

Modular IOT Architecture for Monitoring Aquaculture Variables in Tilapia (*Colossoma Macropomum*) Ponds

Arquitectura Modular Iot Para el Monitoreo de Variables Acuícolas de Estanques de Cachama (*Colossoma Macropomum*)

Diana Carolina Rodríguez Rozo¹, Diego Armando Mejía Bugallo²,
Cristhian Iván Riaño Jaimes³

¹Ing., Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia  <https://orcid.org/0009-0008-4750-7913>.

²MSc., Universidad de Pamplona, Grupo LOGOS, Pamplona, Colombia,  <https://orcid.org/0000-0003-3883-9779>.

³PhD., Universidad de Pamplona, Grupo A y C, Pamplona, Colombia,
 <https://orcid.org/0000-0002-0392-5741>.

Autor correspondencia: diego.mejia@unipamplona.edu.co

Cite this article as: D. Rodríguez Rozo, D. Mejía Bugallo, C. Riaño Jaimes, “*Arquitectura Modular Iot Para el Monitoreo de Variables Acuícolas de Estanques de Cachama (Colossoma Macropomum)*” *Prospectiva*, Vol. 24 N° 2 2026

Recibido: 11/11/2025 / Aceptado: 24/06/2026

RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño e implementación de una arquitectura modular IoT orientada al monitoreo en tiempo real de variables críticas de la calidad del agua en estanques destinados a la cría de cachama (*Colossoma macropomum*). La arquitectura propuesta integra tres capas principales: una capa de sensado compuesta por dispositivos que registran temperatura y pH, una capa de control basada en hardware abierto con capacidad de procesamiento y transmisión de datos mediante protocolos estándar, y una capa de supervisión en la nube que posibilita la visualización remota de la información. La arquitectura se diseñó bajo criterios de modularidad, bajo costo y facilidad de instalación, lo que facilita su aplicación en contextos rurales y en distintas escalas producción acuícola. Las pruebas realizadas en laboratorio y en campo confirmaron la viabilidad técnica de la propuesta, alcanzando una exactitud del 98.15% en temperatura y 99.15% en pH, con una latencia promedio de 0.95 s y transmisión estable incluso en condiciones de conectividad limitada. Además de su aporte tecnológico, esta arquitectura contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) relacionados con la seguridad alimentaria, la innovación y la producción sostenible, contribuyendo al fortalecimiento del sector piscícola mediante soluciones prácticas, económicas y escalables.

Palabras clave: Automatización, cría de cachama, control de variables acuícolas, monitoreo en tiempo real, piscicultura.

ABSTRACT

This paper presents the design and implementation of a modular IoT architecture for real-time monitoring of critical water quality variables in ponds used for raising cachama (*Colossoma macropomum*). The proposed architecture integrates three main layers: a sensing layer composed of devices that record temperature and pH, a control layer based on open hardware with data processing and transmission capabilities using standard protocols, and a cloud-based supervision layer that enables remote visualization of the information. The architecture was designed according to criteria of modularity, low cost, and ease of installation, which facilitates its application in rural contexts and at different scales of aquaculture production. Laboratory and field tests confirmed the technical feasibility of the proposal, achieving 98.15% accuracy in temperature and 99.15% in pH, with an average latency of 0.95 s and stable transmission even in conditions of limited connectivity. In addition to its technological contribution, this architecture contributes to the fulfillment of the Sustainable Development Goals (SDGs) related to food security, innovation, and sustainable production, helping to strengthen the aquaculture sector through practical, economical, and scalable solutions.

Keywords: Automation, cachama breeding, aquaculture variable control, real-time monitoring, fish farming.

1. INTRODUCCIÓN

La acuicultura se reconoce como un sector alimentario en rápida expansión, con aportes directos a la seguridad alimentaria y al ODS “Hambre Cero”, lo que refuerza la necesidad de infraestructuras de monitoreo robustas y escalables en entornos productivos, típicamente rurales [1]. En América Latina, la cachama negra (*Colossoma macropomum*) es una especie de alto interés comercial; su desempeño depende críticamente de mantener parámetros de calidad de agua dentro de rangos operativos, en particular oxígeno disuelto (OD), pH y temperatura, cuyas variaciones rápidas pueden comprometer la salud y la productividad del cultivo, motivando vigilancia continua y alertas oportunas en tiempo casi real [2].

Entre los factores ambientales que determinan el bienestar y rendimiento de la cachama se destacan la temperatura, el oxígeno disuelto y el potencial de hidrógeno (pH). La temperatura es crítica: valores por debajo de 20°C reducen drásticamente la tasa de crecimiento e incrementan la mortalidad, mientras que estudios recientes recomiendan mantener el rango entre 24°C y 30°C, con un ideal de 26–28°C en etapas iniciales del cultivo [3]. De hecho, se ha reportado una mortalidad superior al 62 por ciento a 18°C, lo que evidencia la necesidad de asegurar estabilidad térmica en los estanques [4].

El oxígeno disuelto es otro parámetro esencial, ya que sustenta el metabolismo aeróbico y afecta la eficiencia alimenticia y la respuesta inmunológica. Su disponibilidad disminuye a medida que la temperatura aumenta, por lo que, aunque la cachama presenta cierta tolerancia a niveles bajos, se recomienda mantener concentraciones superiores a 3 ppm (partes por millón) como mínimo, siendo óptimas entre 5 y 6 ppm en fases de engorde y reproducción [5]. Mantener valores por debajo del umbral mínimo puede inducir estrés crónico, inmunodepresión y una reducción significativa en el crecimiento [3].

Finalmente, el pH regula la acidez o alcalinidad del agua, influye en la toxicidad de compuestos como el amonio y afecta directamente funciones metabólicas clave. Aunque la cachama proviene de ambientes naturalmente ácidos, su desempeño óptimo ocurre en valores de 6.5 a 7.5, con un ideal cercano a 7.0 [6]. Valores extremos (<4 o >11) pueden causar graves alteraciones fisiológicas, lo que resalta la importancia de un monitoreo continuo, especialmente en sistemas intensivos donde la acumulación de materia orgánica o de alimento residual puede generar variaciones rápidas [4].

Los despliegues en granjas y estanques alejados han validado una arquitectura de comunicaciones de dos saltos: enlaces de acceso de muy bajo consumo mediante tecnología de largo alcance y baja potencia LoRa / LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*) entre nodos de sensores y pasarelas (*gateways*) locales, y

un retrolazo celular de evolución a largo plazo bajo la tecnología 4G / LTE (*Long Term Evolution*) desde la pasarela hacia servicios de red y aplicaciones en la nube [7] [8]. En campo se han reportado coberturas multi kilómetro (≈ 4 km en granja y hasta 8 km en línea de vista) y fiabilidad elevada (pérdida de paquetes $< 2\%$ a 5 km durante tres meses), lo que respalda la idoneidad de LoRa/LoRaWAN para entornos rurales dispersos [8] [9].

La integración pasarela-nube mediante el protocolo de transporte de telemetría de cola de mensajes MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) se ha demostrado como patrón viable para telemetría y orquestación de datos, facilitando la entrega de mediciones y eventos a servicios aguas arriba, mientras que el uso de servidores de red LoRaWAN habilita el enrutamiento de cargas útiles y la gestión del enlace extremo a extremo [10].

Operativamente, varias implementaciones confirman capacidades de alerta y control local: desde alarmas umbral configurables hasta la activación automática de aireadores ante caídas de OD con tiempos de respuesta del orden de minutos, coherentes con las exigencias de operación en granja [2]. Asimismo, se han documentado diseños energéticamente eficientes y estaciones autónomas con operación estacional prolongada bajo alimentación solar, alineadas con restricciones de potencia en zonas remotas [11].

En este contexto, si bien se han desarrollado diversas soluciones basadas en Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*) para el monitoreo de variables acuícolas, la literatura evidencia limitaciones recurrentes. Entre ellas se encuentran la dependencia de esquemas de comunicación poco estables, el uso de enlaces LoRa sin la implementación completa de la pila LoRaWAN y la adopción de arquitecturas cerradas que no incorporan modelos de datos ni mecanismos de seguridad estandarizados [12] [13]. Algunos sistemas reportan intervalos de muestreo del orden de 15 minutos y conectividad mediante Wi-Fi, lo cual resulta insuficiente para detectar variaciones rápidas en parámetros críticos como el oxígeno disuelto, especialmente en entornos rurales con limitada infraestructura. Otros despliegues combinan LoRa y 4G con resultados aceptables en campo, pero sin documentar claramente el uso de MQTT ni la interoperabilidad semántica de los datos. Asimismo, existen propuestas con LoRaWAN y 4G que presentan estabilidad operativa, aunque no incluyen la integración con estándares como OPC UA (*Open Platform Communications Unified Architecture*), OGC SensorThings (*Open Geospatial Consortium*) o la plataforma abierta FIWARE, ni lineamientos de ciberseguridad industrial como los establecidos en la norma IEC 62443 [14].

