

SISTEMA IOT PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS Y CONTROL DE PARÁMETROS EN ESTANQUES DE ACUICULTURA



ISSN 2619 - 2896

01

SISTEMA IOT PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS Y CONTROL DE PARÁMETROS EN ESTANQUES DE ACUICULTURA

IOT SYSTEM FOR DATA COLLECTION AND CONTROL OF PARAMETERS IN AQUACULTURE PONDS

Jefferson Solarte

Ingeniero mecatrónico,
Universidad Autónoma de Occidente,
email: eddi.solarte@uao.edu.co

Luis Aparicio

Máster en administración de empresas
email: lucapc1725@gmail.com

Andrés García

Máster en ingeniería
Universidad Autónoma de Occidente
email: andres.garcia@innovers.co

RESUMEN

La acuicultura es la técnica mediante la cual de manera artificial se cultivan organismos vegetales o animales para distintos fines. Debido a que la producción mediante esta técnica representa una gran fuente de materias primas y alimento para el ser humano es clave investigar y desarrollar soluciones tecnológicas que permitan realizar un seguimiento a la producción y operaciones. Es por ello, que en esta investigación se presenta el diseño e implementación de un sistema IoT que permite medir y controlar las variables que fueron identificadas como críticas, en el cultivo de tilapias que utilizan la técnica de cultivo IPRS (In-Pond Raceway Systems), teniendo como caso de estudio una asociación de piscicultores llamada ASPEIBE ubicada en el departamento del Huila, Colombia. Para el diseño y fabricación del sistema IoT se utilizó la metodología de diseño concurrente, haciendo una amplia comprensión de las necesidades de los usuarios y traducéndose en soluciones tecnológicas. El diseño de este

prototipo mediante la metodología de ingeniería concurrente permitió obtener una solución a medida pero escalable en poco tiempo, este prototipo puede ser fabricado con componentes comerciales y adaptado a distintos contextos usando distintos sensores o actuadores.

Palabras claves: Acuicultura de precisión, Control de calidad del agua, Cultivo de tilapias, Sistema de monitoreo, Nivel de oxigenación.

ABSTRACT

Aquaculture is the technique through which plant or animal organisms are artificially cultivated for various purposes. Given that production using this technique represents a significant source of raw materials and food for humans, it is essential to research and develop technological solutions that enable monitoring of production and operations. Therefore, this study presents the design

and implementation of an IoT system that allows for the measurement and control of variables identified as critical in tilapia farming using the In-Pond Raceway Systems (IPRS) technique, with a case study conducted at an aquaculture association called ASPEPIBE, located in the Huila department of Colombia. The concurrent engineering design methodology was employed to develop the IoT system, ensuring a thorough understanding of user needs and translating them into technological solutions. By utilizing concurrent engineering principles, the prototype was developed in a short time frame, providing a customized yet scalable solution. This prototype can be manufactured with commercial components and adapted to various contexts using different sensors or actuators.

Keywords: Tilapia farming, Monitoring system, Oxygenation levels, Precision aquaculture, Water quality control.

INTRODUCCIÓN

En 2018, el consumo per cápita de pescado alcanzó un máximo histórico de 20.5 kg por persona y el pescado representa una fuente crucial de proteínas animales, proporcionando aproximadamente el 17% de las proteínas animales consumidas a nivel mundial y hasta el 50% en algunos países en desarrollo, y del total de pescado producido mundialmente se estima que el 46% es cultivado artificialmente (FAO, 2020) Esto hablando en términos de cultivos animales, no obstante el mismo informe de la FAO, dice que en el mismo año se produjeron alrededor de 32.4 millones de toneladas de cultivos no animales mediante la acuicultura, principalmente algas. Estos datos demuestran la importancia de la acuicultura en la cadena de suministros de alimentos, por ende, es consecuente la búsqueda de tecnologías modernas que ayuden a tecnificar los procesos, debido a que existen todavía

muchos retos que pueden ser abordados desde la investigación, como la disminución de la mortalidad en peces, precisión en el incremento del oxígeno, optimización de la alimentación entre otros (Wang et al., 2021). Sin lugar a dudas, cada vez se emplea más tecnología con el fin de garantizar la seguridad alimentaria y es mediante la investigación y el desarrollo que se logran implementar y validar las mejoras en estos procesos, es así como surge el concepto de acuicultura de precisión que hace uso de una red sensores interconectados desplegados en el entorno acuático para monitorear, analizar, interpretar y proporcionar apoyo en la toma de decisiones para las operaciones de las granjas (Antonucci & Costa, 2020; O'Donncha & Grant, 2020; Wang et al., 2021).

