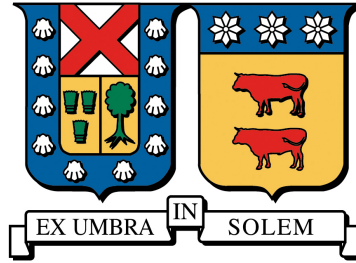


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA

VALPARAÍSO — CHILE



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN
SISTEMA MÓVIL DE MONITOREO DE
CALIDAD DEL AGUA EN TIEMPO REAL PARA
CENTROS DE CULTIVO DE SALMÓN**

CRISTHIAN MAURICIO URRALDUNATE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL TELEMÁTICO

PROFESOR GUÍA : MOHAMED ABDELHAMID
PROFESOR CORREFERENTE : MARCOS ZÚÑIGA

JULIO DE 2026



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 MÓVIL DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AGUA EN TIEMPO REAL PARA CENTROS DE CULTIVO DE SALMÓN

Nombre del candidato(a): Cristhian Mauricio Urra Aldunate

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Telemática

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

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Mohamed Abdelhamid Ahmed, 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: 13-08-2026

; Firma:

M. Abdelhamid

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 13-08-2026

; Firma:

[Firma]

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

This research was funded by ANID Subdirección de Investigación Aplicada FONDEF TA25I10016.

Agradecimiento a mi familia, que me apoyó en todo momento. Un apoyo constante e incondicional que me dió el rumbo, en ámbito social como académico. Lo que he logrado es gracias a ustedes.

Índice general

1. Introducción	8
1.1. Contexto	8
1.2. Problema a resolver	9
1.3. Acercamiento a la solución	9
1.4. Hipótesis	10
1.5. Objetivos	10
1.5.1. Objetivo general	10
1.5.2. Objetivos específicos	11
1.6. Estructura general del documento	12
2. Estado del Arte	13
2.1. Prototipos existentes	13
2.2. Trabajo relacionado	14
2.3. Soluciones comerciales	21
3. Arquitectura Propuesta	24
3.1. Arquitectura del sistema	24
3.2. Descripción de Componentes	27
3.3. Matriz de Requisitos Funcionales y Componentes	30
3.4. Diagrama de contexto	30
3.5. Diagrama de arquitectura	33

4. Diseño Propuesto	40
4.1. Módulo de Sensores Submarinos	41
4.1.1. Sensores disponibles en Chile	41
4.1.2. Componentes disponibles para importación.	41
4.2. Módulo de Sensores de la Cápsula	42
4.3. Módulo de electrónica	43
4.3.1. Componentes	43
4.3.2. Esquema de conexión	45
4.3.3. Diagrama de Circuito impreso	47
4.3.4. Montaje de componentes	49
4.3.5. Algoritmo de muestreo	49
4.3.6. Protocolo I2C en sensores	52
4.3.7. Comparativa en métodos de muestreo	53
4.3.8. Secuencia de funcionamiento del circuito	55
4.4. Módulo de Comunicación	56
4.4.1. Formato y paquete de datos	56
4.4.2. Envío de datos y cana de transmisión	56
4.5. Módulo de Almacenamiento	57
4.6. Módulo de Aplicación	59
5. Resultados y validación	60
5.1. Pruebas en piscina de la universidad	60
5.1.1. Ámbito funcional	61
5.1.2. Ámbito extra funcional	61
5.2. Funcionamiento	66
5.3. Sistema-Usuario	66
5.4. Durabilidad	66
6. Conclusiones	67

Resumen

Este proyecto presenta el diseño e implementación de una sonda para el monitoreo en tiempo real de la calidad del agua y las condiciones subacuáticas, con la intención de llevar un registro y monitoreo confiable de estas en centros de cultivo de salmón.

La solución propuesta cuenta con una arquitectura modular que garantiza escalabilidad y compatibilidad con infraestructuras existentes. Los datos recopilados del entorno subacuático se transmiten mediante tecnologías Ethernet a una base de datos, permitiendo su visualización a través de dashboards interactivos. La robustez y confiabilidad del sistema fueron validadas mediante pruebas controladas, demostrando su capacidad para operar de manera continua y recolectar datos con alta precisión.

Al proporcionar datos en tiempo real sobre parámetros críticos del agua, este proyecto responde a la necesidad de monitoreo ambiental eficiente en la acuicultura, mejorando la gestión de la salud de los peces y promoviendo prácticas sostenibles. El trabajo futuro incluye la implementación del sistema en entornos marinos reales para evaluar su rendimiento en condiciones desafiantes y optimizar la interacción del usuario para mayor usabilidad.

Palabras clave

Calidad del agua, Monitoreo, ROV, Granja de salmón, acuicultura.

Abstract

This project presents the design and implementation of a probe for the real-time monitoring of water quality and underwater conditions, aiming to establish a reliable record and monitoring system for salmon farming facilities.

The proposed solution features a modular architecture that ensures scalability and compatibility with existing infrastructure. Data collected from the underwater environment is transmitted to a database via Ethernet technology, enabling visualization through interactive dashboards. The robustness and reliability of the system were validated through controlled testing, demonstrating its ability to operate continuously and collect data with high precision.

By providing real-time data on critical water parameters, this project addresses the need for efficient environmental monitoring in aquaculture, enhancing fish health management and promoting sustainable practices. Future work involves deploying the system in real marine environments to evaluate its performance under challenging conditions and optimizing user interaction to enhance usability.

Keywords

Water quality, Monitoring, ROV, Salmon farm, aquaculture.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto

La acuicultura es el cultivo y reproducción de especies acuáticas en agua dulce o salada. Este ha sido uno de los sectores de mayor crecimiento en Chile en los últimos 30 años. El sector pesquero se ha convertido en uno de los pilares de la economía chilena, alcanzando una producción total de 3.4 millones de toneladas en 2021 y con un total de 8500 millones de dólares por concepto de exportación de pescado y productos pesqueros en el año 2022 según FAO [1]. Dado el tamaño de esta industria, es importante tener en consideración el manejo de la salud de los peces, un concepto utilizado en la acuicultura para describir las prácticas de manejo diseñadas para prevenir enfermedades en los peces. Para lograr esto, es necesario implementar rigurosas pruebas de calidad del agua, asegurar una adecuada nutrición y medidas de saneamiento efectivas.

La calidad del agua es crucial en la acuicultura [2],[3,4], ya que en este medio los peces realizan procesos metabólicos esenciales como la digestión, excreción y crecimiento. Por ello, es fundamental realizar un monitoreo constante para asegurar que se mantengan los niveles óptimos de temperatura, oxígeno disuelto y pH, entre otros parámetros críticos para la salud de los peces.

Por ejemplo, mantener los niveles de oxígeno disuelto en el agua es crucial para garantizar una máxima productividad en la cosecha, ya que cualquier fluctuación puede aumentar los grados de estrés en los peces. Por otro lado, altas concentraciones de amoníaco en el agua pueden ser letales y los residuos particulados, como heces y alimento desperdiciado, pueden contaminar el agua y dañar las branquias de los peces. Por tanto, mantener una calidad óptima del agua es fundamental para preservar la salud de los peces.

1.2. Problema a resolver

El ecosistema marino es extremadamente sensible a cambios mínimos en sus parámetros, lo que hace indispensable un registro confiable y objetivo de sus condiciones. El sistema de monitoreo propuesto busca ser altamente eficiente y confiable, proporcionando a los operadores de centros de cultivo datos detallados y en tiempo real sobre las condiciones del agua. Esto les permitirá tomar decisiones informadas para optimizar el ambiente de cultivo, mejorando la salud y el crecimiento de los peces y aumentando la rentabilidad de la operación.

El desarrollo de este sistema es un desafío multidisciplinario que integra múltiples tecnologías, principalmente en el área de robótica subacuática, ciencia de datos y acuicultura. Además de avanzar en la tecnología de monitoreo ambiental, el proyecto contribuye al desarrollo sostenible de la industria acuícola, fomentando prácticas más responsables con el medio ambiente.

1.3. Acercamiento a la solución

Se ha identificado una brecha en las soluciones actuales para el monitoreo del ambiente subacuático, centradas mayormente en sensores estáticos, lo que limita la adaptabilidad. Para solucionar esto, se propone un dispositivo móvil integrado en un Vehículo Operado Remotamente (ROV) capaz de monitorear y mapear condiciones del agua en centros

de cultivo de salmón. Este sistema alertará en tiempo real sobre condiciones adversas, permitiendo respuestas rápidas y asegurando el bienestar de los peces.

El proyecto incluye el desarrollo de un prototipo equipado con sensores avanzados para recolectar muestras sin alterar su estado natural. También se diseñará una interfaz de software para controlar el ROV, recopilar datos en tiempo real y gestionar un historial de mediciones.

Además, el diseño será escalable e interoperable con tecnologías existentes, asegurando integración con infraestructuras actuales y permitiendo su aplicación en diversos entornos acuícolas, mejorando la eficiencia y fomentando la innovación en la industria.

1.4. Hipótesis

Los sistemas de monitoreo subacuático han evolucionado de manera considerable en los últimos años, siendo el cultivo de salmonídeos una de las industrias directamente impactadas. Las regulaciones ambientales, cada vez más exigentes, junto con la alta competencia entre empresas, hace necesaria la implementación de sistemas de monitoreo de calidad del agua. Se plantea, como hipótesis, la posibilidad de diseñar y construir un sistema que permita monitorear en tiempo real la calidad del agua, generando registros, mapeo tridimensional de datos y visualización para operadores en cada centro de cultivo.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Crear un dispositivo sumergible capaz de realizar mediciones y mapeo tridimensional en tiempo real. Debe poder comunicarse con la superficie para enviar los datos de manera segura y confiable, garantizando la inmediatez e integridad de los mismos.

1.5.2. Objetivos específicos

1. **Reactivar prototipo boya y soluciones preexistentes** Realizar una revisión completa de un prototipo previo de monitoreo, consistente en una boya con múltiples sensores para verificar su desempeño bajo diferentes condiciones y formatos de comunicación.
2. **Crear un sistema de IoT funcional para comunicación de datos desde dispositivos subacuáticos.** Investigar y analizar soluciones existentes para ROVs submarinos. Definir requisitos técnicos, funcionales, no funcionales, arquitectura y riesgos.
3. **Integrar sistema de muestreo, colección y transmisión de datos.** Diseñar un modelo estructural y técnico que permita la integración efectiva de los sistemas. Para esto se debe estudiar y probar el comportamiento de componentes electrónicos bajo diversas condiciones extremas.
4. **Desarrollar una placa electrónica para el dispositivo.** Definir componentes y electrónica necesarios y compatibles con los requisitos de funcionamiento.
5. **Crear una carcasa estructural para funcionamiento submarino** Definir diagrama inicial, identificar los elementos relevantes, metodología y recursos.
6. **Diseñar e implementar métodos de comunicación, procesamiento y visualización de datos**

Este proyecto de investigación hace un énfasis especial en los objetivos 4 y 6, que corresponden a la integración de componentes electrónicos de sensado, comunicación e integración de los mismos.

1.6. Estructura general del documento

- **Capítulo 2 – Estado del Arte:** Se examinan las soluciones de monitoreo existentes mediante el análisis de diversas herramientas de hardware y software, además de contextualizar la situación actual de la industria salmonera en Chile.
- **Capítulo 3 – Arquitectura propuesta:** Se detalla la propuesta técnica y las decisiones de diseño adoptadas. Incluye la definición de requisitos y el despliegue del sistema a través de diagramas de contexto y de arquitectura.
- **Capítulo 4 – Diseño propuesto:** Se describe la configuración de los módulos desarrollados, la estructura de navegación para el usuario y los elementos clave de la interfaz gráfica.
- **Capítulo 5 – Resultados:** Se presenta el sistema completo, mostrando el funcionamiento del prototipo final integrado, tanto en su capa de almacenamiento como en la de aplicación.
- **Capítulo 6 – Validación:** Se sintetizan los resultados obtenidos, evaluando el cumplimiento de los objetivos y analizando el impacto de implementar un sistema de monitoreo en jaulas de cultivo. Asimismo, se esbozan las líneas de trabajo futuro y las posibles mejoras.

Capítulo 2

Estado del Arte

2.1. Prototipos existentes

1. Proyecto boya ANID FONDEF IDeA I+D, ID 22I10091

El diseño preliminar, mostrado en la Figura [2.1.1](#) incluye un flotador utilizado como base para el equipo (A), dotado de una carcasa que protege la electrónica interna de salpicaduras (C), esencial para la medición de variables críticas y la evaluación de la calidad del agua. La cubierta de la boya está diseñada con conductos de PVC que emergen de ella, proporcionando un acceso despejado para los sensores y garantizando mediciones precisas.

En cuanto a su configuración electrónica (B), se compone de una placa madre que interconecta todos los elementos, incluyendo cuatro sensores que registran el pH, la temperatura, la conductividad y el oxígeno disuelto. Además, está equipado con un módulo Heltec LoRa ESP 32 que facilita la comunicación y un panel solar compacto que provee la energía necesaria para su funcionamiento autónomo.