De este modo, el vacío de investigación identificado en la literatura científica radica en la falta de arquitecturas tecnológicas que logren converger la flexibilidad de los sistemas IoT de bajo costo en zonas rurales dispersas con el rigor técnico, la estandarización semántica de los datos y las directrices de ciberseguridad propias de los entornos industriales. Específicamente, la ausencia de modelos de datos unificados, la falta de una planificación cuantitativa de la capacidad del enlace de comunicación y la limitada adopción de criterios de seguridad industrial constituyen vacíos consistentes en el estado del arte que restringen la escalabilidad y confiabilidad de estas soluciones en la acuicultura real [15].

Para abordar estas limitaciones, la principal contribución de este artículo es el desarrollo, implementación y validación experimental de una arquitectura modular IoT robusta y de bajo costo para el monitoreo en tiempo real de estanques acuícolas de cachama (*Colossoma macropomum*), diseñada específicamente para operar de forma eficiente bajo las restricciones de conectividad de los entornos rurales. A diferencia de las soluciones existentes, esta propuesta aporta valor científico y práctico mediante tres pilares fundamentales: primero, la adopción del protocolo MQTT que optimiza la transmisión confiable de datos con una mínima carga útil y un consumo de recursos reducido [16], segundo, la integración de un esquema tolerante a fallos mediante el procesamiento local (*Edge Computing*) en un Controlador Lógico Programable (PLC, *Programmable Logic Controller*) industrial (Arduino Opta, programado mediante su entorno de desarrollo integrado IDE, *Integrated Development Environment*) que asegura la continuidad operativa y el almacenamiento en caché ante desconexiones de red, y tercero, una validación experimental cuantitativa que demuestra precisiones superiores al 98% en la adquisición de datos frente a instrumentos calibrados de laboratorio. Con este enfoque, el sistema no solo responde a una necesidad tecnológica insatisfecha en la

literatura, sino que también ofrece una herramienta con alta transferibilidad tecnológica que permite a los piscicultores visualizar de forma remota el estado de sus estanques, anticipar riesgos biológicos y optimizar la toma de decisiones productivas [17].

Con el fin de facilitar la comprensión del contenido y orientar al lector, este documento se encuentra estructurado de la siguiente manera: posterior a esta sección introductoria, en antecedentes se expone el estado del arte y la revisión de la literatura científica respecto al monitoreo tecnológico en la acuicultura. Seguidamente, en Materiales y Métodos se detallan las fases de diseño electrónico, modelado estructural, topología de software por capas bajo la norma ISO/IEC 30141 y las estrategias de seguridad informática implementadas. Posteriormente, en la sección de Resultados y Discusión se exponen las pruebas cuantitativas de laboratorio, los indicadores estadísticos de repetibilidad y reproducibilidad, la estimación de costos en USD, los modelos matemáticos de latencia y los hallazgos de los muestreos continuos realizados en estanques de producción real. Finalmente, en la sección de Conclusiones se sintetizan los principales aportes del trabajo frente a las metas de sostenibilidad, se declaran las limitaciones del sistema y se trazan las líneas de desarrollo técnico futuro.

2. ANTECEDENTES

El desarrollo de soluciones tecnológicas aplicadas al monitoreo de entornos acuáticos y sistemas digitales ha crecido de forma notable en los últimos años. Diversas investigaciones han mostrado cómo las soluciones basadas en IoT constituyen antecedentes relevantes y un punto de partida sólido para el desarrollo de sistemas más avanzados [18]. En 2021, se propuso una placa de circuito abierto (*open-source*) de bajo consumo energético diseñada específicamente para mitigar las restricciones de logística y costos en ambientes acuáticos remotos [19]. Posteriormente, en 2023, se integraron algoritmos de aprendizaje automático en sistemas IoT, lo que permitió detectar contaminantes con alta precisión, aunque aún persisten retos asociados a la complejidad computacional [20].

Otros trabajos han resaltado la importancia de construir plataformas digitales adaptables y escalables, capaces de ofrecer monitoreo predictivo de la calidad del agua, especialmente en contextos con recursos limitados [21]. En 2024, la tendencia se orientó hacia soluciones más prácticas y accesibles: por ejemplo, se diseñó un sistema telemétrico basado en el microcontrolador ESP32 para medir variables esenciales como pH, oxígeno disuelto, conductividad (EC), potencial de reducción de oxígeno (ORP), temperatura y sólidos disueltos totales (TDS), complementado con una pantalla LCD y una aplicación Android [22]. Este tipo de dispositivos reportó en pruebas de laboratorio errores absolutos promedio diferenciados por sensor, tales como +0.76% en temperatura, +1.52% en pH y +9.3% en oxígeno disuelto [22].

En 2025 surgieron propuestas más sofisticadas, como el sistema Aqua BuoySis, orientado al monitoreo de parámetros del agua salobre (oxígeno disuelto, pH, sólidos totales, entre otros) con transmisión de datos a través de una plataforma digital y el uso de algoritmos para mejorar la precisión de las mediciones. Este sistema incorpora además una interfaz móvil multilingüe que facilita la toma de decisiones en tiempo real por parte de los productores [23]. Paralelamente, se aplicaron modelos predictivos y técnicas explicativas de inteligencia artificial para el análisis de la calidad del agua en redes de distribución [24].

A la par de estos avances estáticos, la incorporación de metodologías analíticas avanzadas e infraestructuras cinemáticas ha redefinido las fronteras del monitoreo predictivo. [25] implementaron un sistema IoT a medida para el monitoreo continuo durante seis meses en estanques de Tilapia (*Oreochromis niloticus*) en Montería, Colombia. Mediante la adquisición de pH, temperatura, turbidez y oxígeno disuelto, aplicaron Redes Neuronales de TensorFlow (TFN) y el Índice Aqua Enviro (AEI) para el análisis predictivo de las dinámicas hídricas, logrando modelos de regresión altamente significativos para la temperatura. Por otra parte, con el fin de resolver las limitaciones de muestreo espacial, [26] desarrollaron el sistema robótico autónomo flotante *AquaBot*. El diseño destaca por emplear tecnología de comunicación inalámbrica de banda ultraancho (UWB) en el rango de 3.1 GHz a 10.6 GHz, aplicando estimaciones de Tiempo de Arribo

(TOA) para mitigar el desvanecimiento por trayectorias múltiples, logrando una precisión de rango a nivel de centímetros (cm) en el posicionamiento y enrutamiento del nodo robótico.

En conjunto, estas iniciativas destacan la necesidad de tecnologías inteligentes que favorezcan una gestión sostenible de los recursos hídricos. El monitoreo automatizado no solo ayuda a prevenir problemas, sino que también eleva la calidad del agua [27]. En este sentido, la inteligencia artificial y el análisis de datos se posicionan como herramientas clave para apoyar la toma de decisiones [28]. Asimismo, se ha demostrado que el uso de protocolos de transmisión eficientes como MQTT, integrados con plataformas en la nube, potencian las capacidades de monitoreo predictivo [29], mientras que los sistemas IoT de bajo costo han mostrado gran utilidad en zonas rurales [30].

A pesar de los avances documentados en el uso de IoT para la acuicultura, persisten vacíos importantes en la literatura que limitan su adopción por parte de pequeños y medianos productores. En primer lugar, la mayoría de los desarrollos previos presentan una dependencia absoluta de la computación centralizada en servidores remotos o en la nube (como en [25] y [26]), lo que compromete críticamente la operación y la persistencia de datos ante las interrupciones de conectividad comunes en áreas rurales. En segundo lugar, los sistemas basados en hardware de desarrollo comercial abierto carecen de la robustez industrial y la protección contra ruido electromagnético requerida para coordinar actuadores físicos de potencia en entornos de campo. Finalmente, se evidencia una carencia sustancial de arquitecturas estandarizadas que guíen la interoperabilidad del sistema; la literatura científica suele omitir el uso de marcos internacionales de referencia, lo que dificulta la escalabilidad y replicabilidad de los prototipos.

Para abordar de manera sistemática estas limitaciones teóricas, este trabajo adopta como marco de referencia global la norma internacional ISO/IEC 30141 (Internet of Things Reference Architecture). Este estándar proporciona una estructura conceptual organizada en capas funcionales que van desde el entorno físico e instrumentación hasta el transporte de datos y los servicios de aplicación en la nube. La integración de esta directriz permite unificar criterios de diseño, asegurando que la descentralización del procesamiento mediante estrategias de *Edge Computing* y la implementación de redes híbridas de comunicación se ejecuten bajo un modelo formalmente validado. De este modo, se garantiza una alta tolerancia a fallos y resiliencia en la persistencia de datos ante la intermitencia de las redes en zonas rurales dispersas, cerrando las brechas pendientes en semántica de datos y ciberseguridad que restringen la modernización del sector piscícola regional.