DESARROLLO

En esta investigación se busca implementar la técnica de cultivo IPRS junto a un sistema IoT que pueda monitorear y controlar las variables del estanque para un cultivo específico de tilapias, este sistema se complementa con una plataforma web que permite registrar una gran cantidad de información del proceso, con la cual se podrían obtener mediciones por ejemplo de la mortalidad, el peso total final de un lote respecto al proyectado entre otros. Tomando como referencia trabajos previos en la misma línea, se encontraron sistemas que miden variables como la temperatura, pH, alcalinidad, nivel de nitratos, oxígeno disuelto, nivel de agua y tamaño de los peces (Rastegari et al., 2023). Por otra parte, se observó en trabajos previos que la mayoría de los sistemas orientados al monitoreo IoT hacen uso de arquitecturas que dependen grandemente de la computación en la nube, lo cual para este tipo de cultivos en el contexto local representa problemas técnicos, debido a la dificultad para garantizar la continua conexión a internet. También se evidenció, que los actuadores en la mayoría de los casos se li-

mitan a señales visuales y sonoras que alertan al usuario de alguna anomalía, pero los sistemas no son capaces de tomar acciones correctivas (Islam, 2023; Islam et al., 2022; Ya'acob et al., 2021).

La propuesta principal de este trabajo consiste en que junto con la implementación de la nueva técnica IPRS de cultivo que han venido realizando los piscicultores, se pueda monitorear constantemente las variables que han sido previamente identificadas como críticas en la calidad del agua, para el cultivo de peces y diseñar el sistema de tal manera que pueda actuar para mejorar dichas condiciones y que mediante los datos recolectados sea posible evaluar aspectos importantes que puedan ayudar a mejorar el rendimiento de los cultivos.

Con el desarrollo de este prototipo se pudo evaluar la tecnología actual disponible para implementar sistemas IoT en piscicultura y afrontar los retos que implica; como la intermitencia del acceso a internet en zonas de difícil acceso donde se encuentran los cultivos. La técnica de FOG computing o computación en la niebla (Das & Inuwa, 2023), brindó una solución efectiva para emplear sensores interconectados de manera local por medio de la tecnología inalámbrica LoRa (Devalal & Karthikeyan, 2018); estos sensores se adaptan para funcionar en un sistema de flotación comercial, empleado para los sistemas de aireación tipo Splash, ya que son ampliamente utilizados en este contexto y esto aceleró significativamente el tiempo de desarrollo del prototipo.

MÉTODOS

Como bien se introdujo, en esta esta investigación se pretende obtener un sistema IoT de monitoreo y control de variables en estanques de piscicultura y para ello se aplicó la metodología de diseño concurrente (Ulrich et al., 2020), debido a que se abordó el sistema IoT como un desarrollo de producto y esta metodología es ampliamente utiliza-

da en este ámbito, puesto que promueve la colaboración entre diferentes disciplinas desde las primeras etapas del proyecto, se reduce el tiempo de desarrollo al permitir la ejecución simultánea de tareas y evita retrasos debidos a errores de comunicación o ajustes tardíos. Además, mejora la calidad del producto al integrar consideraciones de manufactura, costos y usabilidad desde el inicio, optimizando el ciclo de vida completo del producto.

Como se mencionó anteriormente se contó con el apoyo de una asociación de piscicultores, los cuales jugaron un rol bastante importante en el levantamiento de los requerimientos que están listados en la tabla 1. Mediante la recopilación de estas necesidades se definen unas métricas que sean medibles para el producto como se muestra en la tabla 2.

Tabla 1.
Necesidades interpretadas y su importancia en el diseño del producto.