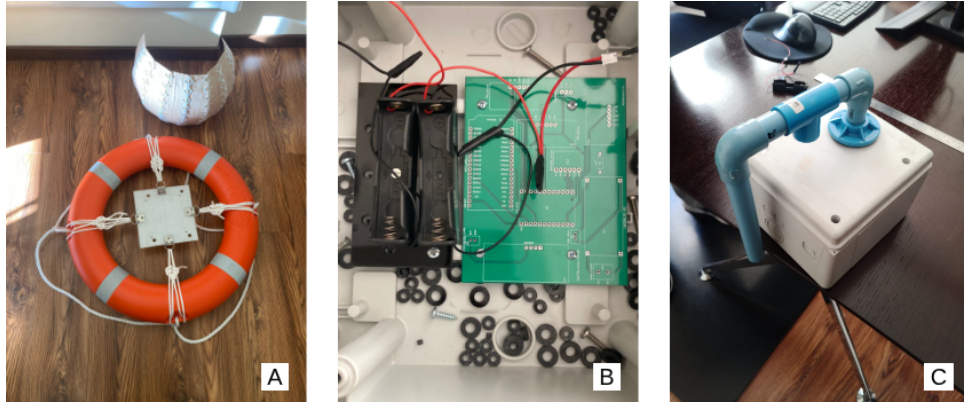


Figura 2.1.1: Estado actual de proyecto boya

2.2. Trabajo relacionado

Resulta crucial examinar distintos métodos para hallar una solución efectiva al problema en cuestión. En este proceso, se han revisado múltiples artículos académicos que abarcan una amplia gama de posibles soluciones:

1. Se han intentado crear robots subacuáticos para monitorear la calidad del agua, por ejemplo, en [5] se utiliza hardware como Arduino UNO, ESP32 CAM module, sensores de pH, turbiedad y temperatura, motores DC para mover el robot y bombear agua, tal como se detalla en la arquitectura mostrada en la Figura 2.2.1. Además, se creó una carcasa estructural con un diseño que permite bombear agua fuera del robot para que sea más liviano y salir a la superficie. En este proyecto se envían datos a un sistema pero no se menciona cuál, además de utilizar WiFi para enviar los datos.

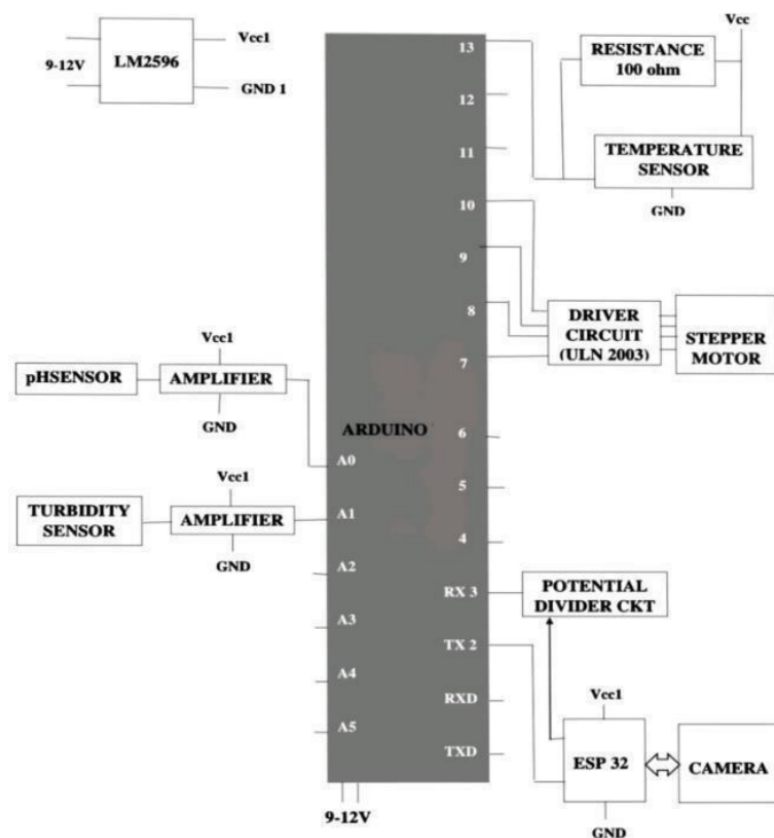


Figura 2.2.1: Diagrama de arquitectura electrónica

- Otra aplicación en [6] se muestra la utilización de sensores ultrasónicos para detectar la presencia de peces, sensores de pH y temperatura como los principales factores del estudio. Tal como se muestra en la Figura 2.2.2, se utiliza una app móvil llamada Blynk para visualizar los datos, hardware como ESP8266 como controlador y WiFi para comunicar los datos. En este proyecto se hacen mediciones en distintas horas del día, en la mañana, en la tarde y en la noche. La propuesta concluye que se pueden reducir los costos de la operación y mejorar la eficiencia.

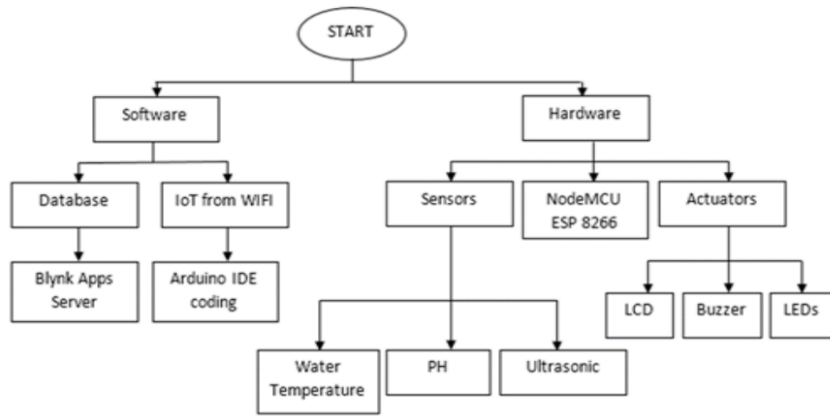


Figura 2.2.2: Diagrama de arquitectura

3. En la solución de IoT propuesta en [7], se crea un sistema de monitoreo del agua en tiempo real que utiliza sensores de temperatura, pH, oxígeno disuelto (DO), sólidos disueltos totales y salinidad. El hardware utilizado funciona en torno a un ESP8266 WiFi, tal como se muestra en la Figura 2.2.3 y en el software se desarrolla una aplicación móvil en Android que permite visualizar los parámetros del agua manteniendo una gestión eficiente del estanque de agua. Este sistema creado permite al usuario monitorear las mediciones de los sensores, administrar el ciclo de producción y registrar el programa de alimentación y de salud de los peces.

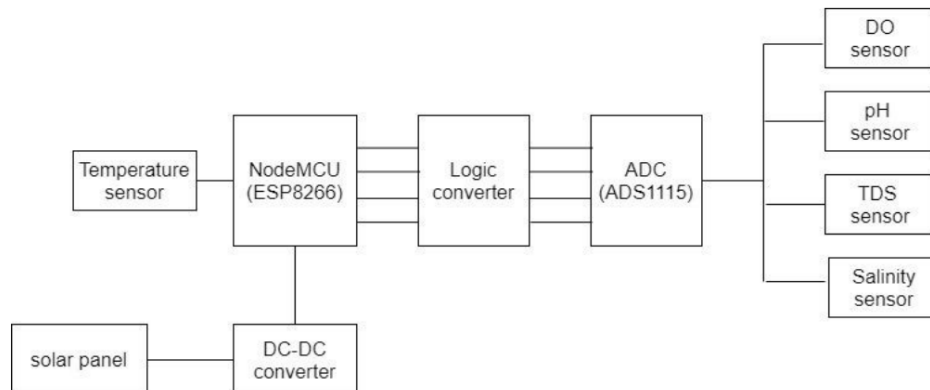


Figura 2.2.3: Diagrama de arquitectura propuesta

4. El artículo [8] muestra una solución que integra vídeo y captura de datos fue desarrollada por Akva Group, la denominada **Akva Sumerged**, una pequeña sonda con capacidad de medir oxígeno, temperatura, y masa estimada del pez en base a procesamiento de imágenes. Este desarrollo no ha publicado información detallada sobre su funcionamiento, solo aspectos generales de su uso y ventajas, como se muestra en la Figura 2.2.4.

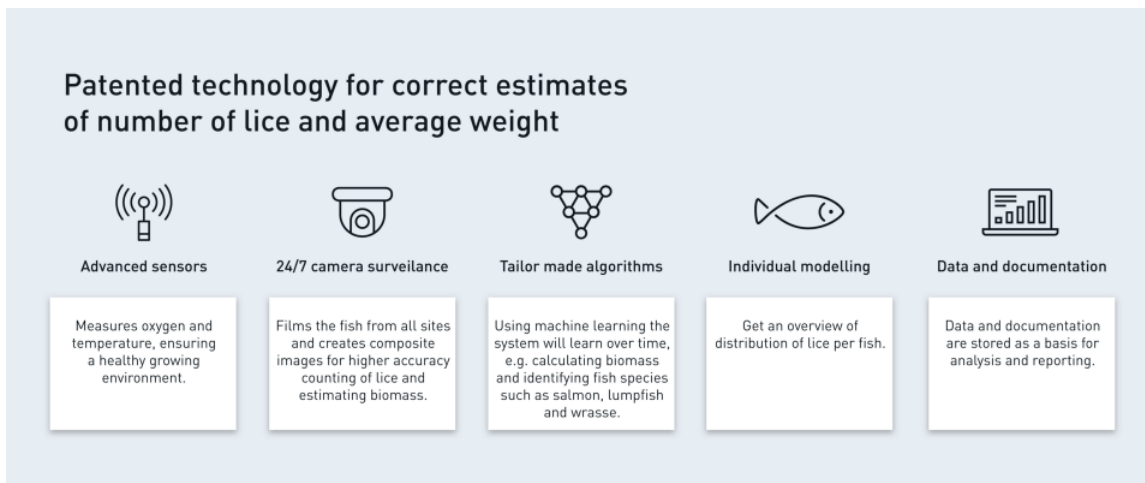


Figura 2.2.4: Características del dispositivo Akva Sumerged.

5. El artículo [9] presenta un sistema basado en IoT para monitorear el nivel de agua, detectar fugas y controlar motores en tanques de agua. Se muestra en la Figura 2.2.5 un esquema de arquitectura propuesta en el paper. Se utilizan sensores de nivel de agua y conductores eléctricos para activar transistores que controlan el motor. La visualización y almacenamiento de datos en la nube se realiza a través de la plataforma Dweet.io. Se desarrolló una aplicación para smartphone que permite a los usuarios ver el nivel de agua en el tanque. Sin embargo, el sistema tiene limitaciones, como la falta de monitoreo de fugas de agua y la capacidad de monitorear solo cuatro niveles de agua en el tanque. Se señala que los cables eléctricos utilizados para detectar niveles de agua pueden sufrir efectos de biofilm y erosión. Además, se menciona un posible problema de consumo excesivo de energía de la batería. En términos de programación, se utilizó el IDE Energia.

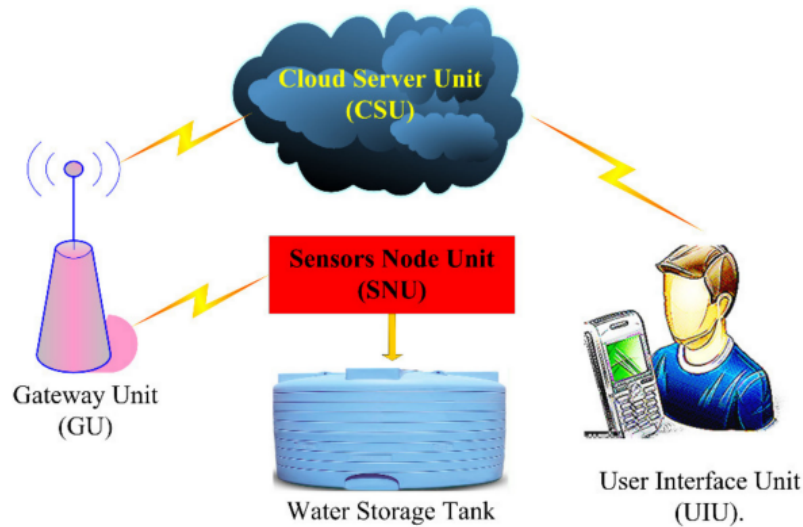


Figura 2.2.5: Diagrama de arquitectura simplificado

6. El artículo de investigación de [10] propone el diseño y desarrollo de un rover submarino controlado de forma automatizada utilizando Raspberry Pi y Arduino UNO, tal como se detalla en la Figura 2.2.6. Se destaca la importancia de una comunicación adecuada entre el usuario en el barco anfitrión y el rover submarino,

así como las diversas aplicaciones de este dispositivo en la exploración y actividades submarinas. Se discute el uso de sensores de temperatura, humedad, CO2 y presión, junto con la transmisión de datos a través de un transmisor LoRa para monitorear y almacenar información en la nube. Además, se menciona la posibilidad de enviar notificaciones en caso de parámetros anómalos en el rover.

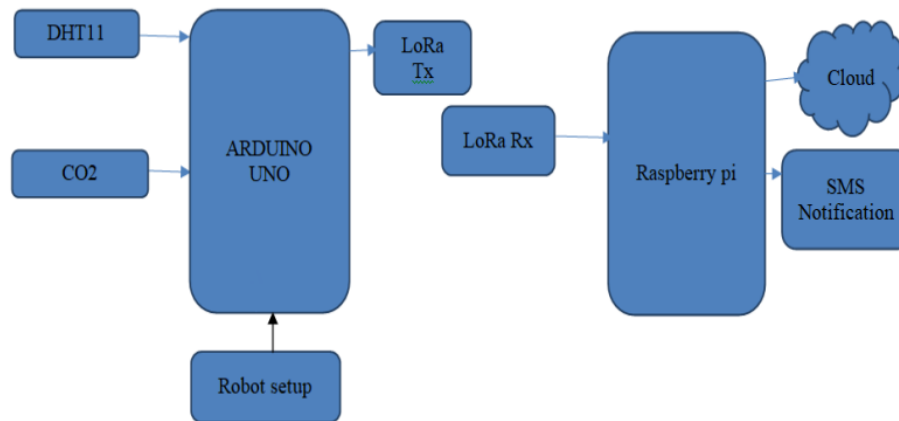


Figura 2.2.6: Diagrama de bloques del sistema

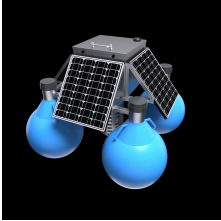
7. El documento [11] analiza el desarrollo de un sistema asequible de vigilancia del medio ambiente acuático utilizando componentes disponibles en el mercado. El objetivo del sistema es proporcionar telemetría para las lecturas de los sensores desplegados a distancia, lo que permite una interpretación oportuna de los datos. Se basa en los conceptos iniciales de hardware del proyecto Cave Pearl, pero modificados y mejorados. El sistema, cuyo diagrama se muestra en la Figura 2.2.7 funciona en diferentes estados, incluidos los de vigilia, reposo, arranque, muestreo, transmisión y error. Utiliza baterías de iones de litio recicladas y ha demostrado su potencial para durar un tiempo indefinido sobre el terreno. La calidad de los datos de los sensores desplegados ha mostrado reactividad al entorno e indicativos de cambio.

