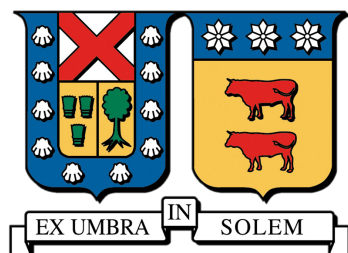


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA

VALPARAÍSO - CHILE



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN
SISTEMA DE MONITOREO EN TIEMPO REAL
PARA LA CALIDAD DEL AGUA EN
SALMONERAS**

KAROLAIN YARELY CABRERA CABRERA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL TELEMÁTICA

PROFESOR GUÍA: MOHAMMED ABDELHAMID

PROFESOR CORREFERENTE: MARCOS ZUÑIGA

SEPTIEMBRE - 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: Diseño e implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real para la calidad del agua en salmoneras

Nombre del candidato(a): Karolain Yarely Cabrera Cabrera

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Telemática

Campus: Casa Central ; **Departamento:** Electrónica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Mohamed Abdelhamid Ahmed Abdelhamid, 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

☒ 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:

☐ 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: 8/10/2025

; Firma:

M. Abdelhamid

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 8/10/2025

; Firma:

Karolain

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.

”Mientras creas en ti mismo, no importa lo que pase: siempre saldrás adelante.” —
Sakura Kinomoto

Agradecimientos

En primer lugar, expreso mi más profundo agradecimiento a mi familia, pilar fundamental sin el cual este logro no habría sido posible. Dedico una mención especial a mi madre, quien ha sido mi mayor fuente de inspiración y apoyo incondicional a lo largo de estos años universitarios. Gracias por tu presencia constante, tu amor y por brindarme la fortaleza necesaria para superar cada desafío en este largo camino.

A mis amigos cercanos, les agradezco de corazón su paciencia, compañía y palabras de aliento en los momentos más difíciles, recordándome siempre que no estaba sola en este proceso. Extiendo mi gratitud a mi amiga Francisca, cuya comprensión, apoyo y todo su conocimiento fueron un motor para terminar este trabajo, gracias por brindarme soporte crucial en cada etapa del proceso. De igual manera, agradezco a Diego, quien, a pesar de haber llegado en el periodo más estresante del último año universitario, trajo consigo alegría, calma y un apoyo incondicional.

Mi sincero reconocimiento a mi Profesor Mohamed, por su inmensa dedicación, preocupación y compromiso. Sus valiosos consejos, la rigurosidad en la corrección y la paciencia con la que me acompañó durante todo el proceso de esta memoria fueron clave para la consecución de este objetivo.

Finalmente, a todos ustedes, gracias por ser parte de mi vida y por contribuir, de diversas formas, a que esta meta fuera alcanzable. Cada uno ha dejado una huella imborrable en este camino.

Resumen

En Chile, la acuicultura llega a ser un pilar económico y líder exportador, llegando a enfrentar diversos desafíos para garantizar la sostenibilidad y la calidad del agua en sus sistemas productivos. El presente trabajo logra desarrollar un sistema de monitoreo ambiental enfocado en la optimización de la salud de las especies marinas y mejorar la eficiencia en la producción en jaulas de cultivo.

El sistema propuesto combina dos enfoques: una boya estática equipada con comunicación inalámbrica en la superficie para una supervisión continua, y la utilización de un Vehículo Operado Remotamente (ROV) que utiliza conexión vía Ethernet. En ambos casos es necesaria la recolección de datos en tiempo real en un entorno subacuático, superando las limitaciones actuales de las soluciones de monitoreo al integrar tecnologías de comunicación adaptadas a cada entorno.

A lo largo de este trabajo se incorporaron diversos sensores para la medición de ciertos parámetros considerados críticos como pH, temperatura, oxígeno disuelto y conductividad. Se implementaron diversos protocolos de seguridad basados en cifrado AES-128 para garantizar integridad y confidencialidad de datos transmitidos. Utilizando simulaciones y pruebas realizadas demostraron la viabilidad del sistema, destacando su capacidad para transmitir datos de manera robusta y confiable en condiciones adversas que se puedan presentar en un entorno real.

Los resultados obtenidos validan la factibilidad técnica de la solución y aportan una base sólida para futuras implementaciones en la industria acuícola. La integración de tecnologías avanzadas en este sistema de monitoreo representa un avance significativo en la gestión sostenible de los recursos hídricos, posicionando a la acuicultura chilena como un referente global en innovación tecnológica y eficiencia operativa.

Abstract

In Chile, aquaculture has become an economic pillar and leading exporter, facing several challenges to ensure sustainability and water quality in their production systems. The present work achieves the development of an environmental monitoring system focused on optimizing the health of marine species and improving the efficiency of production in culture cages.

The proposed system combines two approaches: a static buoy equipped with wireless communication on the surface for continuous monitoring, and the use of a Remotely Operated Vehicle (ROV) using an Ethernet connection. In both cases, real-time data collection in an underwater environment is required, overcoming the current limitations of monitoring solutions by integrating communication technologies adapted to each environment.

Throughout this work, several sensors were incorporated to measure certain parameters considered critical, such as pH, temperature, dissolved oxygen and conductivity. Several security protocols based on AES-128 encryption were implemented to ensure integrity and confidentiality of transmitted data. Using simulations and tests, they demonstrated the viability of the system, highlighting its ability to transmit data in a robust and reliable manner under adverse conditions that may occur in a real environment.

The results obtained validate the technical feasibility of the solution and provide a solid basis for future implementations in the aquaculture industry. The integration of advanced technologies in this monitoring system represents a significant advance in the sustainable management of water resources, positioning Chilean aquaculture as a global benchmark in technological innovation and operational efficiency.

Índice general

1	Introducción	1
1.1	Contexto	1
1.2	Problema por resolver	2
1.3	Acercamiento de la solución	3
1.4	Objetivos	5
1.4.1	Objetivo General	5
1.4.2	Objetivos Específicos	5
1.5	Estructura general del documento	5
2	Estado del Arte	7
2.1	Soluciones existentes en la industria	7
2.2	Alternativas del mercado	11
2.2.1	Alternativas de mercado en tecnologías de comunicación acuática	12
2.2.2	Tecnología inalámbrica	13
2.2.3	Conexión Ethernet	18
2.2.4	Seguridad	21

3	Arquitectura propuesta	31
3.1	Arquitectura del sistema	31
3.2	Revisión de requerimientos	36
3.3	Requisitos funcionales	37
3.4	Requisitos no funcionales	38
3.5	Requisitos ambientales	38
3.5.1	Ambiente subacuático	38
3.5.2	Hardware de Desarrollo	39
3.5.3	Software de Desarrollo	39
3.6	Módulos	39
3.6.1	Electrónica	40
3.6.2	Comunicación	41
3.6.3	Almacenamiento	42
3.6.4	Aplicación	42
3.7	Software de simulación	43
4	Diseño propuesto para Boya	44
4.1	Hardware	44
4.2	Comunicación	45
4.3	Simulaciones	47
5	Diseño propuesto para ROV	75
5.1	Hardware	75
5.2	Comunicación	77
5.3	Simulación	78

5.4	Interfaz	86
5.5	Prototipo físico	88
6	Validación y Verificación	91
6.1	Resultados	91
6.1.1	Sistema Inalámbrico (Boya) - Evaluación en Entorno Real	91
6.1.2	Sistema Cableado (ROV)	93
6.2	Validación	94
6.3	Verificación	95
6.4	Análisis Crítico y Evaluación de Riesgos	95
7	Conclusiones	97
Anexo A	Código Fuente del Microcontrolador	99

Índice de figuras

2.1	Sondas EXO	8
2.2	Data Buoy 4700	9
2.3	ROVs Blue Robotics	9
2.4	ROVs Deep Trekker	10
2.5	Comparación de Alcance entre Tecnologías Inalámbricas.	14
2.6	Comparación de Velocidad de Datos entre Tecnologías Inalámbricas.	15
2.7	Comparación de Consumo de Energía entre Tecnologías Inalámbricas.	16
2.8	Comparación de Latencia entre Tecnologías Inalámbricas.	17
2.9	Ancho de banda entre diferentes tecnologías alámbricas.	18
2.10	Velocidad de datos entre diferentes tecnologías alámbricas.	19
2.11	Frecuencia de operación entre diferentes tecnologías alámbricas.	20
2.12	Distancia máxima soportada entre diferentes tecnologías alámbricas.	21
2.13	Comparación de consumo energético entre algoritmos de cifrado en tecnologías inalámbricas.	23
2.14	Comparación de complejidad computacional entre algoritmos de cifrado en tecnologías inalámbricas.	24
2.15	Comparación de latencia entre algoritmos de cifrado en tecnologías inalámbricas.	25

2.16 Comparación de nivel de seguridad entre algoritmos de cifrado en tecnologías inalámbricas.	26
2.17 Comparación de latencia entre protocolos de comunicación alámbrica. . .	27
2.18 Comparación de consumo energético entre protocolos de comunicación alámbrica.	28
2.19 Comparación de nivel de seguridad entre protocolos de comunicación alámbrica.	29
2.20 Comparación del overhead de transmisión entre protocolos de comunicación alámbrica.	30
3.1 Arquitectura del sistema	32
3.2 Esquema General del Sistema.	34
3.3 Esquema eléctrico	40
4.1 Diagrama de Comunicación Inalámbrica para boya	46
4.2 Imagen satelital desde google maps sobre Salmonera Antarfood, Chonchi, Los Lagos	47
4.3 Tipología Salmonera Antarfood para boya	48
4.4 Comunicación vía Wifi entre 8 boyas y 1 centro de control	49
4.5 Red NetSim para 1 boya	51
4.6 Link Throughput vs Time – Tabla 8 nodos y 1 punto de acceso	52
4.7 Link Throughput vs Time - Conexión hacia 8 nados y punto de acceso . .	53
4.8 Generation Rate vs Time – Conexión hacia 8 nados y punto de acceso . .	54
4.9 Generation Rate vs Time - Tabla 8 nodos y 1 punto de acceso	55
4.10 Vista de un nodo	56
4.11 Vista de los ocho nodos a utilizar	56

4.12	Distribución 8 Boyas en 8 piscinas	57
4.13	Imagen desde google maps sobre Cancha ubicada en Universidad Técnica Federico Santa María	58
4.14	Vista lateral de Medición en Cancha UTFSM	58
4.15	Distribución de boyas con Routter en situado extremo	59
4.16	Distribución de boyas con Routter situado en medio	59
4.17	Métricas Temperatura	60
4.18	Métricas RSSI	61
4.19	Métricas Uptime	62
4.20	Imagen desde Google Maps en Sector Feria Achupallas, Viña del Mar . .	65
4.21	Vista lateral de Medición en sector Achupallas	66
4.22	Métricas Temperatura	68
4.23	Métricas RSSI	69
4.24	Métricas Uptime	71
5.1	Diagrama de Comunicación Sistema ROV	77
5.2	Diagrama de Comunicación Cisco Packet Tracer para ROV	79
5.3	Envío de paquete de datos en Cisco Packet Tracer	79
5.4	Red NetSim para comunicación ROV	81
5.5	Link Throughput vs Time	82
5.6	Link Throughput vs Time	82
5.7	Occupied Buffer Size vs Time	83
5.8	Occupied Buffer Size vs Time	84
5.9	Generation Rate vs Time – Tabla - Entre el nodo y centro de control . . .	85

5.10	Generation Rate vs Time	86
5.11	Dashboard - Vista Principal	87
5.12	Vista de Histórico de Datos	87
5.13	Nodo submarino para monitoreo que se conecta directamente al ROV. . .	88
5.14	Cable conexión Ethernet + fuente de energía	89
5.15	Sistema recolectando data	90
5.16	Datos en ThingSpeak	90

Índice de cuadros

2.1	Comparación de alternativas de monitoreo en acuicultura	12
3.1	Datos límites entre 3 y 11 metros de profundidad. Cortesía de Caleta Bay.	39
4.1	Comparación del rendimiento según número de boyas transmitiendo paquetes ICMP	49
6.1	Comparación entre tecnología Wi-Fi y Ethernet	93
6.2	Verificación de requisitos	95

Capítulo 1

Introducción

1.1 Contexto

La acuicultura es uno de los sectores productivos más relevantes de Chile, ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas, consolidándose como un pilar de la economía en nuestro país. En el año 2021, la producción alcanzó los 3.4 millones de toneladas de pescados, mientras que en 2022 las exportaciones generaron ingresos por alrededor de 8500 millones de dólares, según cifras de la FAO [1]. Este crecimiento en el desarrollo plantea la necesidad de implementar prácticas que, además de garantizar la sostenibilidad del sector, también puedan asegurar la salud y el bienestar de las especies acuáticas.

La calidad del agua es un factor crítico en este contexto, ya que influye directamente en procesos metabólicos esenciales como la digestión, la excreción y el crecimiento [2]. Además, mantener parámetros óptimos como el oxígeno disuelto, el pH, la temperatura o cualquier otro que sea de carácter influyente, requiere de una supervisión que sea constante y precisa [3].

Así mismo, las fluctuaciones en la calidad del agua pueden desencadenar efectos adversos, desde el estrés en los peces hasta la proliferación de enfermedades o pérdidas significativas en la producción [4]. Es por esto que la capacidad de monitorear y responder rápidamente a estos cambios es esencial para garantizar la productividad y sostenibilidad de las operacio-

nes acuícolas. Este trabajo aborda uno de los mayores desafíos de la industria: garantizar una monitorización oportuna y precisa en entornos remotos, donde las condiciones del agua pueden variar rápidamente y poner en riesgo la producción.

En este escenario, las tecnologías de comunicación juegan un papel fundamental al permitir la transmisión de datos en tiempo real desde sensores instalados en sistemas acuáticos hacia plataformas centralizadas de análisis [5]. La implementación de tecnologías avanzadas no solo facilita un monitoreo continuo de un sistema completo, sino que también asegura que la información recopilada llegue de forma confiable para apoyar la toma de decisiones informadas. Esta solución representa un avance significativo en la gestión eficiente y sostenible de los recursos acuáticos, posicionando a la acuicultura chilena como un próximo referente global en innovación tecnológica y sostenibilidad [6].

1.2 Problema por resolver

En la actualidad, los sistemas de inspección y monitoreo de las jaulas de cultivo enfrentan limitaciones significativas, tanto en las tecnologías disponibles como en las capacidades de comunicación. La calidad del agua llega a ser un factor crucial para la salud de los peces, requiriendo un monitoreo constante y detallado, aunque las soluciones actuales presentan deficiencias notables que son de gran impacto en la eficiencia y la sostenibilidad de las operaciones.

Este proyecto abarca dos hitos principales, un sistema de monitoreo estático basado en una boya y un sistema móvil acoplado a un vehículo remotamente operado (ROV). La boya estática es capaz de registrar datos de manera constante tiende a almacenar la información de manera local, lo que dificulta el acceso en tiempo real a la información y, además, requiere procesos adicionales para la recopilación y análisis de datos. Por otro lado, el sistema móvil asociado a un ROV tiene el potencial de realizar inspecciones dinámicas y detalladas, aunque en la actualidad no existe una solución efectiva que permita la transmisión en tiempo real de los datos recopilados desde el entorno subacuático.

La inspección manual y la supervisión visual mediante operadores humanos se tornan cada vez más inviables, tanto por el nivel de subjetividad que implican como por la dificultad logística de mantener personal operativo en condiciones remotas durante extensos periodos. Además, las inspecciones subacuáticas realizadas con ROVs dependen actualmente de la pericia del teleoperador, careciendo de mecanismos sistemáticos de validación de datos ambientales en tiempo real. La información recolectada suele ser fragmentada, no estandarizada y difícil de integrar con otros sistemas de monitoreo.

A esto se suma la desconexión funcional entre plataformas estáticas y móviles. Si bien las boyas permiten monitoreo continuo en puntos fijos, no se comunican de forma efectiva con dispositivos móviles como los ROVs, generando silos de información que impiden una visión integral del entorno subacuático. Esta falta de interoperabilidad reduce la capacidad de generar mapas ambientales unificados y dificulta la reacción temprana ante eventos críticos.

Por tanto, se evidencia una necesidad urgente de contar con mecanismos que permitan integrar, unificar y actualizar constantemente los datos provenientes de diversas plataformas, especialmente en entornos donde las condiciones del agua pueden cambiar rápidamente. Sin una visión holística y sin herramientas que respalden la toma de decisiones basadas en datos actualizados, las prácticas acuícolas quedan expuestas a riesgos sanitarios, productivos y regulatorios de gran impacto.

1.3 Acercamiento de la solución

Se ha identificado una brecha en las soluciones actuales sobre el monitoreo del ambiente acuático, particularmente en la implementación de las tecnologías de transmisión de datos tanto en dispositivos estáticos como móviles. La solución propuesta aborda esta diferencia en dos fases diferenciadas: en primer lugar el desarrollo de un sistema inalámbricos para

sistemas de superficie y, en segundo lugar la implementación de una red cableada en sistemas motorizados y subacuáticos.

En un primer periodo, se trabajó en un sistema de boya con la integración de una red inalámbrica, que está diseñada para recopilar y transmitir datos en tiempo real desde los sensores que monitorean los parámetros. La elección de una red que sea inalámbrica permite una flexibilidad en la instalación y operación de la boya, facilitando la conectividad en superficie sin la necesidad de cables que podrían limitar su despliegue en entornos acuáticos. Utilizar tecnologías como Wi-Fi o LoRa fueron consideradas para optimizar el alcance, la eficiencia energética y la estabilidad de la transmisión en condiciones variables.

En la segunda fase del proyecto, el enfoque se trasladó al desarrollo de un sistema de comunicación para el ROV. Dado que este opera en un entorno subacuático donde las señales inalámbricas se ven significativamente afectadas por la atenuación, se optó por una red cableada para garantizar una transmisión confiable y de alta velocidad. Este enlace vía Ethernet permite una transferencia continua de datos recopilados por los sensores integrados en una cápsula que irá colocada en un robot submarino, asegurando una comunicación estable incluso durante operaciones prolongadas o de estilo dinámica. Además, esta configuración puede facilitar el manejo de grandes volúmenes de datos, como los generados por cámaras, sensores de alta precisión o cualquier otra integración que requiera un alto manejo de datos.

En ambas fases, el diseño se centró en la optimización, la eficiencia y la confiabilidad de la transmisión de los datos, adaptándose a las difíciles condiciones de cada sistema a integrar. Aunque estas fases se hayan realizado de manera secuencial, cada uno de los sistemas están concebidos para ofrecer capacidades robustas de monitoreo en tiempo real, ya sea desde un punto fijo, en movimiento o submarino.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema de monitoreo de calidad del agua en entornos acuícolas, utilizando una boya estática y un robot subacuático para la recolección de datos en tiempo real.

1.4.2 Objetivos Específicos

1. **Comunicación eficiente:** Diseñar y desarrollar un sistema de comunicación que permita la transmisión de datos desde una boya y un ROV hacia una estación base, utilizando tecnologías inalámbricas (Wi-Fi) y cableadas (Ethernet).
2. **Evaluación de rendimiento:** Realizar simulaciones y pruebas experimentales para analizar la latencia, la tasa de éxito y los tiempos de procesamiento en las transmisiones de datos bajo diferentes condiciones de red.
3. **Análisis comparativo:** Comparar el desempeño de tecnologías de comunicación, destacando las ventajas y limitaciones de Wi-Fi y Ethernet en términos de alcance, estabilidad y seguridad.

1.5 Estructura general del documento

Este documento está dividido en ocho capítulos:

Capítulo 1: Introducción al contexto del monitoreo ambiental en acuicultura, definición del problema, propuesta de solución y objetivos del proyecto.

Capítulo 2: Estudio del estado del arte, incluyendo soluciones existentes, tecnologías de comunicación y seguridad en ambientes acuáticos.

Capítulo 3: Presentación de la arquitectura propuesta del sistema, describiendo las capas físicas, de adquisición de datos, comunicación, almacenamiento y visualización.

Capítulo 4: Diseño detallado de los prototipos de la boya

Capítulo 5: Exposición de los resultados obtenidos a partir de las pruebas de comunicación y desempeño en diferentes escenarios.

Capítulo 6: Validación y verificación del sistema, análisis crítico de los resultados y evaluación de riesgos.

Capítulo 7: Conclusiones generales del proyecto y propuestas para trabajos futuros.

Capítulo 2

Estado del Arte

2.1 Soluciones existentes en la industria

El monitoreo de calidad del agua en acuicultura ha avanzado considerablemente, impulsado por la necesidad de controlar variables críticas como temperatura, pH, oxígeno disuelto y salinidad, esenciales para la salud de las especies cultivadas y la eficiencia del sistema [7, 8].

Las principales tecnologías de monitoreo utilizadas actualmente son:

- **Sensores fijos**, que recolectan datos de forma continua desde jaulas acuícolas mediante redes cableadas o inalámbricas [9].
- **Boyas oceanográficas**, equipadas con sensores y comunicación inalámbrica (Wi-Fi, LoRa), útiles para monitoreo a gran escala, aunque sensibles a condiciones climáticas [10].
- **ROVs**, que permiten inspecciones móviles en tiempo real, pero enfrentan desafíos en la transmisión de datos debido a la atenuación de señales bajo el agua [11].

A pesar de sus beneficios, estas tecnologías presentan limitaciones, especialmente en la integración de datos y la estabilidad de las comunicaciones subacuáticas. Las tecnologías inalámbricas convencionales, como Wi-Fi y radiofrecuencia, presentan baja penetración en

el agua [12], mientras que las soluciones cableadas como Ethernet ofrecen alta velocidad pero menor flexibilidad [13]. La tecnología acústica, aunque útil para largas distancias, sufre alta latencia [14].

Empresas como YSI (parte de Xylem Inc.) ofrecen boyas de monitoreo como la serie EXO, capaces de medir múltiples parámetros ambientales como pH, oxígeno disuelto, turbidez y temperatura en tiempo real, utilizando tecnologías de comunicación como Wi-Fi, radiofrecuencia o redes celulares [15].

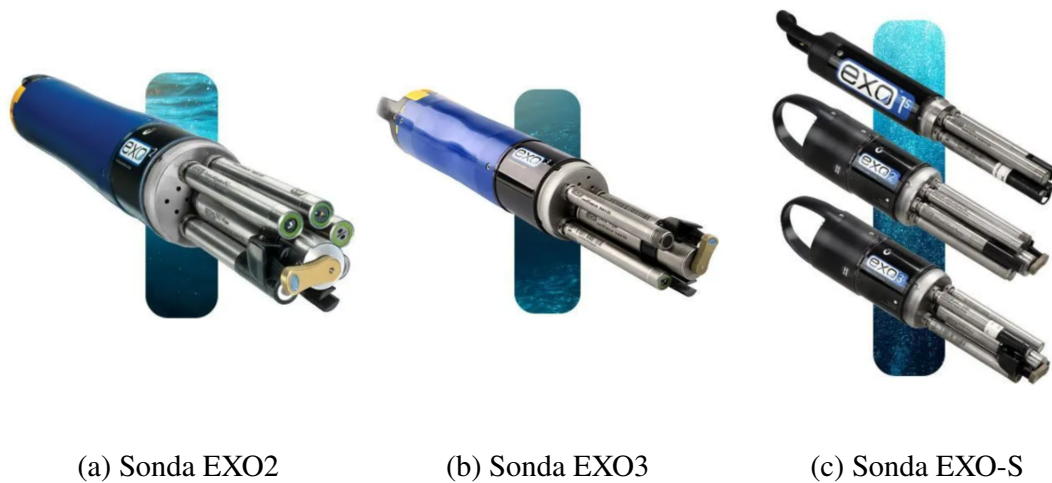


Figura 2.1: Sondas EXO

Otra alternativa destacada es Aanderaa, que ofrece sistemas como la Data Buoy 4700, diseñada para entornos marinos exigentes, con capacidades de transmisión de datos a larga distancia mediante satélite o GPRS, y una alta resistencia a condiciones ambientales adversas [16].



(a) Boya Data Buoy 4700



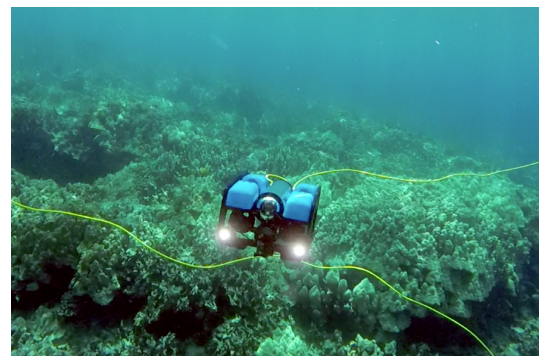
(b) Escenario real Data Buoy DB 4700

Figura 2.2: Data Buoy 4700

En cuanto a monitoreo subacuático, los ROVs han ganado protagonismo como solución versátil. Empresas como Blue Robotics comercializan plataformas como el BlueROV2, un vehículo operado remotamente de bajo costo, ideal para tareas de inspección y monitoreo en acuicultura y estudios ambientales [17]. Estos ROVs permiten la integración de sensores especializados para medición de parámetros ambientales bajo el agua.



(a) BlueROV2



(b) BlueROV2 en el mar

Figura 2.3: ROVs Blue Robotics

Adicionalmente, empresas como Deep Trekker ofrecen ROVs compactos diseñados para el monitoreo ambiental, con capacidades de operación sumergida prolongada y comunicaciones mediante umbilicales de fibra óptica o Ethernet, asegurando alta calidad de transmisión de datos incluso en aguas turbias [18].

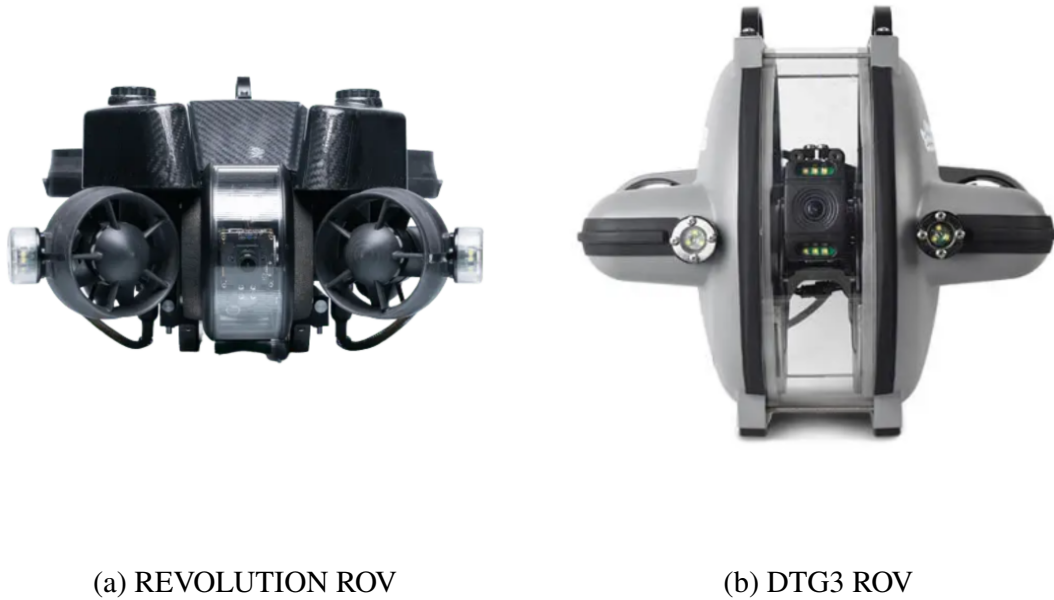


Figura 2.4: ROVs Deep Trekker

Como alternativa, diversos trabajos han propuesto arquitecturas híbridas que combinan diferentes tecnologías de comunicación para optimizar la transmisión de datos en entornos acuáticos. En particular, se han desarrollado sistemas que emplean medios cableados, como Ethernet o fibra óptica, para la transmisión subacuática, mientras utilizan Wi-Fi o redes celulares en superficie para la retransmisión de datos [13, 12].

