad proactiva se facilita intervenciones rápidas ante cualquier anomalía detectada, lo que no solo optimiza la operatividad del sistema, sino que también contribuye a la reducción de riesgos operacionales.

La automatización, al eliminar la necesidad de intervención manual constante, asegura una respuesta inmediata ante cualquier eventualidad, mejorando la eficiencia operativa y reduciendo los tiempos de inactividad del sistema. Esto, a su vez, tiene un impacto directo en la sostenibilidad de los recursos, al minimizar los errores humanos y los costos asociados a fallas no detectadas a tiempo.

En comparación, las alternativas previas, que no alcanzan el nivel de automatización ofrecido por la Alternativa 3, dependen de la supervisión manual y de procesos reactivos; donde este enfoque aumenta la probabilidad de errores humanos y la demora en la identificación de problemas, lo que puede generar consecuencias negativas, como el mal manejo de los recursos hídricos o el incumplimiento de los parámetros operativos. La falta de alertas automáticas limita la capacidad de respuesta ante emergencias, lo que pone en evidencia la ventaja de la Alternativa 3 en términos de eficiencia operativa y control. En este sentido, la automatización no solo optimiza el proceso, sino que también garantiza una gestión más precisa y segura, contribuyendo a la sostenibilidad a largo plazo del sistema de bombeo.

1.12.7. Interfaz de Usuario Intuitiva.

Una de las principales ventajas de la Alternativa 3 radica en su interfaz web intuitiva, que permite a los operadores acceder al sistema de manera remota desde cualquier dispositivo con conexión a internet; gracias a esta capacidad de control remoto no solo mejora la eficiencia operativa al permitir supervisión constante sin importar la ubicación geográfica, sino que también facilita una gestión más ágil y dinámica de las operaciones. La accesibilidad mejorada también implica que múltiples usuarios pueden monitorear el sistema simultáneamente, lo que refuerza la flexibilidad operativa y optimiza la toma de decisiones en tiempo real. En entornos donde la gestión eficiente es crucial, como en el manejo de recursos hídricos, esta funcionalidad representa un cambio paradigmático hacia una gestión más proactiva y menos dependiente de intervenciones locales.

En contraste, las alternativas anteriores no incluyen una solución de monitoreo remoto, lo que limita considerablemente la capacidad de control y supervisión a interacciones locales o a sistemas con acceso restringido; por lo que, esta dependencia de la proximidad física al sistema puede resultar en una respuesta más lenta ante incidencias o en la dificultad para coordinar intervenciones en caso de fallas, especialmente en contextos geográficamente dispersos o de difícil acceso. Así, la falta de acceso remoto no solo incrementa los costos operativos asociados a la necesidad de presencia física, sino que también puede generar ineficiencias y riesgos operacionales, destacando aún más la superioridad de la Alternativa 3 en términos de accesibilidad, flexibilidad y eficiencia en la gestión.

En síntesis, la Alternativa 3 se posiciona como la opción más robusta y sostenible, garantizando innovación, eficiencia, seguridad y capacidad de expansión, lo que la convierte en la solución más adecuada para la gestión hídrica del condominio.

1.13. VALOR AGREGADO.

La implementación de un sistema automatizado de monitoreo y control de agua en el Condominio Lafquen representa un avance significativo que genera múltiples beneficios económicos, operativos, ambientales y de sostenibilidad a largo plazo; primero desde una perspectiva económica, la automatización del sistema contribuye a la reducción de los costos operativos, especialmente en lo que respecta a mano de obra y consumo de combustible. Dado que, al disminuir la necesidad de supervisión y mantenimiento manual, se reducen los costos laborales y se optimiza el uso de recursos, particularmente en términos de agua y combustible. Asimismo, al minimizar los errores humanos en las operaciones diarias, se mejora la precisión y confiabilidad del proceso, garantizando un control más constante y eficiente de los recursos.

Desde el punto de vista ambiental, el sistema automatizado juega un papel crucial en la sostenibilidad; ya que la optimización del uso del agua y la reducción del consumo de combustibles no solo contribuyen a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también alivian la presión sobre los recursos hídricos, un aspecto especialmente relevante en el contexto de la creciente escasez de agua y los desafíos ambientales globales. Por lo que este enfoque no solo asegura el cumplimiento con las normativas ambientales, sino que también posiciona a la empresa como un modelo de responsabilidad social y ambiental. Un compromiso claro con la sostenibilidad no solo mejora la reputación de la organización, sino que también genera confianza entre la comunidad, los reguladores y los inversores, fortaleciendo su imagen corporativa en el mercado.

Adicionalmente, el sistema automatizado contribuye a mitigar el riesgo de sanciones o multas regulatorias; esto gracias al monitoreo constante, facilitando el cumplimiento de las normativas ambientales y operativas, evitando situaciones de incumplimiento como desbordamientos o el manejo ineficiente del agua. Este monitoreo proactivo no solo previene sanciones, sino que también optimiza el funcionamiento del sistema en línea con los estándares de eficiencia y sostenibilidad. La capacidad de evitar riesgos legales y costos indirectos refuerza la seguridad operativa y financiera de la empresa.

La rentabilidad del sistema también se ve reflejada a largo plazo; a pesar de que la inversión inicial sea considerable, el ahorro anual en costos operativos permite recuperar rápidamente el capital invertido, generando un flujo de caja positivo desde el primer año. Este flujo de caja mejora la posición financiera de la empresa, asegurando una operación rentable y

eficiente. Además, la reducción en los costos de mantenimiento y reparación prolonga la vida útil de los equipos, evitando gastos adicionales a lo largo del tiempo.

En cuanto a la imagen corporativa, la implementación de un sistema de monitoreo y control refleja un avance hacia la transparencia y la responsabilidad en la gestión de recursos, valores cada vez más apreciados por los inversores, clientes y otros stakeholders. Asimismo adoptar prácticas sostenibles y eficientes posiciona a la empresa como un actor responsable y competitivo en su industria, lo que amplía las oportunidades de crecimiento y fortalecimiento en el mercado. Este enfoque no solo beneficia internamente la rentabilidad de la empresa, sino que también la alinea con las expectativas de sostenibilidad y eficiencia de la sociedad actual, mejorando sus perspectivas a futuro.

1.14. OBJETIVOS

El creciente desafío de la escasez de agua en diversas regiones del mundo, particularmente en áreas como la Región de Valparaíso, ha subrayado la importancia de gestionar eficientemente los recursos hídricos. En este contexto, la optimización del uso del agua en instalaciones residenciales y comerciales es un objetivo primordial para garantizar su sostenibilidad a largo plazo. En el Condominio Lafquen, Oasis La Campana, la falta de un sistema automatizado para el monitoreo y control de los niveles de agua en las salas de bombas ha generado un uso ineficiente del recurso y un desperdicio significativo, lo que incrementa los costos operativos y afecta negativamente al medio ambiente, por lo que se plantean los siguientes objetivos.

1.14.1. Objetivo General

Implementar un sistema de monitoreo y control remoto-local para salas de bombas en el Condominio Lafquen, Oasis La Campana, para optimizar el uso del agua y reducir el desperdicio.

1.14.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar una infraestructura de comunicación inalámbrica.
- Implementar sensores ultrasónicos, microcontroladores y/o tarjetas de desarrollo para el monitoreo preciso de los niveles de agua.
- Crear una interfaz web para el monitoreo y control remoto del sistema.
- Evaluar los costos del proyecto.

**CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL REMOTO-
LOCAL PARA SALAS DE BOMBAS**

2. DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL REMOTO-LOCAL PARA SALAS DE BOMBAS

2.1. SISTEMA DE MONITOREO CONTROL REMOTO-LOCAL.

En este capítulo se presenta el desarrollo detallado de la ingeniería del sistema de monitoreo y control remoto-local implementado en el Condominio Lafquen, con base en los análisis previos expuestos en el capítulo 1. Asimismo, a lo largo de este apartado, se discutirán aspectos fundamentales como la arquitectura de red adoptada, la selección de sensores ultrasónicos, y la plataforma de visualización de datos. Además, se profundizará en los protocolos de comunicación utilizados, destacando el empleo de LoRa para la transmisión de datos a largas distancias, así como el papel crucial de los microcontroladores Arduino y otros componentes esenciales del sistema.

El enfoque principal de este desarrollo técnico radica en la integración de diversas tecnologías para crear una solución eficiente, escalable y de fácil mantenimiento, que permita la gestión remota y la supervisión precisa de los niveles de agua en los estanques, junto con el control automatizado de las bombas. Por lo tanto, el sistema está diseñado para proporcionar monitoreo continuo, permitiendo a los operadores tomar decisiones informadas y actuar de manera proactiva ante cualquier eventualidad. De esta forma, se asegura una operación más eficiente, sostenible y alineada con los objetivos de optimización de los recursos hídricos.

2.2. FUNDAMENTO TEÓRICO.

El Internet de las Cosas (IoT) ha transformado profundamente la manera en que los dispositivos y sensores interactúan para transmitir datos en tiempo real, ofreciendo soluciones innovadoras en diversas industrias, particularmente en la gestión de recursos; en este contexto, tecnologías como LoRa (Long Range) y LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) se han consolidado como opciones altamente efectivas para la transmisión de datos en redes de baja potencia y larga distancia, resultando fundamentales en proyectos donde el acceso a infraestructuras de comunicación convencionales es limitado o incluso inexistente.

LoRa es una tecnología de comunicación inalámbrica diseñada para enviar pequeños paquetes de datos a distancias superiores a los 10 kilómetros en condiciones óptimas; ya que su bajo consumo energético la hace particularmente adecuada para dispositivos ubicados en áreas remotas o de difícil acceso, como es el caso del monitoreo de sistemas de agua y recursos naturales. Por su parte, LoRaWAN es un protocolo que facilita la transmisión de datos a través de redes LoRa, permitiendo la interconexión de múltiples sensores con un único gateway. Este enfoque posibilita una escalabilidad eficiente en aplicaciones de telemetría, lo que resulta

esencial para el monitoreo y control de puntos geográficamente dispersos, como en la gestión de recursos hídricos o instalaciones industriales.

La combinación de microcontroladores y plataformas de monitoreo como CBOX potencia la integración efectiva de los datos recolectados y facilita el control remoto de sistemas complejos; debido a que esta configuración es particularmente beneficiosa para proyectos que requieren automatización en tiempo real y mínima intervención humana. En el caso de la gestión de bombas de agua en entornos rurales, este tipo de tecnología no solo optimiza el control preciso de los sistemas, sino que también mejora la eficiencia operativa, reduciendo costos y minimizando el uso de recursos.

2.2.1. LoRa.

LoRa es una tecnología de comunicación inalámbrica diseñada para la transmisión eficiente de datos a largas distancias, manteniendo un bajo consumo energético. Su implementación es especialmente relevante en el ámbito del Internet de las Cosas (IoT), donde resulta crucial para aplicaciones de monitoreo y telemetría, en las que los dispositivos deben transmitir pequeños paquetes de datos de manera eficaz y con costos operativos mínimos.

Entre las principales características de LoRa, destaca su *alcance*, ya que los módulos LoRa pueden operar a distancias de hasta 10 km en áreas rurales, lo que la convierte en una opción ideal para entornos extensos y de difícil acceso. En cuanto al *consumo energético*, LoRa es altamente eficiente, lo que la hace adecuada para aplicaciones que dependen de fuentes de energía limitadas, como baterías o paneles solares. Además, LoRa opera en *bandas de frecuencia sub-GHz* (por ejemplo, 868 MHz en Europa y 915 MHz en América), optimizando la cobertura y la penetración de señales en zonas rurales o en entornos con obstáculos. Finalmente, la *capacidad de datos* de LoRa es adecuada para transmitir pequeños paquetes de información a tasas de datos relativamente bajas, convirtiéndola en una solución efectiva para aplicaciones que no requieren grandes volúmenes de transmisión de información, como el monitoreo de sensores en tiempo real.

2.2.2. Modulación y parámetros LoRa.

La modulación Chirp Spread Spectrum (CSS) utilizada por LoRa es uno de los elementos fundamentales que le permite transmitir datos de manera eficiente a largas distancias; ya que este tipo de modulación emplea pulsos de señal que se expanden y comprimen a medida que se

transmiten, lo que confiere a la señal una notable resistencia a interferencias y ruidos de fondo, una característica esencial en entornos con condiciones adversas de comunicación.

El CSS se basa en la técnica de modulación por espectro ensanchado, lo que implica que las señales de LoRa ocupan un ancho de banda mayor al necesario para transmitir la información. Aunque este método puede parecer menos eficiente desde el punto de vista del uso del espectro, su principal ventaja radica en la robustez que proporciona, permitiendo la transmisión de datos a largas distancias incluso en áreas urbanas con alta interferencia electromagnética.

Los parámetros que determinan el rendimiento de una red LoRa incluyen el *spreading factor* (factor de dispersión), el *ancho de banda* y el *coding rate* (tasa de codificación). Cada uno de estos parámetros tiene un impacto directo en la capacidad, la eficiencia y la fiabilidad de la red.

Spreading Factor (SF): este parámetro controla el número de chips necesarios para transmitir un bit de información, lo que a su vez determina la cantidad de tiempo que la señal permanece activa durante la transmisión. A lo que un SF más alto extiende el alcance de la señal, pero reduce la velocidad de transmisión. En aplicaciones donde el alcance es prioritario sobre la velocidad, se emplean *spreading factors* mayores, como SF12. En contraste, cuando la distancia es corta, se opta por valores más bajos, como SF7, para maximizar la velocidad de transmisión.

Ancho de Banda: se refiere al rango de frecuencias utilizado para transmitir los datos. LoRa ofrece flexibilidad al permitir la configuración de diferentes anchos de banda, que van desde los 125 kHz hasta los 500 kHz. Con un ancho de banda más estrecho se concentra la señal en un rango limitado de frecuencias, lo que puede mejorar el alcance, especialmente en entornos con interferencias. Por otro lado, un ancho de banda más amplio permite una mayor velocidad de transmisión de datos.

Coding Rate (CR): este parámetro define la proporción de bits útiles de datos en comparación con los bits dedicados a la corrección de errores. Los valores típicos de *coding rate* en LoRa varían entre 4/5 y 4/8; por lo que un *coding rate* más alto incrementa la resistencia de la señal a interferencias y pérdidas de datos, aunque disminuye la velocidad efectiva de transmisión. Esta característica es especialmente útil en entornos ruidosos o cuando las señales son débiles.

A modo de resumen, la modulación CSS de LoRa, junto con la configuración adecuada de sus parámetros, proporciona una solución altamente robusta y flexible para la transmisión de datos en redes de largo alcance y bajo consumo energético, lo que la hace idónea para aplicaciones en el monitoreo de recursos, como la gestión de agua y la automatización de sistemas de bombeo.

2.2.3. Componentes y topología de una red LoRa

La red LoRa (Long Range) se caracteriza por su capacidad para transmitir datos a grandes distancias utilizando un consumo mínimo de energía, lo que la hace ideal para aplicaciones de IoT y monitoreo en áreas remotas. Esta red se organiza a partir de diferentes componentes que trabajan de manera coordinada para asegurar la comunicación eficiente entre dispositivos. Entre estos componentes se encuentran los dispositivos finales, las pasarelas (gateways) y los servidores de red, que permiten capturar, enviar y procesar la información. A continuación, se describen en detalle los elementos más relevantes de la topología de una red LoRa.