#	Necesidades	Importancia	
1	El sistema IoT	Cuenta con sistema de flotación	9
2	El sistema IoT	Utiliza un panel solar con suficiente capacidad	9
3	El sistema IoT	Almacena suficiente energía para su autonomía	9
4	El sistema IoT	Es resistente a la intemperie	9
5	El sistema IoT	Mide el PH del agua en el lago	3
6	El sistema IoT	Mide el oxígeno disuelto en el agua del lago	9

7	El sistema IoT	Mide la temperatura del agua del lago	3
8	El sistema IoT	Mide la cantidad de sólidos disueltos en el agua del lago	9
9	El sistema IoT	Transmite inalámbricamente los datos a un servidor local	9
10	El sistema IoT	Hace una transmisión cifrada	3
11	El sistema IoT	Es de fácil instalación	3
12	El sistema IoT	Requiere un mínimo mantenimiento	3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.

Métricas y las unidades de medición de las características del producto.

#	Necesidad	Métrica	Unidades
1	1	Sistema de flotación	Binario
2	2	Capacidad del panel solar	W
3	3	Capacidad de batería	mAh
4	4	Aprueba de condiciones ambientales	Binario
5	5, 6, 7, 8	Cantidad de variables medidas	#
6	9	Transmisión inalámbrica	Binario
7	10	Tipo de cifrado en la comunicación	Lista

8	11	Tiempo para puesta en funcionamiento	Minutos
9	12	Periodicidad de mantenimiento	Meses

Fuente: Elaboración propia

Necesidades

1. Cuenta con sistema de flotación.
2. Utiliza un panel solar con suficiente capacidad.
3. Almacena suficiente energía para su autonomía.
4. Es resistente a la intemperie.
5. Mide el PH del agua en el lago.
6. Mide el oxígeno disuelto en el agua del lago.
7. Mide la temperatura del agua del lago.
8. Mide la cantidad de sólidos disueltos en el agua del lago.
9. Transmite inalámbricamente los datos a un servidor local.
10. Hace una transmisión cifrada.
11. Es de fácil instalación.

Variables

PN: Peso de las necesidades
SF: Sistema de flotación
CPS: Capacidad del panel solar
CB: Capacidad de batería
AC: Aprueba de condiciones ambientales
CVM: Cantidad de variables medidas
TI: Transmisión inalámbrica
TC: Tipo de cifrado en la comunicación
TPF: Tiempo para puesta en funcionamiento
PM: Periodicidad de mantenimiento

Tabla 3.
Ponderación de Necesidades vs Métricas

Necesidades	PN	SF	CPS	CB	AC	CVM	TI	TC	TPF	PM
1	9	9			9			1	3	
2	9		9	3						
3	9		3	9		1				
4	9	3			9					
5	3					3				
6	9					3				
7	3					3				
8	9					3				
9	9						9	3		
10	3						3	9		
11	3								9	9
Puntaje	108	108	54	162	81	90	54	36	54	
Ponderación	14.5	14.5	7.2	21.7	10.8	12	7.2	4.8	7.2	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.

Matriz de correlación de Métricas

#	Métricas									
1	Sistema de flotación									
2	Capacidad del panel solar									
3	Capacidad de batería		++							
4	Aprueba de condiciones ambientales									
5	Cantidad de variables medidas									
6	Transmisión inalámbrica		+	+						
7	Tipo de cifrado en la comunicación					+				
8	Tiempo para puesta en funcionamiento					-				
9	Periodicidad de mantenimiento					--			+	
	Preferencia	=	Subir	Subir	=	Subir	=	=	Bajar	Bajar
	#	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se hace una evaluación de métricas contra las necesidades identificadas, como se muestra en la tabla 3, de la cual se puede decir que, mediante la ponderación, las características más importantes para el producto son: hacer el dispositivo a prueba de las condiciones ambientales, capaz de flotar y con alimentación solar. También se ponderan las métricas contra métricas esto con el fin de evaluar cómo impacta de manera positiva o negativa mejorar una característica del producto, por ejemplo, según la tabla 4, si se mejora la capacidad de la batería también se debería mejorar la capacidad del panel solar y viceversa, aunque también se puede observar que incrementar la cantidad de variables medidas afecta el tiempo de puesta en funcionamiento y la periodicidad de mantenimiento porque implica tener más sistemas susceptibles a fallas o que requieren calibración. Una vez se tienen una características y métricas claras para el dispositivo se continuó con el análisis funcional del mismo, el cual como se observa en la figura 1 cuenta

con entradas, salidas y subsistemas que interactúan internamente.