Siguiendo esta tendencia, este trabajo propone una solución que emplea Wi-Fi en superficie y Ethernet para la transmisión subacuática, garantizando robustez, eficiencia y baja latencia en la comunicación.

Además, el desarrollo de sistemas basados en **IoT y aprendizaje automático** permite anticipar eventos críticos y optimizar la gestión en tiempo real [19]. El avance en sensores más

precisos y resistentes refuerza esta tendencia, promoviendo un monitoreo acuícola más confiable y sostenible.

Estas alternativas comerciales demuestran la creciente importancia del monitoreo ambiental acuático y ofrecen bases de comparación para el desarrollo de soluciones adaptadas a las necesidades específicas de la industria acuícola y la conservación de recursos hídricos.

El monitoreo de parámetros ambientales en la superficie de cuerpos de agua se realiza comúnmente mediante boyas multiparamétricas. Estas plataformas flotantes están equipadas con sensores que miden variables como temperatura, oxígeno disuelto, salinidad, turbidez y pH, enviando datos en tiempo real mediante tecnologías inalámbricas como Wi-Fi, LoRa o redes celulares [20].

El uso de boyas permite una supervisión continua de las condiciones superficiales, facilitando la toma de decisiones en acuicultura, gestión de embalses y conservación de ecosistemas acuáticos. Además, la integración de energía solar en estos dispositivos mejora su autonomía y reduce la necesidad de mantenimiento frecuente.

Avances recientes han permitido incorporar comunicaciones de largo alcance (LPWAN) y técnicas de almacenamiento descentralizado de datos para aumentar la resiliencia de los sistemas frente a fallas de red.

2.2 Alternativas del mercado

El monitoreo de la calidad del agua en acuicultura ha impulsado el desarrollo de diversas soluciones tecnológicas en el mercado. Actualmente, existen múltiples alternativas diseñadas para la recolección, transmisión y análisis de datos en tiempo real. Sin embargo, cada una de estas soluciones presenta ventajas y limitaciones en términos de precisión, conectividad y escalabilidad. A continuación, se analizan las principales alternativas disponibles en el mercado para la supervisión de la calidad del agua en sistemas acuícolas.

Cuadro 2.1: Comparación de alternativas de monitoreo en acuicultura

Ref	[10]	[9]	[11]	[19]	[21]	[22]
Monitoreo Continuo	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí
Alcance	Local	Local	Movilidad limitada	Global	Regional	Amplio
Movilidad	No	No	Alta	No	Limitada	Alta
Transmisión en tiempo real	Sí	Sí	Limitado	No	Sí	Limitado
Tecnología de comunicación	Wi-Fi, LoRa, 4G	Cableado Wi-Fi	Cableado	Satelital	LoRa Sigfox	Acústica Óptica
Costo	Medio-Alto	Medio	Alto	Muy Alto	Bajo-Medio	Muy Alto
Mantenimiento	Medio	Alto	Alto	Bajo	Bajo Bajo-Medio	Alto

Para asegurar el funcionamiento eficaz del sistema de monitoreo de calidad del agua, se realizó una revisión y selección detallada de las tecnologías de comunicación involucradas. Esta sección aborda los aspectos clave relacionados con la transmisión inalámbrica, la conexión alámbrica y las estrategias de seguridad implementadas.

2.2.1 Alternativas de mercado en tecnologías de comunicación acuática

El desafío de la transmisión de datos en ambientes acuáticos ha impulsado el desarrollo de diversas tecnologías de comunicación, tanto para medios superficiales como subacuáticos.

En monitoreo superficial, tecnologías como LoRaWAN y LTE-M han sido implementadas para transmitir datos desde boyas de monitoreo a estaciones base ubicadas en tierra. Proyectos como SmartBuoy, desarrollado por Cefas (Reino Unido), utilizan comunicaciones GSM/GPRS y satelitales para transmitir en tiempo real parámetros como salinidad, temperatura y oleaje [23].

En el ámbito subacuático, la comunicación acústica representa la principal solución. El WHOI Micro-Modem, desarrollado por Woods Hole Oceanographic Institution, se ha establecido como un estándar en comunicaciones acústicas de alta fiabilidad para redes de sensores submarinos y vehículos autónomos [13].

Además, alternativas híbridas, como las propuestas en el proyecto SUNRISE (EU Horizon 2020), combinan comunicaciones acústicas subacuáticas con Wi-Fi y 4G en superficie, optimizando la cobertura y la velocidad de transmisión en redes submarinas extendidas [24].

Más recientemente, tecnologías ópticas de comunicación subacuática (Underwater Optical Wireless Communications, UOWC) han comenzado a emerger como alternativas para transmisiones de alta velocidad en distancias cortas, aunque aún limitadas por la atenuación del agua y las condiciones de turbidez [25].

Estas alternativas ofrecen una perspectiva amplia sobre las tecnologías de comunicación disponibles y emergentes para operaciones de monitoreo ambiental en ambientes acuáticos.

La elección de cada tecnología se basó en criterios como consumo energético, velocidad de transmisión, cobertura, latencia y compatibilidad con sistemas embebidos. Asimismo, se consideraron distintos protocolos de seguridad para garantizar la integridad y confidencialidad de los datos transmitidos, tanto en la superficie como en ambientes subacuáticos.

A continuación, se detallan las decisiones técnicas tomadas, junto con sus fundamentos y proyecciones futuras.

2.2.2 Tecnología inalámbrica

La comunicación inalámbrica permite la transmisión de datos entre dispositivos sin cables, siendo fundamental en sistemas IoT por su flexibilidad, movilidad y escalabilidad [26]. Este módulo es esencial para el monitoreo remoto en tiempo real, especialmente en ambientes acuáticos de difícil acceso [27].

Se realizó un análisis comparativo de métricas clave basadas en datos técnicos de la literatura (alcance, velocidad de datos, consumo energético y latencia). Estos datos fueron procesados mediante la librería Pandas y visualizados mediante gráficos de barras, los cuales fueron generados utilizando la librería Matplotlib en Python. Esta metodología permitió obtener las representaciones gráficas que se presentan a continuación, facilitando la toma de decisiones basada en un análisis cuantitativo de rendimiento y eficiencia.

Se evaluaron distintas tecnologías inalámbricas relevantes para IoT: Wi-Fi, LoRa, Bluetooth, Zigbee, Sigfox y Z-Wave. Cada una fue comparada en función de alcance, velocidad de datos, consumo energético, latencia y capacidad de conexión simultánea [28, 29, 30, 31].

Sigfox ofrece el mayor alcance entre las tecnologías de comunicación analizadas, llegando hasta 50.000 metros, lo que lo convierte en una opción ideal para aplicaciones que requieren cobertura en áreas extensas [32]. LoRa proporciona también un alcance significativo, aunque menor en comparación con Sigfox. En contraste, Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee y Z-Wave tienen alcances más limitados, adecuados para redes locales o domésticas [30, 29].

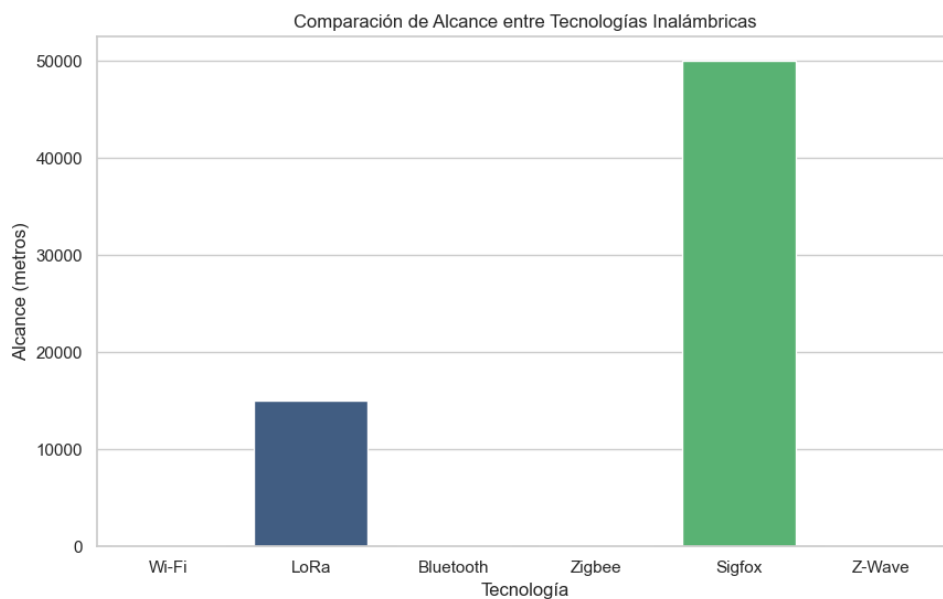


Figura 2.5: Comparación de Alcance entre Tecnologías Inalámbricas.

Wi-Fi proporciona la mayor velocidad de transmisión de datos, siendo ideal para aplicaciones que requieren flujo rápido de información, como el streaming de video o la navegación web. Bluetooth ofrece una velocidad moderada, adecuada para transferencia de archivos y conexión de periféricos. En cambio, LoRa, Zigbee, Sigfox y Z-Wave presentan velocidades más bajas, enfocadas principalmente a la transmisión de datos pequeños en aplicaciones IoT.

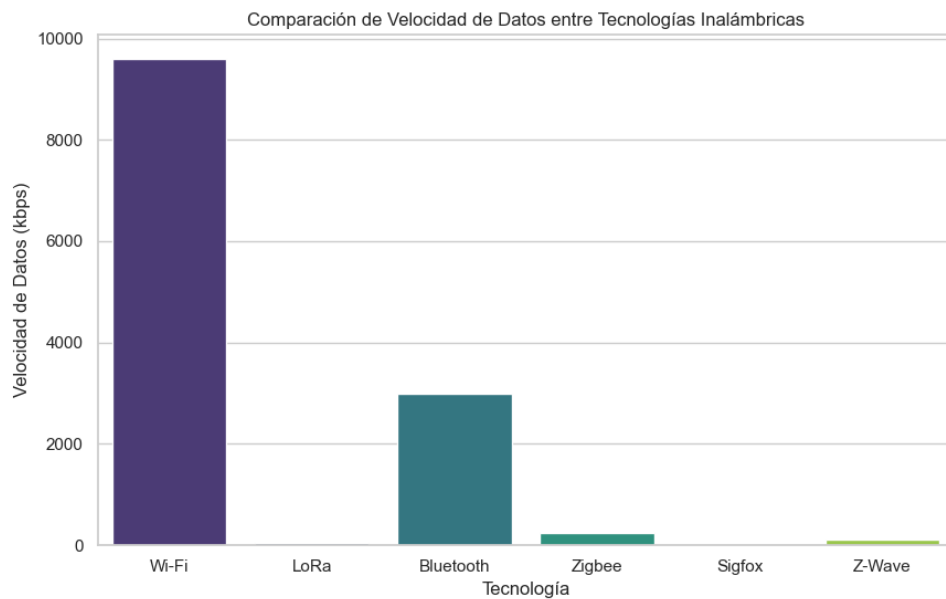


Figura 2.6: Comparación de Velocidad de Datos entre Tecnologías Inalámbricas.

Respecto al consumo de energía, Wi-Fi registra el mayor consumo, lo cual puede representar una limitante en dispositivos alimentados por baterías. Por otro lado, tecnologías como LoRa y Z-Wave muestran consumos significativamente más bajos, siendo preferidas en aplicaciones que requieren bajo consumo energético para maximizar la duración de la batería. Bluetooth, Zigbee y Sigfox también exhiben un consumo de energía relativamente bajo.

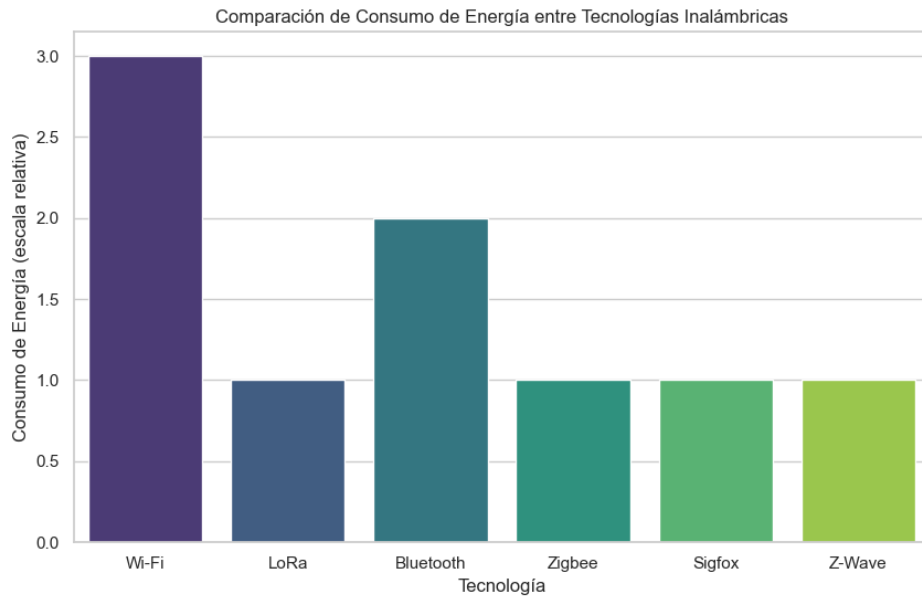


Figura 2.7: Comparación de Consumo de Energía entre Tecnologías Inalámbricas.

En términos de latencia, Wi-Fi presenta el desempeño más favorable, haciéndolo ideal para aplicaciones que requieren comunicaciones rápidas y en tiempo real. Por su parte, LoRa y Sigfox presentan latencias más altas, lo cual puede ser una limitante en escenarios que demandan respuesta inmediata. Bluetooth, Zigbee y Z-Wave manejan latencias moderadas, adecuadas para la mayoría de las aplicaciones domésticas e industriales.

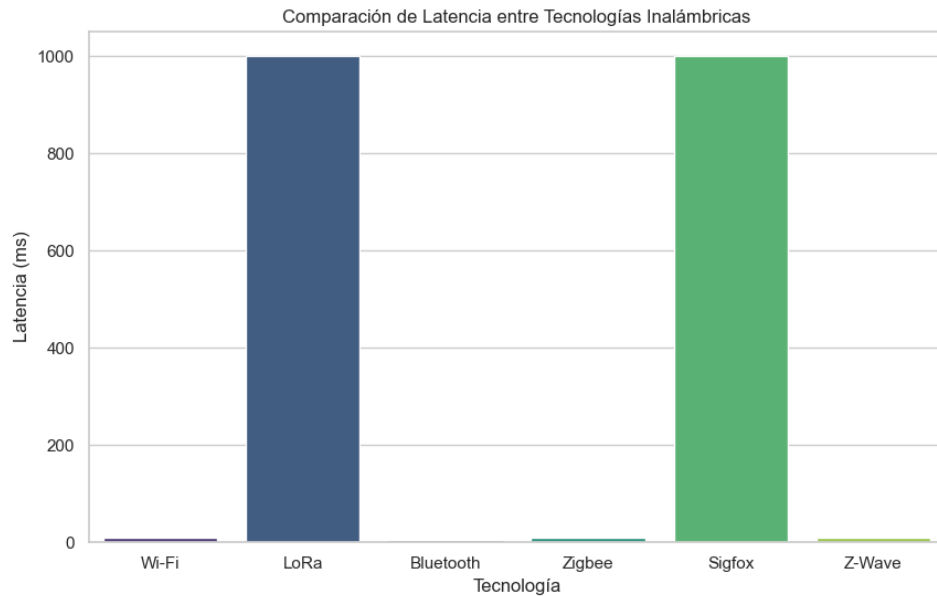


Figura 2.8: Comparación de Latencia entre Tecnologías Inalámbricas.

Wi-Fi destaca por su alta velocidad y baja latencia, pero con alto consumo energético [33]. **LoRa** ofrece excelente cobertura y eficiencia energética, ideal para entornos extensos [28]. **Bluetooth** y **Zigbee** son útiles para distancias cortas y bajo consumo [29]. **Sigfox** proporciona cobertura masiva, aunque con baja velocidad de datos [32]. **Z-Wave**, aunque limitada, es eficiente para automatización local [34].

Para el prototipo se utilizó **Wi-Fi**, dada su facilidad de integración, infraestructura disponible y velocidad de implementación, lo que facilitó el desarrollo y validación inicial del sistema. No obstante, **LoRa** se proyecta como la mejor opción a largo plazo, especialmente para entornos remotos con restricciones energéticas, debido a su bajo consumo y gran alcance.

Esta elección representa un equilibrio entre las necesidades actuales del proyecto y su escalabilidad futura, optimizando recursos sin comprometer la calidad del monitoreo.

2.2.3 Conexión Ethernet

La transmisión de datos subacuática se abordó mediante tecnologías alámbricas, evaluando distintas categorías de cables Ethernet: Cat5e, Cat6, Cat6a, Cat7 y Cat8, junto con fibra óptica como alternativa. Se analizaron aspectos como ancho de banda, frecuencia de operación, distancia máxima y compatibilidad con alimentación eléctrica (PoE) [35, 36]. Para el procesamiento de esta información se utilizó la librería Pandas en Python, y la visualización de los resultados (Figura 2.9 a Figura 2.12) fue realizada con la librería Matplotlib en Python, lo que permitió una decisión fundamentada en el desempeño técnico requerido para el entorno subacuático.

La fibra óptica ofrece el mayor ancho de banda entre las tecnologías analizadas, alcanzando 100.000 Mbps, superando ampliamente a los cables Ethernet de categoría Cat8, que logran hasta 40.000 Mbps [37]. Las categorías Cat5e, Cat6 y Cat6A presentan anchos de banda considerablemente menores, con Cat5e y Cat6 limitadas a 1.000 Mbps y Cat7 a 10.000 Mbps [38, 39].

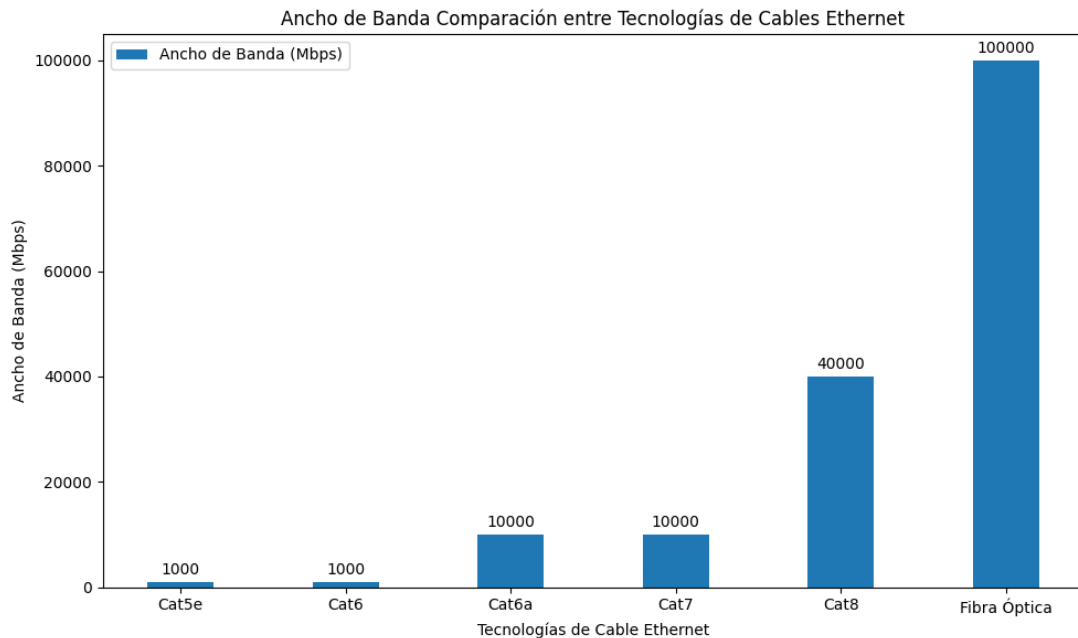


Figura 2.9: Ancho de banda entre diferentes tecnologías alámbricas.

La fibra óptica también lidera en términos de velocidad de transmisión, alcanzando hasta 100 Gbps. Le sigue la categoría Cat8 con 25 Gbps, mientras que Cat6A y Cat7 alcanzan velocidades de 10 Gbps. Las categorías Cat5e y Cat6 están limitadas a 1 Gbps [39, 40].

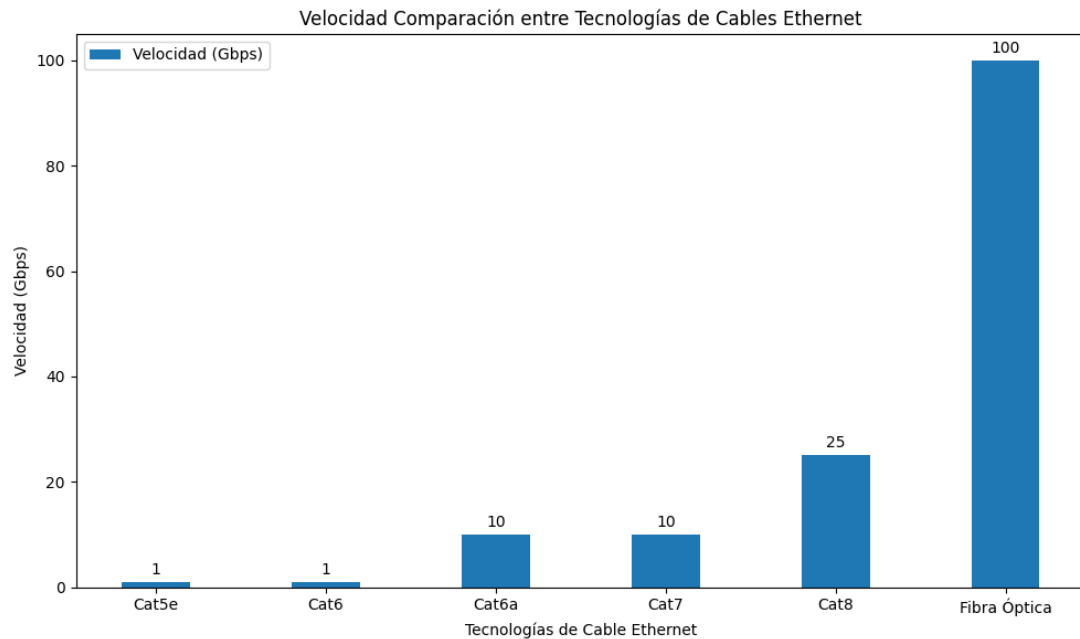


Figura 2.10: Velocidad de datos entre diferentes tecnologías alámbricas.

En términos de frecuencia de operación, la categoría Cat8 destaca al alcanzar los 2000 MHz, permitiendo velocidades superiores en distancias más cortas. Le siguen Cat7 con 600 MHz, Cat6A con 500 MHz y Cat6 con 250 MHz. Cat5e tiene la frecuencia más baja con 100 MHz [38].

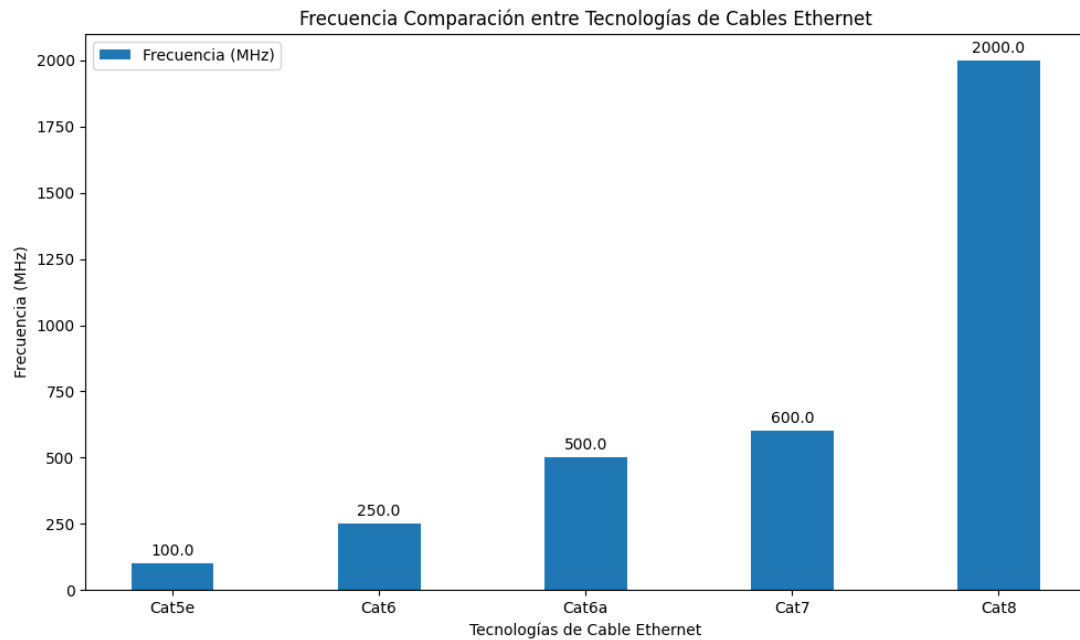


Figura 2.11: Frecuencia de operación entre diferentes tecnologías alámbricas.

En cuanto a la distancia máxima soportada, la fibra óptica vuelve a destacar significativamente, permitiendo enlaces de hasta 100.000 metros, posicionándola como la tecnología ideal para aplicaciones de larga distancia. Los cables Ethernet, excepto Cat8, permiten hasta 100 metros de enlace, mientras que Cat8 está limitado a 30 metros. Esto confirma que, aunque los cables Ethernet son adecuados para redes locales, la fibra óptica es indispensable para enlaces que requieren alta fidelidad de señal en grandes distancias.

