

Artículo original

**Sistema de monitoreo remoto y control automatizado del sistema acuapónico**

Remote Monitoring and Automated Control System of the Aquaponic System

**GUISEPPi JORDANO CÁRDENAS CHAMBILLA<sup>1</sup>**

 <https://orcid.org/0009-0007-6203-3587>

**VICTOR ANDRE JORGE ALARCÓN QUISPE<sup>2</sup>**

 <https://orcid.org/0009-0007-5680-5966>

**HUGO JAVIER RIVERA HERRERA<sup>3</sup>**

 <https://orcid.org/0000-0002-9896-5008>

Recibido: 03/02/2025

Aceptado: 24/03/2025

Publicado: 07/04/2025

<sup>1,2,3</sup>Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica, Universidad Privada de Tacna, Tacna, Perú

E-mail: <sup>1</sup>[gc2020066925@virtual.upt.pe](mailto:gc2020066925@virtual.upt.pe), <sup>2</sup>[va2020067153@virtual.upt.pe](mailto:va2020067153@virtual.upt.pe), <sup>3</sup>[hujrivera@upt.pe](mailto:hujrivera@upt.pe)



## Resumen

La acuaponía, una práctica que combina la acuicultura y la hidroponía, ofrece una alternativa sostenible para la producción de alimentos en zonas con recursos hídricos limitados, como algunas regiones de Perú. Sin embargo, gestionar adecuadamente los parámetros del agua, esenciales para mantener el equilibrio del sistema, sigue siendo un desafío. En este contexto, el estudio tuvo como objetivo diseñar e implementar un sistema de monitoreo remoto basado en IoT para medir y controlar parámetros críticos del agua en una piscigranja acuapónica en Tacna, Perú. La metodología incluyó el desarrollo de una infraestructura de hardware con sensores de pH, turbidez, temperatura y nivel de agua, conectados a un microcontrolador ESP32 LilyGO con comunicación vía MQTT y equipado con un módem GSM/3G (SIM7000G). También se diseñó un software para la recopilación, transmisión y almacenamiento de datos en la nube, permitiendo supervisión en tiempo real y acciones automatizadas. Los resultados evidenciaron una mejora en la estabilidad de los parámetros monitoreados, optimizando la eficiencia del sistema acuapónico y reduciendo la intervención humana. Se concluye que la implementación de IoT en acuaponía permite un control preciso y en tiempo real de la calidad del agua, lo que contribuye a una producción sostenible y eficiente, reduciendo riesgos y mejorando la resiliencia del sistema frente a variaciones ambientales.

**Palabras clave:** Internet de las cosas (IoT); monitoreo, producción sostenible; sistema acuapónico.

## Abstract

Aquaponics, a practice that combines aquaculture and hydroponics, offers a sustainable alternative for food production in areas with limited water resources, such as some regions of Peru. However, properly managing water parameters, which are essential to maintain the system's balance, remains a significant challenge. In this context, the study aimed to design and implement a remote monitoring system based on IoT to measure and control critical water parameters in an aquaponic fish farm in Tacna, Peru. The methodology included the development of a hardware infrastructure with pH, turbidity, temperature, and water level sensors, connected to an ESP32 LilyGO microcontroller with MQTT communication and equipped with a GSM/3G modem (SIM7000G). Additionally, software was designed for data collection, transmission, and cloud storage, enabling real-time monitoring and automated actions. The results showed an improvement in the stability of the monitored parameters, optimizing the efficiency of the aquaponic system and reducing human intervention. It is concluded that the implementation of IoT in aquaponics allows for precise, real-time control of water quality, contributing to a sustainable and efficient production process, reducing risks, and enhancing the system's resilience against environmental fluctuations.