9. El documento [13] propone una red de sensores basados en LoRa para monitorear la calidad del agua, midiendo temperatura, turbidez, humedad. Se utiliza Arduino y un módulo GPS para cada nodo y se transmiten para luego ser guardados en una base de datos. En esta propuesta verifican si la red escogida es eficaz y si el rendimiento de los dispositivos desplegados funcionan de manera correcta en términos de cobertura.

2.3. Soluciones comerciales

En esta sección se muestra una tabla que ilustra algunos de los productos existentes en el mercado que cumplen la función de recopilar datos de la calidad del agua, siendo como parámetros comunes el pH, salinidad y temperatura. A continuación se muestra la tabla de algunas de las alternativas del mercado:

Cuadro 2.3.1: Alternativas del Mercado

Alternativas del Mercado			
Imagen de Referencia	Nombre	Descripción	Referencia
	SENSOR de calidad del agua con nitrato de amonio, temperatura de turbidez, PH DO EC SOLAR flotante multiparámetro	Sensor móvil flotante que mide: pH, DO (Oxígeno Disuelto), ORP, TDS, Salinidad, Turbidez, CE, Amonio, Nitrato, Cloro Residual y Temperatura.	[14]
	Orbit 881 Multisensor	Sensor estático que mide: Oxígeno, Temperatura, Profundidad y Corriente Marina.	[15]
	aquaMeasure SAL	Sensor estático que mide: Salinidad, Temperatura, Inclinação, Memoria de 64 MB flash y Profundidad hasta 100 metros.	[16]

También se mencionan implementaciones de vehículos autónomos y operados remotamente (ROV) para la vigilancia y monitoreo de la calidad del agua en tiempo real.

Cuadro 2.3.2: Soluciones de Vehículos y Monitoreo Subacuático

Nombre		
Nombre	Descripción	Referencia
An integrated ROV solution for underwater net-cage inspection in fish farms using computer vision	Sistema de medición subacuática utilizando visión por computadora para la inspección de jaulas en piscifactorías	[17]
Development of Autonomous Underwater Vehicle for Water Quality Measurement Application	Vehículo autónomo para la medición de la calidad del agua	[18]
Preliminary Engineering Implementation on Multisensory Underwater Remotely Operated Vehicle (ROV) for Oil Spills Surveillance	Implementación preliminar de un vehículo operado remotamente multisensorial para la vigilancia de derrames de petróleo	[19]
Wireless sensor network development in unmanned aerial vehicle (uav) for water quality monitoring system	Desarrollo de una red de sensores inalámbricos en un vehículo aéreo no tripulado para el monitoreo de la calidad del agua	[20]
Development of a low cost remotely operated vehicle for monitoring underwater marine environment	Vehículo operado remotamente de bajo costo para el monitoreo del entorno marino subacuático	[21]
Innovative Water Quality and Ecology Monitoring Using Underwater Unmanned Vehicles: Field Applications, Challenges and Feedback from Water Managers	Monitoreo innovador de calidad del agua y ecología utilizando vehículos submarinos no tripulados	[22]
An Underwater Vehicle Monitoring System and Its Sensors	Sistema de ²³ monitoreo de vehículos submarinos y sus sensores	[23]
PROTEUS Multisensor	Multisensor PROTEUS	[24]
i3XO EcoMapper	Vehículo submarino autónomo i3XO EcoMapper	[25]

Capítulo 3

Arquitectura Propuesta

3.1. Arquitectura del sistema

El esquema general ilustrado en la Figura [3.1.1](#) destaca las entradas y salidas del sistema. En este diseño, un ROV (Vehículo Operado Remotamente) se encarga de integrar un sistema electrónico avanzado que alberga una serie de sensores. Estos sensores son los responsables de recoger datos críticos del ambiente acuático, como la temperatura, el pH y los niveles de oxígeno disuelto. Una vez recolectados, los datos son transmitidos a una plataforma en la nube, donde se procesan y almacenan. Finalmente, la información es accesible a través de un dashboard intuitivo, que permite a los usuarios visualizar y analizar los datos en tiempo real, facilitando así la toma de decisiones informadas para la gestión de la calidad del agua en las granjas acuícolas.

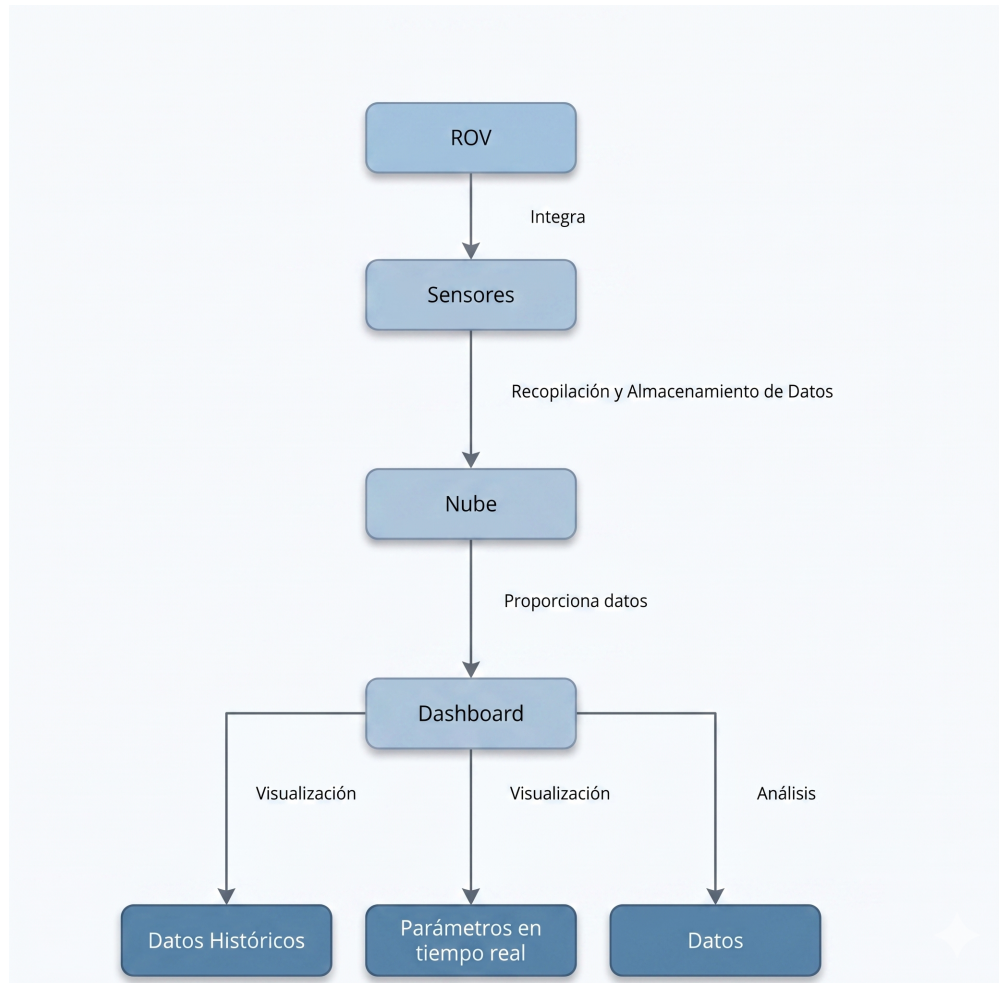


Figura 3.1.1: Esquema General del Sistema

La arquitectura preliminar del sistema es representada por la Figura 3.1.2 esta muestra las diferentes capas que fueron planteadas por el equipo:

- La Capa Física representa los diferentes componentes físicos existentes y próximos a necesitar en el sistema. En este caso se tienen fuente de poder, la boya/flotador y el ROV.
- La Capa de Adquisición de Datos corresponde al hardware utilizado para recopilar

los datos obtenidos por los sensores, elementos como microcontroladores y sensores son necesarios para obtener los datos necesarios.

- La Capa de Comunicación representa la tecnología que se utilizará para enviar los datos recopilados en la capa de adquisición y se utilizan herramientas como LoRa, Bluetooth, WiFi, etc.
- La Capa de Almacenamiento representa las diferentes herramientas de storage como nubes, base de datos, etc. Importante para almacenar los datos en un espacio seguro.
- la Capa de Aplicación representa la Visualización de Datos donde se utiliza un dashboard para ver y monitorear los datos.

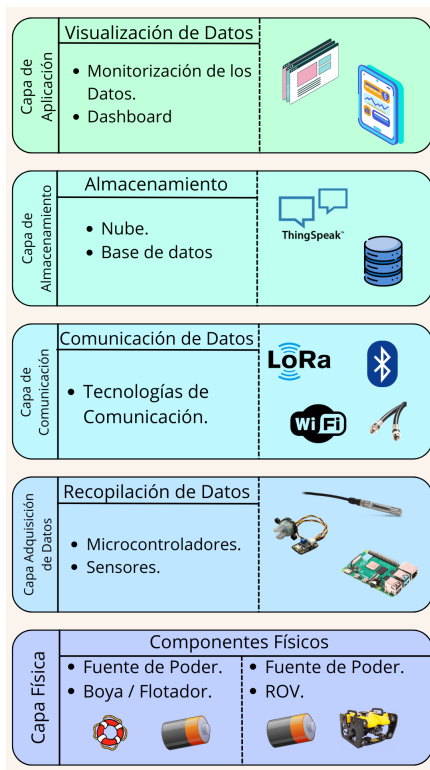


Figura 3.1.2: Arquitectura del Sistema

3.2. Descripción de Componentes

El sistema de monitoreo de calidad de agua está compuesto por varios elementos que pueden recolectar muestras directamente del agua y presentarlas de manera visual en un panel fácil de usar para cualquier usuario que necesite acceder a él. A continuación se encuentra una lista de componentes fundamentales para el sistema.

1. Carcasa submarina.

- Será necesario contar con una carcasa impermeable que pueda resistir las presiones y el entorno submarino al que estará expuesta. Esta carcasa debe ser capaz de proteger el sistema eléctrico creado de cualquier daño. Asimismo, es crucial que la carcasa tenga un ajuste perfecto con el ROV para evitar cualquier posible desprendimiento o daño durante el ensamblaje y las pruebas.

2. Sensores.

- Estos componentes son de vital importancia dentro del sistema, ya que facilitarán la recolección de muestras de los parámetros requeridos por el usuario. Estos sensores estarán disponibles en diferentes tipos, lo que permitirá obtener una variedad de muestras. Además, es fundamental que cumplan con ciertos requisitos, como ser resistentes al agua, capaces de soportar diversas presiones y no requerir una calibración frecuente. Para su elección se debe considerar también su disponibilidad en el mercado local, para permitir un reemplazo rápido en caso de requerirlo.

3. Placas o microcontroladores.

- Para la utilización de los sensores nombrados con anterioridad, será necesario contar con un componente que pueda conectar todos los sensores requeridos simultáneamente. Estas placas y controladores desempeñarán un papel fundamental al facilitar la recolección eficiente de muestras. Además de su función

de conectividad, estos componentes pueden incorporar características adicionales, como capacidad de procesamiento de datos en tiempo real o capacidad de comunicación inalámbrica para una mayor versatilidad y conveniencia en el monitoreo de la calidad del agua.

4. ROV.

- La carcasa que alberga el sistema electrónico se ensamblará junto con un ROV (Vehículo Operado Remotamente) submarino. Este ROV no solo proporcionará la energía necesaria al sistema, sino que también actuará como el vehículo encargado de transportarlo a través del agua. Esta colaboración garantizará un despliegue eficiente y seguro del sistema de monitoreo en el entorno acuático deseado.

5. Sistema de comunicación.

- Para permitir la transferencia de muestras tomadas, se requerirá un sistema de comunicación que conecte el ROV con un sistema externo de recolección de datos. Este sistema debe cumplir con rigurosos estándares de seguridad para evitar la pérdida de datos y garantizar una transmisión confiable. Además, debe ser capaz de enviar los datos en tiempo real desde el ROV hasta la superficie, lo que permitirá una monitorización continua y una respuesta rápida ante cualquier eventualidad.

6. Base de datos.

- Después de recopilar los datos, es crucial almacenarlos de manera segura para su posterior acceso y análisis. Esto implica la necesidad de establecer una base de datos robusta donde las muestras puedan ser almacenadas de forma organizada y fácilmente accesible en cualquier momento necesario. La implementación de una base de datos garantizará la integridad y disponibilidad de los datos a largo plazo, permitiendo su recuperación eficiente para futuros análisis y referencias.

7. Computador

- Para lograr una visualización efectiva de los datos, será imprescindible contar con un terminal capaz de recibir los datos del sistema de monitoreo, almacenarlos en la base de datos y generar visualizaciones pertinentes. Esta computadora actuará como el centro de control, permitiendo el análisis y la interpretación de los datos recopilados, así como la toma de decisiones informadas basadas en la información proporcionada por el sistema de monitoreo de calidad de agua.