Con el propósito de evidenciar la pertinencia científica de esta aproximación, en la Tabla 1 se presenta un análisis comparativo explícito entre las aproximaciones previas de la literatura y la solución propuesta en este artículo, detallando sus variables, hardware y métricas de rendimiento como base justificativa para la solución modular e industrial desarrollada.

Tabla 1. Comparación técnico-estructural y métricas de rendimiento de la arquitectura propuesta frente a la literatura científica..
Fuente: Autor.

Table 1. Technical-structural comparison and performance metrics of the proposed architecture against the scientific literature..
Source: Author.

Trabajo	Variables Monitoreadas	Infraestructura de Hardware y Conectividad	Ubicación y Enfoque del Procesamiento	Mecanismos de Tolerancia a Fallos / Almacenamiento	Métricas de Rendimiento y Resultados Reportados
[19]	Variables ambientales acuáticas generales (pH, temperatura, nivel).	Placa de circuito abierto (<i>open-source</i>) a medida para bajo consumo.	Local / Lógica minimalista adaptada a restricciones de logística en campo. Diseño centrado en estabilidad temporal y suministro por energía	Diseño centrado en estabilidad temporal y suministro por energía renovable.	Muestreo en tiempo casi real (< 15 min). Validación funcional en múltiples estudios de calidad de agua.
[22]	Temperatura, pH, conductividad (EC), potencial de reducción de oxígeno (ORP), oxígeno disuelto (DO) y sólidos disueltos totales (TDS).	Microcontrolador comercial ESP32. Conectividad telemétrica IoT con pantalla LCD y aplicación Android.	Centralizado / Recopilación de sensores en un dataset y carga a base de datos en tiempo real.	Registro local de respaldo mediante ranura para tarjeta de memoria SD.	Errores absolutos promedio de laboratorio: Temperatura: +0.76%, pH: +1.52%, EC: +10.8%, ORP: +14.6%, DO: +9.3%, TDS: +13.2%.
[25]	pH, temperatura, turbidez y oxígeno disuelto (DO).	Sistema IoT modular a medida (<i>custom-built</i>) para monitoreo continuo en estanques de	Servidor Remoto en la Nube / Modelado predictivo avanzado con Redes Neuronales de	No documenta mecanismos de cómputo local o almacenamiento en el borde	Validación en estudio de 6 meses en Montería, Colombia. Modelos de regresión para temperatura altamente

		Tilapia.	TensorFlow (TFN) y el Índice Aqua Enviro (AEI).	ante caídas de red.	significativos ($p < 0.001$); correlación turbidez-temperatura de $r = -0.093$.
[26]	Localización cinemática y variables de estanques piscícolas.	Redes inalámbricas con tecnología de banda ultraancha (UWB) en el rango de 3.1 GHz a 10.6 GHz.	Periférico / Simulación y análisis de pulsos Gaussianos y rectangulares mediante promedios y correlación de Relación Señal-Ruido (SNR).	Estimación del Tiempo de Arribo (TOA) local para mitigar el desvanecimiento por trayectorias múltiples.	Alta precisión de rango a nivel de centímetros (cm) para el posicionamiento y enrutamiento del nodo robótico (<i>AquaBot</i>).
Este trabajo (Arquitectura Propuesta)	pH y Temperatura.	Controlador Lógico Programable (PLC) de grado Industrial (Arduino Opta). Red híbrida de dos saltos: RS485/Wi-Fi local + Protocolo MQTT.	<i>Edge Computing</i> local en PLC (Estrategias de control y umbrales en tiempo real) + Supervisión remota en la nube.	Alta resiliencia rural. Estrategia tolerante a fallos mediante el almacenamiento en caché local del bróker Mosquitto y ledes periféricos de diagnóstico físico.	Exactitud promedio de adquisición validada frente a patrones calibrados: Temperatura: 98.15%, pH: 99.15%. Latencia de procesamiento local en el borde de 50 ms e intervalo sincrónico de 1.02 s.

Este trabajo presenta el diseño de un sistema IoT modular para el monitoreo en tiempo real blando de variables críticas en estanques de cachama, estructurado conceptualmente bajo los lineamientos de la norma ISO/IEC 30141. La propuesta articula un nodo de adquisición robusto en el borde con un esquema de conectividad híbrido y una plataforma de supervisión descentralizada.

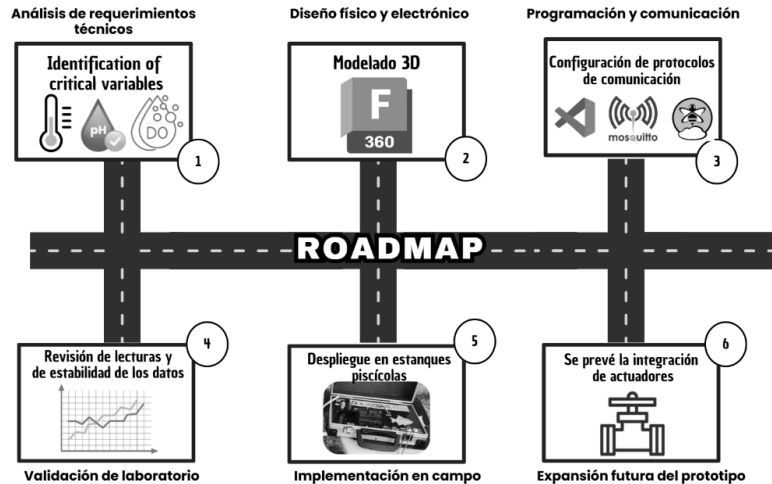
3. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló como un estudio aplicado con orientación experimental, centrado en el diseño, implementación y validación de una arquitectura modular IoT orientada al monitoreo en tiempo real de variables críticas de la calidad del agua en estanques de cachama. El enfoque metodológico comprendió el desarrollo de un prototipo funcional, evaluado tanto en condiciones controladas de laboratorio como en entornos acuícolas reales, con el propósito de verificar precisión, estabilidad y portabilidad.

El desarrollo de la arquitectura se estructuró en cinco fases secuenciales: orientadas a garantizar su funcionalidad y adaptabilidad. Estas fases se muestran en la Figura 1, que funciona como la hoja de ruta del proyecto; su importancia radica en que permite observar el avance ordenado del prototipo, la relación entre el diseño físico y la programación, y el camino a seguir para futuras mejoras del sistema. Aunque la hoja de ruta plantea una proyección hacia adelante, el desarrollo actual de la arquitectura se concentró específicamente en las primeras cinco fases establecidas. La primera fase consistió en el análisis de las necesidades críticas identificadas en el entorno real de la producción acuícola rural, donde la volatilidad ambiental en estanques a cielo abierto y la falta de conectividad estable amenazan la supervivencia de las especies. Estas necesidades operativas iniciales se tradujeron en requisitos del sistema orientados a la supervisión constante de las variables, asegurando que el equipo pudiera operar a la intemperie sin perder información. A partir de estos requisitos, se tomaron los requerimientos técnicos detallados y se identificaron las variables críticas a monitorear, clasificándolas bajo tres dimensiones de ingeniería: funcionales y de sensado, ambientales y estructurales, y de red y conectividad. Este análisis permitió la correcta selección de componentes y el diseño de la arquitectura.

Figura 1. Hoja de ruta. Fuente: Autor.

Figure 1. Roadmap. Source: Author.



En la dimensión funcional y de sensado, el requerimiento de medir la temperatura en un rango de 0 °C a 50 °C y el pH entre 4 y 10 unidades, con una latencia menor a 3 segundos, condujo a la selección de hardware y protocolos de comunicación específicos. Se optó por la integración de sensores basados en el protocolo digital One-Wire para la temperatura y canales de lectura analógica directa en el controlador para el pH, asegurando precisión y un bajo tiempo de respuesta en entornos húmedos. Asimismo, para cumplir con el requerimiento de auditoría de datos sin depender de conectividad externa, se decidió diseñar una función de descarga de históricos en formato plano (CSV) directamente desde la interfaz local del usuario, garantizando la autonomía operativa del productor.

Por su parte, los requerimientos ambientales derivados de la alta humedad relativa y la exposición directa a la intemperie exigieron decisiones de ingeniería enfocadas en la robustez física del hardware. Se determinó el uso de una envolvente estanca compacta configurada como maleta portátil, lo que garantiza la protección de los componentes electrónicos internos y facilita su transporte manual entre estanques. Además, para resolver la necesidad de un diagnóstico rápido en zonas aisladas, se tomó la decisión de programar y aprovechar los ledes físicos periféricos del controlador (D0 a D3) como una interfaz visual directa en campo. Esto permite conocer instantáneamente el estado de la red Wi-Fi, del bróker y del flujo de datos, evitando la dependencia de pantallas externas que suelen ser propensas a fallas por condensación.