**Keywords:** Internet of Things (IoT); monitoring, sustainable production; aquaponic system.



## 1. Introducción

La producción de alimentos enfrenta desafíos cada vez mayores debido al crecimiento de la población y la reducción de recursos naturales disponibles. En ese sentido, se ha desarrollado un sistema de producción sostenible denominado acuaponía, que combina la acuicultura (cría de peces) con la hidroponía (cultivo de plantas sin suelo) en un ciclo cerrado y simbiótico. En este sistema, los desechos de los peces se convierten en nutrientes para las plantas gracias a la acción de bacterias beneficiosas, mientras que las plantas ayudan a filtrar y limpiar el agua, devolviéndola a los peces en condiciones adecuadas. Además, este enfoque permite optimizar el uso del agua, reducir la necesidad de fertilizantes químicos y producir alimentos saludables de manera integrada (Ataucusi-Mayor et al., 2022; Goddek et al., 2020; Khaoula et al., 2021; Pérez et al., 2015). Sin embargo, el monitoreo constante de la calidad del agua en sistemas acuáticos es esencial para garantizar el bienestar de los organismos que habitan en estos entornos. Parámetros como el pH, la temperatura, la turbidez y los niveles de agua son indicadores esenciales para el buen funcionamiento de estos sistemas. La variabilidad en estos parámetros puede resultar en estrés fisiológico, enfermedades y pérdidas económicas significativas (Sun et al., 2022; Shete et al., 2024).

El pH, que indica el nivel de acidez o alcalinidad del agua, impacta la tasa de crecimiento, la actividad enzimática y la solubilidad de los nutrientes esenciales (Wang et al., 2023; Wongkiew et al., 2017). Por otro lado, la temperatura del agua afecta el metabolismo, por lo que mantenerla en un rango adecuado es fundamental para el crecimiento y la reproducción de los peces (Krastanova et al., 2022; Yavuzcan Yildiz et al., 2017). Mientras que la turbidez mide la cantidad de partículas en suspensión en el agua, tales como sedimentos, materia orgánica y microorganismos (Nair et al., 2025)

Tradicionalmente, el monitoreo y control de estos factores se ha realizado mediante muestreos manuales y análisis de laboratorio. Este enfoque, aunque efectivo, es laborioso y no proporciona datos en tiempo real, limitando la capacidad de respuesta ante cambios abruptos en las condiciones del agua. Además, con la expansión de estos sistemas hacia áreas remotas, la necesidad de contar con soluciones tecnológicas efectivas para el monitoreo en tiempo real ha aumentado (Jaya et al., 2024; Khandelwal et al., 2024). El uso de tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT) ha mostrado un gran potencial para satisfacer esta demanda y minimizar los riesgos asociados (Taha et al., 2022). Khaoula et al. (2021) menciona que el IoT es una herramienta para la automatización y el monitoreo remoto en diversas industrias, incluida la acuicultura.

El uso de dispositivos como sensores conectados a plataformas de comunicación permite la recopilación y transmisión de datos en tiempo real, proporcionando una visión continua de las condiciones del entorno. En esa línea, Jaya et al. (2024) y Kok et al. (2024) expresa que la automatización ofrece la posibilidad de reducir la intervención humana y minimizar los errores asociados con las mediciones manuales, lo que a su vez mejora la fiabilidad del sistema. Por tanto, el objetivo del estudio fue diseñar e implementar un sistema de monitoreo remoto basado en IoT para la medición y control de los parámetros de calidad del agua (pH, turbidez, nivel de agua y temperatura) en un sistema acuapónico. Este sistema permitirá la transmisión de datos a una plataforma en la nube, facilitando la supervisión en tiempo real y la automatización de acciones correctivas cuando sea necesario.

## 2. Metodología

### 2.1. Lugar de estudio

La investigación se realizó en una piscigranja acuapónica de Tacna, Perú, ubicada al sur de la ciudad. Que opera en condiciones semi-aisladas, lo que representa un desafío para la conectividad. Sin embargo, el área tiene cobertura de la operadora Entel, por lo que se integró una tarjeta SIM de esta operadora al microcontrolador ESP32 LilyGO. Esta ubicación fue elegida debido a su relevancia en la actividad acuapónica local y su capacidad para albergar el sistema de monitoreo remoto, lo cual facilitó el análisis de datos en tiempo real. Respecto al tipo de pez que se produjo fueron las tilapias (*Oreochromis niloticus*). Que es ampliamente cultivado en acuaponía debido a su valor económico y su aporte nutricional. Contiene nutrientes esenciales para el cuerpo humano, como carbohidratos, proteínas, grasas, calcio, fósforo y hierro (Jaya et al., 2024).