8. Dashboard.

- Es fundamental disponer de una plataforma que permita visualizar los datos de manera clara y amigable para el usuario. La implementación de un dashboard posibilitará la visualización de diversas métricas y gráficos que faciliten el análisis de los datos recopilados. Además, este dashboard podría incluir funcionalidades adicionales, como la capacidad de personalizar las visualizaciones según las necesidades específicas del usuario, la generación de informes automáticos y la integración con sistemas de alerta temprana para identificar tendencias o anomalías en tiempo real.

3.3. Matriz de Requisitos Funcionales y Componentes

Cuadro 3.3.1: Matriz de Requisitos Funcionales y Componentes

Requisitos Funcionales	Componentes
El sistema eléctrico debe estar cubierto con una carcasa resistente y waterproof.	Boya, Carcasa.
El sistema desarrollado debe capturar los datos censados del agua.	Sensores, placas o microcontroladores, ROV.
El sistema tiene que enviar los datos censados a una API.	Placa o microcontroladores, sistema de comunicación.
El sistema debe permitir visualizar los datos censados en una plataforma de software para el uso del usuario.	Base de datos, computadora, dashboard.
El sistema debe cumplir con las características de un sistema móvil controlado de manera remota.	ROV, sensores, carcasa submarina.

3.4. Diagrama de contexto

El diagrama de contexto ilustra la arquitectura general del sistema de monitoreo propuesto para las jaulas de cultivo acuícolas, cuyo objetivo es mejorar la inspección y la gestión de las condiciones ambientales en las jaulas de salmón mediante el uso de tecnologías avanzadas. Este sistema incluye dos prototipos clave para la recopilación de datos: un dispositivo tipo

boya y un vehículo sumergible y móvil (ROV).

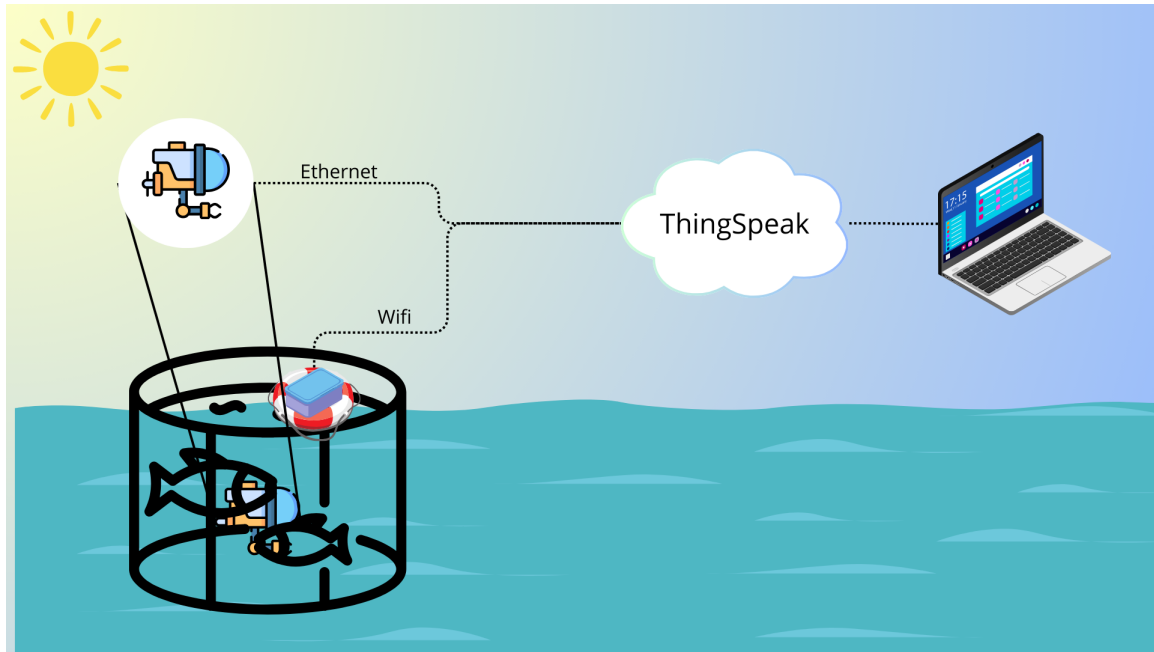


Figura 3.4.1: Diagrama de contexto

Este diagrama consta de varias partes:

El Prototipo Tipo Boya está ubicado flotando en la superficie del agua dentro de la jaula de cultivo. Su función principal es recolectar datos ambientales del mar, tales como temperatura, salinidad y oxígeno disuelto en la superficie. Estos datos son transmitidos de manera inalámbrica (WiFi) a una base de datos para su posterior análisis. La conectividad inalámbrica permite una transmisión continua y eficiente de los datos recogidos por la boya.

Por otro lado, el Prototipo Sumergible y Móvil (ROV) opera sumergido dentro de la jaula de cultivo. Este dispositivo móvil realiza el escaneo de las mallas de las jaulas para detectar agujeros y recopila datos ambientales a diferentes profundidades, incluyendo oxígeno disuelto, salinidad y otros factores críticos para la salud de los peces. A diferencia

de la boya, el ROV utiliza una conexión por cable Ethernet para transmitir los datos recopilados, asegurando una comunicación estable y de alta velocidad con el sistema central.

Ambos prototipos, tanto la boya como el ROV, están equipados con un Nodo Sensor integrado. Este nodo sensor es responsable de recopilar datos precisos y en tiempo real sobre las condiciones del agua, y enviar estos datos a la plataforma de procesamiento. La integración de los nodos sensores en ambos prototipos asegura una cobertura completa y detallada del entorno acuático dentro de las jaulas de cultivo.

La transmisión de datos se realiza de manera dual: el prototipo tipo boya utiliza WiFi para la transmisión inalámbrica, mientras que el ROV sumergible utiliza Ethernet para la transmisión a través de un cable.

La Plataforma ThingSpeak actúa como intermediario para la transmisión y almacenamiento de datos. ThingSpeak es una plataforma de IoT (Internet of Things) que facilita la recopilación, análisis y visualización de datos en tiempo real. Los datos enviados por ambos prototipos son recibidos por ThingSpeak y puestos a disposición de la estación de monitoreo. Esta plataforma permite una gestión eficiente y centralizada de la información recolectada.

Finalmente, la Estación de Monitoreo (Laptop) está ubicada en una posición remota, fuera del entorno acuático. Desde esta estación, los operadores pueden visualizar y analizar los datos en tiempo real utilizando interfaces gráficas proporcionadas por ThingSpeak. Esta visualización se realiza a través de dashboards interactivos que permiten una comprensión clara y concisa de los datos recolectados. La estación de monitoreo facilita la toma de decisiones informadas para mantener las condiciones óptimas del agua y la salud de los peces, proporcionando información vital para la gestión eficiente y sostenible del cultivo acuícola.

El diagrama de contexto muestra cómo el sistema de monitoreo utiliza dos prototipos (una

boya y un ROV) equipados con nodos sensores para recopilar datos cruciales sobre las condiciones del agua en las jaulas de cultivo. La boya transmite los datos inalámbricamente, mientras que el ROV lo hace a través de cable Ethernet. Estos datos son enviados a la plataforma ThingSpeak, donde son procesados y almacenados. Finalmente, los datos se envían a una estación de monitoreo, donde los operadores pueden analizarlos en tiempo real a través de dashboards interactivos, permitiéndoles tomar decisiones proactivas para mejorar la calidad del agua y el bienestar de los peces.

3.5. Diagrama de arquitectura

El diagrama de arquitectura muestra la estructura general del sistema de monitoreo para las jaulas de cultivo acuícolas, destacando las diferentes capas y sus interacciones. A continuación, se describe cada una de las capas presentes en el diagrama:

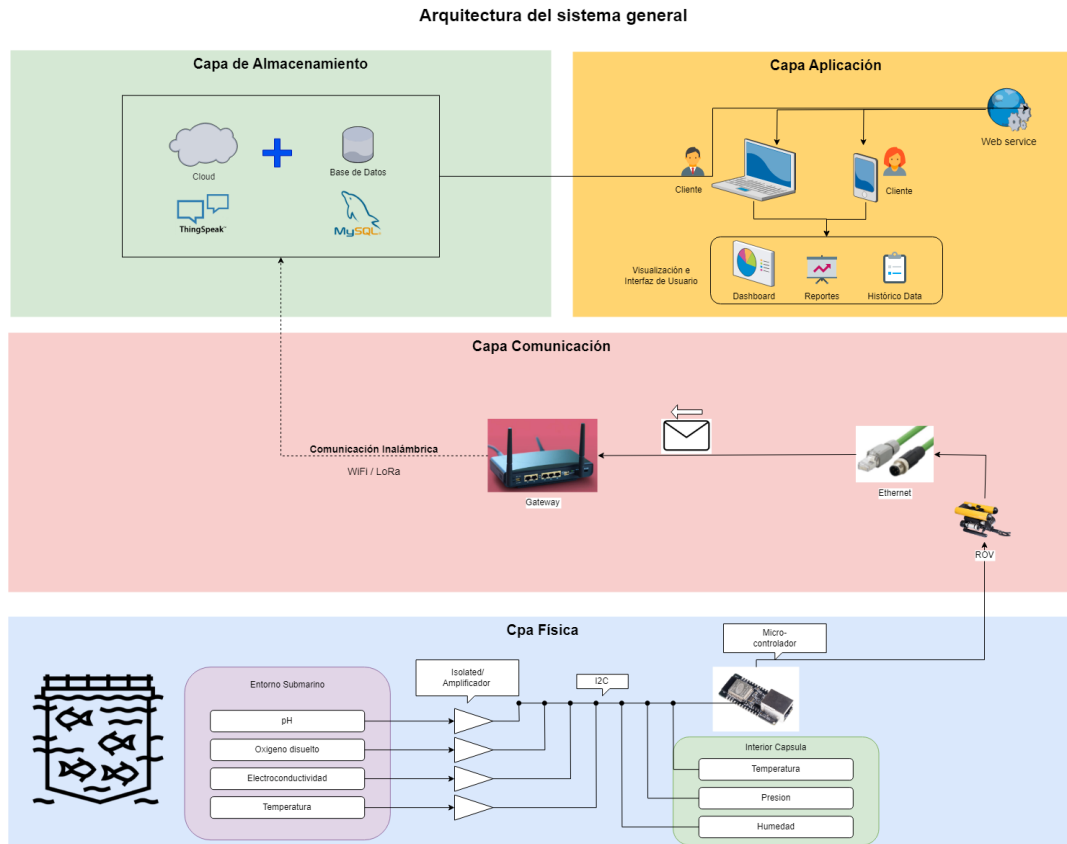


Figura 3.5.1: Diagrama de arquitectura propuesta

1. Capa Física

- **Entorno Submarino:** Sensores de pH, Oxígeno Disuelto, Electroconductividad y Temperatura: Estos sensores están ubicados en el entorno submarino dentro de las jaulas de cultivo y son responsables de medir parámetros críticos del agua.
- **Interior de la Cápsula:** Sensores de Temperatura, Presión y Humedad: Situados dentro de la cápsula, estos sensores monitorean las condiciones ambientales internas. El microcontrolador recibe datos de los sensores a través del protocolo I2C y los procesa para su transmisión.
- **Aislador/Amplificador:** Este componente se encarga de aislar y amplificar las

señales provenientes de los sensores, asegurando que los datos sean precisos y libres de interferencias antes de ser enviados al microcontrolador.

2. Capa de Comunicación

- ROV (Remotely Operated Vehicle): Equipado con sensores que recogen datos ambientales a diferentes profundidades dentro de las jaulas de cultivo. Utiliza una conexión por cable Ethernet para transmitir los datos recopilados al sistema central, asegurando una comunicación estable y de alta velocidad.
- Gateway: Actúa como un intermediario para la transmisión de datos entre el ROV y la capa de almacenamiento. Vía comunicación Inalámbrica permite la transmisión de datos recolectados a través de conexiones inalámbricas, facilitando la comunicación eficiente y continua.

3. Capa de Almacenamiento

- Cloud y Base de Datos (ThingSpeak y MySQL): Compuesta por la plataforma ThingSpeak y la base de datos MySQL. ThingSpeak es una plataforma de IoT que facilita la recopilación, análisis y visualización de datos en tiempo real. Los datos enviados desde el ROV y otros sensores son recibidos y procesados por ThingSpeak, proporcionando información inmediata y accesible para su monitoreo y gestión. MySQL, por otro lado, es una base de datos que se encarga de almacenar estos datos de manera histórica, permitiendo su análisis a largo plazo y la generación de reportes detallados. Esta combinación de herramientas asegura un almacenamiento robusto y un procesamiento eficiente de la información recopilada.

4. Capa de Aplicación

- Clientes (Usuarios): Los clientes acceden a los datos procesados a través de diversas interfaces de usuario. La visualización e interfaz de usuario proporcionan dashboards interactivos que permiten una visualización clara y concisa de los datos recolectados, facilitando el análisis en tiempo real.

- **Web Service:** Permite a los clientes acceder a los datos y reportes a través de servicios web. Utilizando herramientas como dashboards, reportes y acceso al historial de datos, los usuarios pueden visualizar la información en tiempo real, generar reportes detallados y consultar datos históricos almacenados. Estas funcionalidades proporcionan una comprensión clara y concisa de los datos recolectados, facilitando el análisis y la toma de decisiones informadas para la gestión eficiente del cultivo acuícola.

En resumen, el diagrama de arquitectura destaca cómo se integra cada componente del sistema de monitoreo acuícola. La Capa Física recoge datos ambientales a través de sensores ubicados tanto en el entorno submarino como dentro de la cápsula. Estos datos son procesados por un microcontrolador y amplificados antes de ser transmitidos. La Capa de Comunicación facilita la transmisión de datos desde el ROV a través de Ethernet y comunicación inalámbrica mediante un Gateway. En la Capa de Almacenamiento, ThingSpeak y MySQL gestionan el almacenamiento y procesamiento de los datos. Finalmente, la Capa de Aplicación proporciona herramientas y interfaces para que los usuarios puedan visualizar, analizar y tomar decisiones basadas en los datos recolectados, asegurando una gestión eficiente y sostenible del cultivo acuícola.