2.2.3.1. Dispositivos Finales (Nodos).

Los dispositivos finales son el elemento esencial en cualquier red LoRa, ya que son los encargados de la recopilación de datos o de realizar acciones específicas basadas en las condiciones detectadas; asimismo estos dispositivos, que comúnmente incluyen sensores, actuadores o dispositivos embebidos, interactúan directamente con el entorno físico y están conectados a módulos LoRa para permitir la transmisión de los datos a través de largas distancias. Algunos ejemplos representativos de estos dispositivos son los sensores de temperatura, humedad, nivel de agua y consumo energético, entre otros, los cuales son fundamentales para diversas aplicaciones de monitoreo.

Una de las características más relevantes de los dispositivos finales es su bajo consumo energético; dado que, en muchas ocasiones, estos dispositivos se encuentran distribuidos en áreas remotas o de difícil acceso, es indispensable que puedan operar de manera continua durante períodos prolongados, incluso durante años, utilizando una sola batería. Esta característica resulta crucial en situaciones donde el acceso para recargar o reemplazar las baterías es limitado o impracticable.

Además, estos dispositivos finales se benefician de su conectividad inalámbrica a través de los módulos LoRa, lo que les permite transmitir datos a distancias significativas sin necesidad de una infraestructura de red cableada. Igualmente, esta capacidad de comunicación inalámbrica es fundamental para aplicaciones en áreas donde la instalación de redes físicas es costosa o inviable, como en entornos rurales o industriales.

Por otro lado, la escalabilidad es otra ventaja clave de los dispositivos finales. Estos pueden ser desplegados en grandes cantidades dentro del área de cobertura de un *gateway*, lo que permite una expansión eficiente de la red sin la necesidad de una infraestructura adicional compleja. Esta capacidad de ampliación permite a las redes LoRa adaptarse fácilmente a un creciente número de sensores y dispositivos a medida que aumentan las necesidades de monitoreo o control.

Las tarjetas de desarrollo como Arduino o ESP32 son ejemplos comunes de dispositivos utilizados en esta red; debido a que, estos recogen datos de los sensores y los transmiten a través de los módulos LoRa. Además, los sensores empleados en estos dispositivos pueden medir una amplia gama de parámetros, tales como la temperatura, humedad, presión o niveles de líquidos, lo que los convierte en herramientas versátiles y adaptables a una diversidad de aplicaciones en el ámbito del monitoreo remoto.

Los dispositivos finales en una red LoRa son componentes fundamentales encargados de recopilar datos del entorno y ejecutar acciones en función de la información recibida. Estos pueden incluir sensores, que miden variables como temperatura, humedad, presión o niveles de líquidos, y actuadores, como motores y válvulas, que responden a los datos obtenidos.

Estos sensores transmiten la información de forma inalámbrica a través de módulos de comunicación, permitiendo el monitoreo remoto y la automatización de procesos sin la necesidad de infraestructura cableada. Gracias a su bajo consumo energético, conectividad de largo alcance y escalabilidad, los dispositivos finales son esenciales en aplicaciones de monitoreo y control, especialmente en zonas remotas o de difícil acceso, donde la supervisión manual es limitada o costosa.

En resumen, los dispositivos finales permiten la interacción eficiente entre el entorno físico y el sistema de control, asegurando una gestión optimizada de los recursos y mejorando la autonomía operativa en diversas aplicaciones.

2.2.3.2. Módulos LoRa (Transceptores).

Cada dispositivo final requiere un módulo LoRa, cuya función principal es la modulación y transmisión de los datos recopilados; dado que, estos módulos emplean la tecnología LoRa CSS (Chirp Spread Spectrum), que asegura una señal robusta y facilita la transmisión de datos a largas distancias, incluso en entornos con interferencias. La modulación LoRa convierte los datos generados por los sensores en señales de radio, mientras que la desmodulación permite que la señal transmitida sea convertida nuevamente en datos legibles para el sistema receptor.

El módulo LoRa realiza varias funciones críticas dentro del sistema; en primer lugar, se encarga de la modulación y desmodulación, transformando los datos de los sensores en señales de radio y viceversa, asegurando que la información llegue de manera efectiva al *gateway*. Además, permite la transmisión y recepción de señales, actuando como intermediario entre los dispositivos finales y el *gateway*. Este intercambio de datos es fundamental para el monitoreo en tiempo real de los parámetros ambientales, como niveles de agua, temperatura o humedad. Por último, el módulo LoRa establece una comunicación con las tarjetas de desarrollo del dispositivo

final, ya sea un Arduino, un ESP32 u otro; mediante interfaces como SPI o UART, facilitando la integración de los sensores y el sistema de transmisión.

Entre los módulos LoRa más utilizados se encuentran el SX1276 y el SX1278, que son conocidos por su bajo consumo energético y alta sensibilidad para transmitir señales a largas distancias; otro módulo comúnmente utilizado es el RFM95, apreciado en aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT) por su flexibilidad, bajo costo y facilidad de integración en proyectos de monitoreo y control. Estos módulos permiten la expansión eficiente y escalable de redes LoRa, ofreciendo soluciones robustas y adaptables para una amplia gama de aplicaciones en áreas remotas y de difícil acceso.

2.2.3.3. Gateways LoRa.

El *gateway* desempeña un papel crucial como intermediario entre los dispositivos finales y el servidor de red, permitiendo la comunicación entre ambos; cuya función principal consiste en recibir las señales LoRa provenientes de los dispositivos finales y retransmitir estos datos a través de una conexión a Internet, utilizando tecnologías como Ethernet, WiFi o 4G, hacia un servidor en la nube o una plataforma de monitoreo. A diferencia de los dispositivos finales, que generan y procesan los datos, el *gateway* actúa meramente como un canal de transmisión, sin realizar ninguna manipulación de la información que recibe.

Una de las características fundamentales del *gateway* es su alcance, el cual varía en función del entorno, permitiendo la recepción de señales de dispositivos ubicados a varios kilómetros de distancia; lo que le permite cubrir áreas extensas, resultando especialmente útil en aplicaciones de monitoreo y control de recursos en áreas remotas. Además, el *gateway* está conectado a Internet, permitiéndole enviar los datos recopilados a servidores en la nube o bases de datos para su posterior procesamiento y análisis. Otra ventaja significativa del *gateway* es su capacidad multicanal, que le permite gestionar de manera simultánea la recepción de datos de múltiples dispositivos LoRa, pudiendo incluir cientos o incluso miles de nodos en una red, facilitando la escalabilidad del sistema.

Entre los ejemplos más destacados de *gateways*, se encuentran el MikroTik wAP LoRa8 Kit, diseñado para aplicaciones industriales y redes privadas, y el The Things Indoor Gateway (TTIG), un *gateway* compacto y accesible que soporta redes LoRaWAN, especialmente adecuado para implementaciones de bajo costo y en entornos internos. Ambos modelos destacan por su fiabilidad y facilidad de integración, permitiendo la implementación de redes LoRa eficientes y escalables para diversos tipos de aplicaciones.

2.2.3.4. Servidor de Red (Network Server).

El servidor de red es un componente esencial en la infraestructura de una red LoRa, ya que es el encargado de coordinar las comunicaciones entre los *gateways* y las plataformas de aplicaciones. Su función principal es garantizar que los datos transmitidos por los dispositivos finales lleguen a su destino correcto, además de realizar tareas clave como la autenticación de dispositivos y la gestión de mensajes dentro de la red.

Una de las funciones más importantes del servidor de red es la gestión integral de la red, que incluye el control de los dispositivos conectados, la coordinación de la recolección de datos y la administración de las comunicaciones; además, el servidor desempeña un papel crucial en el procesamiento de los datos. Al recibir la información proveniente del *gateway*, el servidor puede filtrar, almacenar temporalmente o incluso enviar directamente los datos a una base de datos o aplicación específica, dependiendo de la configuración del sistema.

Este procesamiento asegura que los datos sean adecuados y relevantes antes de su utilización; asimismo en términos de seguridad, el servidor de red también es responsable de garantizar la encriptación de los datos y su correcta gestión, lo cual es fundamental para mantener la privacidad y la integridad de la información dentro de la red. Finalmente, una vez procesados y asegurados, los datos son reenviados a la plataforma de aplicaciones o servidores en la nube, donde se analizan o visualizan para su posterior uso.

Entre los ejemplos de servidores de red utilizados en redes LoRa, destacan plataformas como The Things Network (TTN), que es ampliamente utilizada en aplicaciones LoRaWAN, y LORIoT, que ofrece servicios gestionados para redes LoRaWAN. Ambos servidores son reconocidos por su fiabilidad, escalabilidad y capacidad para gestionar redes LoRaWAN de manera eficiente, lo que los convierte en opciones preferidas para proyectos que requieren un manejo robusto y seguro de las comunicaciones y datos en tiempo real.

2.2.3.5. Plataforma de Aplicaciones (Application Server).

El servidor de aplicaciones desempeña un papel fundamental en la conversión de los datos recolectados por los sensores en información valiosa y procesable; a su vez este componente actúa como el punto de interacción entre los usuarios y la red, permitiendo que se tomen decisiones informadas basadas en la información proporcionada por los dispositivos. Las plataformas de aplicaciones suelen incluir paneles de visualización, sistemas de control e interfaces de usuario personalizadas, las cuales facilitan la interacción en tiempo real con los dispositivos conectados.

Una de las funcionalidades clave del servidor de aplicaciones es la visualización de los datos, lo que permite a los usuarios monitorear las condiciones de los dispositivos y del entorno en tiempo real a través de *dashboards* o gráficos interactivos; con esta visualización no solo se facilita el seguimiento de los datos, sino que también proporciona una herramienta para la identificación temprana de problemas o irregularidades. Además, el control remoto es otra función crucial que permite a los usuarios enviar comandos para controlar los dispositivos finales, como activar o desactivar bombas de agua o sistemas de riego, lo que mejora la eficiencia operativa. En términos de automatización, las plataformas de aplicaciones ofrecen la posibilidad de configurar alertas y acciones automáticas basadas en los datos recibidos. Por ejemplo, si los sensores detectan que la humedad del suelo ha caído por debajo de un nivel preestablecido, el sistema puede activar automáticamente un sistema de riego para mantener las condiciones óptimas.

Entre las plataformas destacadas que facilitan estas funcionalidades se encuentran TTN Console, que permite la visualización y gestión de los datos en tiempo real, y LORIoT Dashboard, que proporciona herramientas avanzadas para la visualización y el control de redes LoRaWAN. Ambas plataformas son fundamentales para la optimización de la gestión de datos en proyectos que requieren monitoreo y control remoto de sistemas distribuidos, contribuyendo a la toma de decisiones más rápidas y a la mejora de la eficiencia operativa.

2.2.3.6. Backhaul (Conexión de Retorno).

El *backhaul* constituye un componente esencial en la arquitectura de redes LoRa, ya que conecta el *gateway* con el servidor de red, facilitando la transmisión de datos desde los dispositivos finales hasta la infraestructura central; aunque no se trata de un elemento físico independiente, su papel es crucial para asegurar la correcta transmisión de los datos recolectados por los dispositivos remotos, permitiendo que lleguen a las plataformas de monitoreo y análisis. La elección de la infraestructura de *backhaul* depende en gran medida del entorno en el que se implementa la red, ya que puede variar desde opciones de alta capacidad y baja latencia en áreas urbanas, hasta soluciones más accesibles o de largo alcance en zonas rurales o remotas.

Entre las opciones más comunes de *backhaul* se encuentran las conexiones Ethernet, WiFi y 4G/LTE; como en áreas donde ya existe infraestructura de red cableada, Ethernet es una solución eficiente, ya que ofrece una transmisión de datos estable y de alta velocidad. Por otro lado, en entornos interiores o cuando se requiere mayor flexibilidad, el WiFi se presenta como una opción adecuada, al ofrecer la posibilidad de conectar el *gateway* a redes inalámbricas existentes. Finalmente, en regiones rurales o remotas donde las conexiones físicas pueden ser limitadas, el 4G/LTE emerge como una alternativa viable, proporcionando cobertura de red móvil

y permitiendo la transmisión de datos en ubicaciones alejadas. En algunos casos más extremos, como en áreas sin cobertura de red tradicional, se pueden emplear conexiones satelitales, garantizando la conectividad incluso en los entornos más aislados.

2.2.3.7. Seguridad en la Red LoRa.

La seguridad constituye un aspecto fundamental en cualquier red de comunicación, y en el caso de LoRaWAN, se implementan diversos mecanismos para garantizar la integridad y confidencialidad de los datos transmitidos; por lo que, la encriptación de datos es uno de los métodos más efectivos para proteger la información, y LoRaWAN la aplica tanto en la capa de red como en la capa de aplicación utilizando el estándar AES-128. Esta encriptación asegura que los datos, desde su origen en los dispositivos finales hasta su recepción en los servidores, permanezcan protegidos contra posibles interceptaciones y ataques maliciosos.

Además de la encriptación, LoRaWAN también incorpora un robusto sistema de autenticación de dispositivos, lo que garantiza que solo los dispositivos previamente autorizados puedan acceder y comunicarse dentro de la red; con este enfoque de seguridad se ayuda a prevenir accesos no deseados y protege la red contra posibles vulnerabilidades externas. Así, se asegura que los datos transmitidos provienen de fuentes legítimas, lo que fortalece la fiabilidad y confianza del sistema.

En cuanto a la gestión de energía, una de las principales ventajas de LoRa es su capacidad para operar con un bajo consumo energético, lo que lo convierte en una opción ideal para aplicaciones a largo plazo en entornos remotos. Igualmente, los dispositivos finales de la red pueden configurarse para operar en modos de bajo consumo, transmitiendo datos solo en intervalos específicos. Este enfoque optimiza el uso de la energía de la batería, permitiendo que los dispositivos funcionen durante períodos extendidos sin necesidad de intervención frecuente, lo cual es crucial para el mantenimiento y sostenibilidad de redes a gran escala.

2.2.3.8. Métodos de Activación de Dispositivos.

En LoRaWAN, se emplean dos métodos principales para la activación de dispositivos, cada uno con sus propias ventajas en términos de flexibilidad y seguridad; el primero de estos métodos es la Activación por Personalización (ABP), en el cual el dispositivo final se configura previamente con todas las credenciales necesarias para acceder a la red. Este enfoque permite una integración rápida y sencilla del dispositivo en la red, ya que no requiere de un proceso de autenticación posterior. Sin embargo, su principal limitación radica en la menor flexibilidad, ya que cualquier cambio en las credenciales o configuraciones de la red requiere la reprogramación de los dispositivos.

Por otro lado, la Activación por Unión (OTAA) ofrece una solución más dinámica y segura; debido a que, en este caso, el dispositivo solicita unirse a la red de manera interactiva, lo que permite la asignación de credenciales de red en tiempo real. Este proceso no solo mejora la flexibilidad, sino que también incrementa la seguridad, dado que las credenciales de red no están preconfiguradas, lo que dificulta los intentos de acceso no autorizado. Además, OTAA permite un manejo más eficiente de los dispositivos en redes grandes y en constante evolución, facilitando la actualización y gestión de dispositivos sin necesidad de intervención manual. En consecuencia, mientras que ABP es más adecuado para aplicaciones simples y controladas, OTAA proporciona una opción más robusta para redes más complejas y exigentes.

2.2.3.9. Tipos de Topologías de Red

Las topologías de red se refieren a la disposición y organización de los dispositivos dentro de una red, determinando cómo se conectan entre sí y cómo fluye la información a través de esta; por lo que, en el contexto de las redes LoRa, la topología en estrella es la más comúnmente utilizada debido a su simplicidad y eficiencia. En esta configuración, los dispositivos finales se conectan directamente a un único *gateway*, lo que facilita la gestión y el control de la red. Sin embargo, dependiendo de las necesidades específicas de cada proyecto, pueden emplearse otras topologías, como la red en malla (mesh) o la red en árbol (tree).