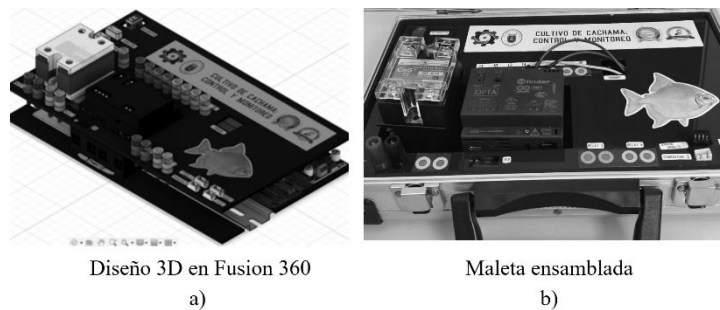
El requerimiento de adaptabilidad a infraestructuras de red inestables o de bajo ancho de banda guió las decisiones fundamentales de la arquitectura de software y comunicaciones. Se definió una estructura basada en computación en el borde (Edge Computing), permitiendo que el sistema opere de forma autónoma a nivel local mediante redes Wi-Fi bajo el estándar IEEE 802.11 b/g/n. Para mitigar la pérdida de paquetes antes de la sincronización con la nube, se implementaron rutinas cíclicas automáticas de reconexión sin bloqueo del hilo principal del programa, respaldadas por el despliegue de un bróker local que actúa como buffer de almacenamiento intermedio. Cada elección tecnológica y componente de la arquitectura queda plenamente justificado como la respuesta directa a la evolución de las necesidades originales del entorno acuícola.

Dando continuidad a este esquema metodológico, la segunda fase correspondiente al diseño físico y electrónico se consolidó integrando de manera modular los sensores directamente al controlador lógico programable (PLC) Arduino Opta, encargado de la adquisición, procesamiento y transmisión de los datos. El modelado estructural se efectuó en Autodesk Fusion 360, asegurando un diseño compacto y resistente

para su uso en campo. Este proceso de desarrollo estructural y de hardware se detalla en la Figura 2, donde en la Figura 2a se observa el modelado digital en 3D desarrollado en el software de diseño, mientras que en la Figura 2b se presenta el resultado final de la maleta ya ensamblada físicamente y lista para operar.

Figura 2. Diseño 3d en Fusion 360 y resultado de la maleta ensamblada. (a) Diseño 3D en Fusion 360; (b) Resultado del prototipo armado. Fuente: Autor.

Figure 2. 3D design in Fusion 360 and result of the assembled suitcase. (a) 3D design in Fusion 360; (b) Assembled prototype result. Source: Author.



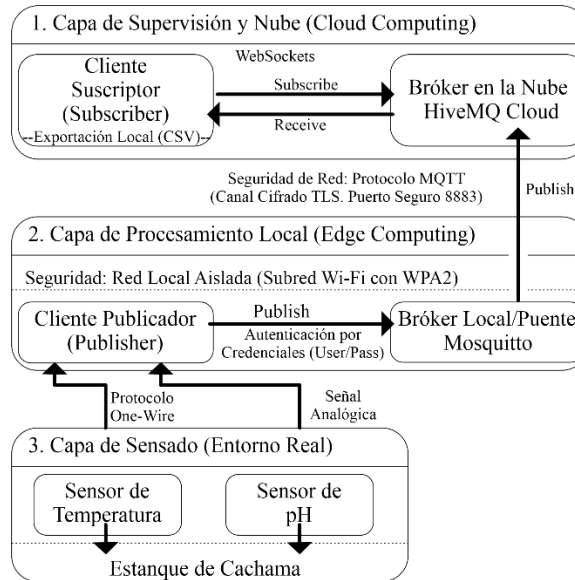
La tercera fase corresponde a la programación del dispositivo de control se desarrolló en el entorno Arduino IDE, configurando el protocolo de comunicación MQTT para la transmisión de datos en tiempo real. La arquitectura de software se concibió bajo un enfoque distribuido estructurado en tres capas jerárquicas interconectadas, las cuales combinan de manera eficiente los paradigmas de Cómputo en el Borde (*Edge Computing*) y Cómputo en la Nube (*Cloud Computing*), tal como se ilustra en el diagrama de la Figura 3.

La primera de estas capas corresponde a la Capa de Sensado, la cual constituye la base física de la arquitectura ubicada directamente en el entorno real del estanque de cachama. Esta capa está integrada por los elementos de captura primaria, que incluyen un sensor de temperatura sumergible operado bajo el protocolo digital *One-Wire* y un sensor de pH acondicionado para entregar señales compatibles con canales de lectura analógica directa, garantizando así el registro constante de las fluctuaciones físicas del agua. Sobre esta base se despliega la Capa de Procesamiento Local o *Edge Computing*, la cual actúa como el núcleo de procesamiento inmediato en campo. Esta capa está conformada por el PLC Arduino Opta en rol de cliente publicador, el cual adquiere las señales de los sensores, las empaqueta en cadenas de texto ligeras y las transmite mediante una subred Wi-Fi privada local protegida bajo cifrado WPA2 hacia una instancia local del bróker Eclipse Mosquitto, configurado en un puerto de escucha abierto para admitir la mensajería en el borde sin retrasos por latencia externa. Finalmente, la Capa de Supervisión y Nube gobierna la gestión remota y la persistencia global de la información; en ella, el bróker local del borde actúa simultáneamente como un puente de red que redirige de manera externa el flujo de datos hacia la plataforma *HiveMQ Cloud* a través de un puerto seguro, permitiendo que los nodos supervisores e interfaces web finales se enlacen a la nube para la visualización global del estado acuícola.

Este esquema jerárquico distribuye las cargas de trabajo y otorga una robusta tolerancia a fallos ante interrupciones del enlace a Internet en zonas rurales. A nivel físico, el bucle interno del Arduino Opta permanece activo de forma síncrona en el borde, usando sus ledes periféricos como interfaz diagnóstica visual en campo. A nivel de datos, el bróker local desactiva la limpieza de sesión e implementa una Calidad de Servicio de nivel uno en el canal de sincronización, forzando el almacenamiento en caché local de los mensajes durante el corte de red. Al restablecerse el enlace, la subrutina del puente reanuda la conexión automáticamente e inyecta asincrónicamente la ráfaga acumulada a la nube, evitando la pérdida de la trazabilidad temporal en el sistema.

Figura 3. Arquitectura por capas del sistema modular IoT Fuente: Autor.

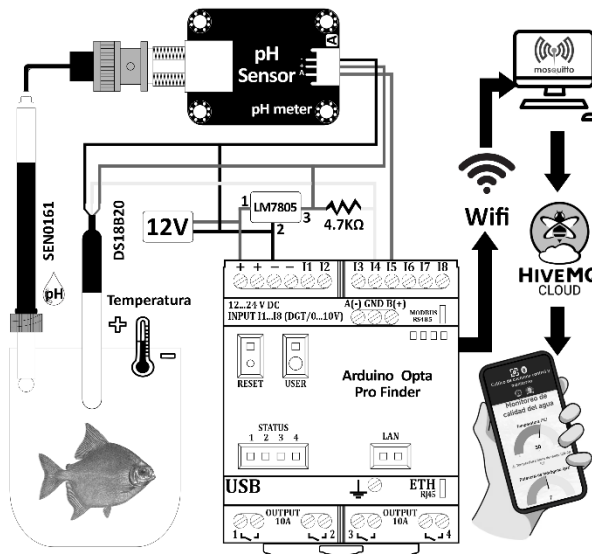
Figure 3. Layered architecture of the modular IoT system. Source: Author.



Para detallar la conexión física del hardware y la ruta secuencial de las señales, la Figura 4 expone el esquema de conexiones y comunicación del sistema. En este diagrama se observa que el sensor de temperatura se enlaza directamente a la entrada digital I4 del PLC utilizando el protocolo de comunicación *One-Wire*, mientras que el sensor de pH se conecta a la entrada analógica I5 para el acondicionamiento de su señal de voltaje. Desde el controlador Arduino Opta, una transición inalámbrica mediante la red Wi-Fi local representa el envío de los datos empaquetados hacia el bróker Mosquitto situado en el borde. Posteriormente, una flecha de comunicación dirigida establece el enlace de este bróker local hacia el servidor centralizado de *HiveMQ Cloud*, completando la transferencia hacia la nube. El ciclo se cierra mediante una flecha orientada desde la plataforma en la nube hacia el teléfono celular del operario, nodo final donde se despliega la interfaz gráfica de usuario para el monitoreo remoto de las variables.

Figura 4. Conexiones y comunicación. Fuente: Autor.

Figure 4. Connections and communication. Source: Author.