Figura 1.
Entradas, salidas y subsistemas internos para el funcionamiento del dispositivo.



Fuente: Elaboración propia

Entradas

Las entradas del sistema descritas en la figura anterior deben ser medidas, registra-

das y monitoreadas con el fin de conocer detalladamente los parámetros de configuración y las condiciones de funcionamiento del sistema.

Entradas de energía: El sistema requiere energía eléctrica para poner en funcionamiento los sensores, actuadores y demás equipos necesarios.

Entradas de agua: El sistema requiere agua para filtrar y recircular con el fin de mantener el agua en óptimas condiciones.

Entradas de aire: El sistema requiere un equipo capaz de tomar aire del ambiente con el fin de introducir oxígeno en el agua y aumentar la densidad de oxígeno en la misma.

Entrada de energía solar: El sistema posee un sistema para captura de la energía solar y conversión de ésta en energía eléctrica la cual se adapta a las condiciones de alimentación de los equipos necesarios para la oxigenación.

Salidas

La salida de agua en condiciones óptimas de densidad oxígeno de agua: Parámetros óptimos de densidad de oxígeno, temperatura, nivel de pH y total de sólidos disueltos qué permitan el ambiente sano para la cría de tilapias.

Información del desempeño acorde a los parámetros de configuración: Esta salida consiste en toda la información correspondiente al comportamiento y desempeño del sistema acorde a los parámetros configurados para el control de este, aquí se reportan las condiciones normales, anomalías, alertas y encendido.

Subsistemas generales

Sistema de registro de datos y parámetros de control: este sistema consiste en el regis-

tro de datos de inicio tales como cantidad de peces, el peso y tamaño promedios de los mismos; igualmente en estos parámetros se configuran los valores de densidad de oxígeno máxima y mínima para tener en cuenta además de la temperatura máxima y mínima, el nivel de pH máximo y mínimo, y el nivel total de sólidos máximo y mínimo que se va a tener para controlar el proceso de calidad del agua. Otros valores de entrada a registrar que pueden ser de interés para medir el desempeño son el consumo de agua y energía que se requiere para sostener todo el sistema. Esto corresponde a la plataforma web que se desarrolló en paralelo al sistema IoT.

Sistema de monitoreo y control de la densidad de oxígeno y la calidad del agua: este sistema se compone de sensores y actuadores que permiten asegurar las condiciones del ambiente de la calidad del agua para la cría de tilapias tales como la densidad de oxígeno, la temperatura, el nivel de PH y el nivel de sólidos disueltos, dentro de los actuadores se encuentran sistemas de oxigenación de agua y la bomba de recirculación de agua.

Sistema de registro de datos y Reportes de desempeño: este sistema permite reportar el resultado del desempeño del proceso de seguimiento y control de oxigenación y calidad del agua, teniendo en cuenta datos de los sensores y condiciones de activación y desactivación de la bomba de agua u oxigenador. En cuanto a los datos del desempeño de crecimiento de los peces la información más relevante es la cantidad, el tamaño promedio, el peso promedio y porcentaje de mortalidad de peces entre otros. Esto también hace parte de la plataforma web que se desarrolló en paralelo al sistema IoT, esto es relevante debido a que el desarrollo del prototipo debe ser capaz de interactuar con esta plataforma.

En base a los subsistemas generales se creó la tabla 5 en la que se plantean los principales subsistemas específicos y sus posibles alternativas de solución, esto con el fin de evaluar la viabilidad de distintas alternativas, dentro del diseño concurrente se sugiere crear prototipos combinando las distintas soluciones, para este caso se evaluaron de manera individual los componentes y no se propusieron distintos conceptos, sino una combinación de las mejores características identificadas.

Tabla 5.
Subsistemas y alternativas de solución.