- **Topología en Estrella (Star Topology):** La topología en estrella es la configuración más comúnmente empleada en redes LoRaWAN; debido a que, en esta estructura, todos los nodos finales, tales como sensores o dispositivos IoT, se conectan directamente a un *gateway* central, el cual actúa como el punto de comunicación principal. El *gateway* recopila los datos provenientes de los nodos y los transmite a un servidor de red para su posterior procesamiento.

Entre las principales ventajas de la topología en estrella se encuentran su simplicidad en la configuración y administración; dado que, cada nodo está directamente conectado al *gateway*, la instalación de nuevos nodos es un proceso sencillo y rápido. Además, esta topología facilita la localización de fallos, ya que, en caso de que un nodo falle, el resto de la red no se ve afectado, manteniendo la comunicación entre los nodos restantes y el *gateway*. Por otro lado, la eficiencia energética es otro de los aspectos destacados, ya que los nodos solo necesitan enviar datos al *gateway*, lo que minimiza el consumo de energía en comparación con otras topologías, como la de malla, donde los dispositivos requieren mantener comunicaciones constantes entre sí.

Sin embargo, la topología en estrella también presenta algunas desventajas. La principal es la dependencia del *gateway*, ya que si esta falla, se interrumpe la comunicación de toda la red, creando un punto único de falla (*single point of failure*). Además, la limitación en el alcance de la red es un desafío, debido a que los nodos deben permanecer dentro del rango de comunicación del *gateway*. En áreas con grandes distancias o con obstáculos físicos que interfieren con la señal, esto puede representar una restricción considerable.

A pesar de estas limitaciones, la topología en estrella es altamente adecuada para las redes LoRaWAN, especialmente en aplicaciones que requieren eficiencia energética y simplicidad operativa. Este tipo de configuración es particularmente útil en escenarios como ciudades inteligentes, infraestructura agrícola, monitoreo ambiental y telemetría industrial, donde los dispositivos dispersos envían datos a un gateway central, que puede estar ubicado a distancias considerables.

- **Topología en Malla (Mesh Topology):** en una topología en malla, los nodos no solo se comunican directamente con un *gateway*, sino que también establecen conexiones entre sí, actuando como repetidores para reenviar los datos de otros nodos hasta alcanzar el destino final; por lo que este enfoque fortalece la robustez y la redundancia de la red, ya que permite que los datos encuentren rutas alternativas en caso de que algún nodo falle, garantizando así la continuidad en la transmisión de información.

Entre sus principales ventajas, destaca la alta redundancia que proporciona esta configuración; por ejemplo, si un nodo deja de funcionar, la red puede redirigir los datos a través de otros nodos, aumentando la fiabilidad, especialmente en entornos dinámicos o de difícil acceso. Además, al permitir que los nodos se comuniquen entre sí, la cobertura de la red se amplía significativamente sin necesidad de que todos los dispositivos estén dentro del rango directo del *gateway*. Este diseño también distribuye la carga de procesamiento y comunicación entre múltiples nodos, reduciendo la dependencia de un nodo central y aliviando la presión sobre el *gateway*.

No obstante, la topología en malla presenta desafíos importantes. El consumo energético es notablemente mayor, ya que los nodos no solo procesan sus propios datos, sino que también retransmiten información de otros nodos; a lo que este aspecto es problemático para dispositivos IoT alimentados por

baterías, donde la eficiencia energética es crítica. Asimismo, la complejidad en la configuración y el mantenimiento de la red es superior a la de una topología en estrella, ya que requiere la implementación de algoritmos avanzados para gestionar el enrutamiento dinámico de los datos.

En el contexto de las redes IoT, aunque la topología en malla no es habitual en LoRaWAN debido a su enfoque en el bajo consumo de energía, puede resultar adecuada en aplicaciones donde la confiabilidad sea prioritaria sobre la eficiencia energética. Escenarios como redes de sensores en minas, instalaciones industriales o entornos con condiciones adversas podrían beneficiarse de las capacidades de resiliencia y cobertura que ofrece la topología en malla.

- **Topología en Árbol (Tree Topology):** la topología en árbol combina elementos de las topologías en estrella y en bus, organizando los nodos en una estructura jerárquica; en esta configuración, los nodos finales, denominados "hoja", están conectados a nodos intermedios, que actúan como puntos de agregación y comunicación con un nodo raíz o *gateway* central. Este diseño es común en sectores como telecomunicaciones y distribución de energía, donde se requiere una organización estructurada de dispositivos.

Entre sus ventajas destaca su facilidad para la expansión; dado que, la adición de nuevos nodos hoja es sencilla y no afecta significativamente la estructura de la red, lo que la hace adecuada para infraestructuras dinámicas. Asimismo, permite la segmentación de la red en subredes, lo que facilita la organización y el manejo de grandes infraestructuras distribuidas, optimizando la gestión y el control de los dispositivos.

Sin embargo, esta topología también presenta desafíos importantes; como ejemplo, existe una fuerte dependencia de los nodos principales, ya que un fallo en un nodo intermedio o en el nodo raíz puede desconectar a todos los nodos asociados, comprometiendo la comunicación en una parte significativa de la red. Además, su configuración y mantenimiento son más complejos que en otras topologías, como la estrella, debido a su diseño jerárquico y las interdependencias entre los nodos.

En el contexto de las redes IoT, la topología en árbol puede ser útil en aplicaciones que requieren una distribución estructurada por capas o niveles, como redes eléctricas inteligentes, donde los dispositivos están organizados por zonas, o en plantas industriales con múltiples niveles de control. Su capacidad

para manejar grandes cantidades de nodos en un diseño segmentado la hace especialmente relevante en escenarios donde la organización y el escalamiento son prioridades.

- **Topología de Bus (Bus Topology):** La topología de bus se caracteriza por la conexión de todos los nodos a un único canal de comunicación compartido, a través del cual se transmiten y reciben los datos; a lo que, este diseño es típico en redes simples y de pequeña escala donde no se requiere un nodo central, lo que lo hace adecuado para entornos con requisitos mínimos de infraestructura y complejidad.

Una de las principales ventajas de esta topología radica en su simplicidad de diseño; como ejemplo, su implementación es directa y no requiere configuraciones complejas, lo que la convierte en una opción económica y práctica para redes pequeñas. Además, el uso de un único canal de comunicación reduce significativamente la cantidad de cableado necesario, lo que simplifica la instalación y disminuye costos asociados.

No obstante, la topología de bus presenta limitaciones importantes que restringen su aplicabilidad en redes más avanzadas; en particular, una de estas limitaciones es la degradación de la señal, que puede volverse notable a medida que aumenta el número de nodos o la longitud del canal de comunicación. Asimismo, la detección y localización de fallas puede ser complicada, ya que un problema en el canal compartido puede interrumpir la comunicación de toda la red, lo que representa un desafío significativo en términos de mantenimiento y confiabilidad.

En el ámbito de las redes IoT, la topología de bus no es común en soluciones como LoRa, donde las demandas de alcance y eficiencia energética superan las capacidades de esta configuración. Sin embargo, puede ser útil en aplicaciones domésticas o sistemas de automatización pequeños, donde la simplicidad y el bajo costo son prioritarios y las limitaciones técnicas no afectan significativamente el desempeño de la red.

- **Topología Híbrida:** Una topología híbrida integra elementos de diferentes configuraciones de red, como las topologías en estrella y en malla, para combinar sus ventajas y adaptarse a las necesidades específicas de una red. Por lo que, en el contexto de las aplicaciones IoT y redes LoRa, esta flexibilidad puede ser

especialmente valiosa en escenarios donde las condiciones físicas, la cantidad de dispositivos y los requisitos de comunicación varían considerablemente dentro de una misma infraestructura.

La principal ventaja de la topología híbrida radica en su flexibilidad; ya que, al combinar múltiples tipos de configuraciones, permite optimizar el rendimiento de la red en función de las características del entorno. Por ejemplo, una red en estrella podría implementarse para dispositivos cercanos al *gateway*, maximizando la eficiencia energética y la simplicidad, mientras que una red en malla podría emplearse para conectar dispositivos en áreas remotas o con obstáculos que dificulten la comunicación directa. Esta combinación estratégica también fomenta la escalabilidad, dado que la red puede adaptarse y crecer con la incorporación de nuevos dispositivos sin comprometer su funcionalidad.

Sin embargo, la topología híbrida no está exenta de desafíos. Su implementación y gestión requieren una planificación cuidadosa y un mayor nivel de complejidad técnica. La necesidad de integrar diferentes configuraciones implica diseñar una red robusta que mantenga la coherencia y funcionalidad entre las distintas partes, lo que puede aumentar los costos y el tiempo de despliegue.

En las aplicaciones IoT, las topologías híbridas son particularmente útiles en proyectos multifacéticos como las ciudades inteligentes; por ejemplo, los sensores de estacionamiento, que generalmente están concentrados en áreas pequeñas, podrían beneficiarse de una red en estrella para transmitir datos al *gateway* de manera eficiente. En cambio, otros sistemas críticos, como las luces de tráfico distribuidas en zonas amplias, podrían requerir la redundancia y confiabilidad de una red en malla. Esta capacidad de personalización convierte a la topología híbrida en una opción estratégica para maximizar el rendimiento y adaptarse a las demandas específicas de cada aplicación.

2.2.4. LoRa WAN

LoRaWAN, es un protocolo de red complementario a la tecnología LoRa (*Long Range*), ha sido diseñado específicamente para conectar dispositivos IoT en redes de largo alcance, priorizando un bajo consumo energético; mientras que LoRa se ocupa de la capa física de la transmisión de datos, definiendo cómo se envían y reciben las señales de manera eficiente en entornos de larga distancia, su alcance varía según el entorno, pudiendo llegar hasta 15 km en zonas rurales abiertas y entre 2 y 5 km en entornos urbanos debido a interferencias y obstáculos

físicos. LoRaWAN opera en una capa superior a LoRa, encargándose de la gestión de la red, la administración de dispositivos y la seguridad en la transmisión de datos. Mientras LoRa se centra en la modulación de la señal y la comunicación a nivel físico, LoRaWAN establece el protocolo que regula cómo los dispositivos se conectan, transmiten información y son identificados dentro de la red. Esto permite organizar el flujo de datos desde los sensores hasta los servidores, asegurando que la información llegue de manera estructurada, segura y eficiente, además de posibilitar la escalabilidad del sistema para integrar múltiples dispositivos sin interferencias.

2.3. HARDWARE Y SOFTWARE

El desarrollo de sistemas IoT (Internet de las cosas) depende de una interacción estrecha entre el hardware y el software, componentes fundamentales para garantizar su funcionalidad y eficiencia; mientras el hardware proporciona la infraestructura física necesaria, incluyendo sensores, actuadores y tarjetas de desarrollo, que permiten la recolección, procesamiento y transmisión de datos desde el entorno físico. Por su parte, el software actúa como el motor que coordina y optimiza estas operaciones, desde la ejecución de algoritmos para el análisis de datos hasta la implementación de protocolos de comunicación como LoRaWAN. La relación simbiótica entre hardware y software no solo asegura la operatividad de los sistemas, sino que también habilita su adaptabilidad a escenarios complejos, como ciudades inteligentes, agricultura de precisión y monitoreo ambiental. Así, comprender y diseñar la integración entre estas dos dimensiones es clave para abordar los desafíos técnicos y operativos que plantea el IoT.

2.3.1. Sensor ultrasónico

El sensor ultrasónico es un dispositivo que mide distancias mediante la emisión y recepción de ondas de sonido a frecuencias superiores al rango audible por los humanos. Su funcionamiento se basa en la emisión de un pulso ultrasónico que viaja hasta impactar en una superficie, retornando un eco que permite calcular la distancia en función del tiempo transcurrido y la velocidad del sonido. Esta tecnología es ideal para medición de niveles en estanques de agua, ya que permite realizar monitoreos sin contacto directo, lo que evita la corrosión y el desgaste prematuro.

En este caso, se ha seleccionado el sensor LDD575, que tiene un rango de medición de 208 mm a 7500 mm y una precisión de ± 1 mm. Estas características aseguran que el sensor pueda detectar con precisión los niveles de agua dentro de los estanques sin errores significativos, lo que es fundamental para un sistema de control eficiente.

Para seleccionar este sensor en comparación con otras opciones, se analizaron diferentes criterios, como rango de medición, precisión, resistencia a condiciones ambientales y compatibilidad con la comunicación LoRaWAN. En comparación con sensores de flotador o capacitivos, el sensor ultrasónico ofrece una solución más precisa, sin contacto y con menor mantenimiento, evitando la acumulación de residuos o incrustaciones que podrían afectar la medición. Frente a otros sensores ultrasónicos, el LDDS75 fue elegido por su integración con sistemas de monitoreo inalámbrico, su capacidad para operar en exteriores y su bajo consumo energético, características clave en entornos de difícil acceso.

En resumen, la elección de este sensor se basa en su precisión, alcance, resistencia y compatibilidad con el sistema de monitoreo, lo que lo convierte en una opción confiable para la automatización del control de niveles en los estanques. Para mayor claridad en el documento, sería recomendable incluir estos criterios de selección en el capítulo correspondiente y detallar cómo se validó su funcionamiento dentro del sistema. (Figura 2-1).



Fuente: <https://www.dragino.com/products/distance-level-sensor/item/161-ldds75.html>

Figura 2-1. Sensor ultrasónico Dragino LDDS75 LoRaWAN.

Características:

LoRaWAN 1.0.3 Clase A

- Consumo de energía ultra bajo
- Detección de distancia mediante tecnología ultrasónica
- Rango de objetos planos: 280 mm - 7500 mm
- Precisión: $\pm(1 \text{ cm} + S * 0,3 \%)$ (S: distancia)
- Ángulo de medida: 40°
- Longitud del cable: 25 cm

- Compensación de temperatura
- Bandas: CN470/EU433/KR920/US915/EU868/AS923/AU915/IN865
- Comandos AT para cambiar parámetros
- Enlace ascendente activado periódicamente
- Enlace descendente para cambiar la configuración
- Carcasa impermeable IP66
- Batería de 4000 mAh o 8500 mAh para uso a largo plazo

2.3.2. Comunicación industrial

La comunicación industrial abarca un conjunto de tecnologías, protocolos y sistemas diseñados para garantizar la interconexión y transferencia de datos entre dispositivos y sistemas en entornos industriales; tiene como objetivo principal el lograr la integración eficiente de información entre máquinas, sensores, actuadores, controladores y sistemas de monitoreo, promoviendo la optimización, seguridad y sostenibilidad en los procesos industriales. Esta capacidad de comunicación es esencial en la automatización y el control de plantas industriales, donde se requiere un flujo continuo, preciso y confiable de datos para respaldar operaciones críticas.

El propósito de la comunicación industrial radica en facilitar el monitoreo y control de procesos en tiempo real, permitiendo decisiones rápidas y fundamentadas ante cualquier contingencia; por lo que, este enfoque habilita a los operadores y sistemas para supervisar, regular y ajustar parámetros operativos, asegurando tanto la eficiencia como la seguridad en las operaciones. Por ejemplo, en el desarrollo de un sistema de monitoreo remoto para salas de bombas, la comunicación industrial posibilita el seguimiento de variables como flujo, presión, niveles de agua y consumo energético. También habilita la detección de anomalías con alertas automáticas y el control remoto del encendido y apagado de las bombas. Estas capacidades no solo mejoran la operación, sino que también minimizan riesgos y maximizan la sostenibilidad, especialmente en regiones con limitaciones hídricas.