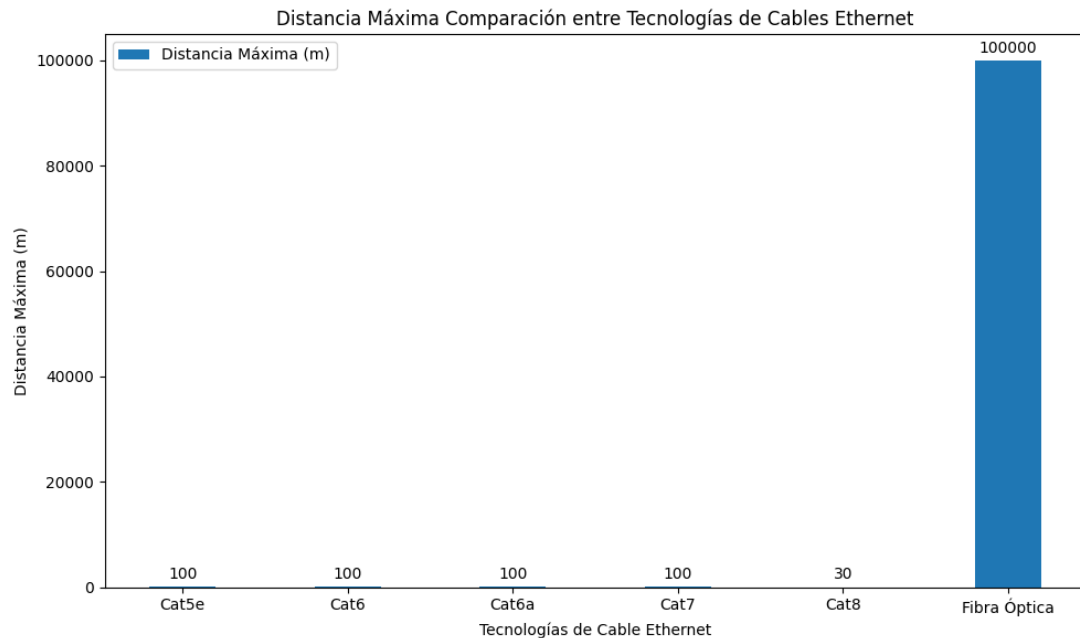


Figura 2.12: Distancia máxima soportada entre diferentes tecnologías alámbricas.

Cat6a y Cat7 se identificaron como las opciones óptimas, ya que permiten transmitir hasta 10 Gbps a 100 metros con buena inmunidad a interferencias. Algunas versiones industriales también incluyen conductores de alimentación, facilitando el uso en entornos donde es necesario transmitir datos y energía simultáneamente.

Para la fase de prototipado se utilizó **Cat5e** por su disponibilidad y simplicidad, ofreciendo 1 Gbps a 100 metros, suficiente para la validación inicial del diseño. Sin embargo, se recomienda migrar a **Cat6a o Cat7** en futuras iteraciones, para lograr un sistema más robusto, estable y preparado para escalamiento en ambientes reales.

2.2.4 Seguridad

La seguridad en la transmisión de datos es un aspecto crítico, particularmente en sistemas distribuidos y entornos remotos. Se evaluaron diversos algoritmos y protocolos para comunicaciones inalámbricas y alámbricas, considerando factores como eficiencia energética, latencia, complejidad de implementación, resistencia a interferencias y nivel de cifrado

[41, 42]. Los datos comparativos fueron procesados con la librería *Pandas* en *Python* y representados gráficamente (Figura 2.13 a Figura 2.20) utilizando la librería *Matplotlib* en *Python*. Esta metodología aseguró una selección de seguridad que equilibra la alta protección de datos con la eficiencia de recursos de los dispositivos embebidos.

Para un correcto análisis de la complejidad, los algoritmos y protocolos evaluados se definen de la siguiente manera:

- **AES-128** (Advanced Encryption Standard): Algoritmo de cifrado **simétrico** rápido y eficiente en recursos, ideal para dispositivos **IoT**.
- **ECC** (Elliptic Curve Cryptography): Cifrado de **clave pública** que ofrece alta seguridad con claves cortas, resultando en una **complejidad computacional moderada**.
- **RSA** (Rivest-Shamir-Adleman): Cifrado de **clave pública** que requiere claves muy largas, lo que implica **alta complejidad computacional** y consumo energético, siendo menos viable en IoT.
- **TLS** (Transport Layer Security): **Protocolo** que asegura la comunicación en red. Implica varias etapas de negociación intensivas en clave pública, resultando en **mayores requerimientos de procesamiento**.

El análisis de consumo energético muestra que el protocolo AES-128 es el más eficiente entre los algoritmos evaluados, presentando el menor consumo de energía [43, 44]. Esta característica es crucial para sistemas de monitoreo inalámbrico en acuicultura, donde la autonomía de los dispositivos es un factor determinante. ECC también ofrece un desempeño energético aceptable, aunque ligeramente superior al de AES-128, mientras que RSA y TLS tienen consumos significativamente mayores, lo que podría afectar la duración de la batería en ambientes de difícil acceso [42].

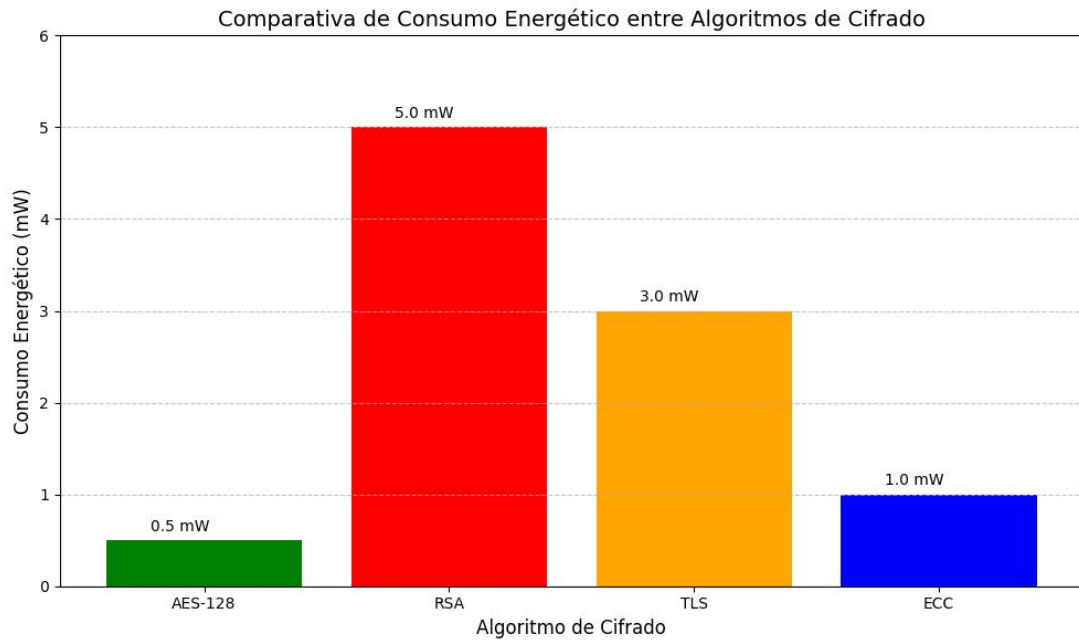


Figura 2.13: Comparación de consumo energético entre algoritmos de cifrado en tecnologías inalámbricas.

La evaluación de la complejidad computacional evidencia que AES-128 requiere menos recursos de procesamiento en comparación con ECC, RSA y TLS, posicionándolo como la opción más adecuada para dispositivos de capacidad limitada [45]. ECC presenta una complejidad moderada, mientras que RSA y TLS, debido a su arquitectura y necesidad de operaciones matemáticas intensivas, presentan mayores requerimientos de procesamiento, impactando negativamente en sistemas donde los recursos de hardware son restringidos.

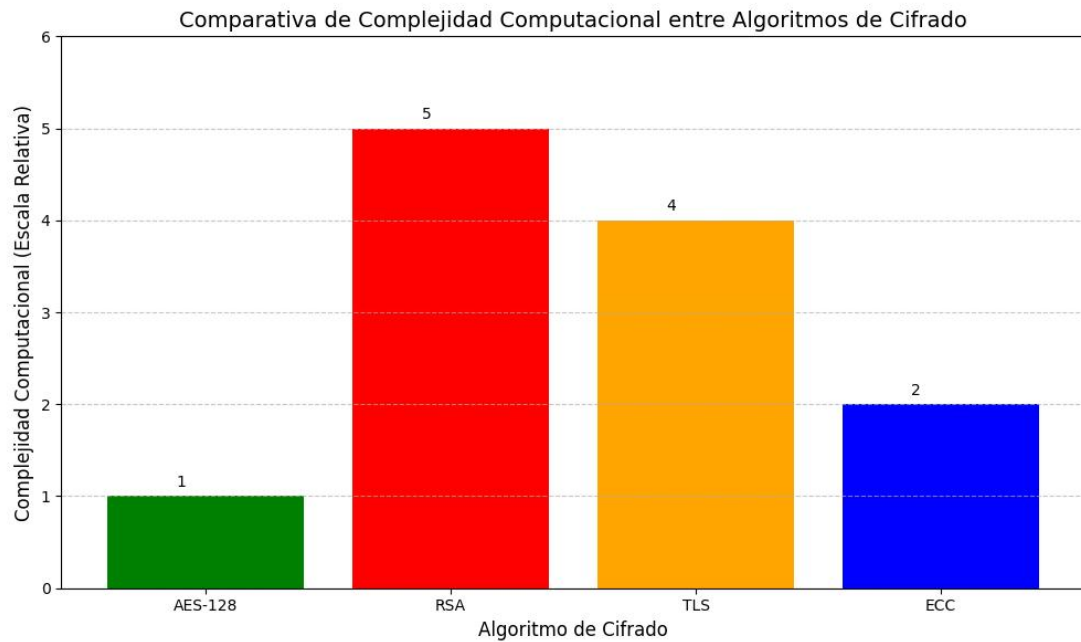


Figura 2.14: Comparación de complejidad computacional entre algoritmos de cifrado en tecnologías inalámbricas.

En términos de latencia, AES-128 vuelve a posicionarse como el protocolo más eficiente, ofreciendo el menor tiempo de cifrado y descifrado entre las alternativas evaluadas [46]. Esto resulta fundamental en aplicaciones donde la transmisión de datos en tiempo real es crítica para la toma de decisiones, como en el monitoreo de parámetros acuícolas. ECC mantiene una latencia razonablemente baja, mientras que RSA y TLS exhiben tiempos de respuesta considerablemente mayores, lo que podría comprometer el desempeño en ambientes dinámicos.

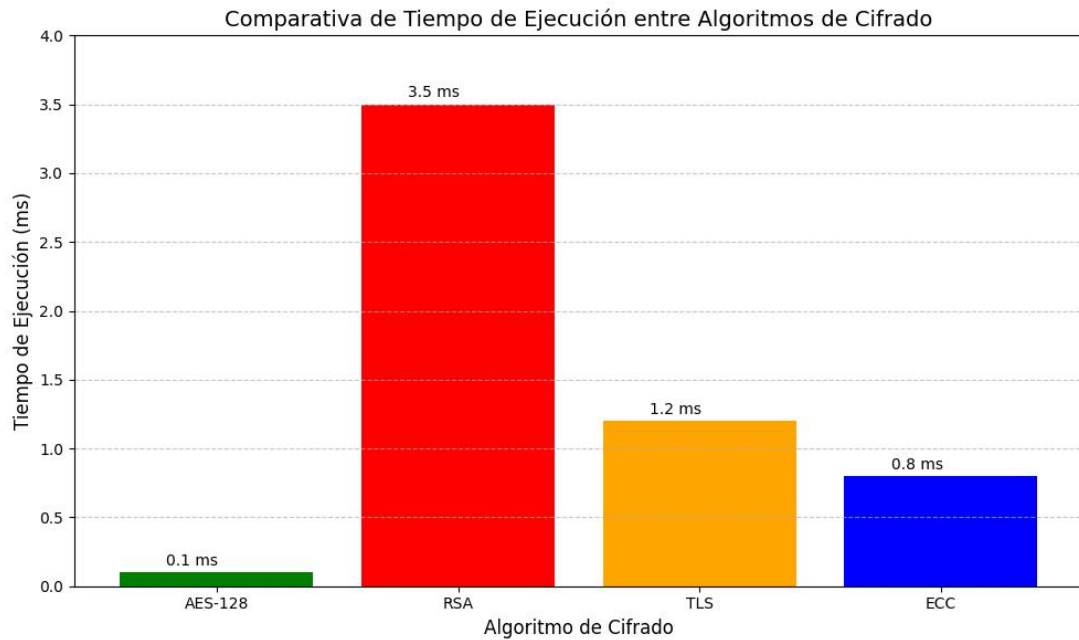


Figura 2.15: Comparación de latencia entre algoritmos de cifrado en tecnologías inalámbricas.

Respecto al nivel de seguridad ofrecido, tanto AES-128 como TLS destacan al cumplir con altos estándares de protección frente a ataques de interceptación y manipulación de datos [44]. ECC, aunque ofrece un buen balance entre seguridad y eficiencia, es ligeramente más vulnerable ante ciertos tipos de ataques si no se implementa adecuadamente. Por su parte, RSA, aunque robusto en teoría, presenta vulnerabilidades asociadas a la longitud de la clave y al uso de infraestructuras más antiguas.

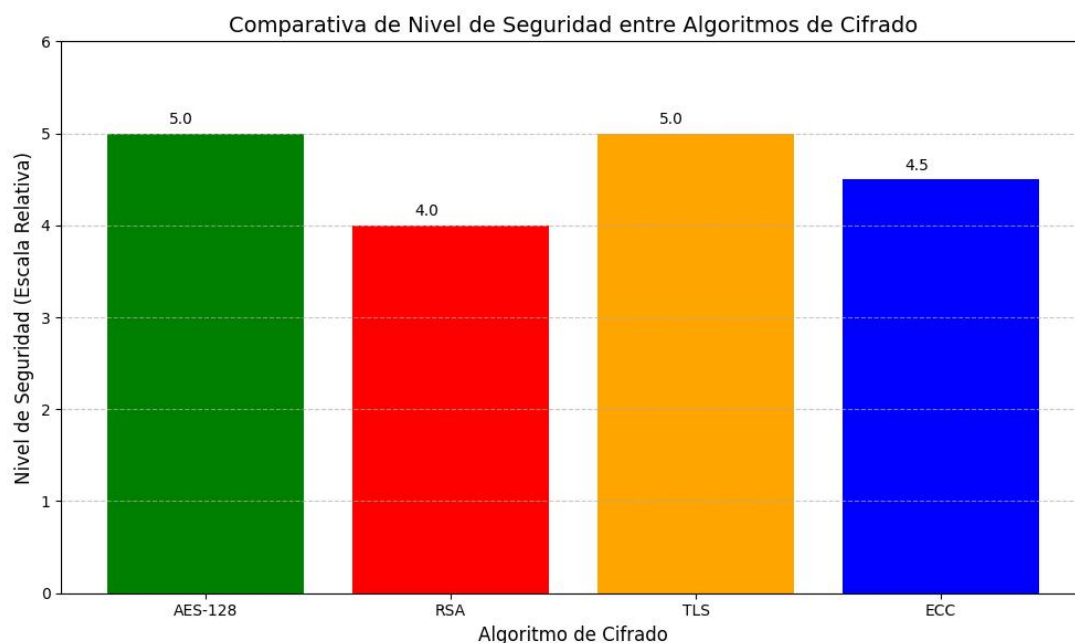


Figura 2.16: Comparación de nivel de seguridad entre algoritmos de cifrado en tecnologías inalámbricas.

Para enlaces inalámbricos, **AES-128** fue el algoritmo más adecuado, destacando por su bajo consumo, latencia mínima y alta seguridad [45]. Es ideal para microcontroladores con recursos limitados, además de ser compatible con tecnologías como Wi-Fi y LoRa. Si bien **ECC** también ofrece buena seguridad con menor tamaño de clave, es más complejo de implementar. **RSA** y **TLS** resultan menos viables en dispositivos IoT debido a su mayor exigencia computacional.

En el caso de enlaces alámbricos, se analizaron **AES-128**, **MACsec**, **TLS** e **IPSec**. La combinación de **AES-128 + MACsec** resultó óptima por su baja latencia, overhead reducido y alto nivel de protección [47].

El análisis de latencia entre protocolos de comunicación alámbrica muestra que AES-128 y MACsec son los más eficientes, con tiempos de procesamiento de 0.1 ms y 0.2 ms respectivamente. Esto los convierte en opciones ideales para aplicaciones que requieren transmisión de datos en tiempo real. TLS, con una latencia moderada de 1.5 ms, es adecuado para escenarios que priorizan autenticación avanzada sobre velocidad. Por otro lado, IPSec presenta

una latencia más elevada, alrededor de 3 ms, lo que limita su viabilidad en entornos donde la velocidad de transmisión es crítica [48].

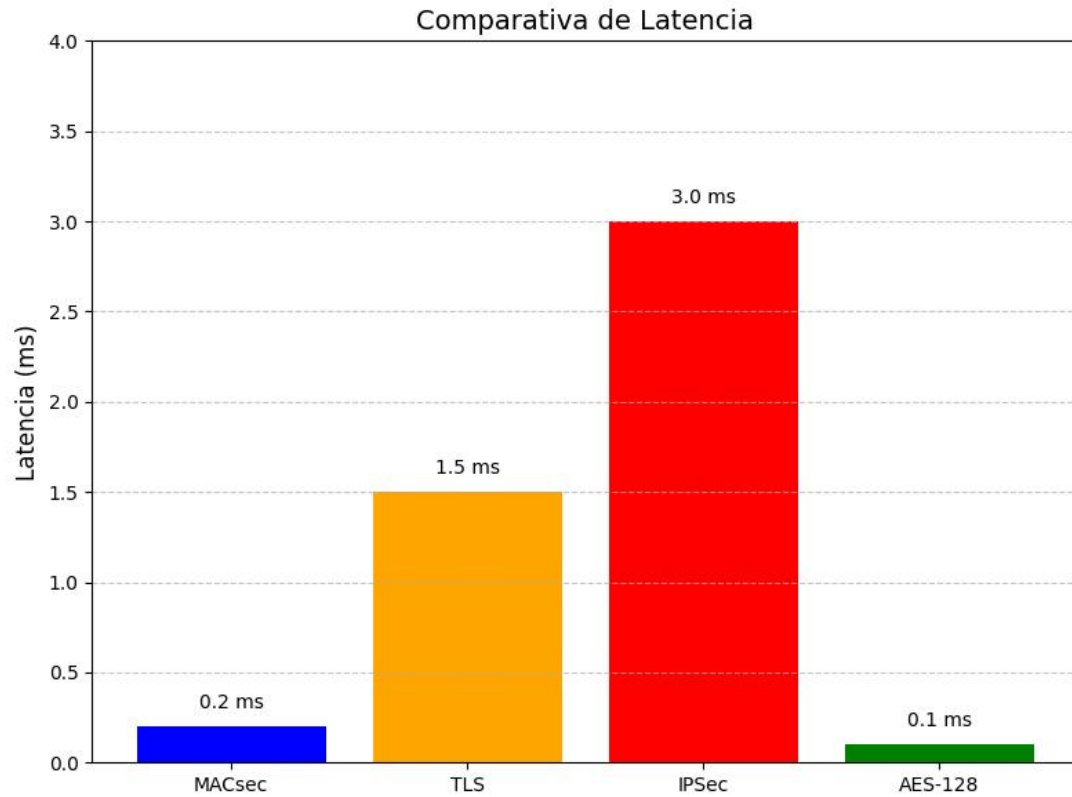


Figura 2.17: Comparación de latencia entre protocolos de comunicación alámbrica.

Respecto al consumo energético, AES-128 y MACsec se destacan nuevamente por su eficiencia, con consumos de 0.3 mW y 0.5 mW respectivamente, adecuados para dispositivos IoT de bajo consumo. TLS, con un consumo de 1.8 mW, ofrece un equilibrio aceptable en sistemas menos exigentes energéticamente, mientras que IPSec, con 3.5 mW, representa la opción menos eficiente en este aspecto [41].

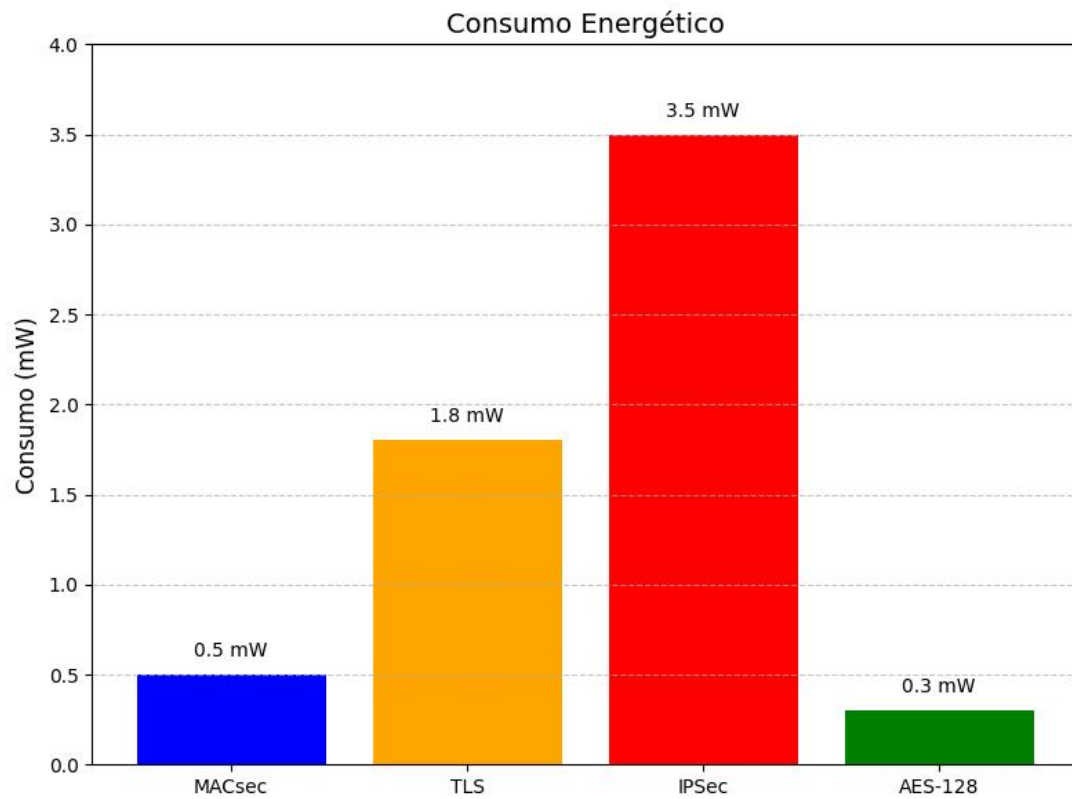


Figura 2.18: Comparación de consumo energético entre protocolos de comunicación alámbrica.

En términos de seguridad, los algoritmos AES-128, TLS e IPSec ofrecen altos niveles de protección, siendo adecuados para la transmisión segura de datos en ambientes críticos. Aunque MACsec proporciona buenas capacidades de seguridad, su alcance se limita a redes Ethernet, lo que restringe su aplicabilidad en comparación con las otras alternativas más versátiles.

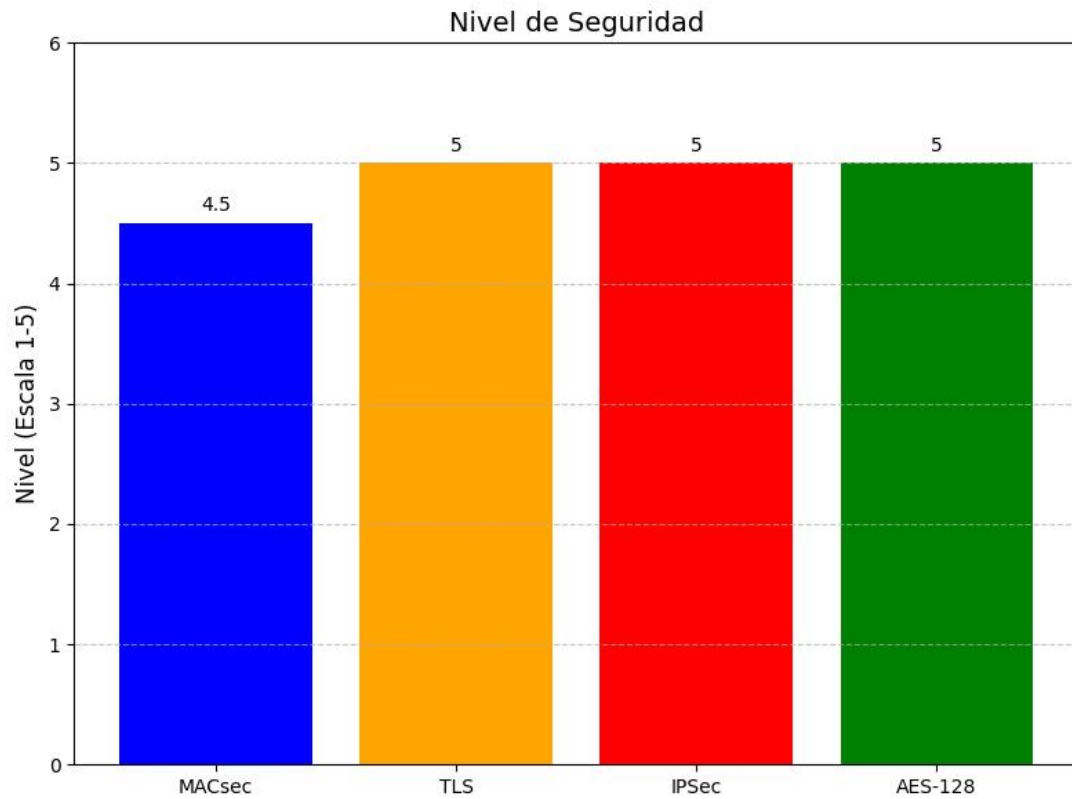


Figura 2.19: Comparación de nivel de seguridad entre protocolos de comunicación alámbrica.

Finalmente, el análisis de overhead en transmisión revela que AES-128 y MACsec introducen el menor overhead, optimizando el uso del ancho de banda disponible. TLS e IPSec, en cambio, generan una cantidad significativa de datos adicionales, lo que puede afectar la eficiencia de transmisión, especialmente en redes limitadas en recursos o que operan bajo demanda intensa.