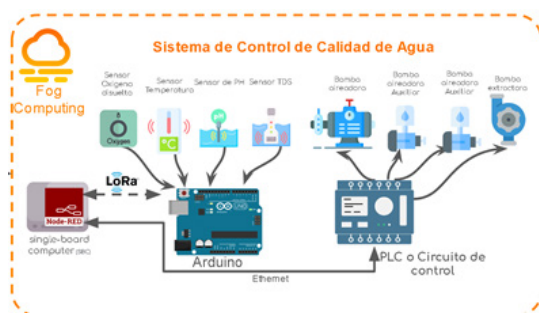
Transmisión inalámbrica	Almacenamiento energía	Tarjeta de desarrollo	Sistema de flotación	Capacidad de batería	Panel Solar	Single Board Computer	Cifrado	Activación de actuadores
Bluetooth	Power-bank 5v	Arduino Uno R3	Caja a prueba de agua	1000mAh	10W	Orange Pi	AES	PLC Logo
Wifi	Batería 3.7v + regulador	Arduino Uno R4	Impresión 3D	6000mAh	20W	Raspberry	DES	PLC S1200
LoRa	Batería 3.7v + controlador solar	Arduino nano	Flotador comercial	10000mAh	40W	Json Nano	RSA	Módulo de relés

Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS

Uno de los principales resultados dentro del diseño del prototipo fue la arquitectura que se propuso, basada tanto en trabajos previos (Delgado Tapia & Valencia Astudillo, 2021; Islam et al., 2022; Martin et al., 2020; Perez Bado & Contreras Aristizabal, 2019), como en las necesidades particulares de este proyecto. Debido a que uno de los principales retos en sistemas IoT en zonas remotas es el acceso a internet (Rastegari et al., 2023), se propuso un sistema basado en el concepto de computación en la niebla FOG computing (Martin et al., 2020), en el cual los datos se procesan y almacenan localmente y son enviados a la nube solo cuando hay una conexión a internet estable. La arquitectura de la figura 2 se construyó de manera robusta para que la información de sensores y actuadores esté centralizada en una computadora compacta del tipo Single Board Computer (SBC) (Galkin et al., 2018), con ayuda de la herramienta Node-Red, la cual se encarga de gestionar las peticiones de la plataforma web que también estará corriendo de manera local. Para este prototipo se incluyeron los cuatro sensores que se muestran en la figura 2 y la posibilidad de activar hasta cuatro actuadores, aunque en las pruebas solo se activaría un oxigenador.

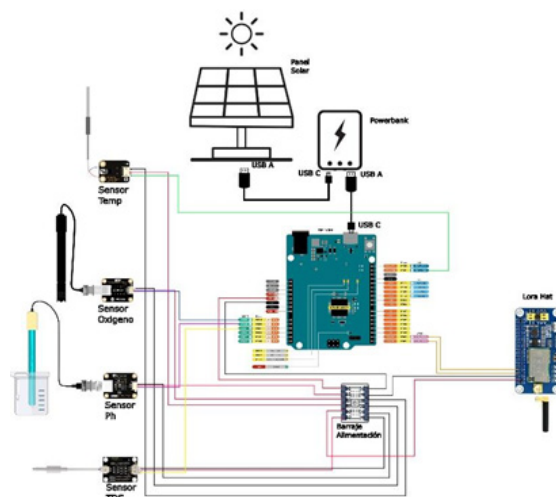
Figura 2.
Arquitectura IoT basada en FOG computing



Fuente: Elaboración propia

Como parte de los resultados está la justificación del uso del protocolo de transmisión inalámbrico LoRa, debido a su bajo consumo y amplio rango de alcance. Por otro lado, la placa de desarrollo que lee directamente los sensores es un Arduino uno R4 debido a su especialización para usos en IoT y mayor capacidad de procesamiento, aunque es necesario conectarle un módulo Lora para ampliar sus capacidades de comunicación. Para mayor confiabilidad en la activación de los actuadores de potencia se optó por un PLC Logo, el cual es compatible con Node-Red y tiene un bajo costo. En la figura 3 se detalla cómo se realizó la implementación del sistema de adquisición de datos, el cual consiste en la placa de desarrollo, el panel solar, la batería de respaldo, el controlador de carga solar, el módulo LoRa Hat SX126X y los siguientes sensores: DS18B20 Arduino Temperature sensor (Df Robot, n.d.-d), Analog pH meter V2 (Df Robot, n.d.-c), Analog TDS Sensor (Df Robot, n.d.-a), Analog Dissolved Oxygen / DO Sensor Meter (Df Robot, n.d.-b). Para facilitar el montaje de los módulos se diseñó y fabricó la placa de circuito impreso (PCB) de la figura 4, la cual se diseñó con una forma semicircular con el fin de adaptarla al flotador comercial utilizado y así agilizar la fabricación del prototipo.