El despliegue práctico de este esquema de doble bróker requirió soluciones particulares en software para resolver los retos de almacenamiento y protección informática en entornos vulnerables. La capa de almacenamiento y persistencia de registros opera bajo una estrategia de Persistencia del Lado del Cliente (*Client-Side Persistence*), prescindiendo del despliegue de motores de bases de datos relacionales en el sitio para mantener la solución económica. El nodo supervisor dedicado a los registros históricos actúa como un cliente suscriptor MQTT conectado a la nube mediante WebSockets seguros en su respectivo puerto. Al recibir las cargas útiles en tiempo real, el script del navegador aloja dinámicamente las variables en arreglos estructurados dentro de la memoria volátil. Al accionar el botón de descarga, un controlador de eventos compila estas matrices junto con las estampas de tiempo en una cadena de texto plana, encapsulándola en un objeto binario tipo *Blob* que genera de forma automatizada la descarga local de una bitácora en formato CSV.

Respecto a la seguridad de la información, la arquitectura implementa un esquema multinivel que combina encriptación y control de acceso. Por un lado, la autenticación en la capa de aplicación restringe el acceso a los brókers mediante credenciales obligatorias integradas por un identificador de usuario y un token de contraseña, impidiendo publicaciones anónimas o maliciosas en los tópicos del cultivo. Por otro lado, el cifrado en la capa de transporte obliga al puente Mosquitto local a validar el certificado de seguridad de la autoridad de certificación Let's Encrypt, forzando una conexión segura TLS mediante el puerto correspondiente. Paralelamente, las interfaces web de monitoreo y control se enlazan mediante el protocolo seguro de WebSockets sobre TLS, garantizando la integridad de las métricas frente a interceptaciones en el tránsito de la red.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La cuarta fase del desarrollo de la arquitectura corresponde a validación de laboratorio, y la quinta es la implementación de campo. El sistema fue evaluado experimentalmente en tres escenarios diferenciados: un entorno controlado de laboratorio en el municipio de Pamplona y dos estanques acuícolas de producción real en funcionamiento (uno ubicado en el municipio de El Zulia y otro en Pamplona, Norte de Santander). Esta estrategia de validación permitió contrastar el desempeño de la arquitectura modular bajo condiciones estables y en entornos de campo expuestos a una alta variabilidad ambiental directa.

La exactitud de los nodos de sensado se determinó mediante la comparación matemática de los valores experimentales medidos frente a instrumentos analíticos de referencia calibrados, aplicando la Ecuación (1):

$$Exactitud(\%) = \left(1 - \frac{|x - x_{ref}|}{x_{ref}}\right) \times 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde x corresponde al promedio de lecturas y x_{ref} al valor patrón.

El sensor de temperatura DS18B20 alcanzó una exactitud promedio de 98.15%, con diferencias menores a 0.5 °C en comparación con el termómetro de referencia. En el caso del sensor de pH SEN0161, la exactitud promedio fue de 99.15%, validada mediante soluciones buffer de 4.0, 7.0 y 10.0. En conjunto, los sensores de temperatura y pH mostraron alta confiabilidad, superando el 97% de exactitud en todos los puntos analizados.

Además de la exactitud frente a equipos de referencia, se evaluó el comportamiento estadístico de los sensores en términos de repetibilidad (consistencia de lecturas bajo condiciones constantes) y reproducibilidad (consistencia al variar las condiciones de medición).

Para el sensor de temperatura DS18B20, se realizaron 20 lecturas consecutivas a 15.9°C, obteniéndose un coeficiente de variación (CV) de 0.42%, lo que confirma una alta estabilidad bajo condiciones térmicas

constantes. La reproducibilidad se analizó en tres escenarios (14.5°C, 15.9°C y 31.4°C), con errores absolutos inferiores a 0.5°C y CV menores al 0.5%, evidenciando consistencia entre distintas condiciones de operación. Los indicadores estadísticos asociados a estos ensayos de repetibilidad se consolidan en la Tabla 2.

Tabla 2. Indicadores de Repetibilidad de los Sensores. Fuente: Autor.

Table 2. Sensor repeatability indicators. Source: Author.

Sensor	Condición / Solución	Error Absoluto	CV (%)
Temperatura (DS18B20)	15.9°C (repetibilidad)	0.465°C	0.42
pH (SEN0169)	pH 4.00 (buffer)	0.052	1.74
	pH 7.00 (buffer)	0.047	0.50
	pH 10.00 (buffer)	0.058	0.44

En el caso del sensor de pH SEN0161-V1, se realizaron mediciones repetidas en soluciones buffer de pH 4, 7 y 10. Los resultados mostraron CV inferiores al 2%, lo que refleja una alta repetibilidad. Para la reproducibilidad, se efectuaron pruebas en días distintos, obteniéndose medias cercanas a los valores de referencia y CV inferiores al 1.5%, lo que demuestra un comportamiento confiable en mediciones distribuidas en el tiempo. Los resultados de estas evaluaciones de reproducibilidad se presentan detalladamente en la Tabla 3.

Tabla 3. Indicadores de Reproducibilidad de Sensores. Fuente: Autor.

Table 3. Sensor Reproducibility Indicators. Source: Author.

Sensor	Condición / Solución	Error Absoluto	CV (%)
Temperatura (DS18B20)	14.5°C (agua fría)	1.164°C	0.26
	15.9°C (ambiente)	0.465°C	0.42
	31.4°C (mano cerrada)	0.205°C	0.32
pH (SEN0169)	pH 4.00 (buffer)	0.0753	1.29
	pH 7.00 (buffer)	0.0311	0.51
	pH 10.00 (buffer)	0.0305	0.58

La latencia se definió como el tiempo transcurrido entre la adquisición física de los datos y su visualización final en la interfaz web. Para evaluar este comportamiento de forma cuantitativa, el retraso acumulado extremo a extremo (T_{total}). se modeló matemáticamente mediante la sumatoria lineal de los tiempos de los procesos síncronos y asíncronos involucrados en la arquitectura distribuida, tal como se expresa en la Ecuación (2):

$$T_{total} = T_{muestreo} + T_{procesamiento+transmisión} + T_{latencia MQTT} \quad (\text{Ecuación 2})$$

El proceso inicia con la etapa de captura física $T_{muestreo}$. En esta fase, el sensor de temperatura DS18B20 requiere hasta para completar su conversión analógica-digital interna, mientras que el sensor de pH SEN0161 demanda aproximadamente para la estabilización de su lectura; ambos transductores están regulados bajo un ciclo de actualización síncrono de un segundo administrado por el controlador, lo que consolida un tiempo de muestreo fijo de 1.02 s.

Posteriormente, tiene lugar la etapa de cómputo local $T_{procesamiento+transmisión}$ donde el PLC Arduino Opta requiere un tiempo estimado de 50 ms (0.05 s) para procesar las lecturas, convertirlas a formato de texto estructurado en una carga útil JSON y publicarlas hacia el bróker local en el borde.

Finalmente, se computa el retardo de transporte y despliegue, se computa el retardo de transporte y despliegue $T_{latencia MQTT}$. En este eslabón, la información se retransmite de forma segura hacia la plataforma *HiveMQ Cloud* mediante una conexión cifrada TLS sobre el puerto 8883, registrando un retraso de red menor a 50 ms (0.05 s). Comprobado mediante pruebas de diagnóstico de eco ICMP (*Ping*) antes de que la interfaz web reciba las tramas vía WebSockets y actualice la visualización de manera casi inmediata.

Al consolidar estos componentes temporales bajo condiciones operativas nominales y estables, el modelo matemático justifica y valida la latencia total promedio de 1.12 s reportada por el sistema, como se ve en la ecuación 3:

$$\begin{cases} T_{\text{muestreo}} = 1.02 \text{ s} \\ T_{\text{procesamiento+transmisión}} \approx 0.05 \text{ s} \\ T_{\text{latencia MQTT}} \approx 0.05 \text{ s} \end{cases}$$

$$T_{\text{total}} = 1.02 \text{ s} + 0.05 \text{ s} + 0.05 \text{ s} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Durante las validaciones experimentales continuas en campo utilizando la infraestructura de red rural real, el tiempo de respuesta real observado se estabilizó en 1.8 s. Este incremento de aproximadamente 0.68 s frente al escenario teórico ideal es un comportamiento esperado debido a limitaciones de la infraestructura de telecomunicaciones ajenas a la arquitectura propuesta, tales como la fluctuación del ancho de banda en redes WAN celulares rurales, la pérdida ocasional de paquetes TCP que fuerza retransmisiones y la sobrecarga (*overhead*) temporal introducida por el intercambio de claves (*handshake*) del cifrado TLS/WSS en entornos de cobertura débil.

Desde una perspectiva de producción acuícola, un tiempo de respuesta total de es plenamente óptimo y técnicamente despreciable para la toma de decisiones. A diferencia de los procesos industriales dinámicos que exigen control en el orden de milisegundos, las variables fisicoquímicas del agua en estanques de gran volumen (como la temperatura y el pH) exhiben una inercia térmica y química extremadamente alta, requiriendo periodos de varias horas para manifestar variaciones significativas de origen ambiental o biológico. Por lo tanto, el retraso registrado garantiza un monitoreo en tiempo casi real que cumple con holgura los requerimientos de alerta temprana sin saturar los canales de comunicación. En la totalidad de los ensayos de campo, el tiempo de respuesta se mantuvo estrictamente por debajo del umbral crítico de los 3 s, consolidando un rango operativo eficiente y seguro para la gestión acuícola en tiempo real.