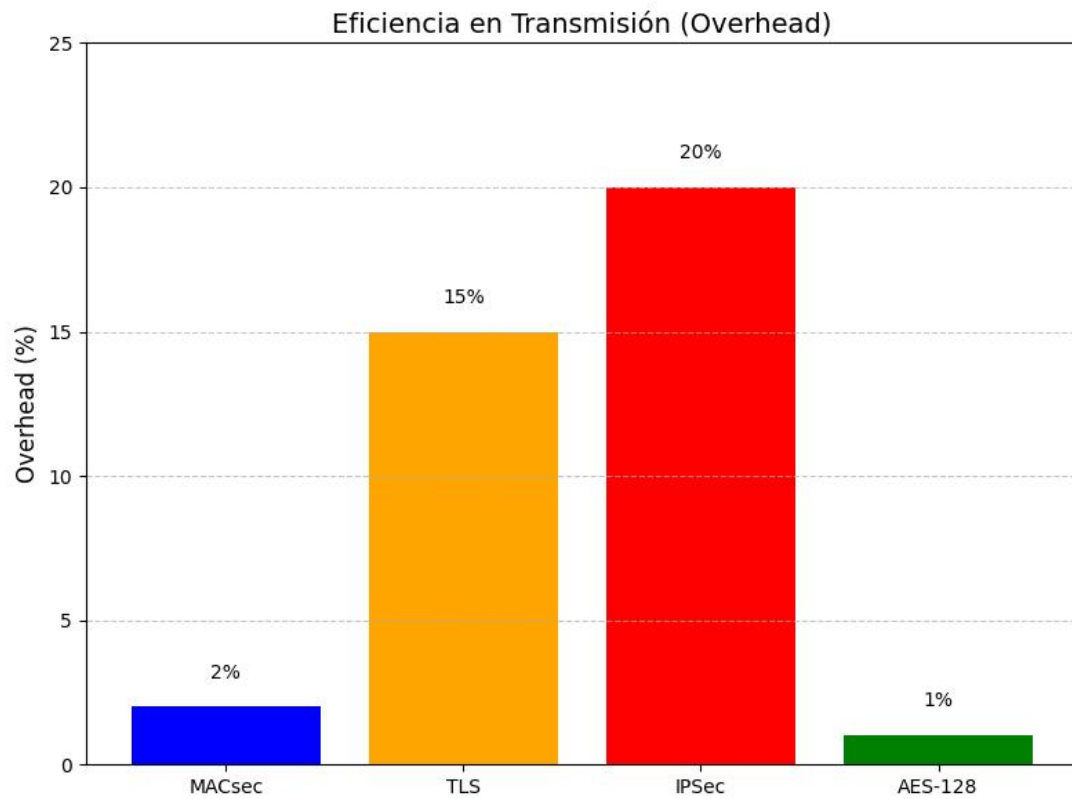


Figura 2.20: Comparación del overhead de transmisión entre protocolos de comunicación alámbrica.

AES-128 y MACsec se posicionan como las alternativas más eficientes para aplicaciones de monitoreo ambiental, combinando baja latencia, bajo consumo energético y alta seguridad. TLS e IPSec, aunque robustos, presentan mayores latencias y overhead, por lo que son menos adecuados para entornos donde la eficiencia y la velocidad son prioritarias.

Capítulo 3

Arquitectura propuesta

3.1 Arquitectura del sistema

El esquema general ilustrado en la Figura 3.1 destaca las entradas y salidas del sistema. En este diseño, un ROV (*Remotely Operated Vehicle*) y una boya flotante conforman un sistema de monitoreo ambiental basado en tecnologías avanzadas para mejorar la inspección y gestión de las condiciones en jaulas de cultivo acuícola.

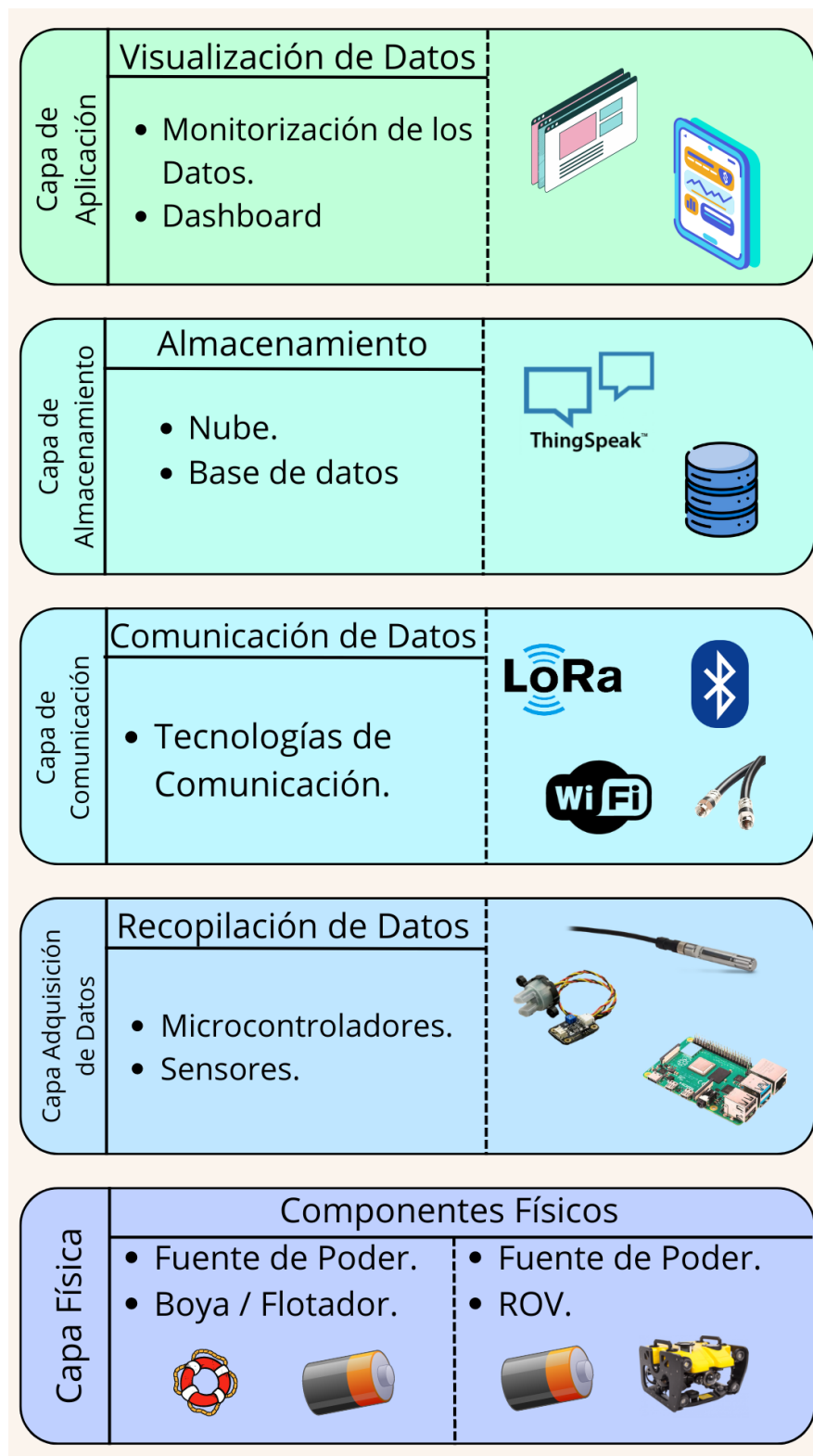


Figura 3.1: Arquitectura del sistema

El sistema propuesto consta de dos prototipos clave:

- **Prototipo Tipo Boya:** Ubicado en la superficie del agua, recolecta datos ambientales como temperatura, salinidad y oxígeno disuelto. La transmisión de datos se realiza de manera inalámbrica (*Wi-Fi*) hacia una base de datos para su almacenamiento y análisis en tiempo real.
- **Prototipo Sumergible y Móvil (ROV):** Operando a diferentes profundidades, escanea la malla de las jaulas para detectar daños y recopila datos ambientales. Utiliza una conexión por cable *Ethernet* para garantizar una comunicación estable y de alta velocidad con el sistema central.

Ambos prototipos están equipados con un **Nodo Sensor Integrado** encargado de recopilar y transmitir datos de manera eficiente. Los datos generados son procesados y almacenados en la **Plataforma ThingSpeak**, una solución basada en la nube para la gestión y análisis de información en tiempo real. Finalmente, la **Estación de Monitoreo** permite a los operadores visualizar los datos a través de dashboards interactivos, facilitando la toma de decisiones informadas.

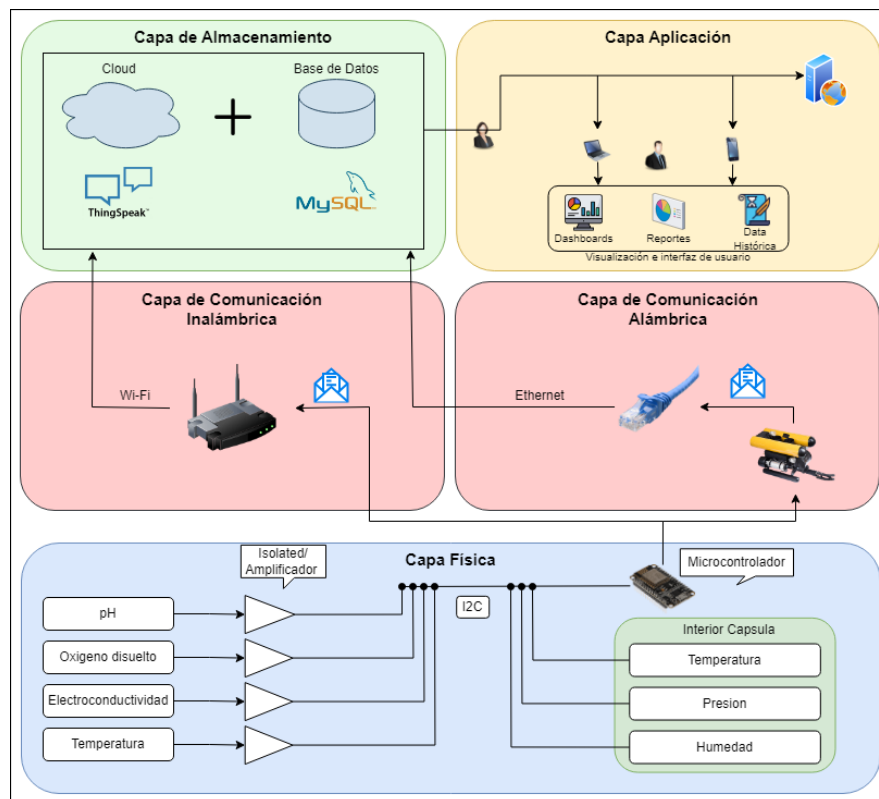


Figura 3.2: Esquema General del Sistema.

La arquitectura del sistema se compone de varias capas, cada una con funciones específicas en la adquisición, transmisión, almacenamiento y visualización de datos.

1. **Capa Física:** Contiene los componentes físicos del sistema, incluyendo sensores, la carcasa protectora del ROV y la boya de superficie.
 - **Sensores:** Ubicados en el entorno submarino, miden parámetros críticos como pH, oxígeno disuelto, electroconductividad y temperatura.
 - **Carcasa del ROV:** Impermeable y resistente a la presión, protege los componentes electrónicos durante la inmersión.
 - **Boya:** Alojamiento de microcontroladores, sensores y fuente de energía, permitiendo un monitoreo estable en la superficie.
2. **Capa de Adquisición de Datos:** Incluye hardware para recopilar información a partir de los sensores instalados.

- **Placas o Microcontroladores:** Gestionan la conexión de sensores y la transmisión de datos, posibilitando el procesamiento en tiempo real.
 - **Amplificadores y Aisladores:** Mejoran la calidad de la señal capturada por los sensores antes de enviarla al microcontrolador.
3. **Capa de Comunicación:** Se encarga de transmitir los datos recopilados desde los sensores hacia la plataforma de almacenamiento y monitoreo.
- **Wi-Fi (Boya):** Permite la transmisión de datos desde la boya hacia la nube.
 - **Ethernet (ROV):** Utilizado para una comunicación estable y de alta velocidad entre el ROV y la estación base.
 - **Gateway:** Actúa como puente de comunicación entre los dispositivos y la red de almacenamiento.
4. **Capa de Almacenamiento:** Responsable de gestionar la información recolectada en una base de datos centralizada.
- **Plataforma ThingSpeak:** Servicio en la nube para la recopilación y visualización de datos en tiempo real.
 - **Base de Datos MySQL:** Almacena información histórica para su análisis y generación de reportes.
5. **Capa de Aplicación:** Permite la interacción con los datos recopilados mediante interfaces gráficas de usuario.
- **Dashboard Interactivo:** Proporciona visualizaciones intuitivas de las métricas recolectadas.
 - **Web Service:** Facilita el acceso remoto a la información, permitiendo generar reportes personalizados.
 - **Estación de Monitoreo:** Laptop o servidor donde se procesan los datos y se gestionan las alertas.

El sistema de monitoreo acuícola propuesto integra múltiples tecnologías para garantizar una supervisión eficiente y en tiempo real de las condiciones ambientales dentro de las jaulas de cultivo. La combinación de sensores de alta precisión, comunicación híbrida (Wi-Fi y Ethernet) y almacenamiento en la nube permite optimizar la gestión de los recursos hídricos y mejorar la toma de decisiones. La estructura en capas facilita la escalabilidad del sistema, permitiendo futuras mejoras en términos de integración de nuevos sensores y funcionalidades avanzadas basadas en inteligencia artificial.

3.2 Revisión de requerimientos

A lo largo del proyecto se han considerado múltiples aspectos esenciales para garantizar el éxito del sistema de monitoreo de calidad del agua subacuática. Inicialmente, se plantearon requerimientos básicos relacionados con la capacidad del sistema para medir y transmitir parámetros como el pH, la temperatura, el oxígeno disuelto y la salinidad, entre otros. Estos requerimientos fueron evolucionando a medida que se avanzaba en el desarrollo del proyecto y se adquiría mayor claridad sobre las necesidades técnicas y las condiciones del entorno operativo.

En una primera fase, se definió que el sistema debía ser capaz de funcionar de manera confiable en condiciones subacuáticas adversas, utilizando sensores robustos para recolectar datos y transmitirlos en tiempo real a una plataforma accesible por los operadores. A partir de reuniones técnicas y con un mejor entendimiento de los desafíos involucrados, se han refinado los requerimientos, detallando aspectos como la integración con el vehículo ROV, que permitirá una movilidad controlada y la toma de muestras en diferentes puntos del entorno subacuático.

Además, se plantearon requerimientos adicionales relacionados con la seguridad e integridad de los datos transmitidos. Esto implica el desarrollo de un sistema de comunicación confiable, capaz de operar en largas distancias utilizando tecnologías como LoRa o

Ethernet, dependiendo de la ubicación de los nodos sensores. Otro aspecto relevante es la capacidad de visualizar los datos a través de un dashboard interactivo, permitiendo a los usuarios monitorear en tiempo real los parámetros críticos del agua, así como acceder a datos históricos almacenados en la base de datos.

3.3 Requisitos funcionales

RF1	El sistema eléctrico debe estar cubierto con una carcasa resistente y waterproof.
RF2	El sistema desarrollado debe capturar los datos censados del agua.
RF3	El sistema debe enviar datos de sensores desde la boya (inalámbricamente) y el ROV (por cable) hacia una estación base.
RF4	La comunicación debe ser confiable y soportar diversos volúmenes de datos, especialmente en el ROV.
RF5	Toda la transmisión, tanto cableada como inalámbrica, debe estar encriptada para evitar accesos no autorizados.
RF6	La boya debe utilizar tecnologías inalámbricas de bajo consumo para garantizar su autonomía.
RF7	El sistema debe permitir visualizar los datos censados en una plataforma de software para el uso del usuario.

3.4 Requisitos no funcionales

RNF1	El sistema debe ser eficiente al enviar los datos censados.
RNF2	El sistema debe asegurar la integridad de los datos.
RNF3	La boya debe utilizar tecnologías inalámbricas de bajo consumo.
RNF4	Los cables del ROV deben ser robustos y soportar condiciones subacuáticas adversas, mientras que la boya debe estar protegida contra corrosión y salpicaduras.
RNF5	El sistema debe permitir la adición de otros dispositivos similares sin alterar la configuración actual.
RNF6	El sistema tiene que tener una interfaz intuitiva para visualizar los datos.
RNF7	Tanto la boya como el ROV deben operar de manera estable durante períodos prolongados sin necesidad de mantenimiento frecuente.

3.5 Requisitos ambientales

3.5.1 Ambiente subacuático

El dispositivo debe funcionar bajo ciertas condiciones para garantizar su correcto funcionamiento, además de tener tolerancia a ciertos cambios. Se muestra en la Tabla 3.1 datos de ambiente subacuático, entre 3 y 11 metros de profundidad, correspondiente a muestras realizadas entre el 1 de Enero y el 5 de Mayo de 2024 en un centro de cultivo ubicado en el Seno de Reloncaví, Región de los Lagos.

Cuadro 3.1: Datos límites entre 3 y 11 metros de profundidad. Cortesía de Caleta Bay.

Parámetro	Mínimo	Máximo
Temperatura	9, 5°C	26, 2°C
Oxígeno	1, 3[mg/L]	13, 1[mg/L]
Salinidad	0[g/L]	31, 2[g/L]

3.5.2 Hardware de Desarrollo

El Hardware necesario para el proyecto involucra un sistema IoT con múltiples sensores y placas, que permitirán censar y recopilar datos para su posterior uso. Además se hará uso de un ROV, al cual se integrará el sistema IoT creado para la recopilación de datos.

3.5.3 Software de Desarrollo

El Software necesario está desarrollado en Javascript/Node con una base de datos utilizando una API REST. Para el Frontend se utiliza React que permitirá visualizar los datos esperados por el usuario para su posterior análisis, investigación, uso. Para el backend se utilizará la herramienta Django conformada por python, que permitirá crear la API necesaria para hacer la conexión con la base de datos y el Frontend.

3.6 Módulos

A partir de los requerimientos definidos y las tecnologías preseleccionadas en el Capítulo 2, este capítulo presenta el diseño detallado del sistema de monitoreo. Se abordan los aspectos estructurales, electrónicos y de comunicación que dan forma al prototipo, integrando sensores, microcontroladores, tecnologías de transmisión de datos y mecanismos de visualización.

Asimismo, se justifican las decisiones técnicas mediante comparativas entre alternativas, priorizando criterios como eficiencia energética, estabilidad, escalabilidad y seguridad. Este diseño sirve como base para el desarrollo e implementación del sistema descrito en capítulos posteriores.

3.6.1 Electrónica

Este módulo se encarga de adquirir y procesar datos provenientes de sensores ambientales alojados en la cápsula, enviándolos posteriormente al módulo de comunicación. Se utilizarán sensores para la toma de datos y se integrarán los componentes electrónicos necesarios para asegurar la lectura, digitalización y transmisión eficiente de la información.

- **Temperatura:** Mide la temperatura interna.
- **Presión:** Registra la presión dentro de la cápsula.
- **Humedad:** Detecta la humedad relativa. Aún se está definiendo el modelo específico a utilizar.

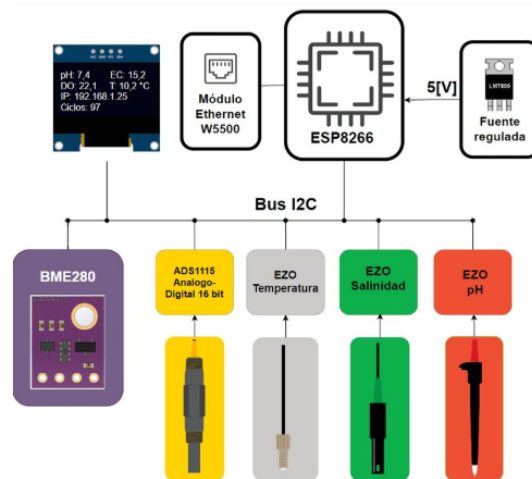


Figura 3.3: Esquema eléctrico

Los sensores se comunican con el microcontrolador mediante el protocolo I2C, permitiendo la recolección periódica de datos ambientales. Además, se contempló el uso de conver-

tidores analógico-digital de alta resolución para garantizar precisión en las mediciones. La selección de componentes priorizó bajo consumo energético y compatibilidad con entornos acuáticos.

- **ESP8266:** Microcontrolador que procesa y gestiona los datos recolectados por los sensores.
- **Módulo Ethernet W5500:** Permite la transmisión de datos vía conexión Ethernet.
- **ADS1115:** Convertidor Análogo-Digital de 16 bits que proporciona mediciones más precisas que las entradas analógicas de microcontroladores como Arduino Nano. Utiliza comunicación I2C.

Referencias técnicas y esquemas disponibles en: github.com/cristianurra/sondapmm

3.6.2 Comunicación

Este módulo se encarga de la transmisión de datos desde el sistema hacia plataformas de almacenamiento y visualización, actuando como el puente entre la electrónica interna y el entorno externo. Su diseño considera las particularidades del entorno acuático y las necesidades del sistema, como estabilidad, velocidad de transmisión y eficiencia energética.

Durante el desarrollo se evaluaron tecnologías inalámbricas y alámbricas, priorizando aquellas con mejor desempeño según el contexto de uso. Para el prototipo se optó por **Wi-Fi**, dada su facilidad de integración, velocidad y disponibilidad de infraestructura, especialmente en entornos de superficie. Sin embargo, se proyecta el uso de tecnologías como **LoRa** para escenarios donde el bajo consumo energético y el alcance sean prioritarios, o **Ethernet** en contextos subacuáticos que requieran alta confiabilidad y baja latencia.

El módulo de comunicación es responsable de recibir los datos desde el microcontrolador y transmitirlos hacia los servicios de almacenamiento o visualización, ya sea localmente o en la nube. Su funcionamiento es fundamental para garantizar que la información sensada esté disponible en tiempo real para su análisis y monitoreo.

3.6.3 Almacenamiento

Este módulo almacena los datos recopilados por los sensores, permitiendo su posterior análisis y visualización. Recibe información desde el módulo de comunicación y la entrega al módulo de aplicación para su despliegue en dashboards.

- **ThingSpeak:** Plataforma en la nube orientada a IoT que permite la recolección, visualización y análisis de datos en tiempo real. Utiliza canales para organizar los datos y ofrece integración con APIs REST y análisis mediante MATLAB. Su facilidad de uso la convierte en una herramienta versátil para el monitoreo ambiental.
- **MySQL:** Sistema de bases de datos relacional de código abierto ampliamente utilizado por su robustez y eficiencia. Permite almacenar grandes volúmenes de datos estructurados y se implementa tanto localmente como en la nube, garantizando disponibilidad, escalabilidad y seguridad.

3.6.4 Aplicación

Este módulo proporciona interfaces para la visualización y análisis de datos por parte de los usuarios. Recibe datos desde el módulo de almacenamiento y entrega herramientas visuales e informativas para facilitar la interpretación de los parámetros monitoreados.

- **Web Service:** Permite el acceso a datos y funcionalidades mediante servicios web, accesibles desde navegadores como Chrome o Firefox a través de una interfaz local.
- **Dashboard:** Interfaz interactiva desarrollada en React para visualizar datos en tiempo real mediante gráficos. Se conecta con el backend en Django, que expone una API para la integración de los datos.
- **Reportes e Histórico:** Muestra información histórica y genera reportes visuales, incluyendo dashboards en tiempo real y visualización 3D del entorno de monitoreo.

3.7 Software de simulación

Para evaluar el rendimiento de la comunicación inalámbrica y la escalabilidad del sistema de monitoreo, se utilizaron dos herramientas de simulación complementarias: **NetSim** y **Cisco Packet Tracer**. Estas plataformas permitieron modelar comportamientos de red y analizar métricas clave como latencia, retransmisión de paquetes y congestión bajo condiciones de carga progresiva.

Cisco Packet Tracer se empleó para validar la configuración lógica de la red. Esta herramienta, desarrollada por Cisco, permite simular topologías a través de una interfaz gráfica intuitiva [49], facilitando la configuración de routers, switches y dispositivos finales. Aunque su modelado físico de señales inalámbricas es limitado, resultó útil para verificar direccionamiento IP, rutas de comunicación y protocolos como ICMP.

NetSim, en cambio, ofrece una simulación avanzada y detallada, ampliamente usada en entornos académicos e investigativos [50]. Su motor permite ajustar parámetros como potencia de transmisión, interferencias, movilidad de nodos y configuración de protocolos. En este proyecto, se utilizó para simular nodos sensores enviando paquetes ICMP a un receptor, registrando métricas como tiempo de propagación, retrasos máximos, retransmisiones y congestión. Su línea de tiempo visual facilitó el análisis progresivo con múltiples boyas transmitiendo simultáneamente.

El uso conjunto de NetSim y Cisco Packet Tracer entregó una visión integral del sistema: por un lado, una evaluación cuantitativa bajo condiciones de carga; y por otro, una validación funcional de la arquitectura lógica de red.

Capítulo 4

Diseño propuesto para Boya

El desarrollo de un sistema tipo boya para el monitoreo acuícola, se centra en garantizar la recolección, transmisión y almacenamiento eficiente de los parámetros ambientales. Tomando en consideraciones aspectos claves como la seguridad de los datos transmitidos y que estos sean enviados de manera eficiente y en tiempo real. Este capítulo en particular detalla como han sido utilizadas las decisiones técnicas tomadas en el capítulo anterior, además de mostrar las simulaciones realizadas y los resultados obtenidos, integrando así las observaciones de diseño y pruebas ejecutadas.

4.1 Hardware

El hardware de la boya incluye sensores para medir parámetros como pH, temperatura, oxígeno disuelto y conductividad, seleccionados por su compatibilidad con entornos acuáticos y su alta precisión, además han sido seleccionados de un proveedor específico de estilo profesional para poder garantizar que los dispositivos utilizados cumplan con todos los estándares de seguridad y que sean completamente aptos para un entorno subacuático, tomando así data confiable, prolongada y sin interrupciones.

Estos sensores están integrados con un microcontrolador ESP32, que combina capacidades

de procesamiento y comunicación Wi-Fi en un solo dispositivo. Escoger dispositivos electrónicos que tengan ciertos dispositivos ya integrados, evita que se tenga que integrar otro tipo de dispositivo que deba ser compatible con el sistema y que no se tengan errores en el envío de datos.

La energía del sistema se suministra mediante una batería recargable, seleccionada para soportar operaciones continuas durante largos periodos. Además, la carcasa de la boya fue diseñada para ser resistente al agua y proteger los componentes internos frente a condiciones adversas.

4.2 Comunicación

El diseño de un sistema de comunicación para la propuesta, prioriza la transmisión eficiente y segura de los datos obtenidos utilizando la boya, enviados hacia una estación base. Para el prototipo actual, se utiliza Wi-Fi, debido a la disponibilidad y facilidad de su implementación. Utilizando el cifrado AES-128 se asegura la integridad y confiabilidad de los datos, mientras que la resiliencia ante desconexiones garantiza que no se pierdan mediciones críticas, llevando un enfoque que prepara el sistema para futuras migraciones hacia tecnologías más robustas como LoRa, necesarias y útiles para entornos extensos.

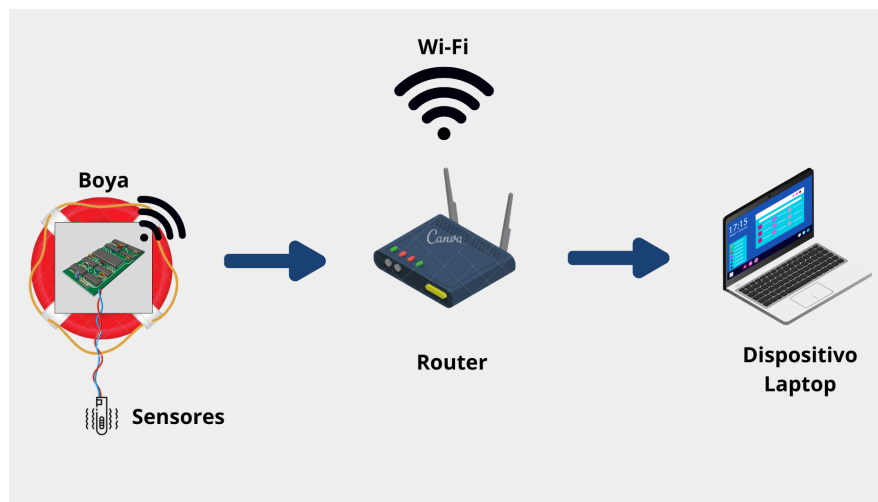


Figura 4.1: Diagrama de Comunicación Inalámbrica para boya

En el sistema de prototipo, los datos que fueron recolectados por los sensores en la boya se enviaron directamente a una base de datos local en un ordenador conectado al sistema. Desde esta base de datos, un dashboard desarrollado permitió la visualización en tiempo real de los parámetros monitorizados.