Los entornos de aplicación de la comunicación industrial son amplios y variados, incluyendo plantas de manufactura para optimizar producción, sistemas de energía para la gestión de generadores y redes, sectores de petróleo y gas para el monitoreo de estaciones y tuberías, y sistemas de agua y saneamiento para la supervisión de plantas y redes de distribución; además, su uso se extiende a sectores como transporte, donde asegura la operatividad de señalización y vehículos, y la agricultura de precisión, permitiendo el control automatizado de riego y fertilización. En el contexto de salas de bombas, la implementación de comunicación

industrial no solo optimiza el suministro de agua, sino que también fomenta una gestión responsable de los recursos hídricos, reduciendo costos y promoviendo la eficiencia.

Para garantizar una comunicación industrial efectiva, se emplean diversos tipos de hardware diseñados para la transferencia de datos entre dispositivos de campo y sistemas de control. Estos dispositivos son fundamentales para la conectividad en aplicaciones industriales y contribuyen directamente al éxito de los proyectos de monitoreo y automatización.

- **Gateways Industriales:** Los *gateways* industriales desempeñan un papel fundamental como intermediarios en la interconexión de diferentes redes de comunicación, permitiendo la transmisión fluida de datos entre dispositivos de campo, como sensores y actuadores, y sistemas de monitoreo centralizados; dado que, su capacidad para conectarse a plataformas en la nube amplía aún más su funcionalidad, habilitando el acceso remoto a la información en tiempo real. Esto no solo mejora la supervisión, sino que también facilita la toma de decisiones informadas y oportunas, independientemente de la ubicación física de los operadores.

Ejemplos destacados de *gateways* industriales incluyen la serie Moxa UC y el Red Lion Sixnet, ambos reconocidos por su fiabilidad, robustez y adaptabilidad en entornos industriales exigentes. Estas soluciones ofrecen una conectividad versátil y un rendimiento optimizado, lo que las convierte en opciones ideales para proyectos de automatización y monitoreo.

En el contexto específico de salas de bombas, un *gateway* industrial desempeña un rol estratégico al centralizar los datos provenientes de sensores que miden variables críticas como el flujo, la presión y el consumo energético; con esta integración se permite que la información sea visualizada en una plataforma central accesible de forma remota, lo que resulta particularmente beneficioso en la gestión de recursos hídricos en áreas remotas o de difícil acceso. La implementación de esta tecnología no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también contribuye a la sostenibilidad y optimización de los procesos industriales.

- **Unidades Terminales Remotas (RTU):** Las Unidades Terminales Remotas (RTU) son componentes esenciales en la automatización industrial, concebidas para recolectar datos de sensores y dispositivos de campo ubicados en entornos remotos o de difícil acceso; estas funcionan como nodos de comunicación remota que garantizan la transmisión eficiente de datos hacia sistemas de supervisión y control, como SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Su diseño

robusto las hace especialmente adecuadas para operar en condiciones ambientales adversas, incluyendo temperaturas extremas, alta humedad y exposición a polvo o vibraciones.

Ejemplos representativos de RTU incluyen el SCADAPack de Schneider Electric y la serie RTU500 de ABB, ambos ampliamente reconocidos por su fiabilidad, capacidad de integración y resistencia en aplicaciones industriales críticas. Estas unidades no solo recolectan y transmiten datos, sino que también pueden ejecutar funciones de control local en caso de interrupciones en la comunicación con el sistema central, lo que refuerza la continuidad operativa.

En el contexto de una sala de bombas, una RTU desempeña un papel estratégico al recopilar información clave proveniente de sensores de flujo, presión, nivel y consumo energético; ya que esta información es transmitida a una plataforma SCADA, donde se centralizan las operaciones de monitoreo y control. Este enfoque no solo mejora la eficiencia operativa y la capacidad de respuesta ante eventos críticos, sino que también permite una gestión más sostenible y optimizada de los recursos hídricos, factores esenciales en proyectos orientados al control y la preservación de recursos esenciales.

- **Modems y Routers Industriales:** Los módems industriales son dispositivos cruciales para la integración de redes de comunicación industriales con redes externas o el acceso a internet, facilitando la transmisión de datos entre sistemas locales y plataformas remotas; dado su diseño robusto, se optimiza para operar en condiciones extremas de temperatura, humedad y vibración, lo que los convierte en elementos fundamentales en entornos industriales rigurosos. Además, los módems industriales ofrecen una variedad de opciones de conectividad, tales como Wi-Fi, 4G y Ethernet, permitiendo que las redes industriales se adapten a diferentes necesidades y entornos operativos.

Ejemplos notables de módems industriales incluyen el eWON Flexy de HMS y el Siemens Scalance M, dispositivos conocidos por su fiabilidad y flexibilidad en la implementación de soluciones de comunicación industrial. Estos módems permiten no solo la integración con sistemas de monitoreo y control remotos, sino también la facilitación de acceso a datos en tiempo real, mejorando la capacidad de respuesta ante situaciones críticas.

En el contexto de las salas de bombas, los módems industriales desempeñan un papel fundamental al permitir la transmisión continua de datos

relacionados con el funcionamiento de las bombas, como el flujo, la presión y el consumo energético, a sistemas de monitoreo remoto; lo que resulta esencial en escenarios donde se requiere supervisión constante y control a distancia, optimizando la gestión operativa y reduciendo los tiempos de inactividad. La conectividad remota proporcionada por estos dispositivos facilita la intervención rápida ante anomalías y contribuye a un mantenimiento más eficiente y a la mejora de la sostenibilidad de los recursos hídricos en proyectos de infraestructura crítica.

- **Dispositivos Edge Computing:** Los dispositivos de Edge Computing se han convertido en una pieza clave en la infraestructura de redes industriales al permitir el procesamiento de datos directamente en el lugar donde se generan, en lugar de enviarlos a la nube para su análisis; por lo que, esta capacidad reduce la dependencia de las conexiones de redes remotas y ofrece la ventaja de realizar análisis en tiempo real, lo cual es esencial para la toma de decisiones rápidas y precisas. Los dispositivos de Edge Computing permiten la reducción de latencias, mejorando la eficiencia operativa al posibilitar respuestas inmediatas ante situaciones que requieren intervención.

Ejemplos destacados de dispositivos de computación de borde incluyen el Advantech ECU-1251 y el Dell Edge Gateway 5000, que ofrecen soluciones versátiles y de alto rendimiento para el procesamiento de datos en entornos industriales. Estos instrumentos permiten manejar grandes volúmenes de datos localmente, facilitando la integración con sistemas de monitoreo y control sin la necesidad de depender de una conexión constante a la nube.

En el contexto de las salas de bombas, los dispositivos de Edge Computing son fundamentales para optimizar la operación y garantizar la eficiencia de los procesos; ya que estos artefactos procesan los datos generados por los sensores, como los de flujo y presión, y son capaces de detectar anomalías en tiempo real, como cambios bruscos en los parámetros operativos. Al poder alertar de inmediato sobre posibles fallos o condiciones fuera de lo normal, el Edge Computing permite una respuesta rápida que minimiza el riesgo de daños o ineficiencias, sin necesidad de esperar a que los datos sean enviados a la nube para su análisis. Esto no solo mejora la confiabilidad de las operaciones, sino que también contribuye a la sostenibilidad de los recursos al optimizar el uso de energía y agua en instalaciones críticas.

- **Servidores de Acceso Remoto:** Los servidores de acceso remoto juegan un papel fundamental en la gestión de dispositivos industriales al permitir que se conecten de manera segura a plataformas en la nube o redes remotas; asimismo, estos servidores no solo facilitan la transferencia de datos, sino que también habilitan el monitoreo, la configuración y el control de dispositivos desde ubicaciones geográficamente distantes, lo que es esencial en entornos industriales donde la presencia constante en el sitio es inviable o costosa. La implementación de servidores de acceso remoto mejora la eficiencia operativa y proporciona una capa adicional de flexibilidad en la gestión de infraestructuras críticas.

Ejemplos representativos de esta tecnología incluyen el Haiwell CBox y la serie RAM de Red Lion, que ofrecen soluciones robustas para el acceso remoto seguro y la gestión de dispositivos industriales. Estos servidores garantizan la conectividad de dispositivos dispersos, permitiendo la supervisión y administración sin comprometer la seguridad de la red o la integridad de los datos.

En el contexto específico de las salas de bombas, el uso de servidores de acceso remoto como el Haiwell CBox resulta crucial; puesto que, este dispositivo permite a los operadores monitorear y controlar las bombas de agua desde ubicaciones remotas, para asegurar que las operaciones se mantengan dentro de los parámetros de funcionamiento óptimos. Además, proporciona un acceso seguro a los datos de operación y permite tomar decisiones de control en tiempo real, sin necesidad de estar presente en el sitio. De esta forma, los servidores de acceso remoto no solo mejoran la eficiencia operativa, sino que también optimizan el tiempo de respuesta ante posibles fallos o necesidades de ajuste en las bombas, reduciendo costos y aumentando la confiabilidad del sistema (Figura 2-2).



Fuente: <https://haiwell.com/hwproducts/185-en.html>

Figura 2-2. CBOX de Haiwell.

Características principales de CBOX

- Funciones integradas: Combina IoT Gateway, DTU y HMI en un solo dispositivo, optimizando costos y espacio.
- Conectividad global: Soporta 4G global, facilitando la conectividad en entornos de difícil acceso.
- Protocolo MQTT: Permite la conexión con servidores de bases de datos, sistemas ERP/MES y otros sistemas industriales.
- Soporte para plataformas IoT de terceros: Compatible con plataformas como Alibaba Cloud, Amazon, Google, entre otras.
- Web API incorporada: Posibilita el control y obtención de datos del dispositivo a través del protocolo HTTP.
- Seguridad innovadora A/B Key: Proporciona un mecanismo de seguridad robusto para monitoreo remoto.
- Interfaz de usuario flexible: Permite el monitoreo y control a través de dispositivos móviles, como teléfonos y tabletas, en lugar de una HMI física.
- Compatibilidad con múltiples protocolos: Soporta los principales PLCs, inversores e instrumentos industriales del mercado.
- Función de voz integrada: Compatible con text-to-speech, transmisión de voz y funciones de intercomunicación.
- Resistente a condiciones ambientales extremas: Diseño robusto, adecuado para instalaciones en exteriores sin necesidad de protección adicional.
- Historial de datos remoto: Permite la descarga, carga y transmisión de datos históricos.
- Compacto y eficiente: Dimensiones: 50×120×85 mm.

Puertos de conectividad:

- 2 Puertos USB
- 2 Puertos LAN (RJ45)
- 2 Puertos COM (RS485/RS232)
- Ranura para tarjeta SIM
- Interfaces de antena 4G y WiFi

2.3.3. Nodo Central LoRaWAN

El *gateway LoRa* es un dispositivo central en la infraestructura de comunicación de redes IoT, diseñado para recibir los datos transmitidos por los nodos finales, como módulos LoRa conectados a tarjetas de desarrollo o controladores, y reenviar esta información a un servidor central o plataforma de monitoreo, como el Cbox; de hecho, su papel es fundamental para garantizar una conectividad eficiente y confiable entre dispositivos distribuidos en áreas extensas.

Entre las características distintivas de los *gateways LoRa* destaca su capacidad multicanal, lo que les permite gestionar simultáneamente la comunicación de millas de nodos dentro de una misma red; además, operan en bandas de frecuencia no licenciadas, como 868 MHz en Europa o 915 MHz en América, lo que facilita su implementación sin costos asociados al uso del espectro. En términos de conectividad, estos dispositivos cuentan con opciones como Ethernet o WiFi, lo que asegura una integración flexible con infraestructuras existentes. En condiciones óptimas, el alcance de un *gateway LoRa* puede extenderse hasta 15 kilómetros en áreas rurales, lo que lo convierte en una solución ideal para aplicaciones en entornos amplios y remotos.

La funcionalidad del *gateway LoRa* se centra en dos roles esenciales; en primer lugar, actúa como un recolector de datos, recibiendo la información transmitida por los nodos finales para luego enviarla a plataformas de monitoreo o servidores centrales, donde puede ser procesada y analizada. En segundo lugar, funciona como un enlace crucial entre los dispositivos IoT distribuidos y los sistemas centrales de control, asegurando que la comunicación sea fluida y eficiente incluso en redes complejas.

En una red LoRaWAN, la comunicación entre sensores y plataformas de monitoreo se gestiona mediante nodos finales, gateways y servidores de red. Inicialmente, en este proyecto se utilizó un Gateway LoRaWAN para establecer la comunicación entre los sensores LDD575 y los dispositivos finales, con el objetivo de validar la transmisión de datos dentro del sistema.

Entre las características distintivas del Gateway LoRaWAN destaca su capacidad para operar en redes multicanal, gestionar múltiples dispositivos simultáneamente y trabajar en bandas de frecuencia no licenciadas, como 868 MHz en Europa o 915 MHz en América, lo que facilita su implementación sin costos adicionales asociados al espectro.

El sistema demostró ser eficiente incluso en redes complejas, logrando establecer comunicación entre los sensores LDD575 y los dispositivos finales a través de LoRaWAN, confirmando la transmisión de datos en condiciones óptimas. Sin embargo, se presentó una dificultad en la conexión entre el Gateway LoRaWAN y el CBox Haiwell, ya que no se logró establecer un enlace estable para la transmisión de datos entre ambos dispositivos.

Como alternativa, se evaluó el uso de MQTT para conectar el Gateway y el CBox, pero se descartó esta opción, ya que se buscaba una solución más directa y con menor latencia. Dado que el CBox no pudo recibir la información enviada desde el Gateway, se reconsideró la arquitectura del sistema para garantizar una comunicación más eficiente.

Para solucionar este problema, se reemplazó el Gateway por el RS485-LN, configurándolo como nodo central de comunicación. Este dispositivo permite consolidar la información de los sensores LDDS75 en un solo punto y establecer una conexión directa con el CBox Haiwell mediante RS485. Se verificó que el RS485-LN pudiera recibir los datos LoRaWAN, convertirlos a Modbus RTU y almacenarlos en registros accesibles mediante Modbus.

Finalmente, se confirmó que el CBox Haiwell pudo recibir y procesar correctamente la información del RS485-LN a través de RS485, validando así la transmisión de datos entre los distintos dispositivos sin la necesidad de un PLC u otro intermediario, asegurando una comunicación estable y confiable dentro del sistema. (Figura 2-3) (Tabla 2-1).



Fuente: <https://www.dragino.com/products/lora-lorawan-gateway/item/228-lps8v2.html>

Figura 2-3. Gateway LoRawan LPS8v2.

Tabla 2-1. Características del Gateway LoRa.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Voltaje de operación	5 VDC a 12 VDC
Alcance	Hasta 15 km en áreas abiertas; entre 2 y 5 km en entornos urbanos
Frecuencias soportadas	EU868: Europa. US915: América del Norte. AS923: Asia y Pacífico. AU915: Australia. IN865: India. KR920: Corea del Sur. JP920: Japón.

Fuente: Elaboración propia

El RS485-LN es un módulo de conversión de datos diseñado para conectar dispositivos con comunicación RS485/Modbus a redes LoRaWAN. Este equipo permite la transmisión inalámbrica de datos desde sensores o controladores industriales hacia una infraestructura LoRaWAN, facilitando la integración de dispositivos cableados en redes de comunicación de largo alcance y bajo consumo.

En el sistema de monitoreo y control de niveles de agua, el RS485-LN actuará como un nodo de transmisión de datos, permitiendo que la información proveniente de los sensores de nivel LDDS75 y el controlador LT-22222-L sea enviada al CBox Haiwell mediante el protocolo Modbus RTU. Su función principal será la de intermediario entre los sensores y el sistema de monitoreo, asegurando que las mediciones de nivel de agua y los comandos de activación de las bombas sean transmitidos de manera confiable a través de la red LoRaWAN.