3.5.0.1. Descripción general de módulos.

En esta sección se detallan los diferentes módulos que componen el sistema de monitoreo de jaulas de cultivo acuícolas. Cada módulo tiene una función específica y contribuye al funcionamiento integral del sistema.

1. Módulo de Sensores Submarinos

Este módulo está compuesto por diversos sensores ubicados en el entorno submarino dentro de las jaulas de cultivo. Sus principales responsabilidades son: Medir parámetros críticos del agua, como pH, oxígeno disuelto, electroconductividad y temperatura, y además envían los datos recopilados al microcontrolador para su procesamiento.

2. Módulo de Sensores de la Cápsula

Este módulo incluye sensores situados dentro de la cápsula que monitorean las condiciones ambientales internas, para identificar peaks de temperatura, o cualquier otro parámetros que pueda poner en peligro al dispositivo. Estos deben medir la temperatura, presión y humedad dentro de la cápsula, además de transmitir estos datos al microcontrolador mediante el protocolo I2C.

3. Módulo de electrónica

El módulo electrónico está diseñado para capturar datos de sensores, procesarlos y enviarlos a través de Ethernet para su visualización. Utiliza tecnología que mejora la precisión en la captura de datos analógicos, permitiendo su integración en sistemas de monitoreo y control eficientes.

4. Módulo de Microcontrolador

El microcontrolador actúa como el cerebro del sistema, recibiendo y procesando datos de los sensores. Deben recoger datos de los sensores submarinos y de la cápsula, procesar y preparar los datos para su transmisión a través del sistema de comunicación.

5. Módulo de Comunicación

Este módulo gestiona la transmisión de datos desde los sensores hasta la capa de almacenamiento. Se utiliza conexión ethernet, utilizada por el ROV para una comunicación estable y de alta velocidad, y comunicación inalámbrica (WiFi/LoRa) utilizada por el gateway para transmitir datos de manera eficiente y continua.

6. Módulo de Almacenamiento

Es responsable de la recopilación y almacenamiento de los datos en la nube. Utilizando

ThingSpeak, una plataforma de IoT para la recopilación, análisis y visualización de datos en tiempo real; y la base de datos MySQL que almacena los datos históricos para análisis a largo plazo y reportes.

7. Módulo de Aplicación

Proporciona interfaces de usuario para la visualización y análisis de datos. Utilizando Web Service que permite el acceso a datos y reportes a través de servicios web, el dashboard con herramientas interactivas para la visualización de datos en tiempo real, la generación de reportes detallados basados en los datos recopilados y el acceso a datos históricos para análisis y comparación.

3.5.0.2. Matriz de requisitos funcionales y módulos.

Se presenta una matriz que relaciona los requisitos funcionales del sistema con los módulos correspondientes que cumplen dichos requisitos. Esta matriz ayuda a visualizar cómo cada módulo del sistema satisface los diferentes requisitos funcionales especificados.

Cuadro 3.5.1: Matriz de Requisitos Funcionales y Módulos

Requisito Funcional	Descripción del Requisito	Módulo(s) Responsa- ble(s)
RF1	El sistema eléctrico debe estar cubierto con una carcasa resistente y waterproof.	Módulo de Sensores de la Cápsula, Módulo de ROV
RF2	El sistema desarrollado debe capturar los datos censados del agua.	Módulo de Sensores Submarinos, Módulo de Sensores de la Cápsula
RF3	El sistema tiene que enviar los datos censados a través de una API.	Módulo de Comunicación, Plataforma ThingSpeak
RF4	El sistema debe permitir visualizar los datos censados en una plataforma de software para el uso del usuario.	Plataforma ThingSpeak, Módulo de Aplicación
RF5	El sistema debe cumplir con las características de un sistema móvil controlado de manera remota.	Módulo de ROV, Módulo de Microcontrolador

Capítulo 4

Diseño Propuesto

Se presenta en este capítulo cada uno de los módulos que componen el sistema de monitoreo de jaulas de cultivo acuícolas, dando **especial énfasis en el aspecto electrónico y comunicación con la superficie**. Cada módulo se describe en términos de su estructura interna, componentes principales y cómo se integra con otros módulos del sistema. Los componentes acá mostrados fueron elegidos entre múltiples alternativas disponibles en el mercado, siendo estos los que presentaron mejores prestaciones y características que los hace aptos para las necesidades de este proyecto.

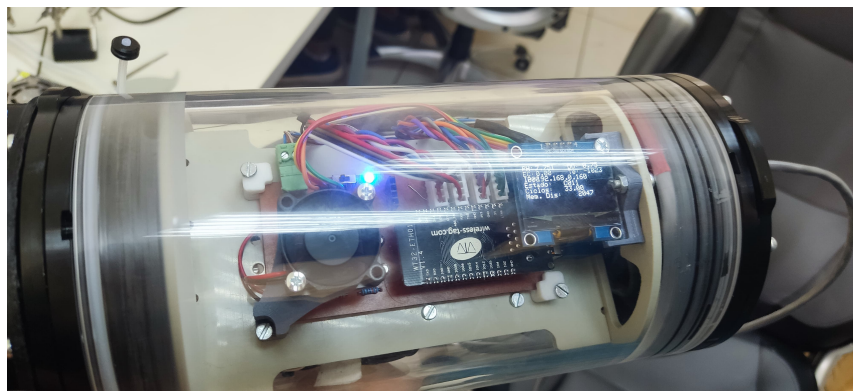


Figura 4.0.1: Interior del dispositivo

4.1. Módulo de Sensores Submarinos

Este módulo se encarga de medir parámetros críticos del agua en el entorno submarino. Al ser para monitoreo submarino se considera como requisito resistencia a al menos 10 Bar de presión, valor que permite monitorear hasta 100 metros de profundidad.

4.1.1. Sensores disponibles en Chile

Nombre	Descripción	Enlace Web
pH	Endress+Hauser Orbipac CPF81. Soporta 10 bar, cuerpo PPS.	Endress+Hauser
Temperatura	Mettler Toledo InPro 7100. Alta resistencia a presión.	Mettler Toledo
Salinidad	Aqualabo C4E. Sensor digital de 4 electrodos.	Welko Chile
Oxígeno	YSI EXO DO. Sensor óptico para uso submarino profundo.	YSI / Xylem

Cuadro 4.1.1: Opciones de sensores submarinos disponibles en Chile

4.1.2. Componentes disponibles para importación.

Componentes:

- **Sensor de pH:** Mide el grado de acidez/alcalinidad del agua.
 - **Sensor PH (Spear Tip pH Probe Atlas Scientific):** 170 USD. Este sensor de punta de lanza está diseñado para medir el pH en entornos difíciles, permitiendo una inserción directa en superficies blandas como tierra y carne.
- **Sensores de Oxígeno Disuelto:** Mide la concentración de oxígeno disponible en el agua.

- **Sensor DO (Industrial Dissolved Oxygen Probe Atlas Scientific):** 349 USD. Este sensor industrial es ideal para medir el oxígeno disuelto en aplicaciones donde se requiere una alta precisión y durabilidad.
- **Sensores de Electroconductividad:** Mide la capacidad del agua para conducir electricidad, lo que puede indicar la presencia de iones y sales.
 - **Sensor Salinidad (Kit) (Mini Conductivity K 1.0 Kit Atlas Scientific):** 166 USD. Este kit mini de conductividad K 1.0 es perfecto para medir la salinidad en soluciones acuosas con una alta precisión.
- **Sensores de Temperatura:** Mide la temperatura del agua.
 - **Sensor Temperatura (Kit) (Micro PT-1000 Temperature Kit Atlas Scientific):** 80 USD. Este kit de temperatura micro PT-1000 ofrece mediciones precisas y fiables de temperatura en aplicaciones acuáticas.

Todos estos sensores se comunican con módulos conversores de señal, para poder registrar los datos de manera digital en el microcontrolador utilizado.

4.2. Módulo de Sensores de la Cápsula

Permite monitorear el estado al interior de la capsula, por medio de los siguientes parámetros.

Componentes:

- **Sensores de Temperatura:** Mide la temperatura interna de la cápsula.
- **Sensores de Presión:** Mide la presión interna de la cápsula.
- **Sensores de Humedad:** Mide la humedad relativa dentro de la cápsula.

Los datos de los sensores se envían al microcontrolador a través del protocolo I2C, el microcontrolador procesa y envía estos datos a la capa de comunicación, para posterior registro y alertas en tiempo real.

4.3. Módulo de electrónica

Información detallada y esquemas están disponible en <https://github.com/cristianurra/sondapmm>
Este módulo abarca desde las mediciones realizadas por los sensores hasta la disponibilización de los datos por medio de una pagina HTML.

4.3.1. Componentes

- **ADS1115:** Conversor de Análogo a digital. Con una resolución de 16 bits permite una toma de datos más exacta que la entrada analógica del microcontrolador WT32-ETH01. Se muestra en la 4.3.1 el diagrama esquemático del módulo.

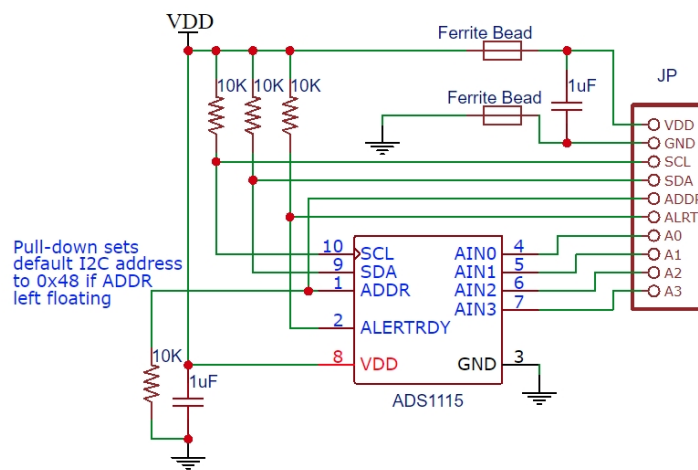


Figura 4.3.1: Diagrama esquemático ADS1115

- **WT32 ETH01 Ethernet:** Dado su tamaño reducido y su memoria disponible, este dispositivo es ideal para procesar la información a la vez que muestra datos en una pantalla OLED. Posee módulo Ethernet, que funciona en torno a un chip LAN8720, que al estar integrado en el módulo disminuye en gran medida la complejidad del circuito impreso que se ha diseñado, lo que permite que la fabricación del circuito impreso requiera menos tiempo y tenga menos posibles puntos de falla.

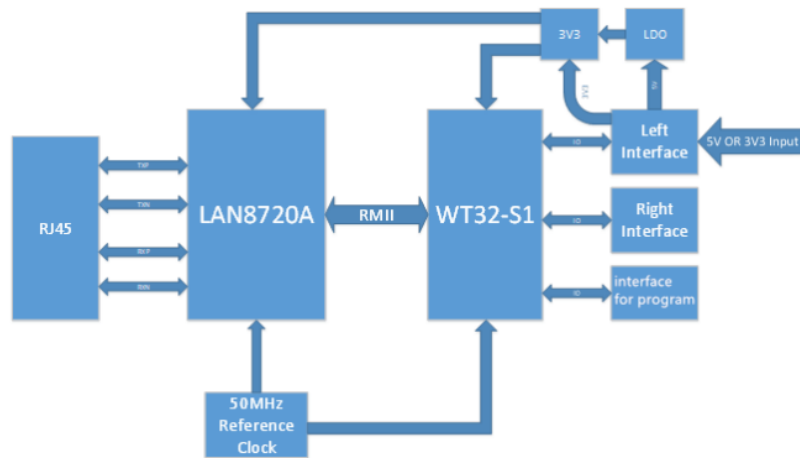


Figura 4.3.2: Diagrama de bloques del WT32-ETH01

- **Pantalla OLED 128x64:** Permite la visualización rápida del estado del dispositivo, esto por medio de códigos de error e información de los sensores. Implementar esta pantalla requiere la disponibilidad de $128 \times 64 = 1024$ Bytes de memoria SRAM, que debe ser cargada cada vez que se actualiza la pantalla. Es esta una de las razones para utilizar un dispositivo basado en ESP32 por sobre una placa basada en Atmega, cuya memoria está limitada a 2kB.
- **Fuente de poder:** Se propone el uso de una fuente de poder al interior de la cápsula. El regulador LM317 recibe entre 7 y 25[V]. La diferencia de voltaje entre entrada y salida será disipada en forma de calor, dependiendo del consumo de corriente. Se muestra a continuación un resumen de los requerimientos de corriente [I] para cada

componente:

Componente	I medio	I max
WT32-ETH01	0,198[A]	0,350[A]
Ezo Salinidad	0,018[A]	0,050[A]
Ezo pH	0,016[A]	0,018[A]
Ezo Temperatura	0,015[A]	0,016[A]
BME280	0,000004[A]	0,00001[A]
ADS1115	0,000015[A]	0,00002[A]
OLED	0,008[A]	0,010[A]
Total	0,255[A]	0,445[A]

Considerando un caso crítico, sobredimensionado, se puede considerar un consumo de 0,5[A]. Se calcula a continuación la potencia disipada por el regulador LM317:

$$P = \Delta V \cdot I$$

$$P = (V_{in} - 5[V]) \cdot 0,5[A]$$

En la que se aprecia que el calor disipado es proporcional a la diferencia entre el voltaje de entrada y el voltaje de salida. Se debe entonces minimizar esta diferencia. Estableciendo que V_{in} sea 9V, entonces el regulador LM317 debe disipar un total de 2[W]. Esta potencia puede ser disipada sin problema con un disipador plano estándar para encapsulado TO220.