Llegando a tener un flujo de datos bastante estructurado, partiendo por la adquisición de los datos mediante los sensores colocados en un sistema electrónico en la boya, registrando parámetros de pH, temperatura, oxígeno disuelto y conductividad. Llevando así al procesamiento de los datos obtenidos por un microcontrolador, donde se aplicaron operaciones básicas como limpieza de datos y formato; la transmisión de estos fue enviada a través de Wi-Fi hacia una estación base en un dispositivo. Finalizando así en el almacenamiento en la base local para luego ser visualizados en un dashboard que los presenta en tiempo real con gráficos y métricas relevantes.

4.3 Simulaciones

Para validar el diseño y el desarrollo del sistema, se llevaron a cabo diversas simulaciones que abarcan desde pruebas iniciales de comunicación básica hasta escenarios avanzados que incluyen seguridad y transmisión continua de datos. Estas simulaciones permitieron analizar el desempeño del sistema en diferentes condiciones, identificar áreas de mejora y garantizar que las soluciones implementadas cumplen con los requisitos establecidos.

Se utilizó el entorno de la salmonera en Antarfood, ubicada en la región de los lagos, y ofrece una oportunidad invaluable para simular una red extensa de nodos. Dado que existen cuatro grupos de jaulas de salmones y cada una de estas se compone de 10 jaulas cada una.

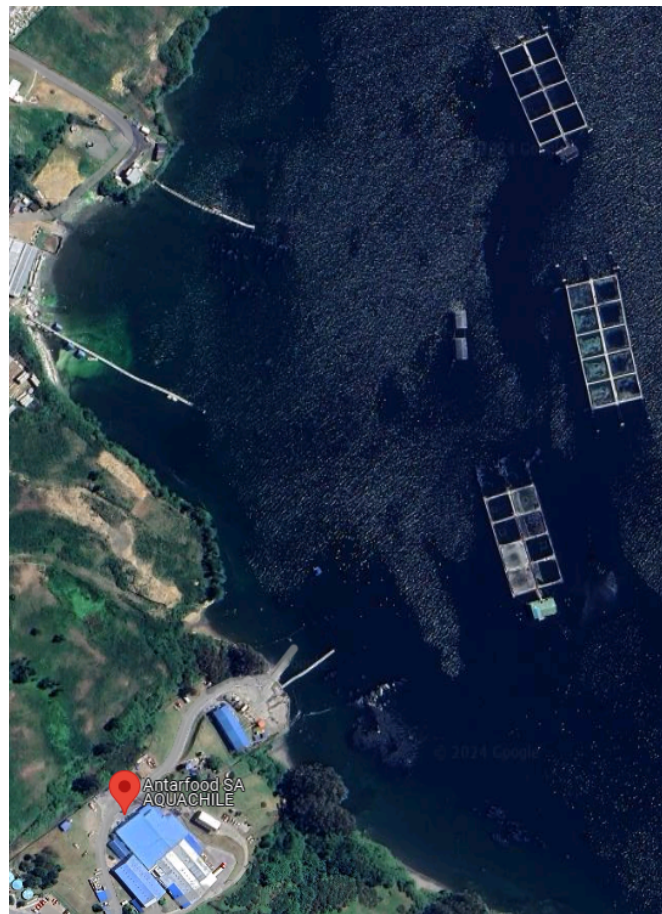


Figura 4.2: Imagen satelital desde google maps sobre Salmonera Antarfood, Chonchi, Los Lagos

Para este caso se ocupará un grupo de jaulas de 2 x 4, con un total de 8 jaulas. Cada una de estas mide 20 m x 20 m con pasarelas de 2 metros de ancho que recorren todas las piscinas. Además, se colocará el router en el medio izquierdo de las jaulas, que se encargará de enviar la señal wifi del envío de datos.

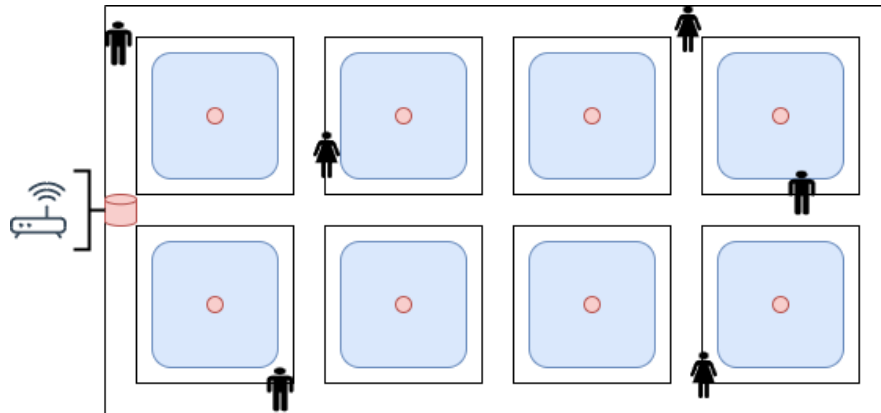


Figura 4.3: Tipología Salmonera Antarfood para boya

1. Simulación en Cisco Packet Tracer

En la presente simulación, se diseñó una red inalámbrica compuesta por ocho microcontroladores que representan boyas de monitoreo ambiental. Cada boya está configurada para enviar datos a un router central modelo WRT300N, que actúa como punto de acceso inalámbrico. Posteriormente, el router redirecciona la información hacia una laptop, la cual es la encargada de recibir y visualizar los paquetes de datos transmitidos.

El objetivo principal de esta simulación fue evaluar la efectividad de la transmisión inalámbrica de datos desde múltiples nodos hacia un único receptor central, simulando un escenario de monitoreo ambiental en tiempo real. Se utilizó el protocolo ICMP (Internet Control Message Protocol) para la prueba de conectividad, permitiendo la visualización de cada paquete transmitido y recibido durante la simulación.

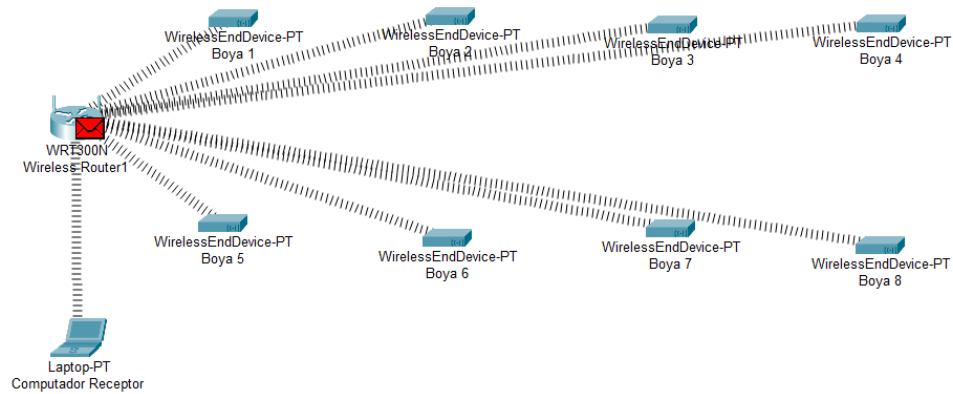


Figura 4.4: Comunicación vía Wifi entre 8 boyas y 1 centro de control

Se hicieron 8 pruebas distintas, en donde cada caso se fue agregando un envío mas de paquetes, llegando a tener las 8 boyas enviando datos de manera simultanea con el objetivo de evaluar la latencia, estabilidad de la conexión y la carga del router WRT300N al manejar múltiples transmisiones simultáneamente.

Cuadro 4.1: Comparación del rendimiento según número de boyas transmitiendo paquetes ICMP

Boyas	Tiempo inicial (s)	Retraso máx. (s)	Retransmisiones	Congestión	Observaciones
1	0.000–0.013	10.253	Sí	Parcial	Salto abrupto
2	0.000–0.013	20.013	Sí	Alta	Retrasos prolongados
3	0.000–0.029	20.240	Sí	Alta	Impacto por carga del router
4	0.000–0.042	>20.000	Sí	Alta	Variabilidad entre boyas
5	0.000–0.054	20.040	Sí	Alta	Boya 5 más afectada
6	0.000–0.056	–	No	Baja	Buen manejo de carga
7	0.000–0.036	–	No	Baja	Aumento leve de latencia
8	0.000–0.092	–	No	Media	Mayor latencia en Boya 8

La simulación evidenció que la red inalámbrica es funcional y permite la transmisión de datos sin pérdidas, pero con latencias variables según la distancia y la carga del router. Se observó que algunos dispositivos tenían tiempos de respuesta rápidos, mientras que otros registraban retransmisiones prolongadas, lo que se atribuye a la interferencia, la sobrecarga del router o una gestión ineficiente del tráfico de red. Además, las diferencias en el rendimiento entre las boyas sugieren que la ubicación de los dispositivos afecta la estabilidad y eficiencia de la comunicación; boyas más cercanas al router tuvieron tiempos de transmisión más rápidos, mientras que las más alejadas experimentaron mayor latencia. Asimismo, la red mostró signos de congestión cuando el tráfico aumentaba, indicando que el router no prioriza equitativamente los paquetes de datos.

La red inalámbrica es capaz de manejar múltiples transmisiones simultáneas sin degradación significativa del rendimiento, pero la latencia podría volverse un problema en aplicaciones de transmisión en tiempo real, como el monitoreo ambiental en salmoneras. Para mejorar la estabilidad, es crucial optimizar la configuración del router, segmentar la red si es necesario y utilizar protocolos más eficientes para la transmisión de datos.

2. Simulación NetSim

Se creó un sistema de comunicación inalámbrica entre múltiples nodos a través de un punto de acceso inalámbrico. Este punto de acceso es el dispositivo central encargado de gestionar la conectividad entre los diferentes nodos inalámbricos, los cuales están distribuidos en la red y representados como Wireless Node X. Estos flujos están representados por las líneas de color morado, y cada uno tiene una etiqueta como App1 CBR, App2 CBR, etc., lo que indica la existencia de distintas sesiones de comunicación dentro de la red.

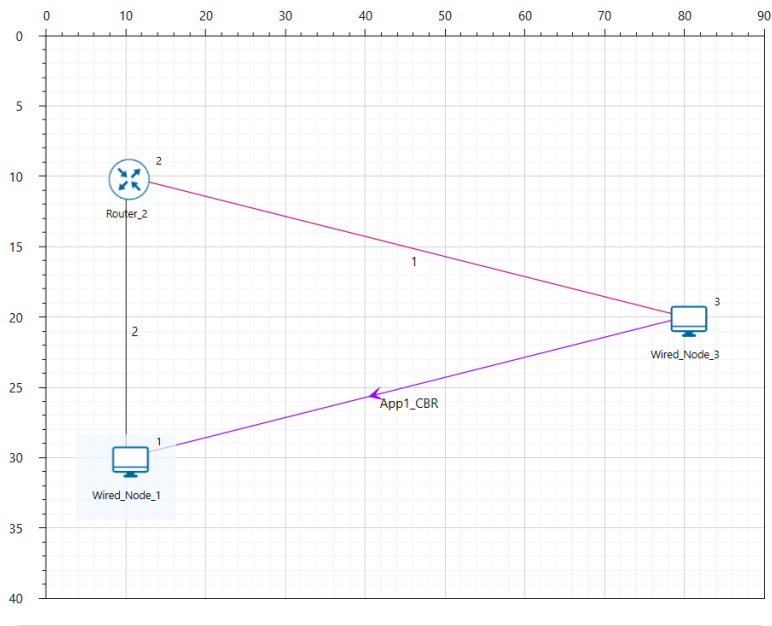


Figura 4.5: Red NetSim para 1 boya

Además, se pueden notar líneas punteadas de color rojo, que representan las conexiones inalámbricas establecidas entre los nodos y el punto de acceso. Este diseño de red sugiere un modelo de comunicación centralizado, donde el Access Point actúa como intermediario en la transmisión de datos.

- **Link Throughput vs Time**

Se ha analizado el rendimiento del enlace inalámbrico a través del análisis del Throughput (rendimiento del enlace) en función del tiempo. Esta evaluación nos permite entender cómo fluye la transmisión de datos entre los nodos y el punto de acceso, así como la estabilidad del tráfico en la red.

Link Id	Link Type	Link Medium	Packet Id	Transmitter	Receiver	Packet Size(Bytes)	Physical Out Time(ms)	Physical In Time(ms)	Throughput(Mbps)	IsVisible	ROWIndex
1	P2MP	Wireless	0	WIRELESS_NODE_9	ACCESS_POINT_1	84.000000	0.324000	324010	13440	True	1
1	P2MP	Wireless	0	WIRELESS_NODE_9	ACCESS_POINT_1	84.000000	0.324000	324060	0	True	1
1	P2MP	Wireless	0	WIRELESS_NODE_9	ACCESS_POINT_1	84.000000	0.324000	637970	0	True	1
1	P2MP	Wireless	0	ACCESS_POINT_1	WIRELESS_NODE_9	14.000000	0.638010	638020	2240	True	2
1	P2MP	Wireless	0	ACCESS_POINT_1	WIRELESS_NODE_9	14.000000	0.638010	638070	0	True	2
1	P2MP	Wireless	0	ACCESS_POINT_1	WIRELESS_NODE_9	14.000000	0.638010	1062080	0	True	2
1	P2MP	Wireless	0	WIRELESS_NODE_4	ACCESS_POINT_1	84.000000	1.062120	1062130	13440	True	3
1	P2MP	Wireless	0	WIRELESS_NODE_4	ACCESS_POINT_1	84.000000	1.062120	1062180	0	True	3
1	P2MP	Wireless	0	WIRELESS_NODE_4	ACCESS_POINT_1	84.000000	1.062120	1376090	0	True	3
1	P2MP	Wireless	0	ACCESS_POINT_1	WIRELESS_NODE_4	14.000000	1.376130	1376140	2240	True	4
1	P2MP	Wireless	0	ACCESS_POINT_1	WIRELESS_NODE_4	14.000000	1.376130	1376190	0	True	4
1	P2MP	Wireless	0	ACCESS_POINT_1	WIRELESS_NODE_4	14.000000	1.376130	1760200	0	True	4
1	P2MP	Wireless	0	WIRELESS_NODE_6	ACCESS_POINT_1	84.000000	1.760240	1760250	13440	True	5
1	P2MP	Wireless	0	WIRELESS_NODE_6	ACCESS_POINT_1	84.000000	1.760240	1760300	0	True	5
1	P2MP	Wireless	0	WIRELESS_NODE_6	ACCESS_POINT_1	84.000000	1.760240	2074210	0	True	5
1	P2MP	Wireless	0	ACCESS_POINT_1	WIRELESS_NODE_6	14.000000	2.074250	2074260	2240	True	6
1	P2MP	Wireless	0	ACCESS_POINT_1	WIRELESS_NODE_6	14.000000	2.074250	2074310	0	True	6
1	P2MP	Wireless	0	ACCESS_POINT_1	WIRELESS_NODE_6	14.000000	2.074250	2458320	0	True	6
1	P2MP	Wireless	0	WIRELESS_NODE_8	ACCESS_POINT_1	84.000000	2.458360	2458370	13440	True	7
1	P2MP	Wireless	0	WIRELESS_NODE_8	ACCESS_POINT_1	84.000000	2.458360	2458420	0	True	7
1	P2MP	Wireless	0	WIRELESS_NODE_8	ACCESS_POINT_1	84.000000	2.458360	2772330	0	True	7
1	P2MP	Wireless	0	ACCESS_POINT_1	WIRELESS_NODE_8	14.000000	2.772370	2772380	2240	True	8
1	P2MP	Wireless	0	ACCESS_POINT_1	WIRELESS_NODE_8	14.000000	2.772370	2772430	0	True	8
1	P2MP	Wireless	0	ACCESS_POINT_1	WIRELESS_NODE_8	14.000000	2.772370	3136440	0	True	8
1	P2MP	Wireless	0	WIRELESS_NODE_10	ACCESS_POINT_1	84.000000	3.136480	3136490	13440	True	9
1	P2MP	Wireless	0	WIRELESS_NODE_10	ACCESS_POINT_1	84.000000	3.136480	3136540	0	True	9
1	P2MP	Wireless	0	WIRELESS_NODE_10	ACCESS_POINT_1	84.000000	3.136480	4110550	0	True	9
1	P2MP	Wireless	0	WIRELESS_NODE_3	ACCESS_POINT_1	84.000000	4.110590	4110600	13440	True	10
1	P2MP	Wireless	0	WIRELESS_NODE_3	ACCESS_POINT_1	84.000000	4.110590	4110650	0	True	10
1	P2MP	Wireless	0	WIRELESS_NODE_3	ACCESS_POINT_1	84.000000	4.110590	4424560	0	True	10
1	P2MP	Wireless	0	ACCESS_POINT_1	WIRELESS_NODE_3	14.000000	4.424600	4424610	2240	True	11
1	P2MP	Wireless	0	ACCESS_POINT_1	WIRELESS_NODE_3	14.000000	4.424600	4424660	0	True	11
1	P2MP	Wireless	0	ACCESS_POINT_1	WIRELESS_NODE_3	14.000000	4.424600	4788670	0	True	11
1	P2MP	Wireless	0	WIRELESS_NODE_5	ACCESS_POINT_1	84.000000	4.788710	4788720	13440	True	12
1	P2MP	Wireless	0	WIRELESS_NODE_5	ACCESS_POINT_1	84.000000	4.788710	4788770	0	True	12
1	P2MP	Wireless	0	WIRELESS_NODE_5	ACCESS_POINT_1	84.000000	4.788710	5102680	0	True	12
1	P2MP	Wireless	0	ACCESS_POINT_1	WIRELESS_NODE_5	14.000000	5.102720	5102730	2240	True	13
1	P2MP	Wireless	0	ACCESS_POINT_1	WIRELESS_NODE_5	14.000000	5.102720	5102780	0	True	13
1	P2MP	Wireless	0	ACCESS_POINT_1	WIRELESS_NODE_5	14.000000	5.102720	5486790	0	True	13
1	P2MP	Wireless	0	WIRELESS_NODE_7	ACCESS_POINT_1	84.000000	5.486830	5486840	13440	True	14
1	P2MP	Wireless	0	WIRELESS_NODE_7	ACCESS_POINT_1	84.000000	5.486830	5486890	0	True	14
1	P2MP	Wireless	0	WIRELESS_NODE_7	ACCESS_POINT_1	84.000000	5.486830	5800800	0	True	14
1	P2MP	Wireless	0	ACCESS_POINT_1	WIRELESS_NODE_7	14.000000	5.800840	5800850	2240	True	15
1	P2MP	Wireless	0	ACCESS_POINT_1	WIRELESS_NODE_7	14.000000	5.800840	5800900	0	True	15
1	P2MP	Wireless	0	ACCESS_POINT_1	WIRELESS_NODE_7	14.000000	5.800840	6304910	0	True	15
1	P2MP	Wireless	0	WIRELESS_NODE_10	ACCESS_POINT_1	84.000000	6.304950	6304960	13440	True	16
1	P2MP	Wireless	0	WIRELESS_NODE_10	ACCESS_POINT_1	84.000000	6.304950	6305010	0	True	16
1	P2MP	Wireless	0	WIRELESS_NODE_10	ACCESS_POINT_1	84.000000	6.304950	6618920	0	True	16
1	P2MP	Wireless	0	ACCESS_POINT_1	WIRELESS_NODE_10	14.000000	6.618960	6618970	2240	True	17
1	P2MP	Wireless	0	ACCESS_POINT_1	WIRELESS_NODE_10	14.000000	6.618960	6619020	0	True	17

Figura 4.6: Link Throughput vs Time – Tabla 8 nodos y 1 punto de acceso

Las tablas de datos muestran la transmisión de paquetes entre diferentes nodos inalámbricos y el Access Point, se observa que los paquetes tienen tamaños de 84 y 14 bytes, y que el tráfico sigue un patrón de comunicación punto a multipunto. Además, los tiempos de transmisión física (Physical Out Time) e ingreso físico están bien definidos, lo que indica que no hay interrupciones abruptas en la comunicación. Uno de los aspectos importantes que se pueden observar en las tablas es que el Throughput (Mbps) fluctúa entre 0 Mbps y 13,440 Mbps, lo que indica que la red experimenta períodos de transmisión activa seguidos de pausas; esta

variabilidad puede deberse a la naturaleza de la comunicación inalámbrica y a la programación de transmisión en la red.

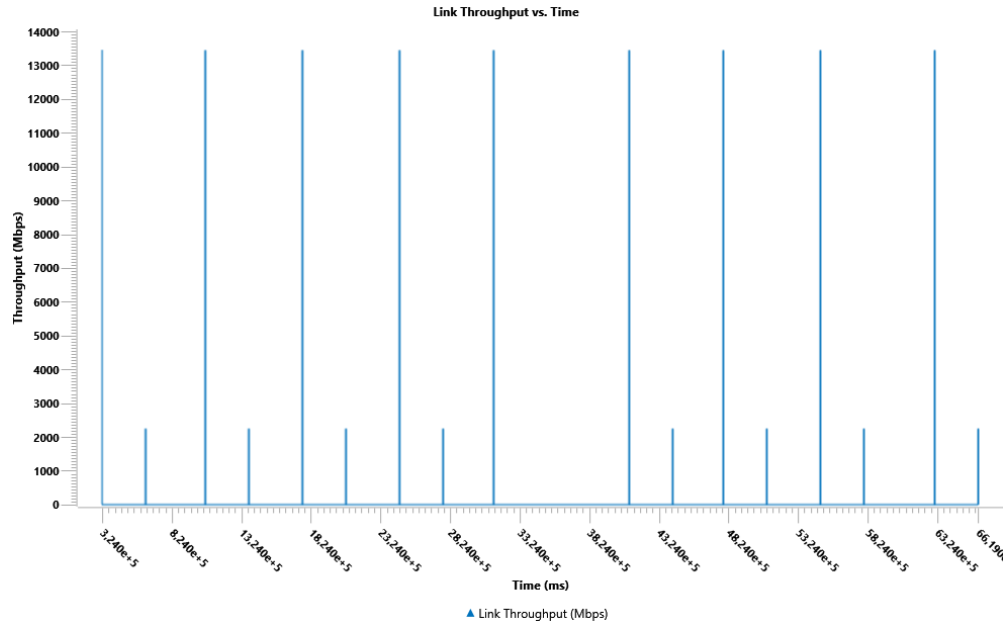


Figura 4.7: Link Throughput vs Time - Conexión hacia 8 nados y punto de acceso

El gráfico "Link Throughput vs Time" confirma este comportamiento, mostrando picos periódicos de throughput en intervalos regulares de tiempo. Se pueden notar valores de throughput que alcanzan los 13,440 Mbps en ciertos momentos, mientras que en otros la transmisión se reduce a 0 Mbps. Este comportamiento sugiere una comunicación intermitente en la red, donde los nodos transmiten en ráfagas en lugar de mantener un flujo continuo de datos.

- **Generation Rate vs Time**

En esta simulación, se ha analizado la transmisión de datos en la aplicación App1 CBR, donde WIRELESS NODE 3 actúa como el nodo de origen y WIRELESS NODE 2 como el nodo de destino. Los datos obtenidos muestran una generación de paquetes con un ritmo constante de 0.584 Mbps, lo cual es característico del tráfico CBR (Constant Bit Rate).

Time(ms)	Application Name	Application ID	Source	Destination	Packet ID	Generation Rate(Mbps)	IsVisible	ROWIndex
0.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	1	0.000000	✓	1
20.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	2	0.584000	✓	9
40.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	3	0.584000	✓	17
60.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	4	0.584000	✓	25
80.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	5	0.584000	✓	33
100.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	6	0.584000	✓	41
120.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	7	0.584000	✓	49
140.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	8	0.584000	✓	57
160.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	9	0.584000	✓	65
180.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	10	0.584000	✓	73
200.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	11	0.584000	✓	81
220.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	12	0.584000	✓	89
240.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	13	0.584000	✓	97
260.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	14	0.584000	✓	105
280.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	15	0.584000	✓	113
300.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	16	0.584000	✓	121
320.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	17	0.584000	✓	129
340.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	18	0.584000	✓	137
360.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	19	0.584000	✓	145
380.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	20	0.584000	✓	153
400.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	21	0.584000	✓	161
420.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	22	0.584000	✓	169
440.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	23	0.584000	✓	177
460.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	24	0.584000	✓	185
480.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	25	0.584000	✓	193
500.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	26	0.584000	✓	201
520.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	27	0.584000	✓	209
540.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	28	0.584000	✓	217
560.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	29	0.584000	✓	225
580.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	30	0.584000	✓	233
600.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	31	0.584000	✓	241
620.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	32	0.584000	✓	249
640.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	33	0.584000	✓	257
660.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	34	0.584000	✓	265
680.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	35	0.584000	✓	273
700.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	36	0.584000	✓	281
720.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	37	0.584000	✓	289
740.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	38	0.584000	✓	297
760.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	39	0.584000	✓	305
780.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	40	0.584000	✓	313
800.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	41	0.584000	✓	321
820.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	42	0.584000	✓	329
840.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	43	0.584000	✓	337
860.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	44	0.584000	✓	345
880.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	45	0.584000	✓	353
900.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	46	0.584000	✓	361
920.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	47	0.584000	✓	369
940.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	48	0.584000	✓	377
960.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	49	0.584000	✓	385
980.000000	App1_CBR	1	WIRELESS_NODE_3	WIRELESS_NODE_2	50	0.584000	✓	393

Figura 4.8: Generation Rate vs Time – Conexión hacia 8 nados y punto de acceso

En las tablas se representa la generación y el envío de paquetes en intervalos de 20 ms, manteniendo una distribución uniforme en el tiempo. Cada paquete enviado se identifica con un Packet ID único, y el tiempo de transmisión se incrementa progresivamente en cada entrada de la tabla. Esto confirma que el tráfico en la red se mantiene estable y predecible, sin interrupciones o fluctuaciones en la generación

de datos.