El consumo total estimado de la arquitectura fue de 3.68 W, distribuido principalmente en el módulo de procesamiento y transmisión, con un consumo marginal asociado a los sensores. Este bajo requerimiento energético garantiza la operación continua con fuentes estándar de 24 V y permite futuras expansiones sin necesidad de modificar la fuente de alimentación. Además, la eficiencia energética observada favorece su implementación en entornos rurales donde el suministro eléctrico puede ser limitado.

La comprobación del funcionamiento del sistema en entornos operativos reales se consolidó mediante la realización de muestreo continuo en campo durante múltiples jornadas consecutivas de monitoreo. Como se aprecia en los registros fotográficos de la Figura 6, las pruebas abarcaron cuerpos de agua con dinámicas ecológicas distintas. En todos los escenarios evaluados, el hardware funcionó sin registrar fallas electrónicas o interrupciones térmicas, garantizando el flujo de datos persistente hacia el almacenamiento.

Se hicieron pruebas en tres lugares: un ambiente controlado en Pamplona, un estanque en El Zulia y otro estanque en Pamplona. En todos los casos, el sistema funcionó sin problemas electrónicos y pudo enviar los datos a la nube de manera constante.

En el estanque de El Zulia, la temperatura promedio fue de 31.6°C, con cambios diarios muy pequeños ($\pm 0.1^\circ\text{C}$). El pH comenzó cerca de 10 y fue bajando hasta estabilizarse alrededor de 7.5, lo que refleja cómo varían las condiciones en un lugar abierto y expuesto al ambiente.

En el ambiente controlado de Pamplona, la temperatura se mantuvo casi constante en 20.2°C ($\pm 0.05^\circ\text{C}$) y el pH estuvo estable entre 6.9 y 7.1, mostrando que los factores externos tienen poca influencia.

En el estanque de Pamplona, la temperatura promedio fue de 21°C, con cambios muy pequeños ($\pm 0.05^\circ\text{C}$). El pH se mantuvo cerca de 7.6, con ligeras variaciones entre 7.56 y 7.62, lo que es normal en un cuerpo de agua natural, pero aun así es bastante estable.

Figura 5. Comportamiento de temperatura y pH. Fuente: Autor.

Figure 5. Temperature and pH behavior. Source: Author.

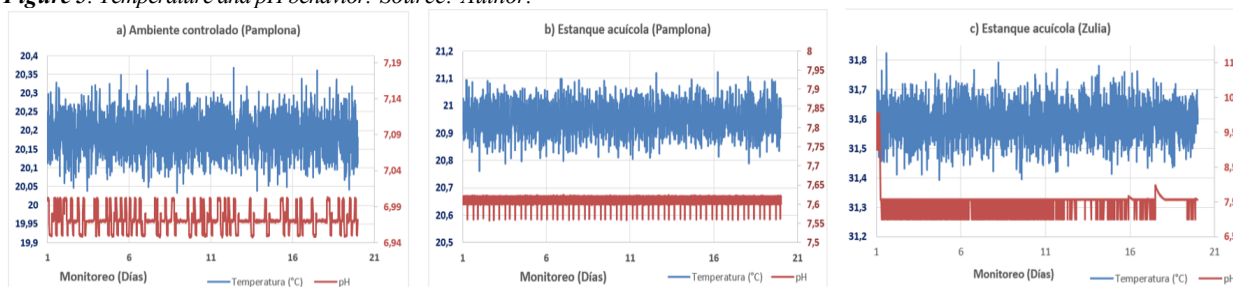
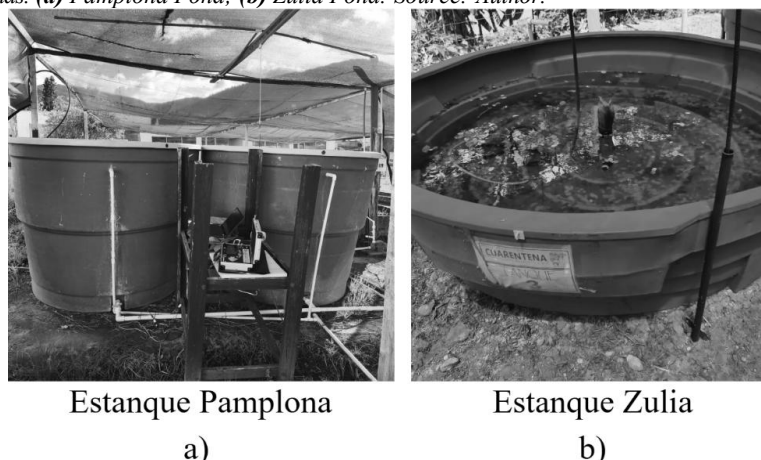


Figura 6. Estanques acuícolas. (a) Estanque Pamplona; (b) Estanque Zulia. Fuente: Autor.

Figure 6. Aquaculture ponds. (a) Pamplona Pond; (b) Zulia Pond. Source: Author.



Durante las pruebas se identificó la necesidad de realizar algunas acciones de mantenimiento para asegurar que los sensores y el sistema funcionaran correctamente. Entre ellas se incluyen: limpieza periódica del sensor de pH para evitar la acumulación de residuos orgánicos que podrían afectar la precisión de las mediciones, calibración del sensor con soluciones buffer antes de cada jornada de monitoreo y seguir protocolos de enjuague y almacenamiento de los sensores después de cada muestreo. Estas acciones resultan especialmente importantes al considerar que los resultados mostraron variaciones de pH en los estanques naturales y la estabilidad en ambientes controlados; mantener los sensores en buenas condiciones asegura que estas diferencias reflejen realmente las condiciones del agua y no errores de medición.

Por otro lado, la instalación portátil en maleta demostró ser muy práctica, reduciendo los tiempos de despliegue a solo 10–15 minutos. Esto facilitó que incluso usuarios sin experiencia previa pudieran manejar el sistema de manera confiable. Además, su portabilidad permitió realizar mediciones en distintos ambientes, desde estanques naturales con fluctuaciones de temperatura y pH, hasta ambientes controlados donde los valores permanecieron estables, asegurando que el monitoreo fuera consistente y eficiente en todas las condiciones evaluadas.

Para evaluar la factibilidad de transferencia tecnológica de la arquitectura propuesta hacia el sector productivo acuícola rural, se consolidó un análisis de costos detallado enfocado en la replicabilidad del sistema. La estimación económica abarca la totalidad de los componentes de hardware requeridos para el ensamble de la maleta portátil, así como los costos operativos de infraestructura de software, expresados en dólares americanos (USD) como moneda de referencia internacional en la Tabla 4.

Tabla 4. Estimación de Costos de Replicación del Sistema IoT Modular. Fuente: Autor.**Table 4.** Replication Cost Estimation of the Modular IoT System. Source: Author.

Categoría de Infraestructura	Componente Específico	Costo Unitario (USD)	Costo
Procesamiento y Conectividad	PLC Arduino Opta Wifi	\$199.0	Costo Único
	Gateway WAN / Módem Router 4G LTE	\$45.00*	Costo Único
Instrumentación y Sensado	Sensor de Temperatura DS18B20	\$4.00	Costo Único
	Sensor de pH SEN0161 (DFRobot)	\$35.00	
Soporte y Potencia	Maleta de Transporte	\$25.00*	Costo Único
	Fuente de Alimentación 24V	\$18.00	Costo Único
	Materiales de Integración (Riel DIN, Interruptor, Cables)	\$15.00*	Costo Único
Infraestructura de Software	Bróker MQTT (<i>HiveMQ Cloud</i>)	\$0.00	Capa Gratuita (<i>Free Tier</i>)
	Servidor de Alojamiento Interfaz Web	\$0.00	Capa Gratuita (<i>Free Tier</i>)
Costo Total de Hardware		\$341.00	Inversión inicial

* Nota: Valores estimados con base en precios promedio de mercado para componentes de grado industrial.

Como se observa en la Tabla 3, la inversión inicial de hardware asciende a un total de \$341.00 USD. Una de las ventajas competitivas más significativas de la arquitectura desarrollada radica en la mitigación absoluta de costos fijos operativos de software. Mediante el aprovechamiento estratégico de las capas gratuitas (*Free Tiers*) de plataformas robustas de nivel empresarial como *HiveMQ Cloud* para la transmisión de mensajes MQTT y servidores en la nube de acceso libre para el despliegue del ecosistema web, el costo recurrente de mantenimiento digital se reduce a cero, haciendo la solución altamente sostenible para pequeños y medianos piscicultores.