El uso del RS485-LN en el sistema permite que, incluso en condiciones donde no haya disponibilidad de comunicación Ethernet o WiFi, la transmisión de datos sea posible mediante LoRaWAN. Además, en caso de fallas en la red LoRaWAN, el dispositivo puede operar localmente utilizando sus capacidades de almacenamiento y retransmisión de datos. (Figura 2-4)



Fuente: <https://www.dragino.com/products/lora-lorawan-end-node/item/154-rs485-ln.html>

Figura 2-4. rs485-ln.

2.3.4. Tarjetas de Desarrollo y Controladores

Las tarjetas de desarrollo son dispositivos electrónicos diseñados para facilitar la implementación de sistemas de control y automatización. Estas tarjetas integran diversos componentes, como puertos de entrada y salida, reguladores de voltaje y conexiones de comunicación, lo que permite su uso en una amplia gama de aplicaciones sin necesidad de circuitos adicionales. Debido a su versatilidad, son ampliamente utilizadas en proyectos de robótica, monitoreo remoto, Internet de las Cosas (IoT) y control industrial.

Entre las tarjetas de desarrollo más utilizadas se encuentran Arduino Uno y ESP32. El Arduino Uno es una opción popular en el ámbito educativo y de automatización básica debido a su facilidad de uso y amplia comunidad de soporte. Por otro lado, ESP32 ofrece conectividad Wi-Fi y Bluetooth, lo que lo convierte en una alternativa ideal para aplicaciones IoT que requieren comunicación inalámbrica y transmisión de datos en tiempo real.

Además de las tarjetas de desarrollo, existen controladores especializados diseñados para la gestión de dispositivos en redes de largo alcance. Un ejemplo es el Dragino LT-22222-L, un controlador LoRaWAN con múltiples entradas y salidas I/O, que permite la recopilación y transmisión de datos desde sensores y la activación remota de actuadores a través de una red LoRaWAN. Este controlador es ideal para aplicaciones de monitoreo y automatización en entornos donde el cableado no es viable, ya que ofrece bajo consumo energético y gran alcance de comunicación. Gracias a sus entradas analógicas y digitales, puede recibir datos de sensores, mientras que sus salidas de relé permiten controlar bombas, motores o alarmas de manera remota, asegurando una integración eficiente en sistemas de control distribuidos.

Inicialmente, se evaluó la posibilidad de utilizar tarjetas de desarrollo como ESP32 o Arduino Uno en combinación con un módulo LoRa para gestionar la transmisión de datos dentro del sistema. Durante la fase de pruebas, se implementó un Arduino Uno con un módulo LoRa para establecer la comunicación entre los sensores y el sistema de monitoreo. Sin embargo, esta solución presentó dificultades en la estabilidad de la transmisión, la integración con el resto de los componentes y la fiabilidad de la comunicación a largo alcance, lo que impidió un funcionamiento adecuado del sistema.

Ante estas limitaciones, se decidió reemplazar el Arduino Uno con módulo LoRa por un LT-22222-L, un controlador diseñado específicamente para operar en redes LoRaWAN. A diferencia de las tarjetas de desarrollo, el LT-22222-L permitió una integración más eficiente con los sensores y actuadores del sistema, proporcionando una comunicación más estable y confiable.

Con este cambio, se logró establecer una transmisión de datos efectiva entre los sensores LDD575 y el LT-22222-L, asegurando la correcta recepción de información en la red y

mejorando la capacidad del sistema para gestionar la activación de la bomba de manera automatizada. (Figura 2-5).

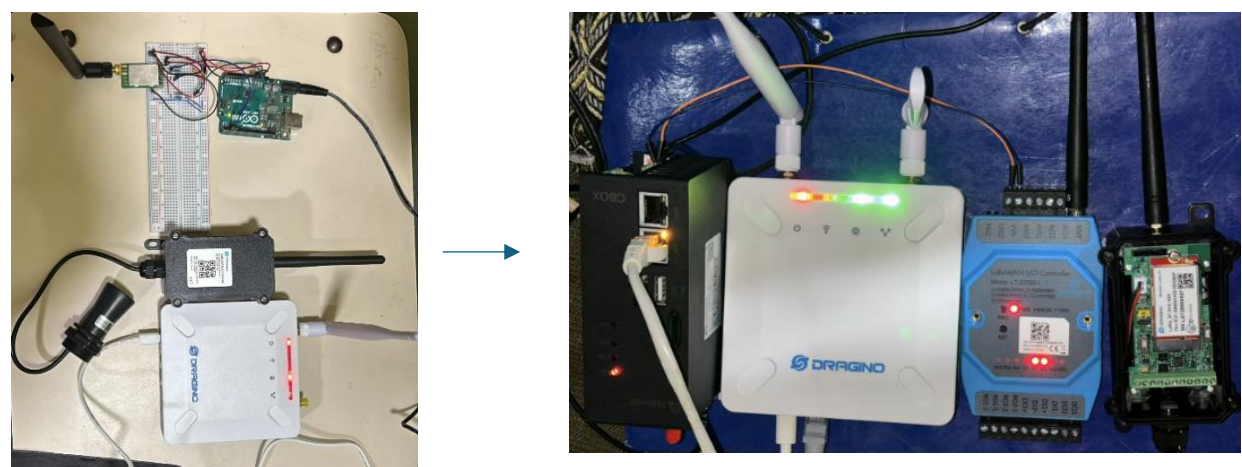


Fuente: <https://www.dragino.com/products/lora-lorawan-end-node/item/156-lt-22222-l.html>

Figura 2-5. LT-22222-L LORA I/O CONTROLLER

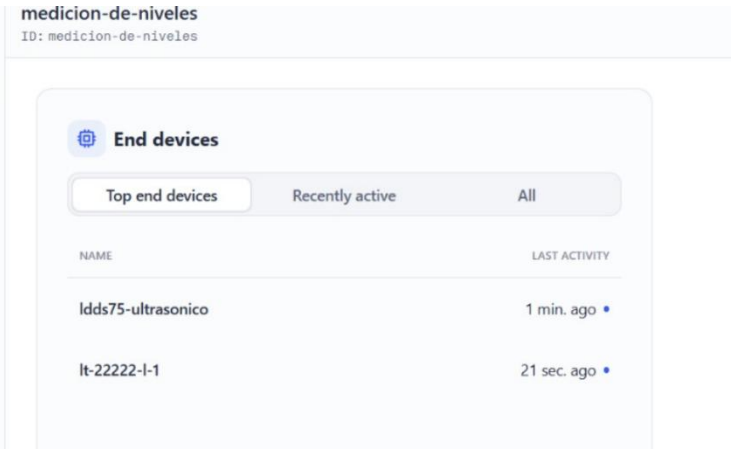
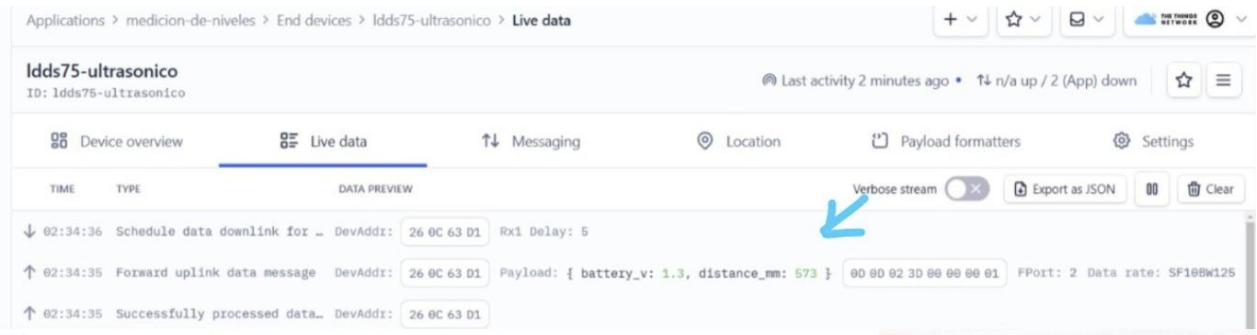
Principales características LT-22222-L:

- Protocolos soportados: Compatible con LoRaWAN Clase A y Clase C. También ofrece la opción de protocolos LoRa personalizados.
- Frecuencias: Soporta múltiples bandas globales, como EU868, US915, AS923, AU915, IN865, KR920, CN470, EU433 y RU864.
- Interfaces de E/S:
 - 2 entradas analógicas de corriente: Rango de 0 ~ 20 mA (resolución: 0.01 mA).
 - 2 entradas analógicas de voltaje: Rango de 0 ~ 30 V (resolución: 0.01 V).
 - 2 salidas digitales: Salida tipo NPN (tensión máxima: 36 V, corriente máxima: 450 mA).
 - 2 entradas digitales bidireccionales: Detecta señales de alto/bajo voltaje (máximo: 50 V o 220 V con resistencias externas).
 - 2 salidas de relé: Capacidad de 5A a 250 VAC / 30 VDC.
- Chip inalámbrico: Equipado con el SX1276/78 LoRa Wireless Chip para comunicaciones robustas y de largo alcance.
- Microcontrolador: STM32L072 para un rendimiento eficiente y bajo consumo de energía.
- Voltaje de operación: Rango de 7 ~ 24 VDC.
- Actualización de firmware: Posibilidad de actualización mediante el puerto de programación.
- Configuración: Parámetros modificables a través de AT Commands.



Fuente: Elaboración propia

Figura 2-6. Prueba realizada de comunicación



Fuente: Elaboración propia

Figura 2-7. Verificación de mediciones

Durante las primeras etapas de desarrollo del sistema de monitoreo y control de niveles de agua, se utilizó una tarjeta de desarrollo Arduino en conjunto con un módulo LoRa para establecer la comunicación con la red LoRaWAN. Sin embargo, durante las pruebas, esta configuración presentó limitaciones en la estabilidad de la transmisión y en la integración con el resto de los dispositivos del sistema.

Ante estas dificultades, se optó por reemplazar el Arduino con módulo LoRa por un LT-2222-L, un dispositivo diseñado específicamente para operar dentro de redes LoRaWAN, con entradas y salidas configurables para la adquisición de datos y control de actuadores.

La imagen muestra la prueba de comunicación realizada con el LT-2222-L, validando su integración con la red The Things Network (TTN). Se verificó que el sensor LDD575 enviara los datos de medición correctamente y que el LT-2222-L fuera reconocido como un nodo dentro de la infraestructura de comunicación. En TTN, se observó la transmisión de datos en tiempo real, confirmando la recepción de valores como la distancia medida por el sensor ultrasónico, la batería del dispositivo y otros parámetros esenciales para el monitoreo del sistema.

2.3.5. Software a utilizar

El entorno de desarrollo y las herramientas de software desempeñan un papel crucial en la implementación de sistemas IoT, como el control y monitoreo de bombas de agua; en este contexto, se destacan las herramientas y protocolos, cuya integración permite la operación eficiente del sistema:

El CBox Dashboard de Haiwell proporciona una interfaz web intuitiva para la supervisión en tiempo real y el control manual de las bombas. A través de su HMI virtual, el sistema permite tanto la automatización completa como el ajuste manual, adaptándose a las necesidades operativas del entorno y mejorando la capacidad de respuesta ante eventos críticos.

El Haiwell Cloud SCADA permite el monitoreo y control remoto del sistema a través de la nube, proporcionando acceso en cualquier momento y desde cualquier ubicación. Además, facilita la generación de reportes, el análisis de tendencias y la configuración de alertas para la detección de eventos críticos.

Para la comunicación y transmisión de datos entre dispositivos, se emplea Modbus RTU sobre RS485, el cual permite la integración del RS485-LN con el CBox Haiwell. Esta configuración garantiza una transmisión confiable y estable de los datos recopilados por los sensores de nivel, sin depender de internet o servidores externos.

El Haiwell PLC Editor es la herramienta utilizada para la programación y configuración del CBox Haiwell. A través de este software, se define la lógica de control, la interacción con los

registros Modbus RTU y el diseño de la HMI virtual, permitiendo la automatización del sistema de monitoreo y control de bombas.

Para la configuración y pruebas de comunicación del RS485-LN, se utilizan herramientas como Termite o PuTTY, las cuales permiten el ajuste de parámetros, la verificación de la transmisión de datos y la depuración del sistema.

Finalmente, el Fluke 773 es un instrumento de prueba utilizado para la simulación y verificación de los sensores de nivel antes de la implementación final. Su uso permite validar la precisión de las mediciones y garantizar la correcta interpretación de los datos dentro del sistema.

La integración de estas herramientas y protocolos asegura la operación eficiente del sistema, facilitando su monitoreo y optimización, además de permitir su escalabilidad y adaptación a nuevos requerimientos operativos o funcionales. (Tabla 2-2).

Tabla 2-2. Componentes principales del sistema.

COMPONENTE	FUNCIÓN	ESPECIFICACIONES CLAVE
Sensor Ultrasónico LDD575 (Dragino)	Mide el nivel de agua en los estanques	Rango de medición: 2 cm - 4 m; Precisión: ±3 mm; Voltaje: 5V
RS485-LN (Dragino)	Convierte datos de sensores LoRaWAN a Modbus RTU	Compatible con Modbus RTU; Comunicación LoRaWAN Clase C; Rango de frecuencia: 868/915 MHz
Dragino It-22222-L	Procesa datos del sensor y controla el sistema de monitoreo	Microcontrolador: STM32L072, 2 salidas de relé: Capacidad de 5A a 250 VAC / 30 VDC, Chip inalámbrico: Equipado con el SX1276/78 LoRa Wireless Chip
CBox Haiwell	Plataforma de monitoreo y control remoto	Interfaz web; Protocolo MQTT para datos; RS485, Acceso en tiempo real

Fuente: Elaboración propia

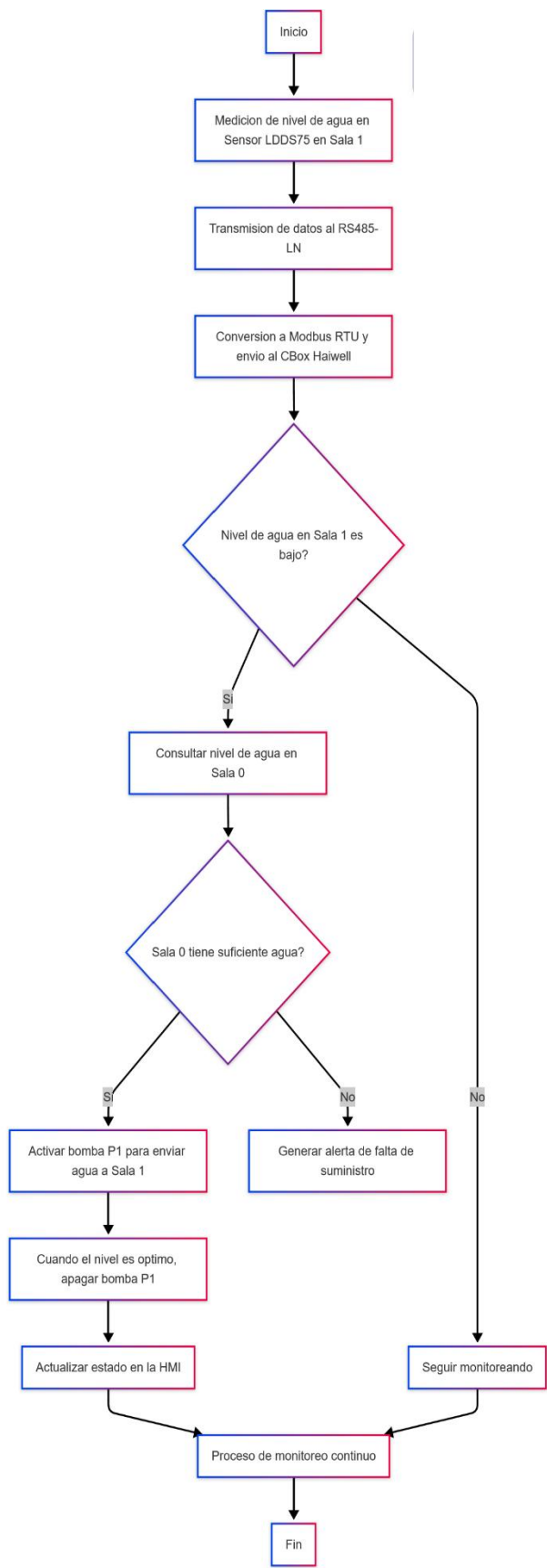
2.3.6. Diagrama de flujo del proceso

El diagrama de flujo es una herramienta gráfica que permite representar el funcionamiento del sistema de monitoreo y control de bombas de agua. A través de esta representación se pueden visualizar de manera clara las etapas del proceso, desde la medición del nivel de agua hasta la activación o desactivación de las bombas según los datos obtenidos.