Figura 3.
Diagrama del sistema de adquisición de datos.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.

PCB para módulos de sensores, LoRa Hat y Arduino uno R4, (a) capa superior, (b) capa inferior.

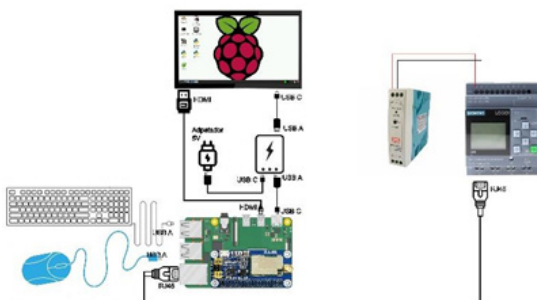


Fuente: Elaboración propia

Como se mencionó anteriormente el sistema IoT va a centralizar la información en un sistema Single Computer Board, para este caso se seleccionó una Raspberry pi 4, debido a que ofrece un equilibrio entre el costo y el rendimiento que para esta aplicación no será muy exigente, en la figura 5 se observa el diagrama de conexiones con una pantalla, mouse y teclado que hará de HMI para el usuario, además de un módulo LoRa Hat que extiende la capacidades de la Raspberry para poder comunicarse con el sistema de adquisición de datos, una UPS y un router que además de brindar conexión a internet permite alcanzar dentro de la misma red el PLC, cabe destacar que el PLC requiere una fuente DC de 12V.

Figura 5.

Diagrama de conexiones de la Raspberry, HMI y PLC



Fuente: Elaboración propia

Normalmente los piscicultores utilizan oxigenadores tipo splash, que cuentan con un sistema de flotación robusto, como el de la figura 7, por ello se decidió usar uno de estos para ubicar los sensores, batería, panel solar, Arduino y transmisor LoRa. Cabe resaltar que el protocolo LoRa al ser abierto puede implicar un problema de seguridad en los datos que se envían, por ello se implementó Data Encryption Standard (DES) desde el Arduino uno R4 hasta la recepción en la Raspberry pi, esta recepción en la Raspberry se hace mediante un código en C++ que usa la misma librería implementada en el Arduino llamada ArduinoDES (Riemann & Otte, 2013).

Figura 6.

PCB para módulos de sensores, LoRa Hat y Arduino uno R4, (a) capa superior, (b) capa inferior.



Fuente: Elaboración propia

Por último, en la figura 7 se muestra el sistema que se obtuvo de este proceso de diseño, en el cual también se puede ver un oxigenador tipo splash en un estanque de pruebas debido a que la instalación final debe ser en un lago lo suficientemente grande para cultivar hasta 150000 peces.

Figura 7.

Sistema IoT de monitoreo y control en pruebas en un estanque.



Fuente: Elaboración propia

DISCUSIÓN

Se puede discutir cómo la implementación del sistema IoT contribuye a una mejora en la eficiencia operativa de las granjas acuícolas. Es importante destacar que, si bien el sistema promete optimizar la calidad del agua y, en consecuencia, la salud de los peces, este beneficio necesita validarse a través de pruebas a largo plazo. Aquí, sería relevante reflexionar sobre la importancia de realizar análisis comparativos con sistemas tradicionales y explorar cómo los avances tecnológicos pueden contribuir a la sostenibilidad de la acuicultura.

Otro aspecto para discutir es el potencial de este sistema para optimizar recursos como el tiempo de funcionamiento de los equipos, la energía (mediante el uso de energía solar) y la alimentación. La automatización de la aeración, por ejemplo, reduce el uso innecesario de energía, lo que podría traducirse en un ahorro significativo y en una mejora en la rentabilidad de los cultivos acuáticos. Aunque el sistema IoT propuesto usa la computación en la niebla (Fog Computing) para

mitigar problemas de conectividad, sigue existiendo el desafío de la falta de infraestructura en áreas rurales. Este tema puede ser discutido en términos de la viabilidad a largo plazo de sistemas IoT en zonas de difícil acceso, y cómo podrían mejorarse las tecnologías de comunicación en esas áreas. También es importante abordar los costos iniciales de implementación y mantenimiento anual, puesto que podrían ser barreras para su adopción. Este es un punto clave, ya que la adopción masiva de tecnologías avanzadas en la acuicultura depende en gran medida de la viabilidad económica. Es importante explorar posibles soluciones, como modelos de negocio que incluyan financiamiento o subsidios para pequeños productores, o el desarrollo de versiones más asequibles del sistema.