Los resultados obtenidos demuestran que el sistema cumple de manera efectiva con los objetivos propuestos: permite el monitoreo confiable de temperatura y pH en distintos entornos acuícolas, con transmisión de datos en tiempo real y baja latencia. El desempeño de los sensores fue notable, superando el 97% de exactitud, lo que garantiza que la información recopilada es lo suficientemente precisa para apoyar la toma de decisiones en la gestión de estanques y el cuidado de los peces.

Durante las pruebas en campo, se observaron variaciones en pH y temperatura, especialmente en los estanques naturales. Esto evidencia la importancia de contar con un monitoreo continuo, ya que cambios bruscos o prolongados en estas variables pueden generar estrés en los peces y afectar su salud y crecimiento. Los datos mostraron que, mientras los ambientes controlados mantenían condiciones estables, los estanques abiertos experimentaban fluctuaciones propias de factores ambientales, lo que refuerza la necesidad de sistemas de monitoreo que detecten estas variaciones a tiempo.

Por otro lado, el uso del PLC Arduino Opta ofrece la oportunidad de integrar actuadores como oxigenadores, válvulas y resistencias, evolucionando hacia un sistema de control automático. Este tipo de integración no solo mejoraría la eficiencia en la operación de los estanques, sino que también alinearía el sistema con las tendencias actuales de digitalización y sostenibilidad en la acuicultura, permitiendo optimizar recursos y reducir riesgos de manera más efectiva.

En conjunto, los resultados sugieren que el sistema no solo es confiable para la medición y transmisión de datos, sino que también tiene un gran potencial para expandirse y convertirse en una herramienta integral de gestión acuícola, capaz de adaptarse a distintos entornos y necesidades productivas. La combinación de monitoreo en tiempo real, precisión de sensores y posibilidad de automatización representa un paso importante hacia la modernización y sostenibilidad de la acuicultura. Para concluir el análisis, las métricas globales del desempeño de la solución IoT se compilan en la Tabla 5.

Tabla 5. Resumen del Desempeño Técnico del Sistema en Pruebas de Campo. Fuente: Autor.
Table 5. Summary of the system's technical performance in field trials. Source: Author.

Criterio	Descripción Técnica	Resultado
Exactitud	Comparación con instrumentos de medición estándar (termómetro de laboratorio y medidor de pH portátil calibrado).	98.15% en temperatura y 99.15% en pH
Transmisión estable	Evaluación de paquetes recibidos vía MQTT con conectividad Wi-Fi inestable (Zulia y Pamplona).	La mayoría de paquetes con éxito de transmisión.
Respuesta rápida	Tiempo de latencia entre adquisición del dato y visualización en la interfaz web.	Promedio de 1.8s por muestra.
Manejo óptimo del ambiente acuícola	Funcionamiento bajo salpicaduras, humedad, temperaturas elevadas y cambios ambientales.	Operación continua con mínima intervención.
Mejora en eficiencia del proceso productivo	Permite monitoreo remoto, reduce visitas al sitio y favorece decisiones informadas.	Reduciría el tiempo de supervisión presencial.
Consumo energético	Estimación del consumo total del controlador y sensores en operación continua.	3.68 W.

Para validar la viabilidad integral de la arquitectura propuesta, los resultados experimentales y operativos se contrastaron con las soluciones homólogas recopiladas en la Tabla 1, evaluando la dimensión económica y el rendimiento técnico. Desde la perspectiva financiera, el sistema ofrece una alta relación costo-beneficio para la transferencia tecnológica rural. Mientras que los prototipos basados en hardware abierto convencional como el ESP32 [19] [22] elevan los costos operativos a mediano plazo por su baja tolerancia ambiental y necesidad de reemplazos frecuentes, los despliegues complejos con robótica autónoma e instrumentación múltiple [26] [25] resultan económicamente prohibitivos para los productores locales debido a su alta inversión inicial. En contraste, la integración de un único controlador de grado industrial como el PLC Arduino Opta optimiza los costos de mantenimiento y asegura un ciclo de vida prolongado por una fracción del costo de un sistema automatizado tradicional.

En el ámbito técnico, las pruebas de laboratorio demostraron que el acondicionamiento de señales y el hardware industrial implementados alcanzan una exactitud del 98.15% en temperatura y del 99.15% en pH. Al comparar estas métricas con el dispositivo de [22], cuyos errores absolutos promedio en laboratorio son de +0.76% y +1.52% respectivamente, se comprueba que la presente arquitectura reduce significativamente el margen de error sin incrementar los costos de instrumentación. Esta precisión analítica resulta crítica para el manejo de la cachama negra (*Colossoma macropomum*), donde variaciones sutiles no detectadas fuera del rango óptimo (6.5 a 7.5) comprometen la respuesta metabólica de la especie.

Finalmente, la infraestructura descentralizada en el borde bajo los lineamientos de la norma ISO/IEC 30141 mitiga las restricciones de conectividad y cobertura observadas en la literatura. A diferencia del enfoque de [25], que depende estrictamente de una conexión continua a la nube para ejecutar sus modelos de TensorFlow, o del sistema *AquaBot* [26], restringido al corto alcance del Wi-Fi local, esta propuesta ejecuta el procesamiento de umbrales en el PLC con una latencia de 50 ms e implementa una red híbrida con soporte RS485 en campo y orquestación por MQTT. De este modo, ante las caídas de internet comunes en la ruralidad dispersa, el bróker local Mosquitto almacena las tramas en caché e impide la pérdida de datos históricos, consolidando una solución tecnológicamente robusta y financieramente accesible.

5. CONCLUSIONES

Se diseñó e implementó una arquitectura modular IoT para el monitoreo en tiempo real de variables críticas de la calidad del agua en estanques de cría de cachama *Colossoma macropomum*, enfocada en la medición precisa de temperatura y pH. El uso de esta arquitectura mejora la capacidad de respuesta ante variaciones ambientales, contribuyendo al mantenimiento de condiciones óptimas para el desarrollo de los peces.

La arquitectura fue evaluada en distintos entornos, lo que permitió validar su desempeño bajo condiciones controladas y de campo. El uso del protocolo MQTT aseguró una comunicación eficiente y estable, mientras que la conexión con la nube posibilitó la visualización remota y continua de los datos desde diferentes dispositivos, incluso en escenarios con conectividad limitada.

Los resultados obtenidos demostraron un comportamiento técnico confiable: la exactitud promedio alcanzó 98.15% en temperatura y 99.15% en pH, con una latencia global de 1.8s y una tasa de transmisión superior al 90% de paquetes exitosos. El consumo energético estimado de 3.68W garantiza operación continua sin necesidad de fuentes adicionales, y la integración en una estructura portátil redujo el tiempo de instalación a menos de 15 minutos, facilitando su despliegue y uso por personal no especializado.

Estos avances se alinean con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente con el ODS 2 *Hambre Cero*, al fortalecer la seguridad alimentaria mediante una producción acuícola más eficiente; el ODS 9 *Industria, Innovación e Infraestructura*, al promover tecnologías accesibles y adaptables en contextos rurales; y el ODS 12 *Producción y Consumo Responsables*, al optimizar el uso de recursos y reducir pérdidas por condiciones inadecuadas del agua.

A pesar de los resultados favorables, el trabajo presenta limitaciones intrínsecas que delimitan su alcance actual y trazan el camino para futuros desarrollos. Una restricción es que el sistema opera actualmente bajo un esquema de lazo abierto, restringiendo la capacidad del PLC Arduino Opta a la detección de umbrales, el almacenamiento local y la emisión de alertas remotas, sin ejecutar una intervención física directa sobre el estanque.

Para orientar las futuras líneas de investigación y superar estas limitaciones, se prevé el diseño de un módulo de instrumentación expandido que incorpore sensores galvánicos de oxígeno disuelto y turbidez bajo el estándar de comunicación industrial RS485. De igual forma, la investigación futura se orientará hacia la evolución del sistema hacia un esquema de control automatizado de lazo cerrado, permitiendo al PLC coordinar de manera autónoma la activación de aireadores mecánicos y sistemas de bombeo ante caídas críticas de los parámetros en el estanque. Este paso representará una contribución significativa hacia la transición de la acuicultura regional hacia la denominada Acuicultura 4.0, consolidando una herramienta tecnológica práctica, económicamente viable y altamente transferible a los escenarios productivos del trópico.

6. DECLARACIÓN DE USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Declaración de uso de tecnologías asistidas por IA en el proceso de redacción: Durante la preparación de este trabajo, los autores utilizaron modelos de inteligencia artificial generativa con el fin de mejorar la fluidez de la redacción, la traducción estructural y el formato del documento. Tras utilizar esta herramienta, los autores revisaron, editaron y validaron exhaustivamente el contenido, asumiendo plena y total responsabilidad por el rigor científico y la integridad final de la publicación.