4.3.2. Esquema de conexión

Se muestra en la Figura 4.3.3 el diagrama esquemático de la electrónica presente dentro de la sonda submarina. Para el diseño electrónico se utilizó el software gratuito Easy EDA.

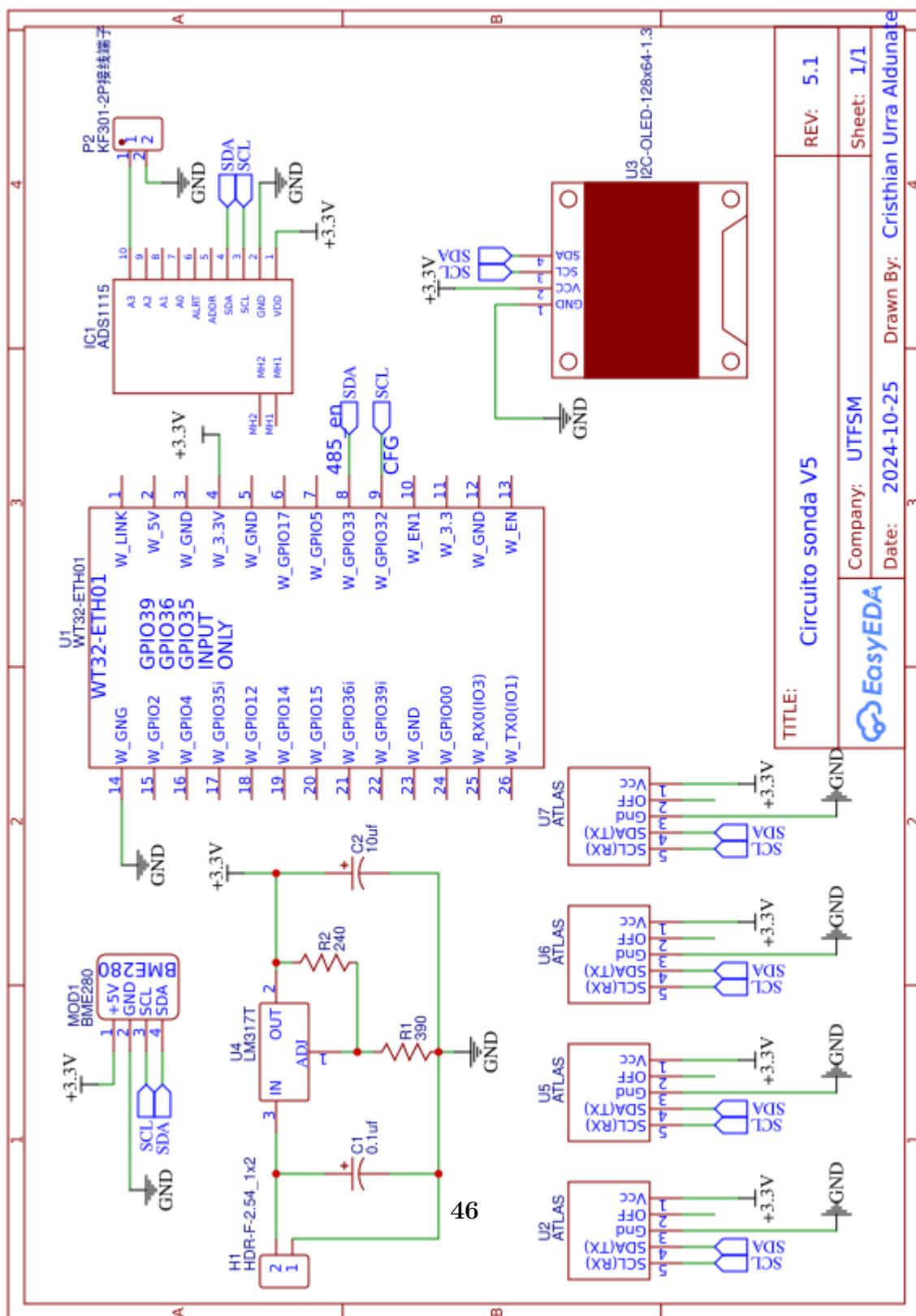


Figura 4.3.3: Diagrama esquemático

4.3.3. Diagrama de Circuito impreso

Se muestra en la Figura [4.3.4](#) el circuito impreso y sus medidas. La placa es diseñada a cara única, lo que facilita y abarata la fabricación.

4.3.4. Montaje de componentes

El prototipo fue montado sobre una PCB de fabricación propia. Los componentes fueron distribuidos de manera que se utilice el menor espacio posible, y la menor cantidad posible de pistas de cobre.

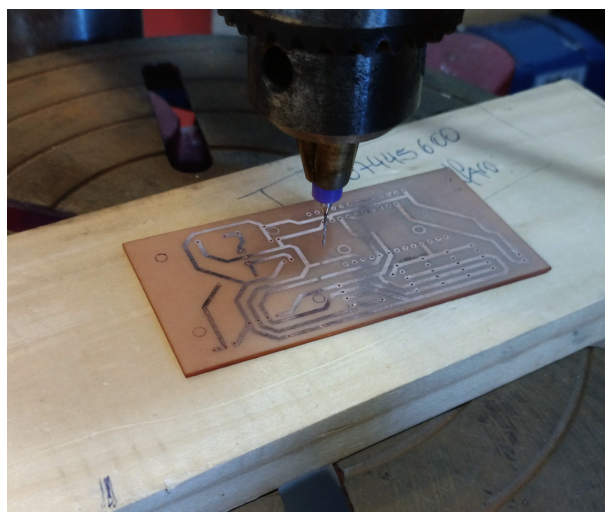


Figura 4.3.5: PCB en proceso de fabricación

El prototipo PCB fue fabricado con el método de transferencia de imagen por medio de calor, para una posterior eliminación de cobre restante utilizando cloruro férrico. El obtener un prototipo funcional con este método nos demostró que es posible generar piezas nuevas en pocas horas, lo que es sumamente importante si se desea poder suplir requisitos y modificaciones de ultimo minuto solicitadas por el cliente.

4.3.5. Algoritmo de muestreo

Una limitante se presenta al querer minimizar el tiempo necesario para medir múltiples parámetros. Siendo el objetivo una sonda móvil, es estrictamente necesario garantizar una velocidad de muestreo que permita un desplazamiento continuo en el medio acuático. Se muestra en la siguiente tabla los tiempos mínimos requeridos por cada sensor para

garantizar que la medición se realiza correctamente.

Cuadro 4.3.1: Tiempo mínimo requerido de medición por sensor.

Sensor	Tiempo minimo requerido
pH	763[ms]
E.C.	530[ms]
D.O.	530[ms]

Estamos en un modelo de comunicación entre **Maestro** y **Esclavos** correspondiente a cada sensor, que se comunican por medio de **I2C**. Se muestra en la Figura 4.3.6 un ejemplo de comunicación entre un Maestro y un esclavo.

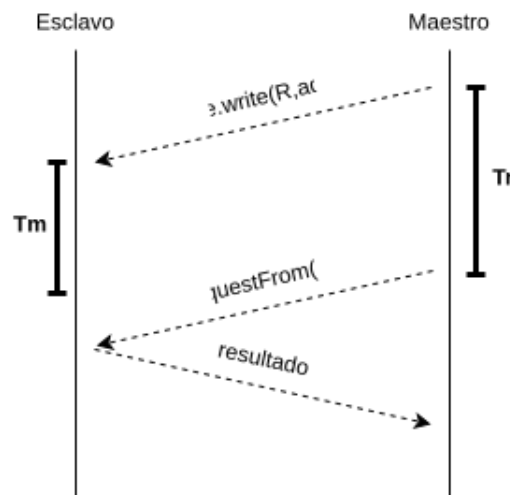


Figura 4.3.6: Modelo con un maestro y un esclavo

Un modelo mas realista, como que se debe implementar en este proyecto posee por lo menos 3 sensores conectados por medio de comunicación **I2C**. Una logica de comunicación sencilla sería realizar una medicion con cada sensor, y esperar su respuesta para seguir con el siguiente, tal como se plantea en el diagrama de la Figura 4.3.7.

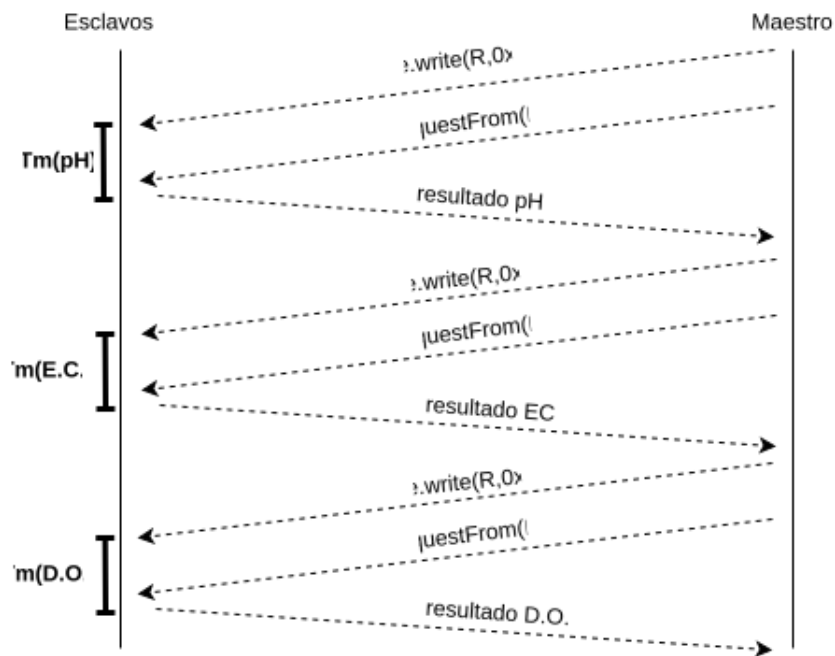


Figura 4.3.7: Modelo con 3 sensores I2C - Configuración 1

Con dicha secuencia se obtiene un algoritmo sencillo capaz de asegurar un funcionamiento correcto, pero no el mas óptimo. El tiempo necesario para obtener datos corresponde, en este caso, a la suma de tiempos de muestreo de cada sensor. Siendo necesario un tiempo $T = T_m(\text{pH}) + T_m(\text{E.C.}) + T_m(\text{D.O.})$. Por eso se plantea el siguiente esquema de comunicación, para optimizar la ventana de tiempo entre cada muestra, en la [Figura 4.3.8](#)

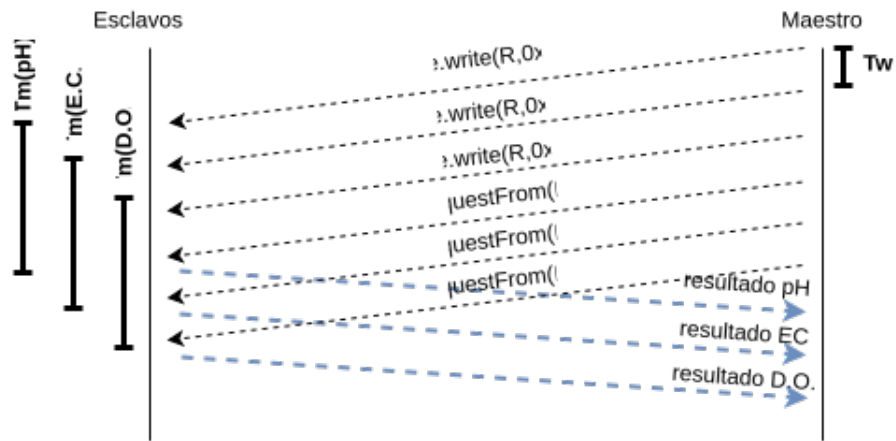


Figura 4.3.8: Modelo con 3 sensores I2C - Configuración 2

Siendo esta ultima una opción que permite reducir hasta en un 66 % el tiempo requerido para un muestreo de múltiples parámetros. Siendo necesario para esto un tiempo total de $T = \text{Mayor}(T_m) + 3 \cdot T_w$, siendo T_w el tiempo entre solicitudes por parte del Maestro.

4.3.6. Protocolo I2C en sensores

Cada sensor se conecta a un módulo EZO-Isolated tal como se muestra en la Figura 4.3.9



Figura 4.3.9: Configuración módulo EZO

Cada sensor trabaja de manera distinta, entregando una señal que varía en función del valor muestreado. Es importante destacar que esta señal no necesariamente corresponde a una señal que varía linealmente, sino que corresponde a peak de voltaje que son enviados al existir una reacción química. Por ello es necesario utilizar los siguientes componentes:

- **Módulo EZO:** Existe un modelo para cada sensor. Este módulo recibe la señal generada por un sensor, y la digitaliza para que quede disponible bajo solicitud en formato I2C.
- **Módulo Isolated:** Tal como se propuso en la Figura 4.3.8, los sensores trabajan en un régimen simultaneo. El proceso de medición de cada parámetro implica, por parte de los sensores, la generación de señales eléctricas al medio acuático, como por ejemplo en el sensor de electro conductividad que lo que hace es medir la resistencia del agua calculando la caída de voltaje en un espacio dado. Por esto se hace necesario aislar eléctricamente todos los sensores de las interferencias. El módulo Isolated es capaz de evitar este problema.