El sistema inicia con la medición del nivel de agua a través del sensor LDD575, el cual transmite los datos al RS485-LN utilizando comunicación LoRaWAN. Este dispositivo convierte la información a Modbus RTU y la envía al CBox Haiwell mediante RS485. El CBox analiza los datos y determina si es necesario activar o detener la bomba. Si el nivel de agua es bajo, se genera un comando de activación que es enviado al LT-22222-L, encargado de ejecutar la acción sobre la

bomba. Si el nivel es adecuado, la bomba permanece apagada. Este proceso se repite continuamente, asegurando la correcta gestión del recurso hídrico.

En el siguiente diagrama de flujo se muestra la secuencia del proceso. (Figura 2-8)



Fuente: Elaboración propia

Figura 2-8. DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA

Resumen del Hardware Utilizado

El sistema de monitoreo y control de bombas de agua se compone de una serie de dispositivos diseñados para garantizar la medición precisa de niveles, la transmisión confiable de datos y la activación eficiente de los actuadores. A continuación, se detallan los principales componentes de hardware utilizados en el proyecto:

Sensor Ultrasónico LDD575: Sensor de nivel que mide la altura del agua en los estanques, proporcionando datos en tiempo real sobre los niveles de líquido. Su tecnología ultrasónica permite mediciones precisas sin contacto directo con el agua, garantizando durabilidad y confiabilidad en condiciones operativas exigentes.

RS485-LN (Dragino): Dispositivo encargado de la conversión de datos desde LoRaWAN a Modbus RTU. Actúa como el nodo central del sistema, recopilando información de los sensores y transmitiéndola al CBox Haiwell a través de una comunicación estable mediante RS485.

Controlador Dragino LT-22222-L: Unidad encargada de procesar la información de los sensores y gestionar la activación de las bombas a través de sus salidas de relé. Su conectividad LoRaWAN permite una comunicación eficiente en entornos donde el cableado no es viable, asegurando la operación automatizada del sistema.

CBox Haiwell: Dispositivo de monitoreo y control que centraliza la información recibida desde el RS485-LN. Proporciona una interfaz gráfica mediante su HMI virtual, permitiendo la visualización en tiempo real de los niveles de agua y el estado de las bombas, además de permitir ajustes manuales o automáticos en la operación del sistema.

Fluke 773: Instrumento de prueba utilizado para la simulación y verificación de los sensores de nivel antes de su instalación. Permite generar señales de corriente de 4-20 mA, asegurando que el sistema interprete correctamente las mediciones y verificando la correcta integración de los sensores con el RS485-LN.

CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN ECONÓMICA

3. EVALUACIÓN ECONÓMICA

3.1. DESGLOSE DE COSTOS DEL PROYECTO

El análisis de costos constituye un componente crítico para determinar la viabilidad técnica y económica del proyecto. Este proceso implica un desglose detallado de los gastos asociados a cada una de las áreas fundamentales: diseño, materiales, mano de obra y mantenimiento. Cada una de estas categorías desempeña un papel esencial en la implementación eficiente y sostenible del sistema de monitoreo, permitiendo no solo identificar los recursos necesarios, sino también optimizar su asignación para garantizar que el proyecto sea rentable y funcional a largo plazo. Este enfoque integral no solo permite justificar la inversión inicial, sino que también asegura la sostenibilidad operativa del sistema, estableciendo una base sólida para su éxito y escalabilidad. Considerándose como valor de UF 37.865 CLP con fecha del 18 de septiembre del 2024.

3.1.1. Costos de Diseño

Los costos asociados al diseño del sistema abarcan las etapas preliminares de planificación y estructuración, fundamentales para garantizar la viabilidad técnica y económica del proyecto; además estas actividades incluyen consultorías técnicas, estudios de factibilidad y análisis de alternativas tecnológicas, los cuales son esenciales para asegurar que el sistema sea eficiente, rentable y adecuado para el contexto específico de la reserva.

- *Consultoría técnica:* Implica la contratación de expertos en tecnologías LoRa y telemetría para definir una arquitectura óptima y seleccionar los componentes más adecuados. Esta asesoría asegura que el diseño del sistema cumple con los estándares de conectividad y rendimiento requeridos. Costo estimado: 7 UF.
- *Estudios de factibilidad:* Comprenden una evaluación técnica y económica detallada, incluyendo pruebas de alcance y conectividad, para garantizar que el sistema pueda operar de manera eficiente bajo las condiciones específicas del proyecto. Costo estimado: 1,75 UF.
- *Análisis de alternativas:* Incluye una comparación exhaustiva de distintas tecnologías y arquitecturas, como LoRa, Wi-Fi y SCADA, con el objetivo de identificar la solución más rentable y funcional para las necesidades del sistema. Costo estimado: 1,75 UF.

- *Costo total del diseño:* 10,5 UF. Este desglose evidencia la inversión estratégica en etapas iniciales del proyecto, esenciales para minimizar riesgos y maximizar la efectividad del sistema final.

3.1.2. Costos de Materiales

El proyecto contempla la implementación de una única estación de monitoreo y control centralizada, instalada en la oficina principal. Esta estación está diseñada para integrar tecnologías LoRaWAN y Modbus RTU, permitiendo la recolección, conversión y visualización de datos provenientes de sensores de nivel, así como el control de bombas de impulsión en tiempo real.

A diferencia de esquemas anteriores que contemplaban múltiples estaciones independientes, el sistema actual se basa en una arquitectura centralizada y simplificada, compuesta por los siguientes componentes clave:

- CBox Haiwell: Actúa como unidad central de procesamiento y visualización. Integra funciones de HMI virtual, lectura Modbus RTU y ejecución de lógica de control, permitiendo supervisar el estado del sistema y realizar ajustes manuales o automáticos.
- RS485-LN (Dragino): Dispositivo que recibe datos desde sensores y actuadores LoRaWAN y los convierte al protocolo Modbus RTU, permitiendo su lectura directa desde el CBox mediante conexión RS485.
- Sensor ultrasónico LDD575 (x2): Sensores inalámbricos de nivel ubicados en sala 0 y sala 1, los cuales miden con alta precisión el nivel de agua en los estanques sin contacto directo.
- Controlador LT-22222-L (Dragino): Unidad instalada en sala 0 que permite accionar la bomba de impulsión a través de sus salidas de relé, en función de las decisiones tomadas desde el CBox.
- Gabinete de protección, fuente de alimentación, cableado y accesorios eléctricos: Elementos necesarios para la correcta instalación y operación local del sistema.

Esta configuración reduce la complejidad técnica y optimiza los recursos, al eliminar la necesidad de gateways intermedios o múltiples nodos de control. Además, permite escalar el sistema fácilmente en el futuro, añadiendo nuevos sensores o controladores compatibles con LoRaWAN. Resumen de costos de materiales (Tabla 3-1).

Tabla 3-1. Resumen de costos de materiales.

MATERIALES	CANTIDAD	PRECIO UNIT	SUBTOTAL		UF
LDDS75 DRAGINO	2	\$ 73.780	\$ 147.560		3,897
LT-22222-L DRAGINO	1	\$ 59.743	\$ 59.743		1,578
RS485-LN DRAGINO	1	\$ 56.646	\$ 56.646		1,496
CBOX HAIWELL	1	\$ 394.000	\$ 394.000		10,405
RELÉ 24VDC	4	\$ 8.000	\$ 32.000		0,845
FUENTE DE PODER 24VDC	2	\$ 25.000	\$ 50.000		1,320
RIEL DIN PERFORADO	1	\$ 4.500	\$ 4.500		0,119
CALUGA AMARRA CABLE	20	\$ 150	\$ 3.000		0,079
FUENTE DE PODER 12 VDC	1	\$ 25.000	\$ 25.000		0,660
CABLE EXTENSION ANTENA LORA	1	\$ 15.000	\$ 15.000		0,396
TABLERO 300X200X150 MET	1	\$ 33.720	\$ 33.720		0,891
CANALETA RANURADA 20X30	1	\$ 12.000	\$ 12.000		0,317
CABLE 18 AWG NEGRO	10	\$ 300	\$ 3.000		0,079
CABLE 18 AWG ROJO	10	\$ 300	\$ 3.000		0,079
CONDUCTOR 2,5 MM2	6	\$ 1.500	\$ 9.000		0,238
BORNERA MONOPOLAR 2,5MM	10	\$ 300	\$ 3.000		0,079
AMARRA CABLE 10CM	100	\$ 50	\$ 5.000		0,132
TORNILLOS CABEZA LENTEJA	1	\$ 7.000	\$ 7.000		0,185
TOPE FINAL DE BORNERAS	10	\$ 650	\$ 6.500		0,172
TAPA DE BORNERAS	10	\$ 650	\$ 6.500		0,172
ENCHUFE 16 A INDUSTRIAL SOBREPUESTO MACHO	1	\$ 12.000	\$ 12.000		0,317
CABLE RS485	1	\$ 6.500	\$ 6.500		0,172
FERRETERIA SOPORTE CAJA UNIVERSAL	1	\$ 35.000	\$ 35.000		0,924
ENCHUFE TRIPLE 10 A SOBREPUESTO CON CAJA	1	\$ 8.500	\$ 8.500		0,224
SUMINISTROS VARIOS	1	\$ 50.000	\$ 50.000		1,320
		Total CLP	\$ 988.169	Total UF	26,097

Fuente. Elaboración propia.

3.1.3. Costos de Mano de Obra

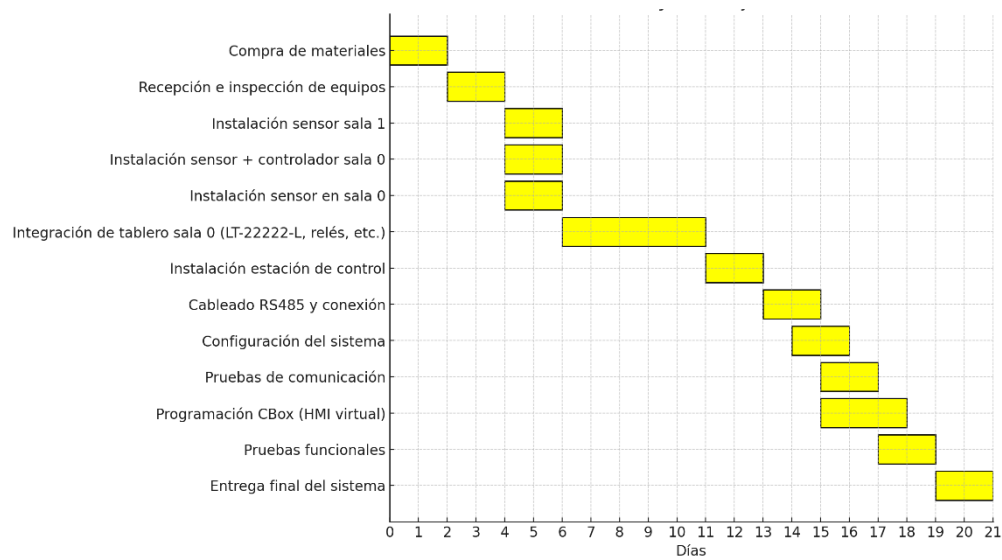
La mano de obra constituye un componente esencial en la implementación del sistema de monitoreo, abarcando actividades como la instalación, configuración y puesta en marcha del proyecto; por lo tanto, este trabajo será llevado a cabo por un equipo técnico compuesto por un ingeniero especializado en control e instrumentación y dos técnicos eléctricos. Su experiencia y habilidades son clave para garantizar la integración adecuada de los dispositivos y el óptimo desempeño del sistema.

El ingeniero de ejecución en control e instrumentación asumirá la responsabilidad de configurar los parámetros de comunicación, integrar sensores con tarjetas de desarrollo y supervisar el funcionamiento general del sistema. Se estima un tiempo de 72 horas de trabajo, con un costo de 0,80 UF por hora, lo que totaliza 57,6 UF.

Por su parte, los *técnicos eléctricos* (dos en total) se encargarán de la instalación física de los equipos, la conexión de componentes y la realización de pruebas de integración para asegurar la operatividad del sistema. Su trabajo requerirá 144 horas combinadas, a un costo de 0,51 UF por hora, acumulando *73,44 UF*. El costo total de mano de obra asciende a *131,04 UF*, una

inversión crítica para garantizar la correcta ejecución y operatividad del sistema de monitoreo. Carta Gantt (Tabla 3-2).

Tabla 3-2. Carta Gantt del proyecto.



Fuente. Elaboración propia

3.1.4. Costos de Mantenimiento

El mantenimiento actual del sistema de monitoreo se realiza mediante inspecciones diarias, en las cuales el personal verifica manualmente el funcionamiento de los equipos en cada punto del sector; donde este proceso incluye la detección de posibles fallas y la detención del sistema en caso de rebalses. Aunque estas inspecciones permiten el monitoreo continuo, la naturaleza manual del procedimiento implica una dependencia de la intervención humana y limita la capacidad de anticiparse a problemas antes de que ocurran.

El valor del personal que actualmente está trabajando recibe un monto aproximado 2.407 CLP/hora, y considerando que el mantenimiento se realiza durante 2 horas diarias por 365 días al año, el cálculo es:

Fórmula:

$$\text{Costo Anual} = \text{Costo por hora} \times \text{horas por día} \times \text{días por año}$$
$$\text{Costo Anual} = 2.407 \text{ CLP/hora} \times 2 \text{ horas/día} \times 365 \text{ días/año}$$
$$\text{Costo Anual} = 1.757.110 \text{ CLP.}$$
$$\text{Costo anual en UF: } 46,40 \text{ UF (37.865 CLP/UF)}$$

En contraposición al modelo actual, el sistema automatizado propuesto introduce un enfoque de mantenimiento preventivo, con el objetivo de optimizar los recursos técnicos y

aumentar la eficiencia del sistema. Este mantenimiento se realizará tres veces al año, asegurando una supervisión proactiva que permita anticiparse a posibles fallas.

El procedimiento considera la recalibración de sensores, verificación de conexiones, pruebas de operación y actualización de software, tareas que serán realizadas por un ingeniero y un técnico especializado.

El ingeniero será responsable de la revisión de los componentes críticos y de la configuración del sistema de monitoreo. Se contempla una dedicación de 18 horas anuales, con una tarifa de 0,8 UF/hora, equivalente a \$30.292 CLP/hora. Esto representa un costo anual de 14,4 UF, o \$545.256 CLP.

El técnico, encargado del mantenimiento y revisión operativa de equipos, también dedicará 18 horas anuales, con una tarifa de 0,51 UF/hora, equivalente a \$19.311 CLP/hora. Esto implica un gasto anual de 9,18 UF, equivalente a \$347.601 CLP.