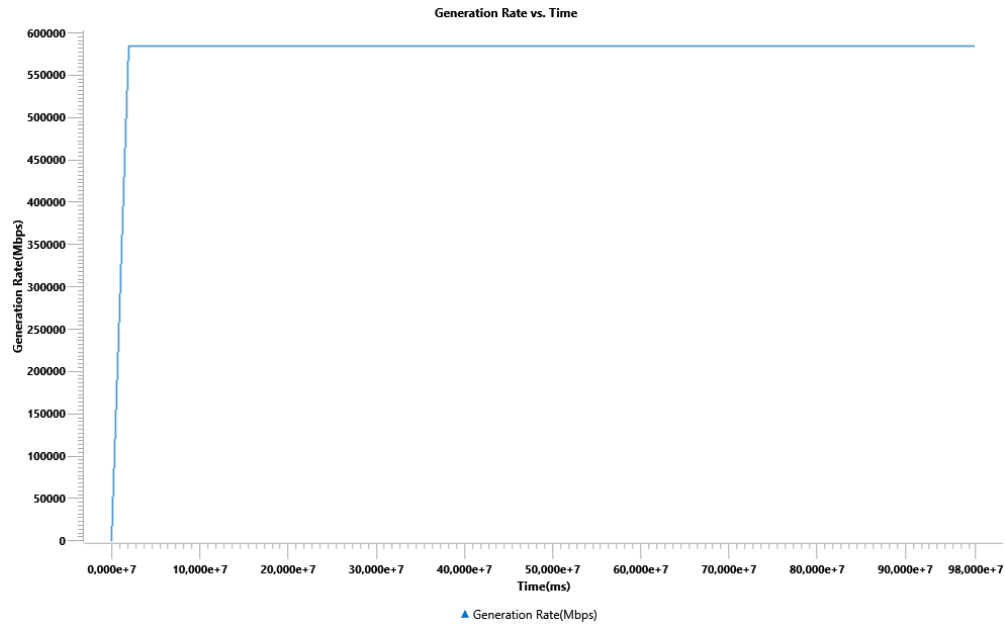


Figura 4.9: Generation Rate vs Time - Tabla 8 nodos y 1 punto de acceso

En cuanto al gráfico de "Generation Rate vs. Time" (Imagen 4), se observa un rápido aumento de la tasa de generación al inicio de la simulación, hasta alcanzar valores extremadamente elevados (cerca de 600,000 Mbps). Sin embargo, este incremento no refleja el tráfico real de la red, sino que parece ser una anomalía en la escala de visualización. Después del pico inicial, la tasa de generación de datos se estabiliza, alineándose con el comportamiento esperado de una transmisión CBR.

3. Simulación real

El objetivo principal de estas pruebas fue evaluar la viabilidad de la comunicación Wi-Fi para la transmisión de datos, como la temperatura, intensidad de señal Wi-Fi - RSSI y tiempo de actividad del dispositivo - Uptime, desde sensores distribuidos en las jaulas hacia una plataforma de monitoreo en la nube (ThingSpeak).

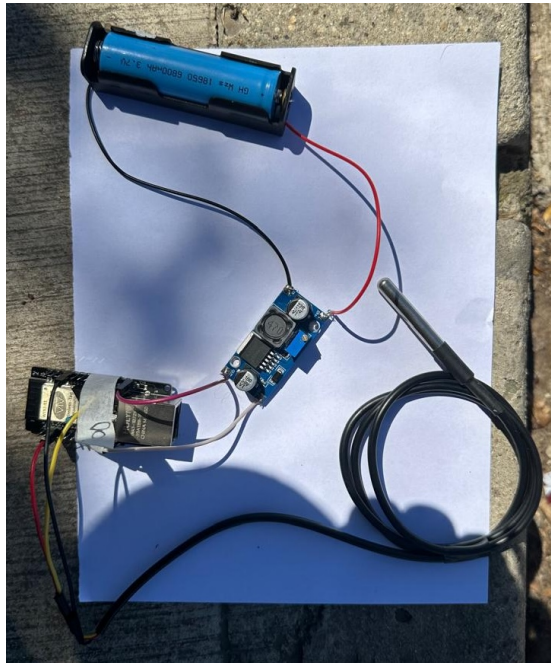


Figura 4.10: Vista de un nodo



Figura 4.11: Vista de los ocho nodos a utilizar

Cada boya del prototipo se implementó utilizando un microcontrolador ESP32 para la gestión de la lógica y la comunicación. El módulo sensor principal es un DS18B20,

seleccionado para la medición de temperatura. Para asegurar la alimentación estable y adecuada del microcontrolador y el sensor, el sistema utiliza una batería recargable de 3.7V (ej. 18650). Dado el bajo voltaje nominal de la batería, se integró un convertidor de voltaje DC-DC elevador (XL6009), programado para suministrar una tensión de salida constante de 5V. Esta arquitectura de potencia eficiente garantiza la operación continua del dispositivo y la precisión de la medición.

Se utilizaron ocho sensores ubicados en el centro de cada jaula (representados por círculos rojos en los cuadrados celestes) y un teléfono móvil y/o MiFi configurado como punto de acceso Wi-Fi ("router"), el primero de estos con una limitación de cinco dispositivos conectados simultáneamente. Las mediciones se realizaron entre las 18:00 y las 20:00 horas, en dos configuraciones distintas de la ubicación del "router".

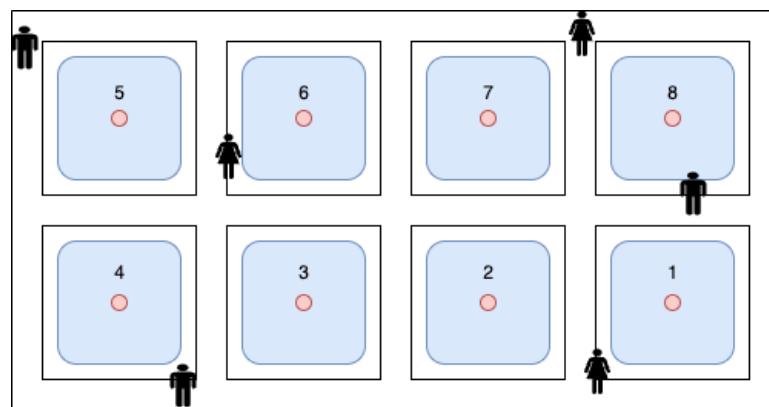


Figura 4.12: Distribución 8 Boyas en 8 piscinas

- Caso 1: Cancha Universidad Técnica Federico Santa María:

Para este escenario, se implementó un sistema de monitoreo compuesto por ocho dispositivos sensores, cada uno encargado de medir la temperatura ambiente, la intensidad de la señal Wi-Fi (RSSI) percibida y el tiempo de actividad acumulado desde su último encendido (Uptime). Estos dispositivos estaban posicionados de manera estratégica en el centro de cada una de las ocho jaulas que conforman el arreglo de 2x4 (Figura 4).



Figura 4.13: Imagen desde google maps sobre Cancha ubicada en Universidad Técnica Federico Santa María

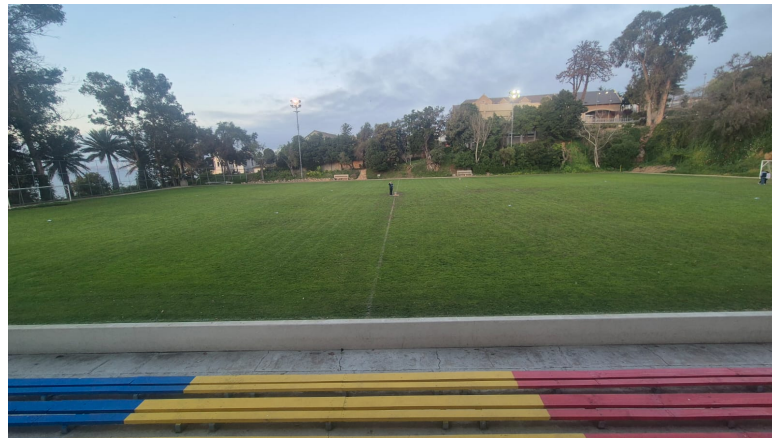


Figura 4.14: Vista lateral de Medición en Cancha UTFSM

La conectividad inalámbrica fue provista por un teléfono móvil actuando como un punto de acceso Wi-Fi (router), utilizando una conexión de datos móviles y con una capacidad máxima de cinco dispositivos conectados de forma simultánea. Esto implicó que, para las ocho jaulas, no todos los sensores pudieron transmitir datos al mismo tiempo, lo que introduce una variable de alternancia o cola en la transmisión.

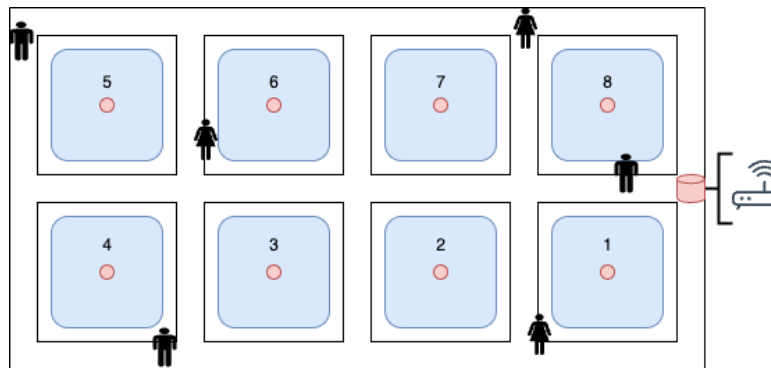


Figura 4.15: Distribución de boyas con Router en situado extremo

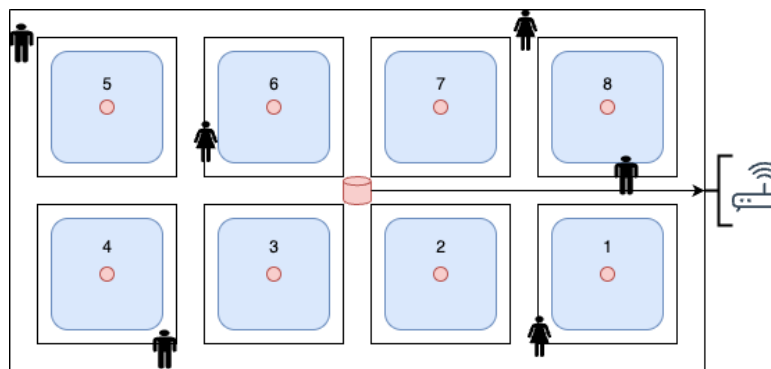


Figura 4.16: Distribución de boyas con Router situado en medio

El experimento se dividió en dos fases principales, diferenciadas por la ubicación del "router" Wi-Fi:

- Fase 1: El teléfono móvil ("router") se posicionó en el medio del grupo de jaulas 4.16. Durante esta fase, se recolectaron datos continuos de los sensores activos, evaluando la estabilidad de la señal y la consistencia de las mediciones bajo esta configuración centralizada.
- Fase 2: El "router" se reubicó hacia el extremo de las jaulas 4.15. Este cambio buscó analizar el impacto de una ubicación menos centralizada en la fuerza de la señal y la transmisión de datos, especialmente para los sensores más alejados.

Los datos de temperatura, RSSI y Uptime de cada sensor fueron enviados a ThingSpeak, donde se visualizaron en gráficos individuales por cada tipo de dato y por

cada sensor.

Temperatura:



Figura 4.17: Métricas Temperatura

- Fase 1: Similar al RSSI, los gráficos de temperatura, cuando presentan datos (ej. Field 2, 3, 5), muestran lecturas coherentes, indicando la capacidad de los sensores para medir y transmitir. La intermitencia es la principal característica.
- Fase 2: Se mantiene la intermitencia. No obstante, la continuidad de la trans-

misión de temperatura en sensores como Field 8, y la presencia de datos en otros puntos, corrobora que la reubicación no impidió la capacidad de los sensores para operar y transmitir su función principal una vez establecida la conexión.

RSSI:



Figura 4.18: Métricas RSSI

- Fase 1: Se observa una variabilidad considerable en los valores de RSSI entre los diferentes canales. Canales, como Field 2 y 5, muestran datos intermitentes sugiriendo desafíos en la conectividad inicial. Los valores, se mantienen

dentro de rangos esperables para Wi-Fi en un espacio abierto pero con múltiples receptores.

- Fase 2: Se aprecian cambios en el patrón de RSSI, especialmente en Field 8, donde se notan caídas significativas seguidas de recuperaciones, indicando que el posicionamiento del router afectó la señal de algunos sensores, obligándolos a reconectarse o experimentar una señal más débil debido a la distancia.

Uptime:



Figura 4.19: Métricas Uptime

- Fase 1: El Uptime, cuando se registra, muestra líneas ascendentes esperables. Las caídas bruscas a cero (ej. Field 2 y 5) son indicativos de reinicios de los dispositivos, lo cual es atribuible a la pérdida de conectividad por la saturación del "router".
- Fase 2 (Router a la derecha): Los patrones de Uptime se repiten, con reinicios continuos en varios sensores (ej. Field 5 y 8) a lo largo de esta fase. El hecho de que los dispositivos reinicien y luego vuelvan a acumular Uptime demuestra que son capaces de reconectarse y operar una vez que se libera un espacio de conexión en el "router" y que la señal les permite hacerlo en ambas ubicaciones del punto de acceso. La no constancia y los reinicios en ambas fases reafirman que la limitación de conexiones es el cuello de botella principal, más allá de la ubicación del "router".

La escasez generalizada de datos continuos en muchos canales a lo largo de ambas fases es el resultado principal de la limitación del "router". Por otro lado, los datos intermitentes que sí se registraron son indicativos de que, cuando se logra la conexión, la comunicación WiFi es funcional para las distancias y disposición de las jaulas.

Los resultados de estas pruebas ofrecen información valiosa sobre la implementación de un sistema de monitoreo basado en WiFi en un clúster de jaulas de salmón:

- Capacidad Funcional del WiFi a Distancias del Arreglo de Jaulas en Ambas Fases: A pesar de las limitaciones del "router", los datos intermitentes recolectados en ambas fases sugieren fuertemente que la tecnología WiFi es intrínsecamente capaz de cubrir las distancias y la disposición de las jaulas en la tipología. La presencia de datos de diversos sensores en distintas ubicaciones a lo largo del experimento, indica que la intensidad de la señal no es el impedimento fundamental, sino la gestión de las conexiones.
- Impacto de la Ubicación del Router: El cambio de ubicación del "router" (de central a derecha) generó fluctuaciones y posibles reinicios, lo que subraya la

importancia de una colocación estratégica y una posible optimización de la antena para asegurar una cobertura uniforme y robusta en todas las jaulas.

- Simetría Potencial de Cobertura: La configuración de las jaulas es simétrica, aunque los datos no pueden demostrar una simetría operativa constante debido a la limitación de conexiones, la viabilidad de conexión en diferentes puntos y en ambas configuraciones del router refuerza la hipótesis de que, con un router de mayor capacidad, se lograría una cobertura uniforme y simétrica en todas las jaulas permitiendo a todos los sensores funcionar simultáneamente y con estabilidad Los datos.
- Necesidad de un Router Dedicado: Para una implementación real con 8 o más sensores, es imperativo utilizar un router dedicado (como el MiFi MF937 que discutimos o un router WiFi industrial) que pueda manejar un número mayor de conexiones simultáneas de manera estable. Esto eliminaría la intermitencia y los reinicios observados, permitiendo un monitoreo continuo de todos los parámetros.
- Relevancia de los Parámetros Medidos: La medición de RSSI y Uptime resultó ser crucial. El RSSI confirmó la variación de la señal a lo largo del tiempo y según la ubicación, mientras que el Uptime fue un indicador directo de la estabilidad operativa de cada sensor, revelando problemas de conectividad o energía que no serían evidentes solo con la temperatura.

Este experimento resalta la importancia de considerar la capacidad del punto de acceso WiFi y su ubicación para garantizar un sistema de monitoreo robusto y confiable en entornos industriales como la acuicultura.

- Localización Achupallas Viña del Mar:

Para este segundo escenario, se mantuvo el sistema de monitoreo compuesto por ocho dispositivos sensores, posicionados de manera estratégica en el centro de cada una de las ocho jaulas que conforman el arreglo de 2x4. El entorno de las pruebas fue un lugar abierto con presencia de viento y obstáculos adicionales como edificaciones cercanas (casas u otras estructuras) que podrían introducir variaciones en

la propagación de la señal WiFi.



Figura 4.20: Imagen desde Google Maps en Sector Feria Achupallas, Viña del Mar



Figura 4.21: Vista lateral de Medición en sector Achupallas

La conectividad inalámbrica fue provista por un router MiFi MF937, utilizando una conexión de datos móviles. Es crucial destacar que este MiFi tenía una capacidad para diez dispositivos conectados de forma simultánea, superando el número de ocho sensores utilizados. Esto significa que la limitación de conexiones observada en el escenario anterior fue eliminada, permitiendo que todos los sensores intentaran conectarse y transmitir datos de manera concurrente. Cualquier intermitencia o ausencia de datos en este escenario, por lo tanto, se atribuye directamente a factores como la calidad de la señal WiFi (distancia, obstáculos).

El experimento se dividió en dos fases principales, diferenciadas por la ubicación del MiFi MF937, realizadas entre las 13:20 y las 13:50 horas:

- Fase 1 (13:20 - 13:35 horas): El MiFi MF937 se posicionó en un extremo del grupo de jaulas (similar a la configuración de la FASE 2 del Escenario 1, es decir, a la derecha del arreglo). Durante esta fase, se recolectaron datos para evaluar la conectividad cuando el punto de acceso está más alejado de algunos sensores y en presencia de obstáculos.

- Fase 2 (13:35 - 13:50 horas): El MiFi MF937 se reubicó hacia el medio del grupo de jaulas (similar a la configuración de la FASE 1 del Escenario 1, es decir, en el medio izquierdo del arreglo). Este cambio buscó analizar el impacto de una ubicación más centralizada en la fuerza de la señal y la transmisión de datos para el arreglo completo, considerando la presencia de obstáculos.

Los datos de temperatura, RSSI y Uptime de cada sensor fueron enviados a ThingSpeak, donde se visualizaron en gráficos individuales por cada tipo de dato y por cada sensor.

Temperatura:



Figura 4.22: Métricas Temperatura

- Fase 1 (MiFi en un extremo, 13:20 - 13:35): Los sensores 3, 5 y 8 muestran lecturas de temperatura consistentes. Es notable la ausencia total de datos en Field 1, 2, 4, 6 y 7. Esto indica que, a pesar de que el MiFi no estaba saturado, estos sensores no lograron establecer o mantener una conexión estable con el MiFi desde esta posición extrema. El Field 3 y 5 presentan una tendencia ascendente, mientras que el Field 8 muestra una subida más pronunciada.
- Los sensores 3, 5 y 8 continúan registrando datos, manteniendo la misma ten-

dencia y estabilidad. La persistencia de ausencia de datos en Field 1, 2, 4, 6 y 7, incluso con el MiFi en una posición más central, es un hallazgo crítico. Esto sugiere que la distancia o la presencia de obstáculos cercanos están afectando la conectividad de ciertos sensores de manera más significativa de lo esperado, o que los propios sensores tienen problemas intrínsecos de estabilidad.

RSSI:



Figura 4.23: Métricas RSSI

- Fase 1 (MiFi en un extremo, 13:20 - 13:35): Los sensores 3, 5 y 8 registran valores de RSSI. Field 3 muestra un RSSI fluctuante, pero funcional (alrede-

dor de -70 a -80 dBm). Field 5 presenta una señal más fuerte al inicio (-68 dBm), que mejora hacia -63 dBm. Field 8, al estar en el mismo lado que el MiFi, muestra una señal relativamente estable que mejora ligeramente. La ausencia de RSSI para los demás sensores confirma que no pudieron establecer una conexión WiFi estable desde esta posición del MiFi.

- Fase 2 (MiFi en el medio, 13:35 - 13:50): Tras la reubicación a la posición central, Field 3 y 5 continúan mostrando RSSI, con Field 5 mejorando su señal (haciéndose menos negativo), lo cual es coherente con la posición más central del MiFi. Field 8 mantiene un buen RSSI. La persistencia de la ausencia de RSSI en Field 1, 2, 4, 6 y 7 en ambas fases es un indicativo claro de desafíos en la propagación de la señal Wi-Fi hacia esas jaulas, o de problemas con los propios sensores, incluso con un router de alta capacidad.

Uptime:



Figura 4.24: Métricas Uptime

- Fase 1 (MiFi en un extremo, 13:20 - 13:35): Los sensores 3, 5 y 8 muestran una línea ascendente y constante en su Uptime, indicando una operación continua y sin reinicios durante este periodo. El Field 7 muestra un único punto de lectura de Uptime, lo cual es esporádico. La estabilidad de Uptime en los sensores activos demuestra que, una vez conectados, la conexión WiFi del MiFi era robusta.
- Fase 2 (MiFi en el medio, 13:35 - 13:50): Los sensores 3, 5 y 8 continúan con una línea ascendente en el Uptime, confirmando una operación estable y

sin reinicios incluso después de la reubicación del MiFi a una posición central. Field 6 también muestra un punto de lectura esporádica. La ausencia de Uptime en los otros sensores, y la falta de cambios en esta situación incluso con el MiFi en una posición central, refuerza la idea de que estos sensores enfrentan desafíos significativos para establecer la conexión WiFi, más allá de la saturación del router.

La ausencia persistente de datos en Field 1, 2, 4, 6 y 7 a lo largo de ambas fases, a pesar de que el MiFi soporta hasta 10 conexiones, indica que el problema no es la capacidad del router, sino la capacidad de la señal WiFi para llegar a esos puntos específicos o la estabilidad de los propios dispositivos sensores.

Los resultados de estas pruebas del Escenario 2, utilizando un MiFi MF937, arrojan conclusiones más críticas:

- Conectividad WiFi No Uniforme a Pesar del Router Dedicado: Contrario a lo esperado con un MiFi de alta capacidad, la persistente ausencia de datos en más de la mitad de los sensores (Field 1, 2, 4, 6, 7) a lo largo de ambas fases (MiFi en el extremo y en el medio) indica que la conectividad WiFi no es uniforme ni completamente robusta en todas las jaulas. Esto sugiere que la distancia combinada con la presencia de obstáculos cercanos (edificaciones) o quizás una baja potencia de transmisión de los ESP32, sí están afectando la capacidad de algunos sensores para establecer una conexión estable.
- No Hay Evidencia de Simetría Operativa Completa: A diferencia de la expectativa de simetría planteada, la observación es que, mientras algunos sensores (3, 5, 8) funcionan con notoria estabilidad, otros (1, 2, 4, 6, 7) no logran conectarse consistentemente en ninguna de las configuraciones del MiFi. La intermitencia observada en algunos gráficos del escenario 1 parecía ser por la saturación, pero aquí, con un MiFi sin saturación, la falla en la conexión persistente apunta a problemas de cobertura de señal WiFi en puntos específicos del arreglo.
- Robustez de los Sensores Conectados: Para los sensores que sí lograron conec-

tarse y transmitir (Field 3, 5 y 8), el rendimiento fue muy estable, evidenciado por la constante línea ascendente en el Uptime y la variabilidad controlada del RSSI y la temperatura. Esto demuestra que, cuando una conexión WiFi es establecida y mantenida, el sistema funciona de manera confiable, incluso en condiciones ambientales de viento y obstáculos.

- Ubicación del MiFi: El cambio del MiFi de una posición extrema a una central no logró mejorar la conectividad de los sensores que no estaban transmitiendo. Si bien pudo haber optimizado el RSSI para los sensores ya conectados (ej. Field 5), no resolvió los problemas de los sensores sin datos. Esto subraya que la estrategia de ubicación es importante, pero no la única solución para las deficiencias de cobertura.
- Reevaluación de la Cobertura WiFi: Los resultados de este escenario indican que la propagación de la señal Wi-Fi estándar puede ser un desafío para cubrir todas las 8 jaulas en presencia de obstáculos, o que algunos de los 8 sensores presentan fallos.

Este segundo experimento, eliminando la limitación de conexiones del router, revela que la tecnología WiFi enfrenta desafíos reales para proporcionar cobertura uniforme y robusta en todas las jaulas de la tipología presentada, particularmente en presencia de obstáculos cercanos.

Los dos escenarios de prueba en la salmonera revelaron que la viabilidad del monitoreo WiFi es heterogénea y depende críticamente de factores más allá de la mera capacidad del router, indicando que el WiFi estándar tiene limitaciones significativas para cubrir de forma robusta y simétrica todas las jaulas de la salmonera, debido a la combinación de distancia y obstáculos. La expectativa de una cobertura uniforme basada en la simetría del arreglo no se cumplió, este hallazgo subraya la necesidad de estrategias de conectividad más robustas y fiables.

Para asegurar un monitoreo completo y consistente de todas las jaulas, es imperativo considerar alternativas o complementos al WiFi, como múltiples puntos de acceso, mejoras en la infraestructura de antenas, o la adopción de tecnologías de largo alcance como

LoRaWAN, que puedan superar las deficiencias de cobertura observadas en el entorno real de la salmonera.

Capítulo 5

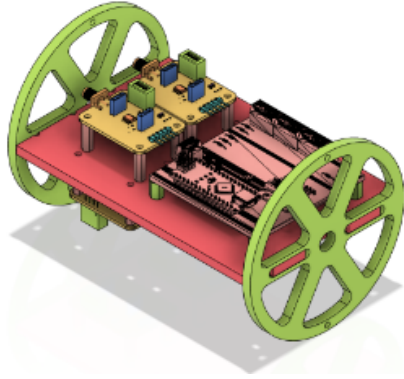
Diseño propuesto para ROV

El desarrollo de un sistema de comunicación que será utilizado junto a un Vehículo Operado Remotamente (ROV) se enfocó en garantizar una transmisión que sea eficiente y segura de los datos en un entorno submarino mediante conexión Ethernet. Este sistema utiliza protocolos TCP/IP para la transferencia confiable de parámetros necesarios como el pH, temperatura, oxígeno disuelto y la conductividad, implementando cifrado AES-128 para proteger la integridad de la información. A través de simulaciones y pruebas prácticas, se evalúan la latencia, estabilidad y la eficiencia del sistema, validando el desempeño en tiempo real y su capacidad de operar bajo condiciones exigentes.

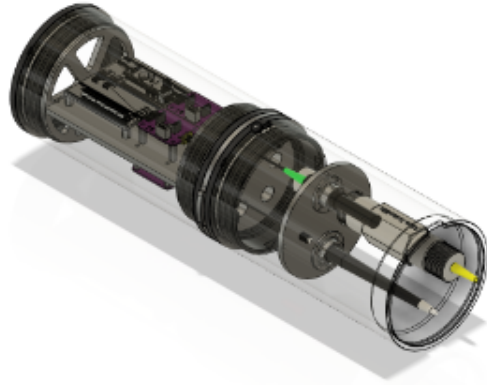
5.1 Hardware

Para el sistema de monitoreo desarrollado, se incorpora una integración de distintos componentes electrónicos diseñados para operar en condiciones subacuáticas y garantizar la transmisión eficiente de los datos en tiempo real. En primer lugar se encuentra el microcontrolador ESP8266, actuando como el componente que integra el resto de los siguientes a mencionar, se ancarfa de gestionar la comunicación y el procesamiento de datos, Este microcontrolador está complementado por un módulo Ethernet w5500, que asegura una conexión estable y de alta velocidad, ideal para la transmisión que sea confiable de datos

desde el entorno acuático a la estación base en un dispositivo.