Bibliografía

- [1] L. Cordova et al., "Energy-Efficient LoRaWan Communication: Real-Time Applications in Aquaculture," in 2024 IEEE 22nd International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 2024, pp. 1-6. doi: 10.1109/INDIN58382.2024.10774297.
- [2] J. F. Fuentes-Pérez and F. J. Sanz-Ronda, "A Custom Sensor Network for Autonomous Water Quality Assessment in Fish Farms," *Electronics*, vol. 10, p. 2192, 2021. doi: 10.3390/electronics10182192.
- [3] Fernández et al., "Efecto de la temperatura de agua en el desarrollo inicial de gamitana (*Colossoma macropomum*) en condiciones de selva alta," *Revista de Investigación Agropecuaria Science and Biotechnology*, vol. 3, pp. 1-9, 2023. doi: 10.25127/riagrop.20234.934.
- [4] Cabezas, J. Amaguay, K. Diéguez-Santana, N. Santana, and N. Sablón Cossío, "Factores medio ambientales que influyen en el desarrollo de la cachama en la Amazonía Ecuatoriana," *Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana*, pp. 1-14, Oct. 2017.

- [5] M. A. Díaz-Céspedes, M. A. Rojas-Paredes, J. E. Hernández-Guevara, F. P. Gonzáles, and R. Meza-Soria, "Harina de frijol mucuna (*Mucuna pruriens* L.) tostada en la alimentación de Gamitana (*Colossoma macropomum* Cuvier 1818)," *Livestock Research for Rural Development*, vol. 30, art. 150, 2018. [Online]. Available: <http://www.lrrd.org/lrrd30/8/medar30150.html>
- [6] J. A. López Ramírez, "Cultivo de Gamitana (*Colossoma macropomum*) en las fases de reproducción y alevinaje en el eje carretero Iquitos – Nauta, Loreto," Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, 2021. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12996/6183>
- [7] Pikulins, R. Gotlaufs, T. Solovjova, A. Aboltins, J. Grizāns, and S. Migla, "On the Development of Long-Range Water Quality Monitoring System for Outdoor Aquaculture Objects," *Electrical, Control and Communication Engineering*, vol. 18, pp. 37-42, 2022. doi: 10.2478/ecce-2022-0005.
- [8] H. Zhang, C. Li, Z. Hua, W. Ren, Y. Gao, and Z. Hao, "Design of aquaculture monitoring system based on LoRa and 4G network of Internet of Things," in *Thirteenth International Conference on Digital Image Processing (ICDIP 2021)*, vol. 11878, 2021, p. 1187827. doi: 10.1117/12.2601041.
- [9] K. R, S. V, D. S, and R. N, "IoT based Fish Farming Management," in *2025 3rd International Conference on Intelligent Data Communication Technologies and Internet of Things (IDCIoT)*, 2025, pp. 705-710. doi: 10.1109/IDCIOT64235.2025.10914802.
- [10] U. A. Ahmad et al., "Design of LoRa Technology as GPS Tracker and SoS Panic Button on Fish Lift Nets," in *2023 6th International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI)*, 2023, pp. 254-259. doi: 10.1109/ISRITI60336.2023.10467388.
- [11] Schultz and M. Smith, "Enhanced IoT Water Quality Monitoring System for Data-Based Aquaculture," in *SoutheastCon 2024*, 2024, pp. 329-334. doi: 10.1109/SoutheastCon52093.2024.10500216.
- [12] Singh et al., "LoRaWAN Gateway Architecture for Aquaculture Monitoring in Rural Area," in *Proceedings of the 8th International Conference on Information Systems and Computer Networks (ISCON)*, 2023, pp. 1-4. doi: 10.1109/ISCON57294.2023.10111936.
- [13] P. Peniak, P. Holecko, E. Bubenkova, and A. Kanalikova, "LoRaWAN Sensors Integration for Manufacturing Applications via Edge Device Model with OPC UA," in *Proceedings of the International Conference on Automotive Engineering (AE)*, 2023, pp. 1-6. doi: 10.1109/AE58099.2023.10274274.
- [14] H. Pimentel, F. Alves, O. Nobrega, and D. Araújo, "Proposal of Communication Infrastructure for Aquaculture 4.0 Based on LoRaWAN," in *Proceedings of the IEEE Laboratory for Computer Science and IoT Conference (LCIoT)*, 2025, pp. 177-180. doi: 10.1109/LCIoT64881.2025.11118537.
- [15] Bhawiyuga and W. Yahya, "MA LPWAN based Wireless Sensor Node for Aquaculture Water Quality Monitoring System," in *Proceedings of the International Conference on Sustainable Information Engineering and Technology (SIET)*, 2018, pp. 252-256. doi: 10.1109/SIET.2018.8693148.
- [16] M. Dafare, S. Waghmare, A. Bhoyar, A. Titarmare, and P. Chandankhede, "LoRa-Enabled Smart RS485 Data Logger and MQTT Gateway for Industrial IoT Applications Using ESP32," in *Proceedings of the International Conference on Circuit Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, 2023, pp. 1297-1302. doi: 10.1109/ICCPCT58313.2023.10245760.
- [17] M. Flores-Iwasaki et al., "Internet of Things (IoT) Sensors for Water Quality Monitoring in Aquaculture Systems: A Systematic Review and Bibliometric Analysis," *AgriEngineering*, vol. 7, p. 78, 2025. doi: 10.3390/agriengineering7030078.
- [18] J. Wang et al., "A review of the application prospects of cloud-edge-end collaborative technology in freshwater aquaculture," *Artificial Intelligence in Agriculture*, vol. 15, pp. 45-60, Mar. 2025. doi: 10.1016/j.aiaa.2025.02.008.
- [19] J. Trevathan, W. Read, S. Schmidtke, T. Sharp, and A. Sattar, "An IoT General-Purpose Sensor Board for Enabling Aquatic Environmental Monitoring," *Internet of Things*, vol. 16, p. 100429, Jul. 2021. doi: 10.1016/j.iot.2021.100429.
- [20] Adeleke, N. I. Nwulu, and O. Ogbolumani, "A hybrid machine learning and embedded IoT-based water quality monitoring system," *Internet of Things*, vol. 22, p. 100774, 2023. doi: 10.1016/j.iot.2023.100774.
- [21] M. Rahu et al., "Toward Design of Internet of Things and Machine Learning-Enabled Frameworks for Analysis

- and Prediction of Water Quality," IEEE Access, vol. 11, pp. 101055-101086, 2023. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3315649.
- [22] P. Megantoro, A. Anugrah, M. Abdillah, B. C. Kustanto, and V. Pandi, "Smart measurement and monitoring system for aquaculture fisheries with IoT-based telemetry system," Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, vol. 13, pp. 1555-1565, 2024. doi: 10.1109/eei.v13i3.6900.
- [23] V. Sowmiya and G. R. Kanagachidambaresan, "Brackish water parameters monitoring dashboard using Internet of things and industry 4.0," EAI Endorsed Transactions on Internet of Things, vol. 10, p. e3, 2024. doi: 10.4108/eetiot.6860.
- [24] Riyadh and N. M. Peleato, "Exploring spatial and temporal importance of input features and the explainability of machine learning-based modelling of water distribution systems," Digital Chemical Engineering, vol. 14, p. 100202, 2025. doi: 10.1016/j.dche.2024.100202.
- [25] McDonnell, C. Bordin, A. Masood, and K. Khan, "Predictive modelling of aquaculture water quality using IoT and advanced machine learning algorithms," Results in Chemistry, vol. 16, p. 102456, 2025. doi: 10.1016/j.rechem.2025.102456.
- [26] M. Hemal, A. Rahman, and N. Nipa, "An Integrated Smart Pond Water Quality Monitoring and Fish Farming Recommendation Aquabot System," International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering, vol. 12, pp. 321-332, 2024. [Online]. Available: <https://ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/4215>
- [27] Alshami, E. Saleh, M. C. Elsayed, A. Eltoukhy, and T. Zayed, "IoT Innovations in Sustainable Water and Wastewater Management and Water Quality Monitoring: A Comprehensive Review of Advancements, Implications, and Future Directions," IEEE Access, vol. 12, pp. 58427-58453, 2024. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3392573.
- [28] H. Kamyab et al., "The latest innovative avenues for the utilization of artificial Intelligence and big data analytics in water resource management," Results in Engineering, vol. 20, p. 101566, 2023. doi: 10.1016/j.rineng.2023.101566.
- [29] R. Wiryasaputra, C.-Y. Huang, Y.-J. Lin, and C.-T. Yang, "An IoT Real-Time Potable Water Quality Monitoring and Prediction Model Based on Cloud Computing Architecture," Sensors, vol. 24, p. 1180, 2024. doi: 10.3390/s24041180.
- [30] R. Bogdan, C. Paliuc, M. Crişan-Vida, S. Nimara, and D. Barmayoun, "Low-Cost Internet-of-Things Water-Quality Monitoring System for Rural Areas," Sensors, vol. 23, p. 3919, 2023. doi: 10.3390/s23083919.