En total, el costo anual del mantenimiento preventivo del sistema automatizado asciende a 23,58 UF, lo que equivale a aproximadamente \$892.857 CLP. Esta inversión garantiza una operación más confiable, reduce la dependencia de la supervisión diaria y mejora la continuidad del servicio.

3.1.5. Costos hídricos

Los costos asociados a los recursos hídricos desechados representan un impacto financiero significativo en la operación actual del sistema. Estos costos derivan del desperdicio de agua potable durante las operaciones diarias, debido a ineficiencias en los procesos de manejo y control del recurso hídrico. Este impacto es relevante, dado que afecta tanto los costos operativos como la sostenibilidad del proyecto.

Actualmente, se estima que el desperdicio de agua asciende a 20 m³ diarios, considerando que cada bomba Pedrollo de 10 HP opera con un caudal de 120.000 litros por hora y pierde aproximadamente 5 minutos de operación diaria. Esto equivale a una pérdida mensual de 600 m³.

Con un costo promedio de 0,02 UF por m³ y un valor de la UF de 37.865 CLP, el costo asociado al desperdicio de recursos hídricos se calcula en aproximadamente 454.380 CLP mensuales o 12 UF mensuales y 5.452.560 CLP anuales (144 UF). Este costo representa una pérdida constante que puede evitarse con la implementación de un sistema de monitoreo y control más eficiente.

La mitigación de este desperdicio no solo reducirá los costos operativos, sino que también contribuirá a un uso más sostenible del recurso hídrico, alineándose con los objetivos de eficiencia y responsabilidad ambiental del proyecto.

3.1.6. Costos en combustible

En el modelo operativo actual, el monitoreo y supervisión de los niveles de agua y funcionamiento de las bombas se realiza de forma manual, lo que implica desplazamientos diarios en camioneta por parte del personal técnico. Estos traslados continuos generan un consumo constante de combustible, representando un costo económico significativo y un impacto ambiental no menor.

Se estima que el gasto mensual en combustible asociado exclusivamente a estos recorridos alcanza los 160.000 CLP (4,23 UF), considerando distancias promedio, frecuencia de visitas y el rendimiento del vehículo. Este monto asciende a un costo anual de 1.922.027 CLP, lo que equivale a 50,7 UF al valor de la UF vigente (37.865 CLP/UF).

La implementación del sistema automatizado elimina la necesidad de inspecciones presenciales diarias, ya que el monitoreo de los niveles y el control de las bombas se realiza en tiempo real a través del CBox Haiwell. Esta automatización permite una reducción significativa en los desplazamientos, disminuyendo directamente el consumo de combustible y los costos operativos asociados.

Además del beneficio económico, esta optimización también contribuye a la reducción de emisiones de gases contaminantes, promoviendo un modelo de gestión más eficiente y alineado con los principios de sustentabilidad ambiental del proyecto. Resumen del proyecto (Tabla 3-3)

Tabla 3-3. Resumen de costos sin proyecto.

DESCRIPCIÓN	COSTO ANUAL (CLP)	COSTO ANUAL (UF)
Costo anual de mantenimiento	1.757.110	46,4
Costos en Combustible	1.922.027	50,7
Costos en Recursos Hídricos	5.452.560	144
Costo sin proyecto total	9.131.697	241,1

Fuente. Elaboración propia.

3.1.7. Costos Indirectos

Los costos indirectos abarcan los gastos adicionales relacionados con el traslado de personal y equipos, así como con los seguros de los equipos, los cuales son esenciales para asegurar la correcta implementación y continuidad del proyecto; por lo que, estos costos no están directamente relacionados con la adquisición o instalación de los componentes principales del

sistema, pero son necesarios para garantizar que el proceso se realice sin contratiempos y que los equipos estén protegidos durante su transporte y operación.

El transporte incluye los gastos asociados con el traslado de personal y equipos al sitio de instalación; cubriendo este gasto, tanto los costos de desplazamiento como los relacionados con el tiempo invertido en estas actividades. El costo estimado para el transporte es de 50.000 CLP. Por otro lado, los seguros de los equipos son una medida precautoria para cubrir posibles daños o pérdidas durante el transporte, la instalación o el mantenimiento del sistema. La cobertura de estos riesgos es fundamental para evitar impactos financieros negativos en caso de incidentes imprevistos. El costo estimado para los seguros de los equipos es también de 50.000 CLP. En conjunto, los costos indirectos ascienden a un total de 100.000 CLP, lo que equivale a aproximadamente 2.64 UF.

3.2. RESUMEN DE COSTOS TOTALES.

El análisis detallado de los costos totales es esencial para evaluar la viabilidad económica y la eficiencia del proyecto en su conjunto. Este apartado presenta un resumen integral de los costos asociados con la implementación y operación del sistema de monitoreo automatizado, desglosando los gastos en diversas categorías clave, tales como diseño, materiales, mano de obra, mantenimiento y costos indirectos. A través de esta segmentación, se busca proporcionar una visión clara de la distribución de los recursos financieros, permitiendo una comprensión precisa del impacto económico del proyecto. Además, se consideran los ahorros esperados en áreas operativas clave, lo que posibilita la identificación de beneficios a largo plazo que podrían justificar la inversión inicial y mejorar la rentabilidad general del sistema (Tabla 3-4).

Tabla 3-4. Resumen de costos totales.

CATEGORÍA	COSTO (CLP)	COSTO EN UF
Costos de Diseño	397.582	10,5
Costos de Materiales	988.169	26,09
Mano de Obra	4.961.829,6	131,04
Costos Indirectos	100.000	2,64
Sub Total Inversión Inicial	6.447.580,6	170,28 UF
Costos de mantenimiento anual	892.856	23,58
Total Inversión Inicial	7.340.436,6	193,9
Costo total proyecto (5 años)	10.911.936	288,18

Fuente. Elaboración propia

El valor total para ejecutar el proyecto es de 193,9 [UF], lo cual se considera como inversión inicial para el flujo de caja.

3.3. INDICADORES DE VIABILIDAD ECONÓMICA.

Para determinar la factibilidad del proyecto desde una perspectiva financiera, se utilizaron indicadores clásicos de evaluación económica. Estos permiten cuantificar la rentabilidad del proyecto a lo largo del tiempo, considerando los flujos de caja proyectados y la inversión inicial.

Los indicadores aplicados serán los siguientes:

VAN (Valor Actual Neto): Permite estimar el valor presente de los flujos netos generados por el proyecto, descontados a una tasa mínima aceptable de retorno (TMAR). Un VAN positivo indica que el proyecto es rentable.

TIR (Tasa Interna de Retorno): Representa la tasa de descuento que iguala el valor actual neto de los flujos de caja a cero. Si la TIR es superior a la TMAR, el proyecto se considera viable económicamente.

Payback: Este indicador señala el tiempo necesario para que los ingresos generados por el proyecto iguallen el valor de la inversión inicial. Mientras menor sea el Payback, más atractivo será el proyecto desde el punto de vista financiero.

Tasa Mínima Aceptable de Retorno (TMAR): Se define como la tasa mínima de rentabilidad que justifica la ejecución del proyecto. Para este estudio, se ha considerado una TMAR del 12% anual, valor razonable para proyectos de eficiencia operativa con bajo o moderado nivel de riesgo.

3.4. FLUJO DE CAJA DEL PROYECTO.

En esta sección se presentan y analizan los flujos de caja asociados al proyecto para distintos esquemas de financiamiento (0 %, 25 %, 50 % y 75 % de la inversión financiada mediante crédito). En todos los casos se parte de la misma base operacional: los ingresos corresponden a los ahorros anuales generados por la implementación del sistema de monitoreo remoto, los que se modelan con un crecimiento real de 2 % anual, asociado al incremento gradual en la demanda de agua y a reajustes en las tarifas y costos evitados. Por su parte, los costos operacionales se descomponen en costos variables y costos fijos, los cuales crecen a una tasa real aproximada de 1 % anual, reflejando el efecto de la actualización de precios de insumos y mano de obra especializada.

La Tabla 3-5 presenta el flujo de caja puro del proyecto, correspondiente al escenario en que la totalidad de la inversión inicial de 193,9 UF es financiada con recursos propios, sin incorporación de deuda. En este caso, la depreciación de la inversión se calcula en forma lineal en un horizonte de cinco años y se registra únicamente como gasto operacional antes de impuestos, tal como se recomienda en la literatura financiera. A partir de este flujo se obtienen un Valor Actual Neto (VAN) aproximado de 438,2 UF, una Tasa Interna de Retorno (TIR) cercana a 84,8 % y un período de recuperación simple del orden de 1,14 años, indicadores que muestran una elevada rentabilidad aun en ausencia de financiamiento externo.

Sobre la base del flujo puro se construyen los escenarios con financiamiento. La Tabla 3-6 muestra el flujo de caja del proyecto incorporando un financiamiento del 25 % de la inversión inicial mediante crédito en UF, manteniendo constantes los supuestos operacionales y la tasa de descuento definida. El crédito se modela con una tasa de interés real del 10 % anual, un plazo de cinco años y amortización según el sistema francés, incorporando explícitamente en el flujo los intereses y las amortizaciones anuales. En este escenario, el VAN para el inversionista asciende a aproximadamente 443,6 UF y la TIR del capital propio alcanza valores del orden de 107,3 %, con un período de recuperación simple cercano a 0,92 años.

La Tabla 3-7 presenta el flujo de caja del proyecto para el escenario con un 50 % de la inversión financiada a través de crédito, lo que permite analizar el efecto de un mayor nivel de apalancamiento sobre los flujos netos del inversionista. Al mantener inalterados los ahorros y costos operacionales, la diferencia se concentra en el servicio de la deuda (intereses y amortización). Bajo estas condiciones, el VAN se eleva a aproximadamente 449,2 UF y la TIR del capital propio alcanza alrededor de 151,2 %, con un payback simple de 0,66 años.

En la Tabla 3-8 se detalla el flujo de caja correspondiente al escenario con 75 % de financiamiento, en el cual el aporte de capital propio es mínimo y el proyecto se encuentra altamente apalancado. En este caso, el VAN para el inversionista alcanza un valor cercano a 454,8 UF y la TIR del capital propio se sitúa en torno a 279,7 %, con un período de recuperación de aproximadamente 0,36 años. Si bien este escenario maximiza la rentabilidad sobre el capital propio, también implica una mayor dependencia del financiamiento externo y un compromiso más relevante con el servicio de la deuda.

Finalmente, en la Tabla 3-9 se resume el comportamiento de los principales indicadores económicos (VAN, TIR del capital propio y payback) para los cuatro escenarios de financiamiento evaluados, con el fin de comparar de manera sintética la conveniencia relativa de cada alternativa. En todos los casos, el VAN se mantiene ampliamente positivo y las TIR del capital propio superan holgadamente la tasa mínima de atractivo del 12 %, mientras que los periodos de recuperación son muy acotados. En consecuencia, la viabilidad económica del proyecto es sólida en todos los

esquemas de financiamiento analizados; la elección del porcentaje de deuda queda determinada principalmente por criterios de política financiera y por el grado de aversión al endeudamiento del inversionista.

Tabla 3-5. Flujo de caja puro.

Concepto	Años					
	0	1	2	3	4	5
flujo de caja puro	0	1	2	3	4	5
Ingresos (ahorros)	0	241,1	245,9	250,8	255,9	261
Costos variables	0	10	10,1	10,2	10,3	10,4
Costos fijos (mantención sistema)	0	13,6	13,7	13,9	14	14,1
Utilidad operacional	0	217,5	222,1	226,8	231,6	236,4
Depreciación	0	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8
Utilidad antes de impuestos	0	179	183	188	193	198
Impuestos 27 %	0	48,3	49,5	50,8	52,1	53,4
Utilidad después de impuestos	0	131	134	137	141	144
Inversión activos fijos	-193,9	0	0	0	0	0
Flujo de caja neto del proyecto	-193,9	169	173	176	180	183
Flujo actualizado	-193,9	151,2	137,6	125,3	114,1	103,9
Flujo actualizado acumulado	-193,9	-42,7	94,9	220,2	334,3	438,2

Fuente. Elaboración propia

En la Tabla 3-6 se muestra el flujo de caja del proyecto con un 25 % de la inversión financiada mediante crédito, incorporando por primera vez los pagos de intereses y amortización, pero manteniendo sin cambios los supuestos de crecimiento de ahorros y costos.

Tabla 3-6. Flujo de caja 25% Financiamiento

Concepto	Años					
	0	1	2	3	4	5
Flujo de caja 25%	0	1	2	3	4	5
Ingresos (ahorros)	0	241,1	245,9	250,8	255,9	261
Costos variables	0	10	10,1	10,2	10,3	10,4
Costos fijos (mantención sistema)	0	13,6	13,7	13,9	14	14,2
Utilidad operacional	0	217,5	222,1	226,8	231,5	236,4
Depreciación	0	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8
Intereses crédito largo plazo	0	5	4	3	2	1
Utilidad antes de impuestos	0	173,9	179,3	184,8	190,5	196,5
Impuestos 27 %	0	47	48	50	51	53
Utilidad después de impuestos	0	127	131	135	139	143
Inversión activos fijos	-193,9	0	0	0	0	0
Crédito largo plazo	48,5	0	0	0	0	0
Amortización crédito largo plazo	0	7,9	8,7	9,6	10,6	11,6
Flujo neto para el inversionista	-145,4	157,8	160,9	164,1	167,3	170,6
Flujo neto actualizado	-145	141	128	117	106	97
Flujo neto actualizado acumulado	-145,4	-4,6	123,7	240,5	346,8	443,6

Fuente. Elaboración propia

La Tabla 3-7 presenta el flujo de caja para el escenario con un 50 % de financiamiento, donde se observa un mayor servicio de deuda y, en consecuencia, un efecto más marcado del apalancamiento financiero sobre los flujos netos del inversionista.

Tabla 3-7. Flujo de caja 50% Financiamiento

Concepto	Años					
Flujo de caja 50%	0	1	2	3	4	5
Ingresos (ahorros)	0	241,1	245,9	250,8	255,9	261
Costos variables	0	10	10,1	10,2	10,3	10,4
Costos fijos (mantención sistema)	0	13,6	13,7	13,9	14	14,2
Utilidad operacional	0	217,5	222,1	226,8	231,5	236,4
Depreciación	0	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8
Intereses crédito largo plazo	0	10	8	6	4	2
Utilidad antes de impuestos	0	169	175,2	181,6	188,3	195,3
Impuestos 27 %	0	46	47	49	51	53
Utilidad después de impuestos	0	123	128	133	138	143
Inversión activos fijos	-193,9	0	0	0	0	0
Crédito largo plazo	97	0	0	0	0	0
Amortización crédito largo plazo	0	15,9	17,5	19,2	21,1	23,3
Flujo neto para el inversionista	-97	146,3	149,2	152,2	155,1	158,1
Flujo neto actualizado	-97	131	119	108	99	90
Flujo neto actualizado acumulado	-97	33,7	152,6	260,9	359,5	449,2

Fuente. Elaboración propia

En la Tabla 3-8 se detalla el flujo de caja correspondiente al escenario con 75 % de financiamiento, en el que el capital propio es mínimo y el servicio de la deuda adquiere mayor relevancia, permitiendo evaluar el proyecto en una condición de apalancamiento elevado.