(a) Diseño componentes electrónicos



(b) Diseño completo

El sistema llega a integrar una variedad de sensores especializados en el entorno de monitoreo de parámetros críticos del agua. Se utilizó un sensor BME280 que se utiliza para medir presión, temperatura y humedad dentro de la cápsula, así poder garantizar un ambiente controlado para prevenir daños internos del hardware. Por otro lado, los sensores EZO permiten la medición precisa de los parámetros esenciales del agua como el pH, la salinidad, la temperatura y el oxígeno disuelto; siendo así fundamentales para evaluar la calidad del ambiente acuático en el que se crían los peces. Estos sensores se llegan a conectar al microcontrolador a través de un bus I2C, lo que permite una comunicación eficiente y tiene una fácil integración de múltiples dispositivos.

Además, el sistema emplea un convertidor ADS1115 para poder transformar las señales analógicas, que se obtienen de los sensores, en datos digitales para mejorar la precisión en la captura de la información y el procesamiento de esta misma. Logrando asegurar un suministro eléctrico constante y estable. También se incorporó una fuente LM2596 para prevenir fluctuaciones en la alimentación que podrían comprometer el funcionamiento del sistema completo.

Este diseño permite la recolección de datos confiables en tiempo real, asegurando su procesamiento y transmisión sin interrupciones. La arquitectura implementada no solo optimiza el rendimiento del sistema, sino que también facilita su adaptabilidad para futuras expansiones o ajustes, dependiendo de las necesidades específicas del entorno operativo.

5.2 Comunicación

En esa ocasión, se diseñó un sistema de comunicación centrada en establecer una conexión confiable y de alta velocidad para transmitir datos críticos en tiempo real, desde el entorno submarino hacia una estación base ubicada en superficie. Se seleccionó la tecnología por cable Ethernet como el principal medio de transmisión, dada la capacidad que tiene para manejar un gran volumen de datos de manera estable y con una baja latencia, incluso en entornos que contengan todo tipo de interferencias.

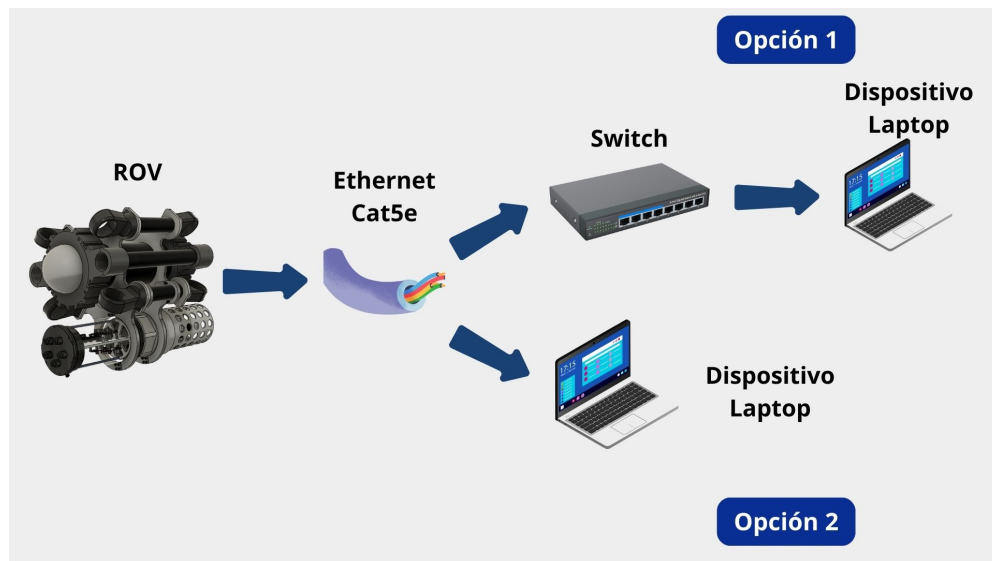


Figura 5.1: Diagrama de Comunicación Sistema ROV

Según la información recolectada de diferentes tipos de cable ethernet, para este proyecto se a seleccionado el cable Ethernet categoría 5e. Este permite una velocidad de transmisión de hasta 1 Gbps para distancias de hasta 100 metros, siendo esto suficiente para garantizar que los datos obtenidos por los sensores integrados al sistema del robot submarino sean

enviados de manera confiable a la estación base. Si bien este no ofrece las mismas capacidades de velocidad que un cable categoría 6a, el Cat5e cumple con los requisitos actuales del sistema en términos de estabilidad y costo, lo que lo hace adecuado para esta implementación específica. Además, el uso de conectores submarinos que sean especializados asegura la integridad de la red y protege contra la entrada de agua, esencial en un entorno subacuático.

El sistema propuesto emplea el protocolo TCP/IP, estándar en redes de datos, para estructurar y transportar la información de forma eficiente y segura. Este protocolo es compatible con la mayoría de los sistemas de monitoreo, visualización en superficie y facilita la integración con plataformas de análisis existentes. Por otro lado, como medida de seguridad, el diseño incorpora el cifrado AES-128 para proteger la información capturada, permaneciendo segura frente a accesos no autorizados, especialmente en aplicaciones críticas donde la confidencialidad de los datos es primordial.

De igual manera el diseño está creado con un enfoque escalable, permitiendo futuras actualizaciones o, incluso, integrar otros tipos de componentes como la conexión de varios dispositivos ROV mediante switch ethernet submarinos o la adición de nodos para monitoreo distribuido en tiempo real. La implementación de esta categoría de cable ethernet es mas limitada pero es una solución práctica y eficiente, alineada con los objetivos actuales del sistema de monitoreo.

5.3 Simulación

- **Simulación en Cisco Packet Tracer**

En esta simulación, realizada en Cisco Packet Tracer, se emuló una red cableada utilizando un conmutador (Switch 2960-24TT) y dos dispositivos representados como laptops, que actúan como el ROV y la estación base. El objetivo principal de esta simulación fue validar

la transmisión de datos a través de un entorno controlado que imita las condiciones de la red utilizada por el ROV en un escenario acuático controlado.

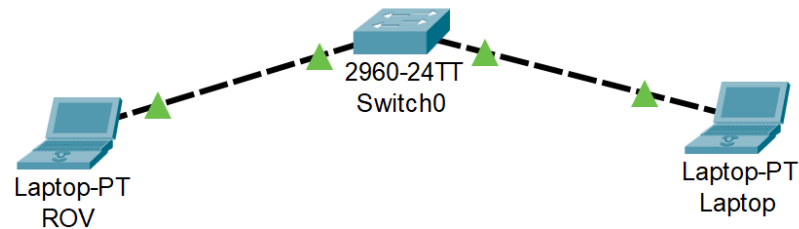


Figura 5.2: Diagrama de Comunicación Cisco Packet Tracer para ROV

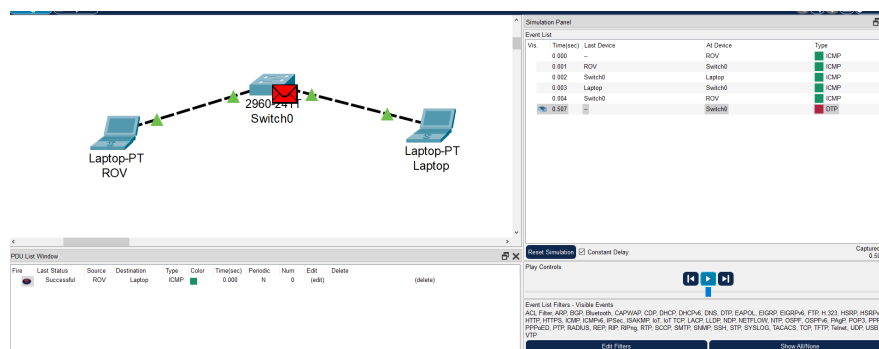


Figura 5.3: Envío de paquete de datos en Cisco Packet Tracer

La integración al ROV, simbolizado como una laptop, envía datos hacia la estación base a través del switch. Se emplearon paquetes ICMP (Internet Control Message Protocol) para verificar la conectividad entre los dispositivos. La simulación demostró que los paquetes se enviaron correctamente desde el ROV hacia la estación base, pasando por el switch, lo que garantiza que la configuración de la red permite una comunicación bidireccional efectiva. Esta transmisión se validó mediante los logs generados, que mostraron tiempos de respuesta consistentes y sin errores de conexión.

El switch utilizado en la simulación representa una pieza clave de infraestructura, ya que permite la interconexión de múltiples dispositivos, asegurando que los datos se transmitan

sin interferencias. La representación gráfica y los datos del panel de simulación destacan que cada paso del flujo de datos fue exitoso, con tiempos de transmisión mínimos que son cruciales para aplicaciones en tiempo real como el monitoreo de parámetros submarinos.

- **Simulación NetSim**

La imagen presentada muestra una topología de red cableada modelada en NetSim, donde se observa la interconexión de tres dispositivos principales: un router y dos nodos cableados. El router actúa como el dispositivo central de la red, facilitando la comunicación entre los nodos finales. En la imagen, Wired Node 1 está conectado directamente al Router 2, mientras que Wired Node 3 también se enlaza con el router a través de una conexión independiente.

Además, se puede ver un flujo de datos identificado como App1 CBR entre Wired Node 1 y Wired Node 3, lo que sugiere que en la simulación se está transmitiendo tráfico con una tasa de bits constante (CBR - Constant Bit Rate). Este tipo de tráfico es común en aplicaciones que requieren un flujo estable de datos, como en transmisión de voz sobre IP (VoIP) o video en streaming. Las líneas de conexión entre los dispositivos indican los enlaces utilizados en la red y las direcciones en las que se transfiere la información.

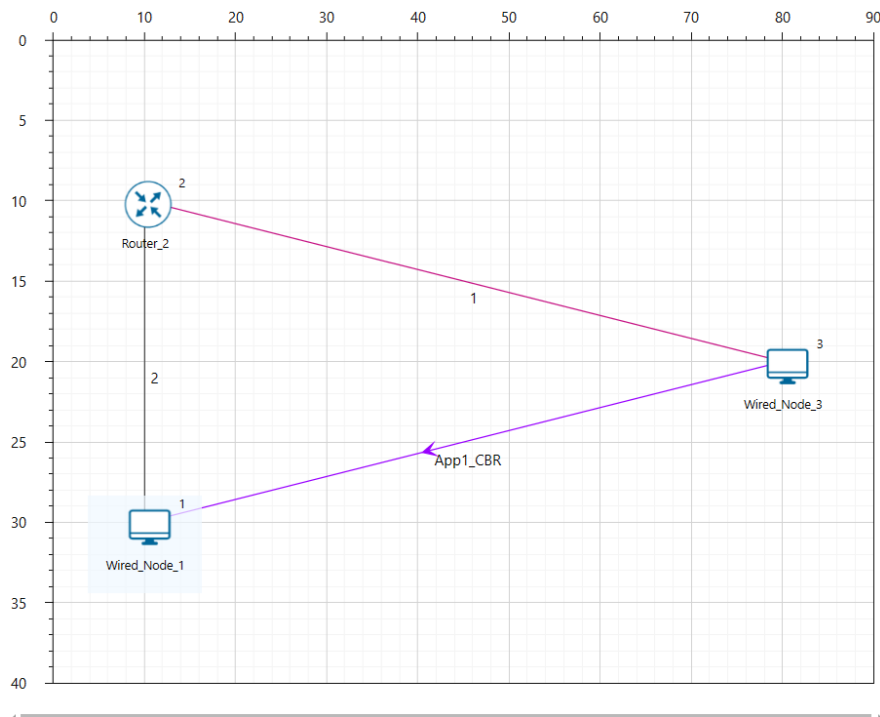


Figura 5.4: Red NetSim para comunicación ROV

A partir de esta configuración, el siguiente paso es realizar un análisis detallado del rendimiento de la red basado en los tres gráficos obtenidos en la simulación anterior. Dicho análisis permitirá evaluar métricas como el retardo de red, el ancho de banda utilizado y la tasa de pérdida de paquetes, proporcionando una visión clara del comportamiento de la red y de posibles mejoras en su diseño o configuración.

– Link Throughput vs Time

En la simulación de red presentada, se analiza el throughput o tasa de transmisión de datos en un enlace punto a punto (P2P) cableado entre un nodo cableado (WIRED NODE 3) y un router (ROUTER 2). La tabla de datos muestra dos registros clave sobre el tráfico en esta conexión. En la primera entrada, el throughput alcanza los 12.48 Gbps (12480 Mbps), mientras que en la segunda cae abruptamente a 0 Mbps, lo que sugiere una interrupción en la transmisión. Además, se observa que el tiempo de salida física del paquete desde el nodo transmisor es 0.001584 ms, mientras que el tiempo de entrada física al receptor varía, indicando que hubo una diferencia en la recepción de paquetes.

Link Id	Link Type	Link Medium	Packet Id	Transmitter	Receiver	Packet Size(Bytes)	Physical Out Time(ms)	Physical In Time(ms)	Throughput(Mbps)	IsVisible	RowIndex
1	P2P	Wired	0	WIRED_NODE_3	ROUTER_2	78.000000	0.001584	6584	12480	True	1
1	P2P	Wired	0	WIRED_NODE_3	ROUTER_2	78.000000	0.001584	6634	0	True	1

Figura 5.5: Link Throughput vs Time

Para visualizar mejor este comportamiento, se incluye un gráfico de Throughput vs. Tiempo, el cual muestra una disminución lineal en la tasa de transmisión a lo largo del tiempo. Al inicio de la medición, el throughput es alto (12.48 Gbps), pero conforme avanza el tiempo, cae de manera progresiva hasta llegar a 0 Mbps en aproximadamente 50 ms. Este comportamiento puede estar relacionado con diversas causas, tales como una interrupción en el enlace físico, congestión en la red, finalización de la transmisión o problemas en la configuración del enrutamiento.

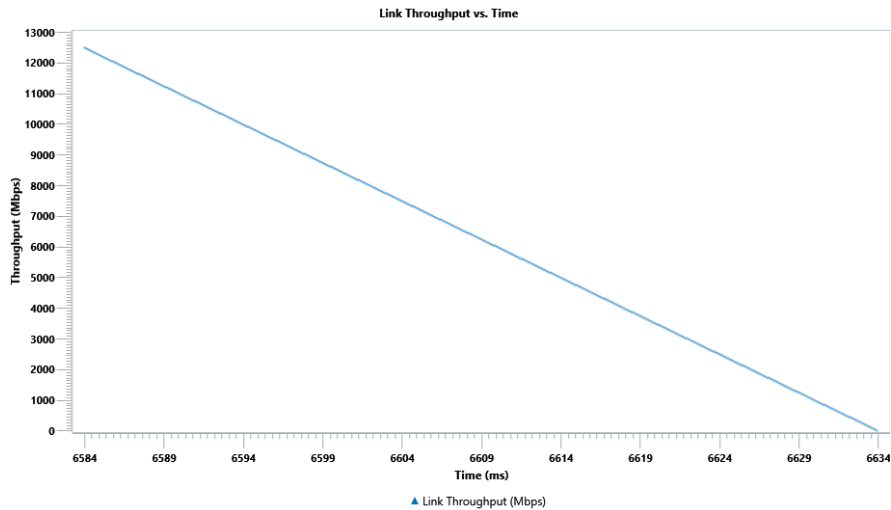


Figura 5.6: Link Throughput vs Time

En conclusión, la simulación muestra que, a pesar de un inicio con alto rendimiento, la tasa de transmisión se reduce rápidamente hasta detenerse por completo. Es recomendable revisar los eventos de la red, la configuración de los dispositivos y posibles errores en la simulación para identificar con mayor precisión el origen de esta caída en el rendimiento.

– Occupied Buffer Size vs Time

En esta simulación de red, se analiza el comportamiento del búfer ocupado en la inter-

faz Ethernet del nodo WIRED NODE 3 a lo largo del tiempo. La tabla de datos muestra dos registros clave que reflejan la dinámica del almacenamiento y transmisión de paquetes en la interfaz Interface 1 (ETHERNET). Inicialmente, en el tiempo 0.000000 microsegundos, el búfer recibe un paquete de 52 bytes, lo que se registra como un evento de ENQUEUE. Inmediatamente después, en el mismo instante, el paquete es retirado del búfer, dejando un tamaño ocupado de 0 bytes, identificado como un evento DEQUEUE. Este comportamiento sugiere que la red opera con un flujo de paquetes sin congestión, donde los datos ingresan y son transmitidos casi instantáneamente.

Time (Microseconds)	Device ID	Device Name	Interface ID	Interface Name	Occupied Buffer Size (Bytes)	Total Buffer Size (MB)	Virtual Interface Name	Remarks	IsVisible	RowIndex
0.000000	3	WIRED_NODE_3	1	Interface_1 (ETHERNET)	52.000000	inf	N/A	ENQUEUE	☒	1
0.000000	3	WIRED_NODE_3	1	Interface_1 (ETHERNET)	0.000000	inf	N/A	DEQUEUE	☒	2

Figura 5.7: Occupied Buffer Size vs Time

Para visualizar mejor este comportamiento, el gráfico de Occupied Buffer Size vs. Time representa cómo el tamaño del búfer cambia en función del tiempo. Se observa un pico abrupto al inicio, donde el búfer se ocupa momentáneamente, seguido de una caída inmediata a 0 bytes. Esto confirma que los paquetes son despachados sin retrasos y sin acumulación de datos en la interfaz de red. Es importante notar que la interfaz opera con un búfer infinito (inf), lo que implica que en esta simulación no hay restricciones en el almacenamiento de paquetes. Sin embargo, en una red real, los búferes tienen límites físicos, y su congestión podría afectar significativamente el rendimiento de la transmisión de datos.

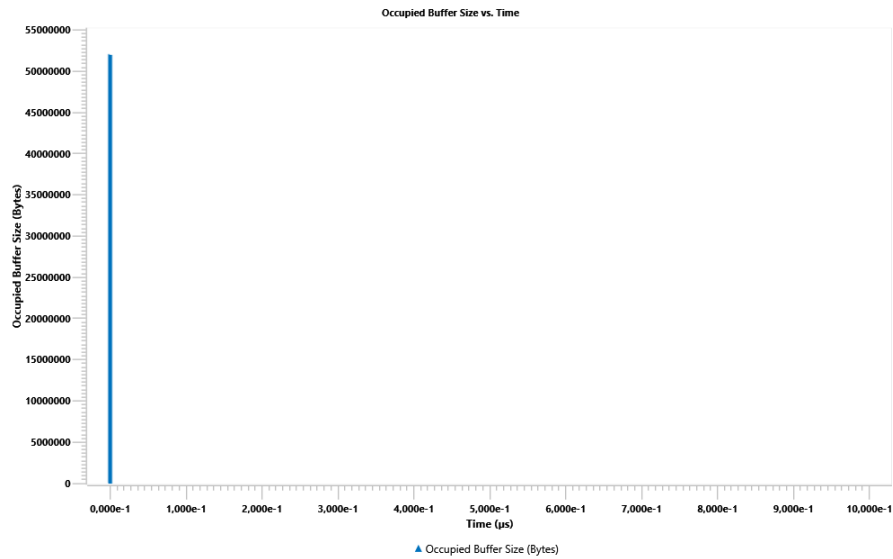


Figura 5.8: Occupied Buffer Size vs Time

En conclusión, esta simulación refleja un sistema de transmisión altamente eficiente, donde los paquetes no experimentan retención en la cola de la interfaz, sino que son procesados de inmediato. Este comportamiento es ideal en términos de latencia, pero en una implementación real, sería necesario considerar las limitaciones del hardware y las posibles congestiones en el tráfico de red que podrían generar retardos en el despacho de los paquetes.

– Generation Rate vs Time

En esta simulación de red, se evalúa la tasa de generación de paquetes en una conexión cableada entre WIRED NODE 3 y WIRED NODE 1 a lo largo del tiempo. La tabla de datos muestra el tráfico generado por la aplicación App1 CBR, identificada con un ID de aplicación 1. Se observa que los paquetes son generados de manera constante cada 20 ms, con una tasa fija de 0.584 Mbps. Esta generación constante de tráfico sugiere una aplicación con transmisión de datos continua y estable, sin variaciones significativas en la tasa de generación.

Time(ms)	Application Name	Application ID	Source	Destination	Packet ID	Generation Rate(Mbps)	IsVisible_	RowIndex_
0.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	1	0.000000	☑	1
20.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	2	0.584000	☑	2
40.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	3	0.584000	☑	3
60.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	4	0.584000	☑	4
80.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	5	0.584000	☑	5
100.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	6	0.584000	☑	6
120.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	7	0.584000	☑	7
140.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	8	0.584000	☑	8
160.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	9	0.584000	☑	9
180.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	10	0.584000	☑	10
200.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	11	0.584000	☑	11
220.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	12	0.584000	☑	12
240.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	13	0.584000	☑	13
260.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	14	0.584000	☑	14
280.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	15	0.584000	☑	15
300.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	16	0.584000	☑	16
320.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	17	0.584000	☑	17
340.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	18	0.584000	☑	18
360.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	19	0.584000	☑	19
380.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	20	0.584000	☑	20
400.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	21	0.584000	☑	21
420.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	22	0.584000	☑	22
440.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	23	0.584000	☑	23
460.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	24	0.584000	☑	24
480.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	25	0.584000	☑	25
500.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	26	0.584000	☑	26
520.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	27	0.584000	☑	27
540.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	28	0.584000	☑	28
560.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	29	0.584000	☑	29
580.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	30	0.584000	☑	30
600.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	31	0.584000	☑	31
620.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	32	0.584000	☑	32
640.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	33	0.584000	☑	33
660.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	34	0.584000	☑	34
680.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	35	0.584000	☑	35
700.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	36	0.584000	☑	36
720.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	37	0.584000	☑	37
740.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	38	0.584000	☑	38
760.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	39	0.584000	☑	39
780.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	40	0.584000	☑	40
800.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	41	0.584000	☑	41
820.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	42	0.584000	☑	42
840.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	43	0.584000	☑	43
860.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	44	0.584000	☑	44
880.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	45	0.584000	☑	45
900.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	46	0.584000	☑	46
920.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	47	0.584000	☑	47
940.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	48	0.584000	☑	48
960.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	49	0.584000	☑	49
980.000000	App1_CBR	1	WIRED_NODE_3	WIRED_NODE_1	50	0.584000	☑	50

Figura 5.9: Generation Rate vs Time – Tabla - Entre el nodo y centro de control

Para visualizar este comportamiento, se presenta un gráfico de Generation Rate vs. Time, donde se observa que la tasa de generación de datos se mantiene constante a lo largo del tiempo. Sin embargo, un aspecto curioso del gráfico es que muestra un pico extremadamente alto al inicio, lo cual podría deberse a un error de escala o a la forma en que el software está representando los datos. En la realidad, la generación de tráfico

debería mantenerse en valores cercanos a los 0.584 Mbps sin esos valores atípicos.

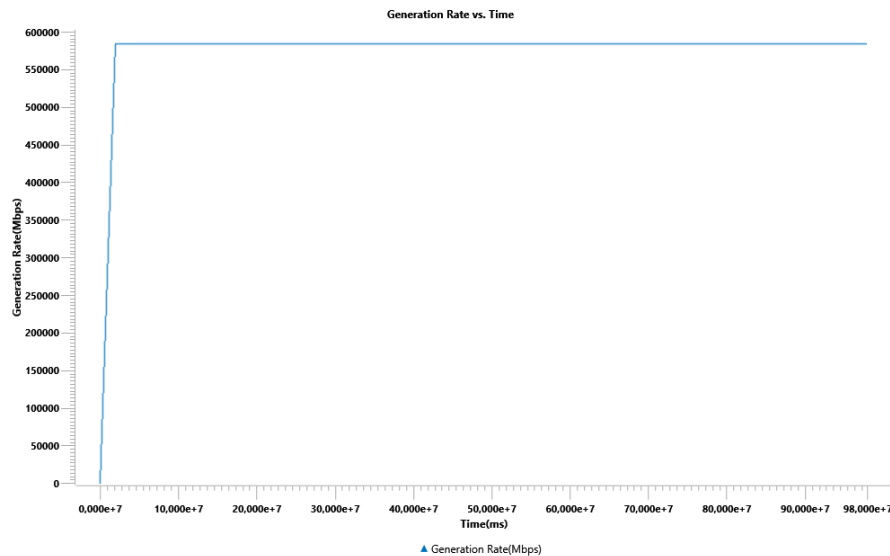


Figura 5.10: Generation Rate vs Time

En conclusión, la simulación muestra un flujo constante de generación de tráfico, lo que indica un patrón predecible y uniforme en la transmisión de datos. Sin embargo, es recomendable revisar la configuración del gráfico para verificar que los valores atípicos no estén afectando la interpretación real del comportamiento de la red.

- **Simulación utilizando un sensor**

5.4 Interfaz

La interfaz del sistema fue diseñada para facilitar la visualización, análisis y exploración de los parámetros ambientales monitoreados. Se implementaron dos vistas principales:

- **Dashboard:** Presenta gráficos en tiempo real con datos como temperatura, pH, oxígeno disuelto y salinidad, además de promedios diarios y comparaciones por periodo. Esta vista permite al usuario interpretar rápidamente el estado del entorno acuático.

- **Histórico de Datos:** Muestra registros pasados en formato tabular, permitiendo revisar fechas, valores medidos y su estado. Incluye filtros para facilitar la exploración de los datos recolectados por parámetro y por fecha.



Figura 5.11: Dashboard - Vista Principal

The dashboard displays a table of historical data for Temperature. The table has columns for #, Sensor, Fecha, Estado, and Valor. The data shows four readings from 23/04/2024 to 24/04/2024, with states ranging from Bueno to Urgente.

#	Sensor	Fecha	Estado	Valor
01	Temperatura	23/04/2024 - 13:00	Bueno	18°C
02	Temperatura	23/04/2024 - 13:30	Medio	17°C
03	Temperatura	23/04/2024 - 14:00	Medio	16°C
04	Temperatura	24/04/2024 - 05:00	Urgente	15°C

Figura 5.12: Vista de Histórico de Datos

5.5 Prototipo físico

Para una validación práctica del diseño propuesto, se desarrolló un prototipo físico del sistema, el cual integra los componentes eléctricos dentro de una cápsula según las necesidades submarinas a cubrir. Este prototipo está diseñado para simular el entorno de un ROV submarino, permitiendo la recolección de datos bajo circunstancias controladas.

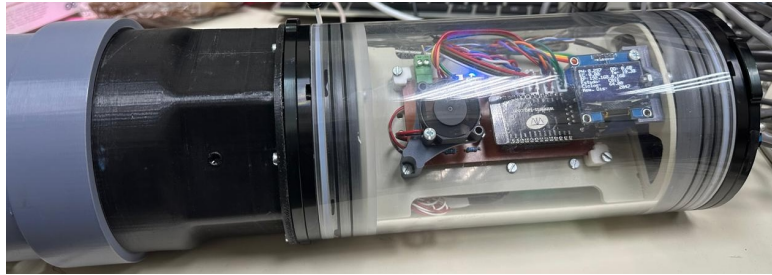


Figura 5.13: Nodo submarino para monitoreo que se conecta directamente al ROV.