### 2.2. Caracterización del sistema

El sistema acuapónico actual de la piscigranja se caracteriza por un ciclo cerrado en el que los peces y las plantas coexisten de manera eficiente. Los desechos generados por los peces son procesados por un sistema de filtrado mecánico y biológico que convierte estos desechos en nutrientes para las plantas (Figura 1a). Es decir, los peces generan desechos ricos en nitrógeno y fósforo, que las bacterias transforman en nitratos, esenciales para el crecimiento de las plantas. Estas, a su vez, mejoran la calidad del agua al absorber nutrientes y reducir compuestos tóxicos. La mayor parte del amoníaco se libera por osmorregulación, mientras que el resto proviene de heces y orina, formando el nitrógeno amoniacal total, clave en el equilibrio del sistema (Wahyuningsih et al., 2015). Luego, el agua rica en nutrientes se transporta a las bandejas donde se cultivan las plantas, purificándose antes de regresar a los tanques de peces. El control de la temperatura del agua se optimiza mediante una terma solar, y se gestionan los flujos de agua y oxígeno mediante una bomba eléctrica y válvulas de flujo

Mientras que la implementación del sistema de monitoreo remoto y control automatizado propuesto, busca integrar tecnologías de sensores y comunicación para mejorar el rendimiento y monitoreo en tiempo real del sistema acuapónico. De esta manera no solo optimizar los recursos sino también garantizar el bienestar de los peces y plantas a lo largo de su proceso de producción (Figura 1b).

### 2.3. Implementación del sistema

La implementación del sistema de monitoreo y control automático del sistema acuapónico se llevó a cabo en varias fases. En primer lugar, se diseñó una infraestructura de hardware que integrara diversos sensores y actuadores para monitorear parámetros clave como pH, turbidez, temperatura y nivel de agua, además de la comunicación remota. Para ello, se diseñaron placas de circuito impreso que facilitaron la integración de los módulos de comunicación y transmisión de datos mediante un cable de red UTP y conectores RJ45 (Figura 2). Estas placas se aseguraron de que los componentes estuvieran debidamente conectados, lo que permitió optimizar el rendimiento del sistema sin causar interferencias o fallas de comunicación.