4.3.7. Comparativa en métodos de muestreo

Teniendo en consideración la diferencia de tiempos necesarios por cada sensor para realizar una medición, se hace necesario un analisis comparativo sobre el método de muestreo. Tenemos los siguientes casos:

- **Muestreo síncrono completo:** Se considera un muestreo completo cada cierto periodo de tiempo. El periodo de muestreo corresponde al sensor que necesita mas tiempo. Si el tiempo de muestreo es T_m , entonces cada periodo de tiempo se registrará los valores de todos los sensores. En una tabla los datos serán registrados de la siguiente manera:

<i>Tiempo</i>	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3
T_m	✓	✓	✓
$2 \cdot T_m$	✓	✓	✓
$3 \cdot T_m$	✓	✓	✓
$4 \cdot T_m$	✓	✓	✓

- **Muestreo asíncrono:** Bajo esta configuración, los datos serían almacenados en tiempos separados para cada sensor, esperando la respuesta de cada sensor para pasar al siguiente. Los datos serían almacenados de la siguiente manera:

<i>Tiempo</i>	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3
1		✓	
2	✓		
3			✓
4		✓	
5	✓		
6		✓	

Lo que si bien permite maximizar la resolución en mediciones en tiempo, nos genera tablas con cantidad de filas proporcional a la cantidad de sensores conectados, lo que significa mayor tiempo de búsqueda al tener en cuenta que en cada fila existe dato de un solo sensor.

4.3.8. Secuencia de funcionamiento del circuito

Se muestra en la Figura 4.3.10, de manera gráfica, un resumen del ciclo de trabajo del circuito, y como evoluciona la velocidad de muestreo en función del tiempo.

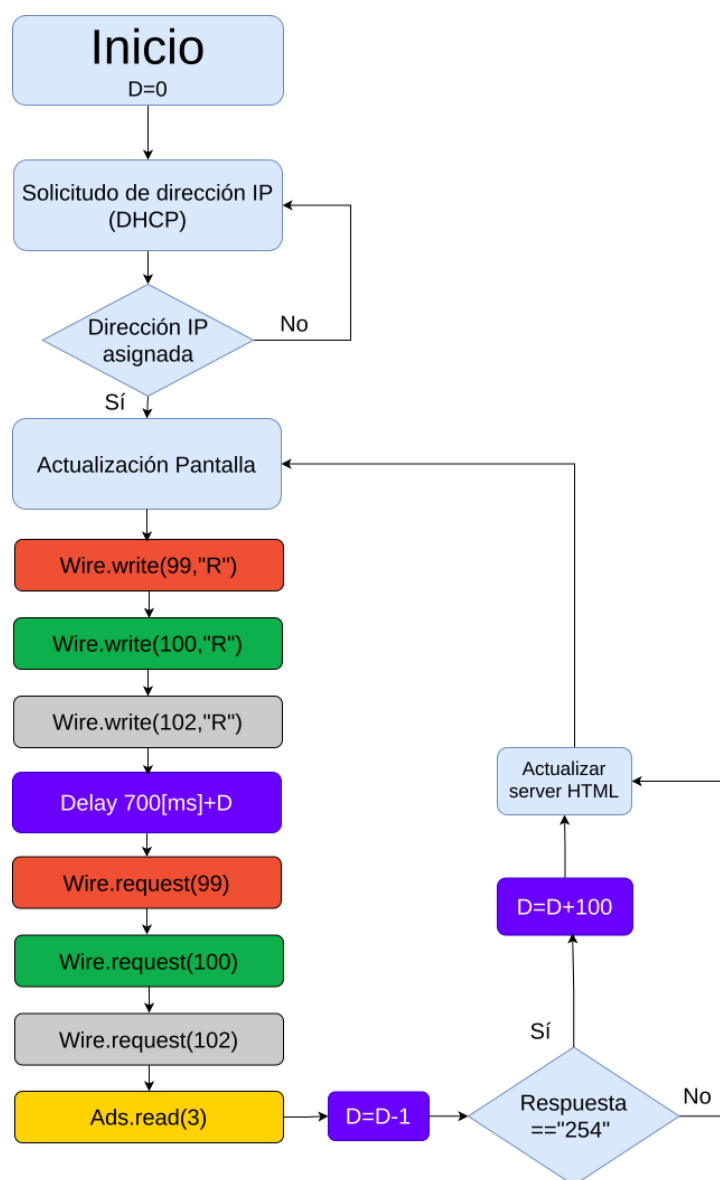


Figura 4.3.10: Ciclo de trabajo

El microcontrolador WT32-ETH01 es programado para que pueda variar de forma conveniente la velocidad de muestreo en los sensores. Tras diversas pruebas en ambiente controlado se pudo notar que los sensores poseen distintos tiempos de respuesta dependiendo de las condiciones del medio. Por ejemplo el sensores de oxígeno disuelto, que puede entregar una respuesta mucho mas rápida si se encuentra en movimiento. Por esto se plantea un ciclo de monitoreo en que la velocidad de muestreo se va ajustando, aumentando lentamente hasta que uno de los sensores retorne el **código 254**, mensaje que envían por el canal **I2C** que significa que necesita mas tiempo para poder completar una medición. En este momento se agrega mas tiempo el periodo de muestreo para que las mediciones puedan realizarse correctamente.

4.4. Módulo de Comunicación

Gestiona la transmisión de datos desde la sonda hasta la capa de almacenamiento y aplicación.

4.4.1. Formato y paquete de datos

En cada ciclo de muestreo se registra la información y se encapsula en una lista con el formato mostrado en la Tabla [4.4.1](#).

4.4.2. Envío de datos y canal de transmisión

Para el envío de datos se utilizó un formato HTML. Una vez que el dispositivo recolecta datos de los sensores actualiza la información en el servidor html que está operando en el mismo. Una ventaja de esto es que este dispositivo puede operar de forma **plug and play** simplemente conectándolo a un computador, permitiendo visualizar los datos en tiempo real sin necesidad de software adicional.

Descripción de los datos

- **time_stamp:** Corresponde a un valor numerico que indica cuantos mili segundos

time_stamp	do_data	ph_data	ec_data	tp_data	status
-------------------	----------------	----------------	----------------	----------------	---------------

Cuadro 4.4.1: Trama de datos

han transcurrido desde el momento de la primera medición. Sirve para en cada capa de aplicación verificar que no se registren datos duplicados.

- **xx_data:** Corresponde a los valores numéricos registrados por cada sensor.
- **status:** Corresponde a un código que indica el estado del dispositivo, puede tomar los valores mostrados en la Tabla 4.4.2.

Código	Fin	Descripción
1000	1199	Temperatura interna 0-199°C
2000	2100	Humedad Interna 0-100 %
3100		Sensor pH desconectado
3200		Sensor do desconectado
3300		Sensor T. desconectado
3400		Sensor E.C. desconectado
4100		Sensor pH invariante
4200		Sensor do invariante
4300		Sensor T invariante
4400		Sensor ec invariante
8888		Se envía al encender la sonda
9999		Retirar sonda del agua

Cuadro 4.4.2: Códigos y su descripción correspondiente.

4.5. Módulo de Almacenamiento

Almacena los datos recopilados y procesados, facilitando su análisis y visualización. Recibe datos del módulo de comunicación y proporciona datos al módulo de aplicación para su

visualización.

Componentes:

- **Plataforma ThingSpeak:** Es una plataforma de análisis de datos y almacenamiento en la nube diseñada para el Internet de las Cosas (IoT). Desarrollada por MathWorks, permite la recopilación, visualización y análisis de datos en tiempo real desde múltiples dispositivos IoT. Los datos se organizan en canales, facilitando su gestión y visualización mediante gráficos en tiempo real. Además, ThingSpeak ofrece herramientas de análisis avanzado a través de scripts de MATLAB y permite la interacción con APIs REST, lo que facilita su integración con otros servicios y aplicaciones. Es utilizada en diversos campos como el monitoreo ambiental, el consumo de energía, proyectos educativos y mantenimiento predictivo en entornos industriales. Su fácil configuración y potente capacidad de procesamiento y análisis de datos la convierten en una opción versátil para cualquier proyecto IoT.
- **Base de Datos MySQL:** Un sistema de gestión de bases de datos relacional (RDBMS) de código abierto, muy popular y ampliamente utilizado en aplicaciones web y empresariales. Desarrollado inicialmente por MySQL AB y ahora propiedad de Oracle Corporation, MySQL es conocido por su rendimiento, fiabilidad y facilidad de uso. Utiliza el lenguaje SQL (Structured Query Language) para gestionar y manipular datos, permitiendo la creación, actualización, eliminación y consulta de registros en una base de datos. MySQL soporta una arquitectura cliente-servidor, donde múltiples clientes pueden acceder simultáneamente a los datos almacenados en el servidor. Además, ofrece características avanzadas como replicación, clustering y seguridad robusta mediante control de acceso y cifrado. Su compatibilidad con diversas plataformas y lenguajes de programación, junto con una comunidad activa y una amplia documentación, hacen de MySQL una elección preferida para desarrolladores y administradores de bases de datos en proyectos de todos los tamaños.

4.6. Módulo de Aplicación

Proporciona interfaces para la visualización y análisis de datos por parte de los usuarios.

Componentes:

- **Web Service:** Facilita el acceso a datos y reportes a través de servicios web. Esto significa que a través de un localhost se podrá acceder al servicio web y a sus diferentes características. Se podrá utilizar en cualquier navegador de internet, por ejemplo, Google Chrome, Firefox, Opera, Edge, etc.
- **Dashboard:** Herramientas interactivas para la visualización de datos en tiempo real. Estas herramientas y gráficos son construidos a través de diversos componentes de React en el frontend, utilizando el lenguaje javascript para poder visualizar los datos a través de gráficos de líneas, barras, etc. Por detrás estará presente el backend, utilizando el framework de desarrollo para python Django, esta permite crear componentes importantes como una API la cual hace la conexión entre el backend y el frontend.
- **Reportes y Histórico de Data:** Genera reportes detallados y proporciona acceso a datos históricos. El servicio web entregará de una manera intuitiva una vista del histórico de datos, dashboard en tiempo real y la visualización de una visualización 3D, que entregarán al cliente información importante sobre lo que sucede en las jaulas de peces.

Recibe datos del módulo de almacenamiento, proporciona herramientas de visualización y análisis a los usuarios.

Capítulo 5

Resultados y validación

5.1. Pruebas en piscina de la universidad

En un entorno controlado, el dispositivo cumplió con lo esperado, tanto en ámbito funcional como extra funcional.

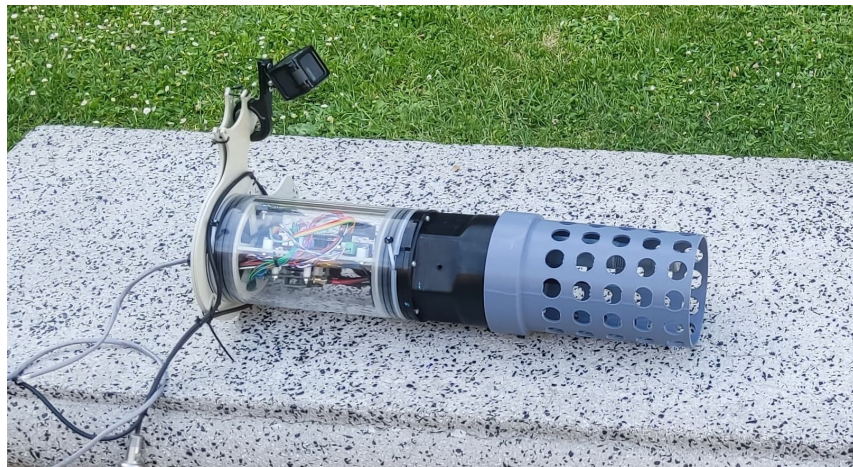


Figura 5.1.1: Dispositivo ensamblado

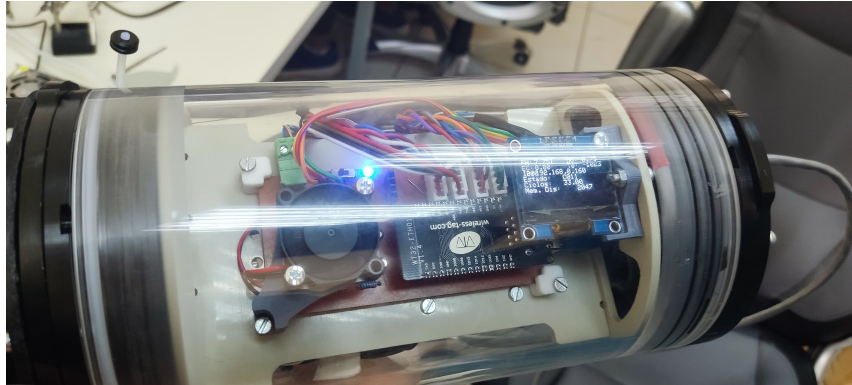


Figura 5.1.2: Interior de la capsula

5.1.1. Ámbito funcional

El dispositivo fue probado en la piscina de la universidad, a una profundidad de 3 metros por 40 minutos, tras lo cual se pudo registrar lo siguiente:

- **Toma de muestras:** El dispositivo pudo realizar mediciones del entorno acorde a lo programado, sin pérdidas de información.
- **Envío de datos:** Los datos registrados por el dispositivo pudieron ser enviados correctamente a la superficie, sin pérdida de información.

5.1.2. Ámbito extra funcional

Durante la prueba en la piscina, se analizó el comportamiento de dispositivo para verificar su estado interno.

- **Temperatura interna:** El dispositivo cuenta con un ventilador interno que disipa el calor generado por la fuente reguladora de voltaje. Gracias a esta configuración es que el dispositivo no alcanzó temperaturas elevadas, pudiendo funcionar correctamente.
- **Humedad:** Una de las principales preocupaciones al trabajar en ambiente submarino es la presencia de componentes que aceleran la oxidación de componentes electrónicos

y metálicos que no están especialmente tratados. Tras las pruebas de sumersión en la piscina, el circuito fue revisado en el momento, y una semana después, sin encontrarse restos de oxido o de filtraciones que puedan facilitar el deterioro temprano de los componentes.

Se muestra en la Tabla 5.1.1 un resumen del experimento.