El módulo del ROV incorpora una placa desarrollada con especificaciones para la medición de parámetros críticos de la calidad del agua, abarcando los cuatro sensores cruciales (pH, temperatura, salinidad y oxígeno disuelto) para la acuicultura. El éxito de este prototipo radica en la validación de la arquitectura de conectividad y potencia:

Para llevar a cabo las pruebas del funcionamiento y la transmisión de los datos, se utilizó un cable Ethernet de Categoría 6 (CAT6). Cable que fue modificado para permitir tanto la transmisión de datos como el abastecimiento de energía, buscando la optimización de la conectividad y la disminución de complejidad de la conexión al ROV y al punto de conexión. Se observa la adaptación del cable en la figura



Figura 5.14: Cable conexión Ethernet + fuente de energía

Durante las pruebas, el sistema tiene el código precargado en su placa para la adquisición de la data y se logra la conexión a través de Ethernet. Los datos recopilados fueron enviados a la plataforma ThingSpeak, servicio en la nube que permite tanto el almacenamiento como la visualización de manera gráfica en tiempo real de los parámetros medidos.

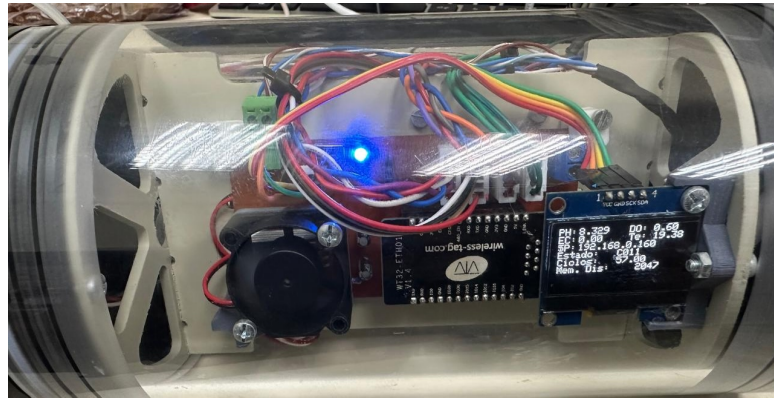


Figura 5.15: Sistema recolectando data

Channel Stats

Created: [2 months ago](#)
 Last entry: [about a month ago](#)
 Entries: 220

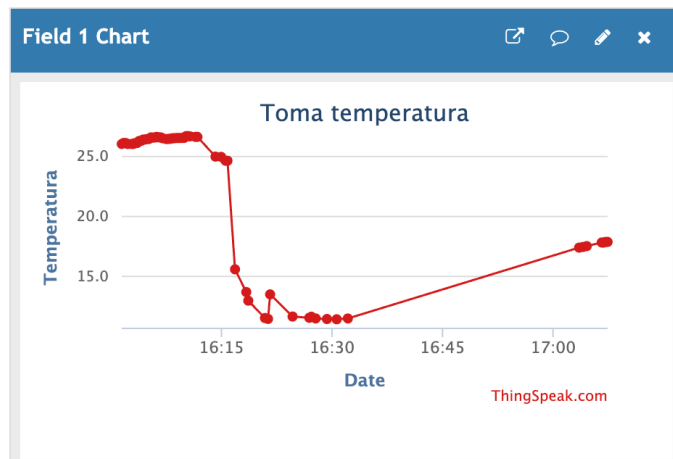


Figura 5.16: Datos en ThingSpeak

En la figura se observan los datos de temperatura registrados y graficados en ThingSpeak, la toma de datos en tiempo real cada 5 segundos, con una transmisión exitosa a través de Ethernet, demuestra la funcionalidad completa y la fiabilidad del prototipo en su tarea principal.

Capítulo 6

Validación y Verificación

6.1 Resultados

Los resultados obtenidos en este proyecto permitieron validar de manera integral los objetivos planteados inicialmente, destacando tanto los avances tecnológicos implementados como su impacto en el monitoreo acuícola. Se diseñaron y evaluaron dos sistemas diferenciados: un dispositivo de monitoreo tipo boya con comunicación inalámbrica Wi-Fi y un sistema basado en un ROV con conexión cableada Ethernet. Ambos enfoques se probaron bajo diferentes condiciones, asegurando su integridad, seguridad y confiabilidad en la transmisión de datos.

Para evaluar el rendimiento de la transmisión de datos, se realizaron pruebas con ambos sistemas en diferentes escenarios. Se consideraron métricas clave como latencia, tasa de éxito en la transmisión y seguridad de los datos.

6.1.1 Sistema Inalámbrico (Boya) - Evaluación en Entorno Real

El dispositivo tipo boya utilizó una conexión Wi-Fi para la transmisión de datos en tiempo real hacia una base de datos local y un dashboard de monitoreo. Las pruebas se realizaron en dos escenarios progresivos de conectividad con ocho sensores (ESP32) ubicados en un

arreglo de jaulas de 2×4 (tipología Antarfood).

Pruebas con Router Limitado (Escenario 1): La fase inicial, utilizando un teléfono móvil como punto de acceso (limitado a 5 conexiones simultáneas), demostró que la saturación del punto de acceso es el cuello de botella principal, causando intermitencia, reinicios frecuentes (Uptime) y ausencia de datos en varios sensores. Esto comprometió el monitoreo continuo, pero la señal Wi-Fi básica mostró el potencial de alcanzar todas las jaulas.

Pruebas con Router Dedicado (Escenario 2 - MiFi MF937): Al utilizar un MiFi MF937 (con capacidad para 10 dispositivos, eliminando la saturación), se pudo evaluar directamente la capacidad de cobertura de la señal Wi-Fi en el entorno de las jaulas (abierto, con viento y obstáculos cercanos).

Conectividad Heterogénea: Los resultados fueron concluyentes: más de la mitad de los ocho sensores no lograron establecer o mantener una conexión estable en ninguna de las dos posiciones probadas del MiFi (extremo y centro). Esto indica que la propagación de la señal Wi-Fi estándar se ve seriamente afectada por la combinación de distancia y obstáculos en puntos específicos del arreglo, lo que impide una cobertura uniforme y simétrica.

Estabilidad en Zonas de Cobertura: A pesar de las fallas de cobertura, los sensores que sí lograron conectarse (ej., Field 3, 5 y 8) demostraron una operación continua y robusta (evidenciada por Uptime ascendente y RSSI funcional), confirmando que el hardware y el código son fiables cuando la calidad de la señal es adecuada.

Las simulaciones de cobertura con Wi-Fi, aunque útiles para establecer la línea base, subestimaron el impacto real de los obstáculos y la variabilidad del entorno, lo que se puso en evidencia en las pruebas con el MiFi.

Para garantizar la seguridad de los datos, se implementó el cifrado AES-128, lo que permitió transmitir la información de manera segura sin generar un impacto significativo en la latencia. La simulación en Cisco Packet Tracer confirmó la estabilidad del sistema bajo la configuración WPA2, validando su aplicabilidad en entornos acuícolas con altos requerimientos de seguridad.

6.1.2 Sistema Cableado (ROV)

El sistema basado en el ROV submarino utilizó una conexión cableada Ethernet Cat5e, diseñada para operar en condiciones subacuáticas. Este enfoque ofreció una transmisión de datos más estable y de mayor velocidad, asegurando una latencia reducida y constante, con valores que oscilaron entre 0.09 y 0.15 segundos.

A diferencia de la solución inalámbrica, este sistema fue menos susceptible a interferencias electromagnéticas o interrupciones en la transmisión, lo que resultó en una comunicación más confiable y sin pérdidas de paquetes. Asimismo, se implementó el cifrado AES-128, garantizando la seguridad de los datos transmitidos sin afectar la velocidad de transmisión.

Entre las ventajas de la comunicación cableada, se observó que la estabilidad y la calidad de transmisión fueron superiores, especialmente en entornos con alta densidad de sensores y en aplicaciones que requieren monitoreo continuo en tiempo real.

Cuadro 6.1: Comparación entre tecnología Wi-Fi y Ethernet

Parámetro	Wifi Boya	Ethernet ROV
Latencia	0.09 - 0.32 seg	0.09 - 0.15 seg
Seguridad	AES-128, WPA2	AES-128
Estabilidad	Variable depende de interferencias	Alta sin interferencias
Aplicabilidad	Fácil implementación ideal para boyas	Mejor para ROVs monitoreo continuo

Estos resultados permiten concluir que, mientras que el sistema inalámbrico basado en Wi-Fi es más flexible en su instalación, el sistema cableado Ethernet ofrece una fiabilidad operativa significativamente superior en aplicaciones críticas donde la continuidad de los datos es obligatoria.

Los resultados obtenidos validan que el sistema desarrollado cumple con los objetivos planteados y presenta un diseño modular con capacidad de escalabilidad futura. Esto incluye la posibilidad de integrar nuevas tecnologías, como LoRa o 5G, para mejorar la cobertura o la

eficiencia energética, así como la implementación de algoritmos de cifrado más avanzados para adaptarse a entornos con mayores restricciones.

6.2 Validación

La validación se realizó mediante pruebas de integración y simulaciones que evaluaron el comportamiento del sistema bajo condiciones controladas y replicando escenarios de campo.

- **Prueba de comunicación Wi-Fi:** Se validó la transmisión de datos desde el módulo ESP8266 hacia un computador, verificándose la correcta recepción, baja latencia (entre 6 y 14 ms) y estabilidad de conexión (RSSI entre -57 dBm y -64 dBm) únicamente en los sensores con cobertura estable. La validación de conectividad falló para los sensores sin señal en el Escenario 2.
- **Prueba de comunicación Ethernet:** A través de la simulación en Cisco Packet Tracer y NetSim, se comprobó la transmisión confiable y de baja latencia del ROV mediante Ethernet, alcanzando velocidades estables superiores a 1 Gbps con baja tasa de error.
- **Prueba de visualización de datos:** Los datos enviados fueron almacenados en una base de datos MySQL y visualizados correctamente en un dashboard, confirmando la funcionalidad del sistema de visualización en tiempo real.
- **Simulaciones de congestión y tráfico de red:** Las simulaciones demostraron que el sistema puede soportar la conexión simultánea de múltiples nodos (boyas) sin pérdidas significativas de paquetes, aunque con incrementos de latencia moderados a medida que aumentaba la carga.

La validación fue satisfactoria, demostrando que el sistema es funcional bajo las condiciones de operación esperadas, aunque se detectaron oportunidades de mejora en la gestión de desconexiones y optimización de recursos.

6.3 Verificación

Se llevó a cabo un proceso sistemático de verificación de requisitos, contrastando las funcionalidades esperadas con los resultados obtenidos en las pruebas de simulación y laboratorio.

- **Verificación de requisitos:** Se confeccionó la siguiente tabla para validar el cumplimiento de los requisitos funcionales y no funcionales definidos en el proyecto.

Cuadro 6.2: Verificación de requisitos

Código	Requisito	Cumplimiento
RF1	El sistema debe enviar datos de sensores desde la boya (Wi-Fi) y el ROV (Ethernet) hacia la estación base.	Sí
RF2	En caso de pérdida de conexión, los datos deben almacenarse temporalmente y enviarse al restablecer la red.	Parcial
RF3	La comunicación debe ser confiable y soportar grandes volúmenes de datos.	Sí
RF4	Toda la transmisión debe estar cifrada utilizando AES-128.	Sí
RF5	La boya debe utilizar tecnologías inalámbricas de bajo consumo.	Sí
RNF1	El sistema debe soportar condiciones subacuáticas adversas.	Sí
RNF2	El sistema debe permitir la integración de nuevos nodos.	Sí

La mayoría de los requisitos fueron verificados satisfactoriamente. Sin embargo, en el caso del almacenamiento temporal de datos en desconexiones (RF2), se logró parcialmente mediante buffer interno, pero se recomienda robustecer esta funcionalidad para implementaciones futuras.

6.4 Análisis Crítico y Evaluación de Riesgos

El sistema demostró robustez y confiabilidad en escenarios de laboratorio y simulación, pero se identificaron algunos riesgos para su despliegue en ambientes reales:

- **Fallo Crítico de Cobertura Wi-Fi en Entorno Real (Riesgo Principal):** La incapacidad del Wi-Fi estándar para garantizar una conexión estable en más de la mitad de los sensores (Escenario 2 con MiFi dedicado) es el riesgo operacional más significativo. Esto compromete la capacidad del sistema para realizar un monitoreo integral y requiere una migración o integración de tecnologías de largo alcance (LoRaWAN) para garantizar la cobertura total del arreglo de jaulas.
- **Riesgo de congestión en redes Wi-Fi (Mitigado por MiFi):** Si bien el MiFi mitigó el riesgo de saturación, bajo una topología puramente Wi-Fi se reitera la necesidad de optimizar protocolos o migrar a tecnologías más eficientes (por ejemplo, LoRa en el futuro) para evitar futuras congestiones o latencias.
- **Vulnerabilidad ante condiciones extremas:** Aunque el hardware cumple con las condiciones de humedad y salinidad controladas, pruebas en condiciones más severas (corrientes fuertes, temperaturas extremas) deben ser realizadas antes de la implementación en terreno.
- **Dependencia de infraestructura de red:** El sistema depende de la estabilidad de los routers y switches utilizados, por lo que se sugiere reforzar las pruebas de tolerancia a fallos y planes de contingencia.

En resumen, el sistema cumple con los requisitos críticos planteados para el monitoreo ambiental acuícola, ofreciendo una solución escalable y confiable. Sin embargo, los resultados experimentales justifican la necesidad de implementar soluciones LPWAN para superar las limitaciones de cobertura del Wi-Fi y garantizar una operación robusta en ambientes reales.

Capítulo 7

Conclusiones

El presente trabajo ha desarrollado e implementado con éxito un sistema robusto para el monitoreo ambiental en jaulas de cultivo acuícola, utilizando dos arquitecturas de comunicación: una inalámbrica para las boyas y otra alámbrica para el ROV. A través del diseño y validación de los módulos de adquisición, transmisión y almacenamiento de datos, se logró una solución capaz de recolectar y analizar parámetros críticos como pH, temperatura, oxígeno disuelto y conductividad. Los resultados han proporcionado una visión profunda de la viabilidad de la tecnología IoT en la acuicultura.

Con respecto a la boya, la evaluación de la conectividad WiFi en superficie reveló limitaciones significativas que deben ser el foco de futuras implementaciones. Las pruebas con el MiFi MF937 dedicado demostraron que la cobertura WiFi de 2.4 GHz es heterogénea e insuficiente para garantizar la conexión estable en más de la mitad de los ocho sensores en el arreglo de jaulas, invalidando la expectativa de una cobertura simétrica. Este fallo se debe a la atenuación combinada por la distancia y la presencia de obstáculos físicos, lo que concluye que la solución WiFi estándar es inviable para garantizar una cobertura integral.

Con respecto al ROV, los resultados obtenidos en las pruebas confirman que la combinación de Ethernet para el entorno subacuático es una solución excepcionalmente efectiva, garantizando una transmisión confiable, de baja latencia (0.09–0.15 segundos) y alta seguridad para el ROV. Este enfoque se verifica como la opción óptima para aplicaciones bajo

el agua, validando el diseño de la alimentación estable con el convertidor DC-DC XL6009 y la cadena de adquisición de datos del ROV.

El principal aporte del trabajo es esta evaluación empírica y crítica, que justifica la necesidad ineludible de integrar soluciones LPWAN, como LoRaWAN, en superficie para superar las zonas de sombra del Wi-Fi. Los sensores que sí lograron conectarse demostraron una operación continua y estable, lo que confirma la fiabilidad del hardware y el firmware cuando la calidad de la señal es adecuada. Así, mientras que el sistema desarrollado cumple con los objetivos críticos y presenta una arquitectura modular para la escalabilidad, se concluye que, para una implementación exitosa y completa, es indispensable adoptar una estrategia híbrida que garantice la cobertura total de todas las jaulas mediante la complementación de WiFi con una solución de largo alcance. Esto asegurará la optimización de los recursos hídricos, la reducción de costos operativos y el fortalecimiento de la sostenibilidad de la industria mediante la toma de decisiones basada en datos completos y fiables.

Anexo A

Código Fuente del Microcontrolador

Este anexo contiene el código fuente completo implementado en el microcontrolador para la adquisición de datos de temperatura y el envío de datos a la plataforma ThingSpeak, incluyendo la medición de RSSI y Uptime.

```
1  #include <OneWire.h>
2  #include <DallasTemperature.h>
3  #include <WiFi.h>
4  #include <HTTPClient.h>
5
6  // RED WIFI
7  const char* ssid = "iPhone de Karolain";
8  const char* password = "tele12345";
9
10 // == API Keys para cada canal en ThingSpeak, a cada uno le enviará a su
    ↳ propio field1 ==
11 const char* apiKeyTemp = "5YHEY43X2LCDDYOC8";
12 const char* apiKeyRssi = "YUCSLW5625I47N16";
13 const char* apiKeyUptime = "1T3S1IORNNO5SI28";
14
15 const char* server = "http://api.thingspeak.com/update";
16
```

```

17  #define ONE_WIRE_BUS 4 // Pin donde está conectado el sensor DS18B20
18
19  OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
20  DallasTemperature sensors(&oneWire);
21
22  void setup() {
23      Serial.begin(115200);
24      sensors.begin();
25
26      WiFi.begin(ssid, password);
27      Serial.print("Conectando a WiFi");
28      while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
29          delay(500);
30          Serial.print(".");
31      }
32      Serial.println("\n Conectado a WiFi");
33      Serial.print("IP Local: ");
34      Serial.println(WiFi.localIP());
35  }
36
37  void loop() {
38      // Mide todos los datos una sola vez
39      sensors.requestTemperatures();
40      float temp = sensors.getTempCByIndex(0);
41      long rssi = WiFi.RSSI();
42      long uptime = millis() / 1000;
43
44      if (temp != DEVICE_DISCONNECTED_C) {
45          if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
46
47              //Envía la temperatura a su canal
48              HTTPClient http_temp;
49              String url_temp = String(server) + "?api_key=" + apiKeyTemp +
49                  ↵ "&field6=" + String(temp, 2);
50              http_temp.begin(url_temp);

```

```

51     http_temp.GET();
52     http_temp.end();
53     Serial.println("Temperatura enviada con éxito.");
54
55     //Envía el RSSI a su canal
56     HTTPClient http_rssi;
57     String url_rssi = String(server) + "?api_key=" + apiKeyRssi +
58         ↪ "&field6=" + String(rssi);
59     http_rssi.begin(url_rssi);
60     http_rssi.GET();
61     http_rssi.end();
62     Serial.println("RSSI enviado con éxito.");
63
64     //Envía el Uptime a su canal
65     HTTPClient http_uptime;
66     String url_uptime = String(server) + "?api_key=" + apiKeyUptime +
67         ↪ "&field6=" + String(uptime);
68     http_uptime.begin(url_uptime);
69     http_uptime.GET();
70     http_uptime.end();
71     Serial.println("Uptime enviado con éxito.");
72
73     Serial.println("Datos enviados a los 3 canales.");
74     } else {
75         Serial.println("WiFi desconectado");
76     }
77     } else {
78         Serial.println("Sensor desconectado");
79     }
80     delay(15000) //Toma de data cada 15 seg;
81 }

```

Bibliografía

- [1] FAO, “El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022,” <https://www.fao.org>, 2022, accedido en mayo de 2025.
- [2] M. B. Timmons and J. M. Ebeling, *Recirculating Aquaculture*. NRAC Publication, 2013.
- [3] C. E. Boyd, *Water Quality: An Introduction*. Springer, 2015.
- [4] A. Lazur, “Water quality for pond aquaculture,” <https://fisheries.tamu.edu/files/2013/09/Water-Quality-for-Pond-Aquaculture.pdf>, 2007, extension publication, University of Florida.
- [5] I. Lee and K. Lee, “The internet of things (iot): Applications, investments, and challenges for enterprises,” *Business Horizons*, vol. 63, no. 4, pp. 437–445, 2020.
- [6] R. Sommer and G. Schiefer, “Digital technologies for smart aquaculture: A review,” *Aquaculture Reports*, vol. 19, p. 100611, 2021.
- [7] S. García-Morales, E. Rivas-López, and K. López-Vásquez, “Tecnologías para el monitoreo de la calidad del agua en acuicultura,” *Revista de Acuicultura y Tecnología*, vol. 7, no. 2, pp. 45–58, 2018.
- [8] M. B. Timmons and J. M. Ebeling, *Recirculating Aquaculture*, 4th ed. Cayuga Aqua Ventures, 2018.
- [9] R. Rountree, F. Juanes, and M. Bolgan, “Advances in passive acoustic monitoring for fisheries and aquatic conservation,” *Fisheries Research*, vol. 236, p. 105846, 2020.

- [10] P. Smith, L. Jones, and B. Wells, “Developments in autonomous oceanographic monitoring technologies,” *Marine Environmental Research*, vol. 170, p. 105394, 2021.
- [11] R. Martins, A. Sousa, and P. Silva, “Rov-based monitoring systems for aquaculture,” *Journal of Marine Science & Technology*, vol. 27, no. 3, pp. 220–235, 2019.
- [12] M. Stojanovic and J. C. Preisig, “Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 1, pp. 84–89, 2009.
- [13] L. Freitag, M. Grund, S. Singh, J. Partan, P. Koski, and K. Ball, “The whoi micro-modem: An acoustic communications and navigation system for underwater sensor networks,” in *Proceedings of MTS/IEEE OCEANS*, 2015, pp. 108–115.
- [14] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, “Underwater acoustic sensor networks: research challenges,” *Ad Hoc Networks*, vol. 3, no. 3, pp. 257–279, 2006.
- [15] Y. A. X. Brand, “Exo monitoring platform,” <https://www.ysi.com/EXO>, 2023.
- [16] A. D. Instruments, “Data buoy 4700,” <https://www.aanderaa.com/media/pdfs/Data-Buoy-4700.pdf>, 2023.
- [17] B. R. Inc., “Bluerov2: Underwater rov,” <https://bluerobotics.com/store/rov/bluerov2/>, 2023.
- [18] D. Trekker, “Underwater rovs for aquaculture and environmental monitoring,” <https://www.deeptrekker.com/industries/environmental-research>, 2023.
- [19] J. Li, H. Wang, and Y. Zhang, “Machine learning applications in smart aquaculture,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 189, p. 106136, 2021.
- [20] T. Johnson, R. Anderson, and S. Kim, “Wireless monitoring systems for aquaculture: Current state and future prospects,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 4, pp. 5301–5312, 2022.

- [21] S. Albahli and W. Albattah, “Iot-based smart water quality monitoring systems,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 4, p. 1877, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/4/1877>
- [22] G. Griffiths, *Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2002. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470751765>
- [23] F. Centre for Environment and A. S. (Cefas), “Smartbuoy system,” <https://www.cefas.co.uk/services/monitoring-and-modelling/smartbuoys/>, 2023.
- [24] S. P. Consortium, “Sunrise project - building the internet of underwater things,” <http://www.sunrise-project.eu/>, 2020.
- [25] H. Kaushal and G. Kaddoum, “Underwater optical wireless communication,” *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1518–1547, 2016.
- [26] O. Vermesan and P. Friess, *Internet of Things: Converging Technologies for Smart Environments and Integrated Ecosystems*. River Publishers, 2013.
- [27] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, and M. Zorzi, “Internet of things for smart cities,” *IEEE Internet of Things journal*, vol. 1, no. 1, pp. 22–32, 2014.
- [28] L. Sornin, M. Luis, T. Eirich, T. Kramp, and O. Hersent, “Lorawan specification,” *LoRa Alliance*, 2015.
- [29] C. Gomez and J. Paradells, “Overview and evaluation of bluetooth low energy: An emerging low-power wireless technology,” *Sensors*, vol. 10, no. 12, pp. 11 734–11 753, 2010.
- [30] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella, and M. Zorzi, “Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the iot and smart city scenarios,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 5, pp. 60–67, 2016.

- [31] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, “Low power wide area networks: An overview,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 855–873, 2017.
- [32] Sigfox, “Sigfox technology overview,” 2020, available at: <https://www.sigfox.com/en/sigfox-iot-technology-overview>.
- [33] S. Al-Sarawi, M. Anbar, K. Alieyan, and M. Alzubaidi, “A survey on wi-fi technologies: Security, spectrum, protocols, and standards,” *Future Internet*, vol. 9, no. 6, p. 71, 2017.
- [34] Z.-W. Alliance, “Z-wave technical overview,” available at: https://www.z-wave.com/learn-about-z-wave/what_is_z-wave.
- [35] A. S. Tanenbaum and D. J. Wetherall, *Computer Networks*. Pearson, 2011.
- [36] G. Kaiser, “Industrial ethernet: Understanding the physical layer,” 2020, available at: <https://www.phoenixcontact.com>.
- [37] F. Community, “Fiber optic cabling: Types, speeds, and distances,” 2021, available at: <https://community.fs.com/blog/fiber-optic-cable-types.html>.
- [38] F. Networks, “Ethernet cable categories: What you need to know,” 2018, available at: <https://www.flukenetworks.com/blog/cabling-chronicles/ethernet-cable-categories-what-you-need-know>.
- [39] D. Rosenberger, “High-performance ethernet cabling in industrial environments,” *Automation Technology*, 2020, available at: <https://www.automation.com/en-us/articles/2020/industrial-ethernet-cabling-design>.
- [40] IEEE, “Ieee standard for ethernet (ieee 802.3),” 2018, available at: https://standards.ieee.org/standard/802_3-2018.html.
- [41] R. Roman, P. Najera, and J. Lopez, “Features, requirements and challenges in security and privacy for iot,” *Computer Networks*, vol. 57, no. 10, pp. 2266–2279, 2013.

- [42] M. U. Farooq, M. Waseem, S. Mazhar, A. Khairi, and T. Kamal, "A review on internet of things (iot) security," *International Journal of Computer Applications*, vol. 113, no. 1, pp. 1–7, 2019.
- [43] M. Naeem, M. W. Anwar, and M. Imran, "A comparative analysis of energy-efficient encryption techniques for wsns," *Wireless Personal Communications*, vol. 83, pp. 323–345, 2015.
- [44] N. Saxena and D. Sharma, "Security and privacy in wireless sensor networks: A survey," *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, vol. 3, no. 7, pp. 236–243, 2013.
- [45] M. Wazid, A. K. Das, B. Bera, N. Kumar, M. Conti, and M. Jo, "Security aspects of the internet of things: A comprehensive survey," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 117 402–117 443, 2019.
- [46] G. Hatzivasilis, I. Papaefstathiou, C. Manifavas, and N. Papadakis, "Review of light-weight cryptographic libraries for embedded systems," *Electronics*, vol. 7, no. 10, p. 283, 2018.
- [47] D. Ghosh and S. Bandyopadhyay, "Secure communication in industrial iot through macsec and tls," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 136, pp. 40–51, 2019.
- [48] D. Andreev and A. Smirnov, "Comparison of tls and ipsec protocols in vpn," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1333, no. 1, p. 012123, 2019.
- [49] C. N. Academy, *Cisco Packet Tracer*, Cisco Systems, 2020. [Online]. Available: <https://www.netacad.com/courses/packet-tracer>
- [50] N. Team, *NetSim Network Simulator*, TETCOS, 2021. [Online]. Available: <https://www.tetcos.com>