Figura 1  
Diagrama de bloques inicial y automatizado del sistema acuapónico

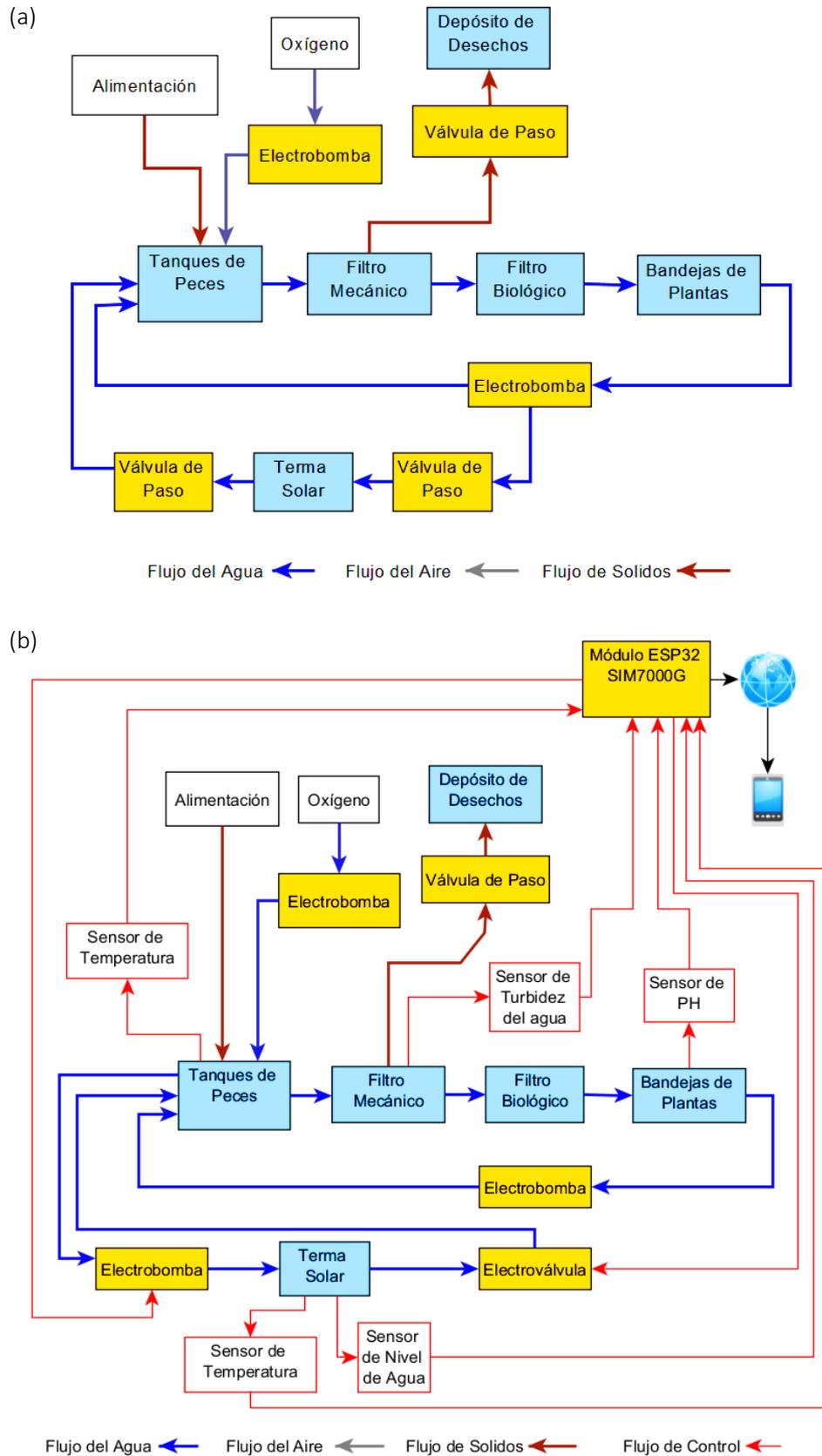
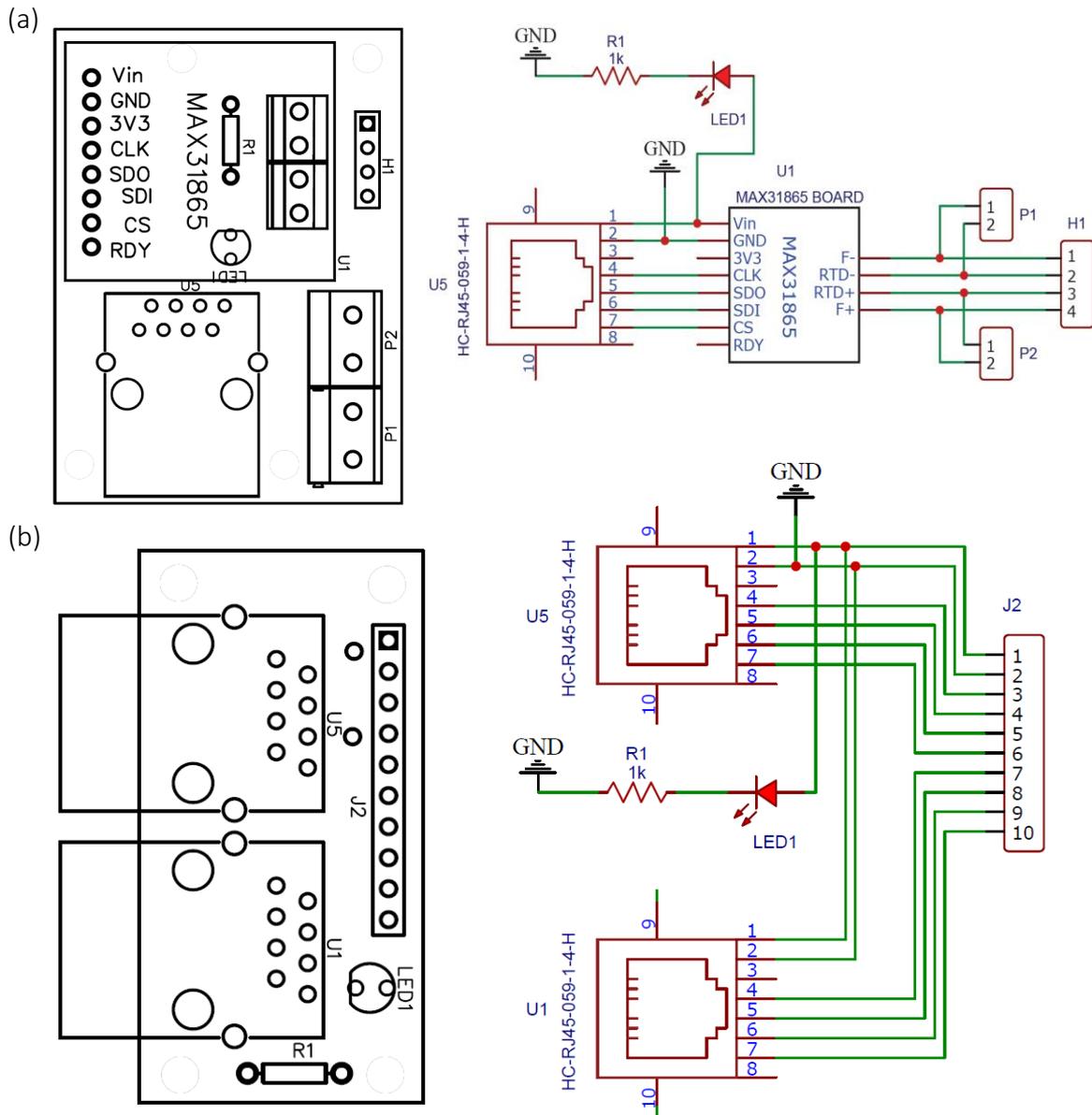