Criterio	Valor	Comentario
Profundidad	3 metros	
Tipo de conexión	Ethernet	
Ciclos de medición	2387	
Voltaje Fuente	11.7[V]	Fuente regulada
Caída Voltaje transmisión	2.4[V]	
Voltaje de entrada sonda	9.3[V]	
Tiempo de prueba	40 minutos	
Acrílico empañado	No	Se pueden visualizar datos de la pantalla OLED
Filtraciones	No	
Flotabilidad	Positiva	Se utilizó lastre
Daño de componentes	No	
Fallos de memoria	No (0)	
Reinicio automático	No (0)	

Cuadro 5.1.1: Resumen del experimento

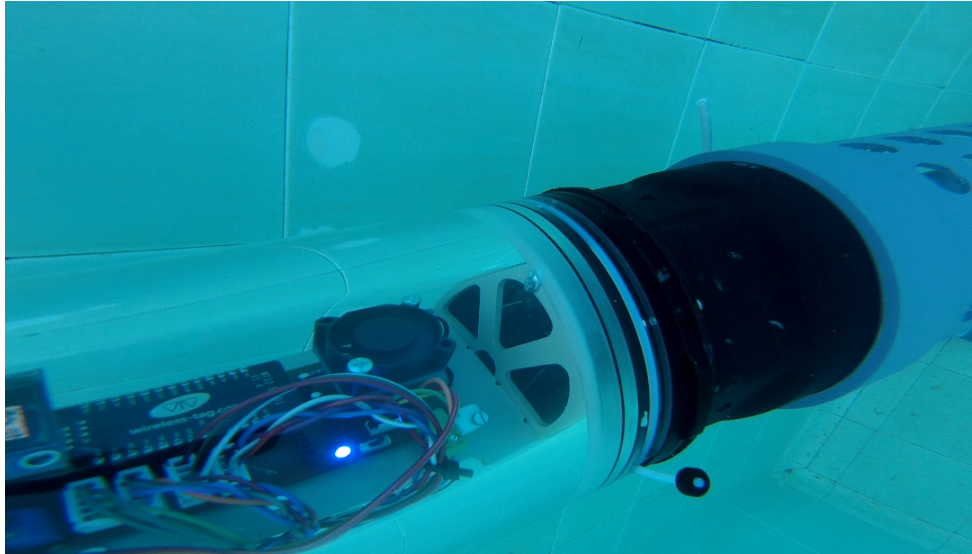


Figura 5.1.3: Dispositivo sumergido

Se puede observar en la Figura 5.1.3 el dispositivo sumergido, tras unos 35 minutos bajo el agua. El registro visual (video) nos permitió verificar que no se formó condensación, y que el ventilador funcionó en todo momento. En la Figura 5.1.4 se puede observar el dispositivo siendo recuperado tras 40 minutos sumergido.



64

Figura 5.1.4: Dispositivo emergiendo

Se muestra en la Figura 5.1.5 evidencia del funcionamiento de la interfaz de usuario. Se pudo recopilar datos según lo esperado, validando el correcto funcionamiento del software e integración de los módulos.

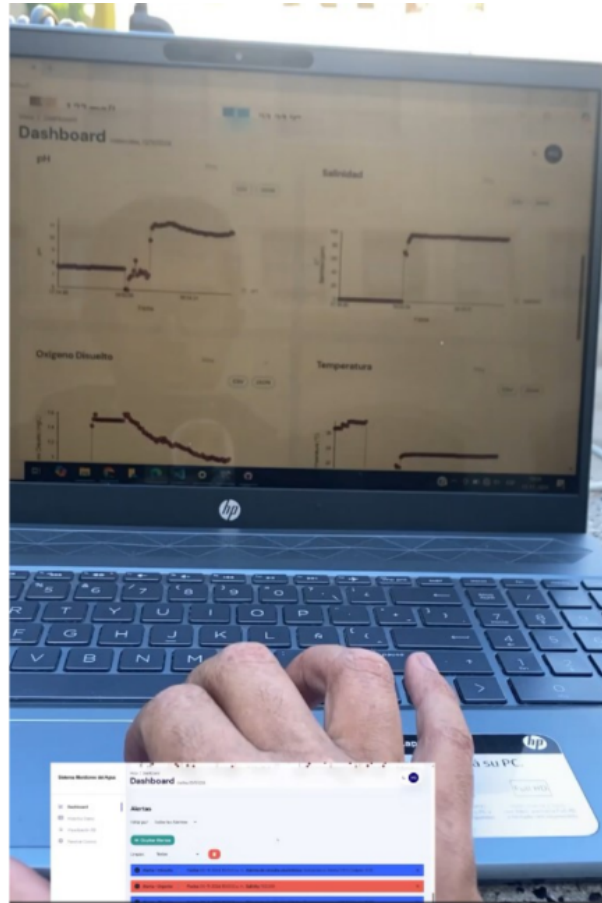


Figura 5.1.5: Funcionamiento de software de captura de datos

Para validar el producto es necesario verificar su funcionamiento y adaptabilidad a entornos productivos. Se mencionan a continuación los principales criterios de validación que deberán ser **revisados en un futuro**, lo que permitirá desplegar este dispositivo en zonas de cultivo cumpliendo requisitos y estándares en su funcionamiento.

5.2. Funcionamiento

El dispositivo fue probado en entorno controlado, como lo es la piscina de la universidad. Si bien las características de este entorno difieren un poco del entorno esperado de trabajo (mar, agua salada, hasta 40 metros de profundidad) fue útil para verificar aspectos mostrados en el capítulo anterior.

5.3. Sistema-Usuario

Es necesario estudiar como se comporta el usuario con el dispositivo, esto abarca los siguientes puntos:

- Puesta en marcha: El dispositivo debe ser rápido de instalar por el operador, permitiendo ahorrar tiempo de puesta en marcha.
- Conectividad: El dispositivo debe ser rápido de configurar por el operador, permitiendo en pocos segundos estar conectado por enlace local de red.

5.4. Durabilidad

Se deben realizar pruebas de resistencia y durabilidad en condiciones normales y extremas, para poder garantizar un trabajo continuo sin necesidad de mantenimiento, ajustes o calibración de sensores en diversos escenarios.

Capítulo 6

Conclusiones

El presente trabajo aborda la creación de una sonda de monitoreo de calidad del agua y el entorno subacuático en tiempo real, dirigida a la industria acuícola, particularmente en centros de cultivo de salmón. Este proyecto integra tecnologías avanzadas como sensores subacuáticos, sistemas de comunicación IoT y plataformas de visualización de datos. Se logró crear un sistema móvil capaz de realizar mediciones en diferentes profundidades, garantizando así un mapeo completo de las condiciones ambientales.

Los resultados obtenidos durante las pruebas realizadas en un entorno controlado validaron tanto la funcionalidad del dispositivo como su robustez estructural. Entre los principales logros destacan:

- Captura precisa de parámetros críticos como oxígeno disuelto, pH y salinidad.
- Comunicación confiable en tiempo real mediante protocolo Ethernet.
- Diseño modular y escalable que permite futuras ampliaciones e integraciones tecnológicas.

Además, el proyecto es afín a la importancia de mantener condiciones óptimas en el agua para asegurar la salud de los peces y la sostenibilidad económica de los centros de cultivo. Este sistema no solo proporciona datos esenciales para la toma de decisiones en tiempo real, sino que también fomenta prácticas acuícolas responsables con el medio ambiente.

No obstante, se identificaron áreas de mejora, como la necesidad de realizar pruebas en entornos más exigentes, tales como aguas saladas y mayores profundidades. Asimismo, se sugiere estudiar la interacción del usuario con el dispositivo para optimizar su diseño y usabilidad.

En conclusión, el desarrollo de esta sonda representa un avance significativo hacia la implementación de soluciones tecnológicas en la acuicultura, contribuyendo tanto al bienestar animal como a la eficiencia operativa de la industria. Con su implementación, se sientan las bases para un monitoreo ambiental más efectivo, sostenible y adaptado a las necesidades del sector.

Bibliografía

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). *Fisheries and Aquaculture*. Recuperado de: <https://www.fao.org/fishery/en/facp/chl>
- [2] MSD Salud Animal. (2022). *La importancia de monitorear y controlar la calidad del agua en la producción de peces*. Recuperado de: <https://11nq.com/URMr2>
- [3] USM Noticias. (2023). *Investigadora USM desarrolla pintura nanotecnológica que aporta al cultivo sostenible de salmones*. Recuperado de: <https://acortar.link/HGVRGQ>
- [4] Consejo del Salmón. (2020). *Principales datos de la industria*. Recuperado de: <https://www.consejodelsalmon.cl/informacion-de-la-industria/principales-datos-de-la-industria/>
- [5] Gupta, S., Kohli, M., Kumar, R., y Bandral, S. (2021). *IoT Based Underwater Robot for Water Quality Monitoring*. Recuperado de: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1033/1/012013/pdf>
- [6] Ya'acob, N., Dzulkefli, N. N. S. N., Yusof, A. L., Kassim, M., Naim, N. F., y Aris, S. S. M. (2021). *Water Quality Monitoring System for Fisheries using Internet of Things (IoT)*. Recuperado de: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1176/1/012016/pdf>
- [7] Darmalim, F., Hidayat, A. A., Cenggoro, T. W., Purwandari, K., Darmalim, S., y Pardamean, B. (2021). *An integrated system of mobile application and IoT solution*

- for pond monitoring. Recuperado de: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/794/1/012106/pdf>
- [8] AKVA Group. (2023). *Akva Submerged, a complete digital surveillance and reporting solution for the aquaculture industry*. Recuperado de: <https://www.akvagroup.com/digital/akva-submerged/>
- [9] Jan, F., Min-Allah, N., Saeed, S., Iqbal, S. Z., y Ahmed, R. (2022). *IoT-Based Solutions to Monitor Water Level, Leakage, and Motor Control for Smart Water Tank*. Recuperado de: <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/3/309>
- [10] Babua, P. A., y Sushmitha, S. (2021). *Automated Controlled Underwater Rover using Raspberry Pi*. Recuperado de: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwi_guzdp4WBAXXNBbkGHU4_BfIQFnoECBAQAQ&url=https%3A%2F%2Fturcomat.org%2Findex.php%2Fturkbilmat%2Farticle%2Fdownload%2F3134%2F2695%2F5916&usg=AOvVaw2BnwenY5HEH33gwYXWMQQq&opi=89978449
- [11] Trevathan, J., Schmidtke, S., Read, W., Sharp, T., y Sattar, A. (2021). *An IoT General-Purpose Sensor Board for Enabling Remote Aquatic Environmental Monitoring*. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2542660521000731>
- [12] Roy Prapti, D., Shariff, A. R. M., Che Man, H., Ramli, N. M., Perumal, T., y Shariff, M. (2021). *Internet of Things (IoT)-based aquaculture: An overview of IoT application on water quality monitoring*. Recuperado de: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/raq.12637>
- [13] Sendra, S., Parra, L., Jimenez, J. M., Garcia, L., y Lloret, J. (2022). *LoRa-based Network for Water Quality Monitoring in Coastal Areas*. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11036-022-01994-8>
- [14] AliExpress. *SENSOR de calidad del agua con nitrato de amonio, temperatura de turbidez, PH DO EC SOLAR flotante multiparámetro*. Recuperado

de: https://es.aliexpress.com/item/1005004011944647.html?src=google&src=google&albch=shopping&acnt=494-037-6276&slnk=&plac=&mtctp=&albbt=Google_7_shopping&albagn=888888&isSmbAutoCall=false&needSmbHouyi=false&albcpr=19756272873&albag=&trgt=&crea=es1005004011944647&netw=x&device=c&albpgr=&albpdr=es1005004011944647&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwxqayBhDFARIsAANWRnThixMOQ2l7y7G4fgWeICSFkOyk_HXs8GvS2a7nnpTsWRQzXbuGWw0aAiigEALw_wcB&gclsrc=aw.ds&aff_fcid=e19e1420d25542d8a0028aa4e281949e-1716173789249-03334-UneMJZVf&aff_fsk=UneMJZVf&aff_platform=aaf&sk=UneMJZVf&aff_trace_key=e19e1420d25542d8a0028aa4e281949e-1716173789249-03334-UneMJZVf&terminal_id=4fda2c88792a4ed5855fc4d9bd614b11&afSmartRedirect=y

- [15] ScaleAQ. *Orbit 881 Multisensor*. Recuperado de: <https://scaleaq.cl/producto/orbit-881-multisensor>
- [16] Innovasea. *aquaMeasure SAL*. Recuperado de: <https://www.innovasea.com/aquaculture-intelligence/sensores-inalambricos>
- [17] Lin, M., et al. (2020). *An integrated ROV solution for underwater net-cage inspection*. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-020-03623-z>
- [18] Zainuddin, A., et al. (2020). *Development of Autonomous Underwater Vehicle for Water Quality Measurement*. Recuperado de: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-5281-6_11
- [19] Jibrin, A., et al. (2019). *Preliminary Engineering Implementation on Multisensory Underwater ROV*. Recuperado de: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8734217>

- [20] Koparan, C., et al. (2020). *Wireless sensor network development in UAV for water quality monitoring*. Recuperado de: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/411/1/012061/pdf>
- [21] Sivanantham, S., et al. (2021). *Development of a low cost remotely operated vehicle for monitoring*. Recuperado de: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9389277>
- [22] Meyer, A. M., et al. (2020). *Innovative Water Quality and Ecology Monitoring Using UUV*. Recuperado de: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/4/1196>
- [23] Bahr, A., et al. (2009). *An Underwater Vehicle Monitoring System and Its Sensors*. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/220806987>
- [24] RS Hydro. *PROTEUS Multisensor - Water Quality Sonde*. Recuperado de: <https://www.rshydro.co.uk/water-quality-monitoring-equipment/water-quality-testing-equipment/multiparameter-water-quality-sonde/proteus-bod-multiparameter-water-quality-meter/>
- [25] YSI. *i3XO EcoMapper Autonomous Underwater Vehicle*. Recuperado de: <https://www.ysi.com/ecomapper>