Tabla 3-8. Flujo de caja 75% Financiamiento

Concepto	Años					
Flujo de caja 75%	0	1	2	3	4	5
Ingresos (ahorros)	0	241,1	245,9	250,8	255,9	261
Costos variables	0	10	10,1	10,2	10,3	10,4
Costos fijos (mantención sistema)	0	13,6	13,7	13,9	14	14,2
Utilidad operacional	0	217,5	222,1	226,8	231,5	236,4
Depreciación	0	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8
Intereses crédito largo plazo	0	15	12	10	7	4
Utilidad antes de impuestos	0	164,2	171,1	178,4	186,1	194,1
Impuestos 27 %	0	44	46	48	50	52
Utilidad después de impuestos	0	120	125	130	136	142
Inversión activos fijos	-193,9	0	0	0	0	0
Crédito largo plazo	145,4	0	0	0	0	0
Amortización crédito largo plazo	0	23,8	26,2	28,8	31,7	34,9
Flujo neto para el inversionista	-48,5	134,8	137,5	140,2	142,9	145,6
Flujo neto actualizado	-49	120	110	100	91	83
Flujo neto actualizado acumulado	-48,5	71,9	181,5	281,3	372,2	454,8

Fuente. Elaboración propia

Finalmente, en la siguiente tabla se resume el comportamiento de los principales indicadores económicos (VAN, TIR del capital propio y Payback) para los cuatro escenarios de financiamiento evaluados, con el fin de comparar de manera sintética la conveniencia relativa de cada alternativa.

Tabla 3-9. Cuadro comparativo final

Escenario	VAN (UF)	TIR capital propio	Payback (años)	Payback (meses aprox.)
0% crédito (puro)	438,2	84,80%	1,15	13,8 meses
25% crédito	443,6	107,30%	0,92	11,1 meses
50% crédito	449,2	151,20%	0,66	8,0 meses
75% crédito	454,8	279,70%	0,36	4,3 meses

Fuente. Elaboración propia

3.5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad permite evaluar cómo variaciones en el costo de los materiales utilizados en la implementación del sistema afectan la rentabilidad del proyecto. En este caso, el ítem “materiales” corresponde a 26,09 UF de la inversión inicial total de 193,9 UF, e incluye principalmente sensores, tarjetas de desarrollo y dispositivos electrónicos asociados al sistema de monitoreo remoto. Dado que estos equipos se encuentran expuestos a cambios de precio por variaciones en el tipo de cambio y en las condiciones de suministro, resulta pertinente analizar el impacto de dichas variaciones sobre los indicadores económicos del proyecto.

Metodológicamente, el análisis se realizó sobre el flujo de caja puro del proyecto, manteniendo constantes los ahorros operacionales, los costos de mantención del sistema y la tasa mínima de atractivo (TMAR = 12 %). La única variable que se modifica es el costo de los materiales, aplicando una variación hipotética de ±15 % sobre el valor base de 26,09 UF. Esta variación se incorpora en la inversión inicial del proyecto, de manera que el componente fijo de la inversión (mano de obra, diseño y costos indirectos) se mantiene inalterado, mientras que solo el monto asociado a materiales cambia. En cada escenario se ajusta la inversión total y la depreciación anual en proporción al nuevo valor de los materiales, y a partir de ello se recalculan el flujo de caja, el Valor Actual Neto (VAN), la TIR del capital propio y el período de recuperación.

Para cuantificar el efecto de estas variaciones sobre el VAN se utiliza la siguiente expresión de análisis de sensibilidad:

$$\text{Sensibilidad} = \frac{VAN_n - VAN_e}{VAN_e} \cdot 100$$

Donde VANE corresponde al VAN del escenario base, VANn al VAN obtenido en el escenario con variación en el costo de los elementos. El resultado indica el porcentaje de cambio del VAN frente a la modificación aplicada en la inversión.

En el escenario base, con una inversión inicial de 193,9 UF, el flujo de caja del proyecto arroja un VAN aproximado de 438,2 UF y un período de recuperación simple cercano a 1,14 años. Cuando se supone una disminución del 15 % en el costo de los materiales, la inversión total se reduce a 190,0 UF y la depreciación anual disminuye en la misma proporción. Bajo estas condiciones, el VAN aumenta a alrededor de 441,4 UF y el período de recuperación se acorta levemente hasta aproximadamente 1,12 años. Aplicando la expresión de sensibilidad, este escenario representa un incremento cercano a 0,7 % en el VAN respecto del escenario base.

En el escenario pesimista, con un aumento del 15 % en el costo de los materiales, la inversión total se eleva a aproximadamente 197,8 UF y la depreciación anual aumenta en igual magnitud. En este caso, el VAN se reduce a alrededor de 435,0 UF y el período de recuperación simple se extiende a aproximadamente 1,17 años. Desde la perspectiva de la fórmula de sensibilidad, esta situación implica una disminución cercana a 0,7 % del VAN en comparación con el escenario base.

La Tabla 3-10 resume los principales resultados del análisis de sensibilidad aplicado exclusivamente al costo de los materiales. Como puede observarse, el VAN se mantiene claramente positivo en todos los escenarios y las variaciones relativas son reducidas: una modificación de $\pm 15\%$ en el costo de los materiales produce solo un cambio del orden de $\pm 0,7\%$ en el VAN del proyecto. La Figura 3-1 ilustra gráficamente este comportamiento y permite apreciar que el proyecto presenta una baja sensibilidad frente a fluctuaciones moderadas en el precio de los equipos. En consecuencia, puede concluirse que la inversión mantiene un margen amplio de rentabilidad aún bajo escenarios de incremento de costos, lo que refuerza la robustez económica de la propuesta frente a variaciones de precios asociadas a inflación, alza de insumos o cambios en el tipo de cambio. (tabla 3-10)

Tabla 3-10. Sensibilidad del proyecto.

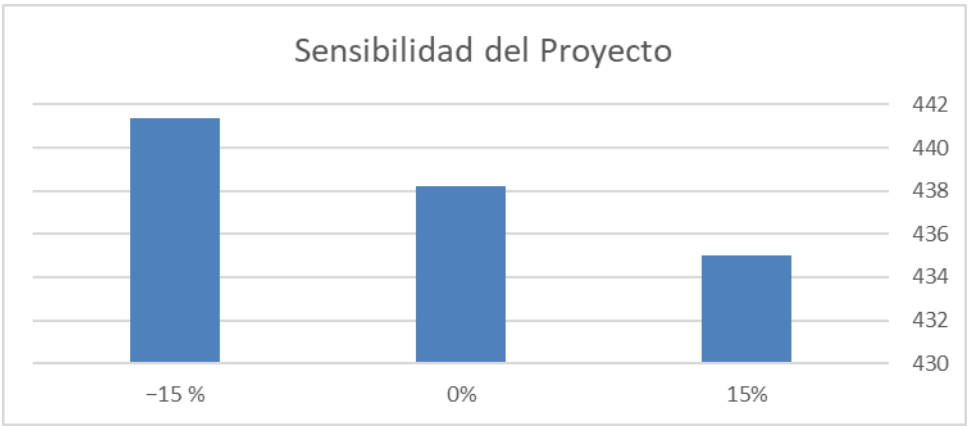
Escenario	Variación materiales	Inversión total (UF)	VAN (UF)
Escenario pesimista	15%	197,8	435
Escenario base	0%	193,9	438,2
Escenario optimista	-15 %	190	441,4

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 3-10 y la Figura 3-1 permiten apreciar de forma sintética el efecto de las variaciones en el costo de los materiales sobre el VAN del proyecto. Se observa que, aun cuando los materiales aumentan un 15 %, el VAN solo disminuye desde 438,2 UF a aproximadamente 435,0 UF, mientras que una reducción del 15 % en su valor lo incrementa a alrededor de 441,4 UF. En términos relativos, estos cambios corresponden a una variación cercana a $\pm 0,7\%$ en el

VAN respecto del escenario base, lo que evidencia una baja sensibilidad del proyecto frente a fluctuaciones moderadas en el precio de los materiales.

En consecuencia, puede concluirse que la inversión mantiene un margen amplio de rentabilidad incluso bajo escenarios de aumento de costos, por lo que el proyecto presenta una elevada robustez económica frente a posibles variaciones de precios asociadas a inflación, alza de insumos o cambios en el tipo de cambio.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-1. Gráfico de sensibilidad del proyecto

3.6. **JUSTIFICACIÓN DEL GASTO.**

La inversión en un sistema automatizado para el control de bombas de agua aporta beneficios económicos, operativos y estratégicos que justifican plenamente la inversión inicial. Este proyecto permite una notable reducción en los costos operativos al disminuir la intervención manual, reduciendo así los costos asociados a la mano de obra y los riesgos derivados de una supervisión constante. Adicionalmente, la automatización evita problemas críticos como el rebalse de estanques y el desperdicio de agua, optimizando significativamente los recursos hídricos, un aspecto crucial en áreas con escasez de agua. Esta eficiencia no solo reduce gastos operativos, sino que contribuye activamente a la sostenibilidad mediante un uso responsable de los recursos disponibles.

El sistema automatizado garantiza un funcionamiento óptimo de las bombas y equipos relacionados al operar únicamente cuando es necesario. Esto disminuye el desgaste de los componentes, extiende su vida útil y reduce la frecuencia y costos asociados al mantenimiento. Estos factores en conjunto permiten una recuperación rápida de la inversión inicial, evidenciada por indicadores financieros positivos como el VAN y un período de recuperación reducido.

Asimismo, el proyecto mejora sustancialmente la toma de decisiones gracias al monitoreo en tiempo real, proporcionando a los operadores alertas automáticas y actualizaciones

constantes sobre los niveles de agua y el estado operativo de las bombas. Esta información inmediata disminuye significativamente el tiempo de respuesta ante posibles problemas, mejorando la precisión y efectividad de las decisiones operativas. Además, la recopilación continua de datos históricos posibilita la realización de análisis predictivos, optimizando los patrones de consumo y aumentando la eficiencia operativa en el largo plazo.

Por otro lado, la viabilidad económica del proyecto está respaldada por un análisis de sensibilidad que confirma su robustez frente a posibles cambios en los costos o fluctuaciones en los ahorros proyectados. Este análisis demuestra que el sistema mantiene su rentabilidad en diversos escenarios, minimizando el riesgo financiero y asegurando un impacto positivo sostenido en la inversión.

La implementación de este sistema automatizado también refuerza el compromiso de la empresa con la sostenibilidad ambiental y la responsabilidad social. Al reducir la huella ambiental mediante un uso eficiente del agua y la energía, el proyecto facilita el cumplimiento de normativas ambientales y fortalece la imagen corporativa en términos de sostenibilidad y responsabilidad social.

Finalmente, este sistema automatizado incrementa notablemente la eficiencia operativa, reduciendo los riesgos inherentes a la gestión manual. Al disminuir la probabilidad de errores humanos y asegurar un control preciso y constante de los niveles de agua, se reducen considerablemente los incidentes operativos. La capacidad de monitorear y ajustar el sistema de forma remota reduce la dependencia de la supervisión física, permitiendo una gestión más flexible y eficiente.

En resumen, la inversión en un sistema automatizado de control para bombas de agua constituye una decisión estratégica sólida y financieramente rentable, cuyos beneficios incluyen reducción de costos, eficiencia operativa, compromiso con la sostenibilidad y una significativa mejora en la rentabilidad general del proyecto.

CONCLUSIÓN

La inversión en un sistema automatizado para el control de bombas de agua aporta beneficios económicos, operativos y estratégicos que justifican plenamente la inversión inicial. Este proyecto permite una notable reducción en los costos operativos al disminuir la intervención manual, reduciendo así los costos asociados a la mano de obra y los riesgos derivados de una supervisión constante. Adicionalmente, la automatización evita problemas críticos como el rebalse de estanques y el desperdicio de agua, optimizando significativamente los recursos hídricos, un aspecto crucial en áreas con escasez de agua. Esta eficiencia no solo reduce gastos operativos, sino que contribuye activamente a la sostenibilidad mediante un uso responsable de los recursos disponibles.

El sistema automatizado garantiza un funcionamiento óptimo de las bombas y equipos relacionados al operar únicamente cuando es necesario. Esto disminuye el desgaste de los componentes, extiende su vida útil y reduce la frecuencia y costos asociados al mantenimiento. Estos factores en conjunto permiten una recuperación rápida de la inversión inicial, evidenciada por indicadores financieros positivos como el VAN y un período de recuperación reducido.

Asimismo, el proyecto mejora sustancialmente la toma de decisiones gracias al monitoreo en tiempo real, proporcionando a los operadores alertas automáticas y actualizaciones constantes sobre los niveles de agua y el estado operativo de las bombas. Esta información inmediata disminuye significativamente el tiempo de respuesta ante posibles problemas, mejorando la precisión y efectividad de las decisiones operativas. Además, la recopilación continua de datos históricos posibilita la realización de análisis predictivos, optimizando los patrones de consumo y aumentando la eficiencia operativa en el largo plazo.

Por otro lado, la viabilidad económica del proyecto está respaldada por un análisis de sensibilidad que confirma su robustez frente a posibles cambios en los costos o fluctuaciones en los ahorros proyectados. Este análisis demuestra que el sistema mantiene su rentabilidad en diversos escenarios, minimizando el riesgo financiero y asegurando un impacto positivo sostenido en la inversión.

La implementación de este sistema automatizado también refuerza el compromiso de la empresa con la sostenibilidad ambiental y la responsabilidad social. Al reducir la huella ambiental mediante un uso eficiente del agua y la energía, el proyecto facilita el cumplimiento de normativas ambientales y fortalece la imagen corporativa en términos de sostenibilidad y responsabilidad social.

Finalmente, este sistema automatizado incrementa notablemente la eficiencia operativa, reduciendo los riesgos inherentes a la gestión manual. Al disminuir la probabilidad de errores humanos y asegurar un control preciso y constante de los niveles de agua, se reducen

considerablemente los incidentes operativos. La capacidad de monitorear y ajustar el sistema de forma remota reduce la dependencia de la supervisión física, permitiendo una gestión más flexible y eficiente.

En resumen, la inversión en un sistema automatizado de control para bombas de agua constituye una decisión estratégica sólida y financieramente rentable, cuyos beneficios incluyen reducción de costos, eficiencia operativa, compromiso con la sostenibilidad y una significativa mejora en la rentabilidad general del proyecto. La implementación del sistema automatizado para el control de bombas de agua presenta múltiples ventajas que respaldan firmemente su ejecución desde perspectivas económicas, operativas y ambientales. La reducción considerable de costos operativos, la prolongación de la vida útil de los equipos, la mejora en la precisión y agilidad en la toma de decisiones y el impacto positivo en la sostenibilidad ambiental son argumentos sólidos que justifican la inversión inicial. Además, el análisis financiero confirma que el proyecto es robusto y viable frente a variaciones económicas externas, minimizando riesgos financieros y asegurando retornos positivos a corto y largo plazo. En definitiva, la automatización propuesta es una solución integral que no solo optimiza recursos y procesos internos, sino que también fortalece el compromiso con prácticas sostenibles y responsables, estableciendo un modelo operativo eficiente y alineado con las expectativas actuales de responsabilidad ambiental y social.

BIBLIOGRAFÍA

Arduino. (2024). *Arduino Uno*. <https://arduino.cl/arduino-uno/>

Instituto Nacional de Estadísticas. (2023). Índice de Precios al Consumidor (IPC), diciembre 2022.

<https://www.ine.gob.cl>

Didácticas electrónicas. (2024). *Comunicaciones Lora*.

https://didacticaselectronicas.com/index.php/promocion/view/productdetails/virtuemart_product_id/13032/virtuemart_category_id/597

Dragino. (2024). *Lista de productos*. <https://www.dragino.com/products/lora-lorawan-gateway/item/228-lps8v2.html>

Electronilab. (2024). *Modulo transceptor Lora*. <https://electronilab.co/tienda/modulo-transceptor-lora-sx1278-ra-02-433-mhz-con-base/>

Haiwell. (2024). *Puerta de enlace SmartLink CBOX*. <https://haiwell.com/hwproducts/185-en.html>

Sirtelecom. (2024). *Telemetría para la Industria*. <https://www.sirtelecom.cl/servicio/telemetria/>