Figura 2  
Diagrama del circuito y conexiones de los componentes

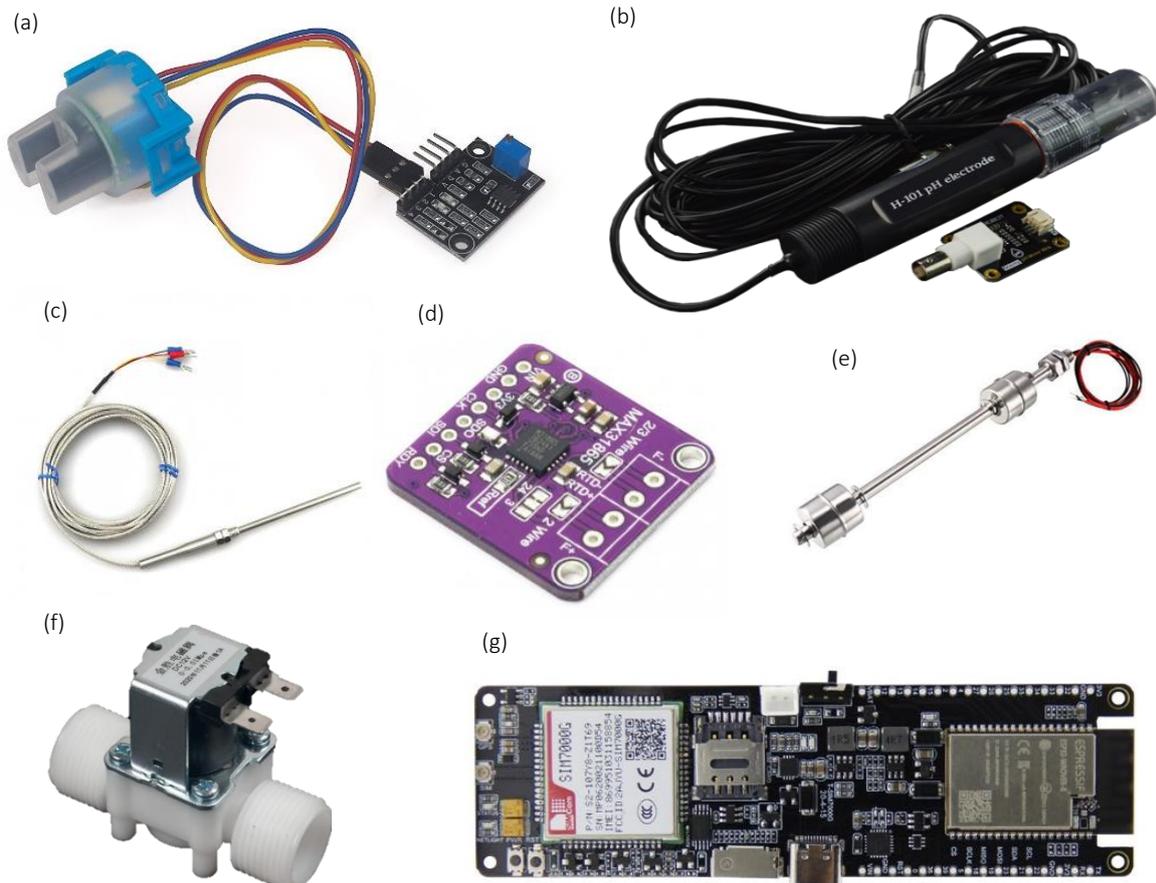


El sistema de monitoreo utilizó sensores de turbidez, pH, temperatura, y nivel de agua, los cuales fueron cuidadosamente seleccionados por su precisión y fiabilidad (Figura 3). El sensor de turbidez de agua (a), por ejemplo, mide la calidad del agua detectando partículas suspendidas mediante un diodo infrarrojo y un fototransistor, con salidas analógicas y digitales para proporcionar lecturas precisas. Del mismo modo, el sensor de pH DFRobot (b) garantiza mediciones rápidas y precisas gracias a su membrana de vidrio de baja impedancia, lo que es importante para mantener condiciones adecuadas en el sistema acuapónico. El sensor de temperatura RTD PT100 (c) fue elegido por su alta precisión y fiabilidad en la medición de la temperatura del agua, fundamental para el bienestar de las especies acuáticas. Para leer el sensor PT100, se seleccionó el módulo MAX31865 (d) debido a su alta facilidad de integración. Además, el interruptor flotante (e) se utilizó para controlar el nivel del agua en los tanques, garantizando que el sistema funcione de manera eficiente. Asimismo, para regular el paso del



flujo se utilizó las Válvula solenoide 3/4" 12VDC Baja Presión normalmente cerradas (f). El microcontrolador ESP32 LilyGO (g) se encargó de la recopilación de datos de los sensores (pH, turbidez, temperatura, y nivel de agua) y de la transmisión de estos a través de la red celular mediante un módem SIM7000G.

**Figura 3**  
*Diagrama del circuito y conexiones de los componentes*



#### 2.4. Diseño del software

El software diseñado gestionó los sensores y actuadores, además de asegurar la conectividad remota mediante el protocolo MQTT (Tabla 1). Para gestionar la comunicación entre el microcontrolador y los dispositivos de monitoreo remoto, se empleó el protocolo MQTT, que permite la transmisión de datos en tiempo real a través de una red segura y confiable. El desarrollo del software incluyó la configuración de las librerías, la inicialización de los sensores y actuadores, la conexión del dispositivo a la red Wi-Fi y la configuración de la comunicación con el broker MQTT. Adicionalmente, el sistema se sincronizó con un servidor NTP para garantizar la precisión en el registro temporal de los datos. El