A lo largo del artículo se mencionó que el prototipo desarrollado es escalable y adaptable a distintos contextos. Es decir que se debe hacer una validación de esta afirmación llevando el sistema a otros entornos agrícolas con los sensores y actuadores requeridos.

Es crucial mencionar cómo el sistema podría evolucionar en el futuro, incorporando nuevas tecnologías o mejorando la automatización y el control. El trabajo ya toca el tema de aplicar inteligencia artificial (IA) y redes neuronales para optimizar aún más los resultados. La IA puede mejorar la toma de decisiones en tiempo real, permitir predicciones más precisas y, en última instancia, contribuir a una acuicultura más sostenible. Una observación importante es cómo el sistema propuesto se diferencia de otros sistemas de monitoreo y control que ya existen en el mercado. Aunque se mencionan trabajos previos en la misma línea, se subrayan las limitaciones de otros sistemas que dependen en gran medida de la computación en la nube y que no tienen capacidad de acción correctiva. No obstante, comercialmente fueron escasos los referentes que brindan este tipo de tecnología a gran es-

cala, por ello es clave indagar aún más en el mercado al que se está apuntando con esta solución, para identificar posibles problemáticas desatendidas.

CONCLUSIONES

La investigación presentada demuestra que la implementación de un sistema IoT basado en computación en la niebla para el monitoreo y control de variables en la acuicultura, ofrece una solución tecnológica viable y escalable para la optimización de la producción acuícola. La metodología de diseño concurrente utilizada permitió un desarrollo eficiente del prototipo, adaptado tanto a las necesidades específicas de los piscicultores de ASPEPIBE como a los desafíos técnicos de la región, y el acceso limitado a internet. El sistema propuesto, que incluye sensores de calidad de agua, mejoría significativamente la salud de los peces, lo que se traduce en un aumento en la producción, no obstante, para esta afirmación se requiere un proceso más extenso de caracterización e investigación, en la que mediante un análisis experimental se pueda cuantificar esta mejora. Además, la automatización de procesos críticos y el monitoreo en tiempo real contribuyen a una reducción en los costos operativos, especialmente en lo que respecta a la alimentación, el uso de medicamentos y las labores operativas. No obstante, el costo inicial de implementación y el mantenimiento anual, junto con la necesidad de personal capacitado, podrían representar barreras importantes para su adopción masiva, especialmente en pequeños y medianos productores, para mejorar esta situación se debe seguir trabajando en la optimización del producto y plantear un modelo de negocio que beneficie a los piscicultores.

El análisis de datos históricos generado por el sistema IoT abre la puerta a futuras investigaciones y aplicaciones de inteligen-

cia artificial, como redes neuronales, para lograr una mayor autonomía en la gestión de los estanques y optimizar aún más los resultados. Así, se vislumbra un futuro donde la acuicultura se beneficie de tecnologías avanzadas que no solo incrementen la producción, sino que también promuevan prácticas más sostenibles y eficientes.

Agradecimientos Para el Centro De Diseño Tecnológico Industrial del SENA sede Cali, quienes mediante Jorge Hernan Lopez Boto



Centro de Diseño
Tecnológico Industrial
Regional Valle



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antonucci, F., & Costa, C. (2020). Precision aquaculture: a short review on engineering innovations. *Aquaculture International*, 28(1), 41–57. <https://doi.org/10.1007/S10499-019-00443-W>
- Das, R., & Inuwa, M. M. (2023). A review on fog computing: Issues, characteristics, challenges, and potential applications. *Telematics and Informatics Reports*, 10, 100049. <https://doi.org/10.1016/J.TELER.2023.100049>
- Delgado Tapia, C. E., & Valencia Astudillo, W. G. (2021). Diseño e implementación de prototipo IOT para el monitoreo remoto de la calidad del agua para la crianza de tilapias en estanques. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21427>
- Devalal, S., & Karthikeyan, A. (2018). LoRa Technology – An Overview. *Proceedings of the 2nd International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology, ICECA 2018*, 284–290. <https://doi.org/10.1109/ICECA.2018.8474715>

- Df Robot. (n.d.-a). Analog TDS Sensor Meter for Arduino / ESP32 / Raspberry Pi - DFRobot Wiki. Retrieved November 3, 2024, from https://wiki.dfrobot.com/Gravity__Analog_TDS_Sensor___Meter_For_Arduino_SKU__SEN0244
- Df Robot. (n.d.-b). Gravity__Analog_Dissolved_Oxygen_Sensor_SKU_SEN0237-DFRobot. Retrieved November 3, 2024, from https://wiki.dfrobot.com/Gravity__Analog_Dissolved_Oxygen_Sensor_SKU_SEN0237
- Df Robot. (n.d.-c). Gravity__Analog_pH_Sensor_Meter_Kit_V2_SKU_SEN0161-V2-DFRobot. Retrieved November 3, 2024, from https://wiki.dfrobot.com/Gravity__Analog_pH_Sensor_Meter_Kit_V2_SKU_SEN0161-V2
- Df Robot. (n.d.-d). Waterproof_DS18B20_Digital_Temperature_Sensor__SKU_DFR0198_-DFRobot. Retrieved November 3, 2024, from https://wiki.dfrobot.com/Waterproof_DS18B20_Digital_Temperature_Sensor__SKU_DFR0198_
- FAO. (2020). The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. In brief. The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. In Brief. <https://doi.org/10.4060/CA9231EN>
- Galkin, P., Golovkina, L., & Klyuchnyk, I. (2018). Analysis of Single-Board Computers for IoT and IIoT Solutions in Embedded Control Systems. 2018 International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2018 - Proceedings, 297–302. <https://doi.org/10.1109/INFOCOMM-ST.2018.8632069>
- Islam, M. M. (2023). Real-time dataset of pond water for fish farming using IoT devices. Data in Brief, 51, 109761. <https://doi.org/10.1016/J.DIB.2023.109761>
- Islam, M. M., Kashem, M. A., & Uddin, J. (2022). An internet of things framework for real-time aquatic environment monitoring using an Arduino and sensors. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), 12(1), 826–833. <https://doi.org/10.11591/IJECE.V12I1.PP826-833>
- Martin, C., Torres, D. R., Diaz, M., & Rubio, B. (2020). FogPi: A Portable Fog Infrastructure through Raspberry Pis. 2020 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2020. <https://doi.org/10.1109/MECO49872.2020.9134320>
- O'Donncha, F., & Grant, J. (2020). Precision Aquaculture. IEEE Internet of Things Magazine, 2(4), 26–30. <https://doi.org/10.1109/IOTM.0001.1900033>
- Perez Bado, M. A., & Contreras Aristizabal, P. D. (2019). Diseño e implementación de un sistema automatizado de oxigenación del agua para el criadero acuicola valle del mar ubicado en santa marta [Universidad Cooperativa de Colombia]. <https://repository.ucc.edu.co/entities/publication/1c812c97-ab5e-4831-8e4f-72b769d854aa>
- Rastegari, H., Nadi, F., Lam, S. S., Ikhwanuddin, M., Kasan, N. A., Rahmat, R. F., & Mahari, W. A. W. (2023). Internet of Things in aquaculture: A review of the challenges and potential solutions based on current and future trends. Smart Agricultural Technology, 4, 100187. <https://doi.org/10.1016/J.ATECH.2023.100187>
- Riemann, T., & Otte, D. (2013). GitHub - Octoate/ArduinoDES: DES and Triples DES encryption and decryption for the Arduino microcontroller platform. <https://github.com/Octoate/Arduino-DES>

Ulrich, K. T. ., Eppinger, S. D. ., & Yang, M. C. . (2020). Product design and development. 432.

Wang, C., Li, Z., Wang, T., Xu, X., Zhang, X., & Li, D. (2021). Intelligent fish farm—the future of aquaculture. *Aquaculture International*, 29(6), 2681–2711. <https://doi.org/10.1007/S10499-021-00773-8>

Ya'acob, N., Dzulkefli, N. N. S. N., Yusof, A. L., Kassim, M., Naim, N. F., & Aris, S. S. M. (2021). Water Quality Monitoring System for Fisheries using Internet of Things (IoT). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1176(1), 012016. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1176/1/012016>