software también permite el control de los actuadores, tales como una válvula solenoide y una bomba, en función de las lecturas de los sensores, lo que asegura la estabilidad del sistema acuapónico. De esta manera, el sistema no solo mide y monitorea, sino que también toma decisiones automáticas basadas en los parámetros predefinidos para mantener condiciones óptimas para los peces y las plantas.

**Tabla 1**  
*Etapas de funcionamiento del software diseñado*

<b>Etapa</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Propósito</b>
Configuración y librerías	Incluir librerías y definir constantes necesarias para el sistema.	Incluir librerías como TinyGsmClient, PubSubClient, SD.
Configuración de red	Conectar el dispositivo a Wi-Fi y/o red GSM.	Conexión a Wi-Fi con WiFi.begin. Configuración del modem GSM con APN y conexión GPRS.
Configuración del cliente MQTT	Establecer comunicación con el broker MQTT.	Configurar broker, puerto, usuario y contraseña.
Configuración de sensores y actuadores	Inicializar y configurar los sensores y actuadores conectados	Definir pines para sensores (pH, temperatura, turbidez, nivel). Configurar actuadores
Configuración de tiempo	Sincronizar el dispositivo con un servidor NTP para obtener la hora actual.	Configurar NTPClient o configTime para sincronización horaria. Formatear y almacenar hora y fecha.
Lectura de sensores	Recopilar datos de sensores y realizar cálculos necesarios.	Leer sensores periódicamente. Calibrar datos según parámetros definidos.
Publicación y control en MQTT	Publicar datos de sensores y controlar actuadores mediante MQTT.	Publicar datos en tópicos MQTT. Escuchar mensajes de control para operar actuadores.

## 2.5. Montaje y pruebas de campo

El software diseñado aseguró la conectividad remota mediante el protocolo MQTT. El microcontrolador ESP32 LilyGO se encargó de la recopilación de datos de los sensores (pH, turbidez, temperatura, y nivel de agua) y de la transmisión de estos a través de la red celular mediante un módem SIM7000G. Para gestionar la comunicación entre el microcontrolador y los dispositivos de control remoto, se empleó el protocolo MQTT, que permite la transmisión de datos en tiempo real a través de una red segura y confiable. El monitoreo in situ se realizó entre los meses de octubre a diciembre de 2024.

## 3. Resultados y discusión

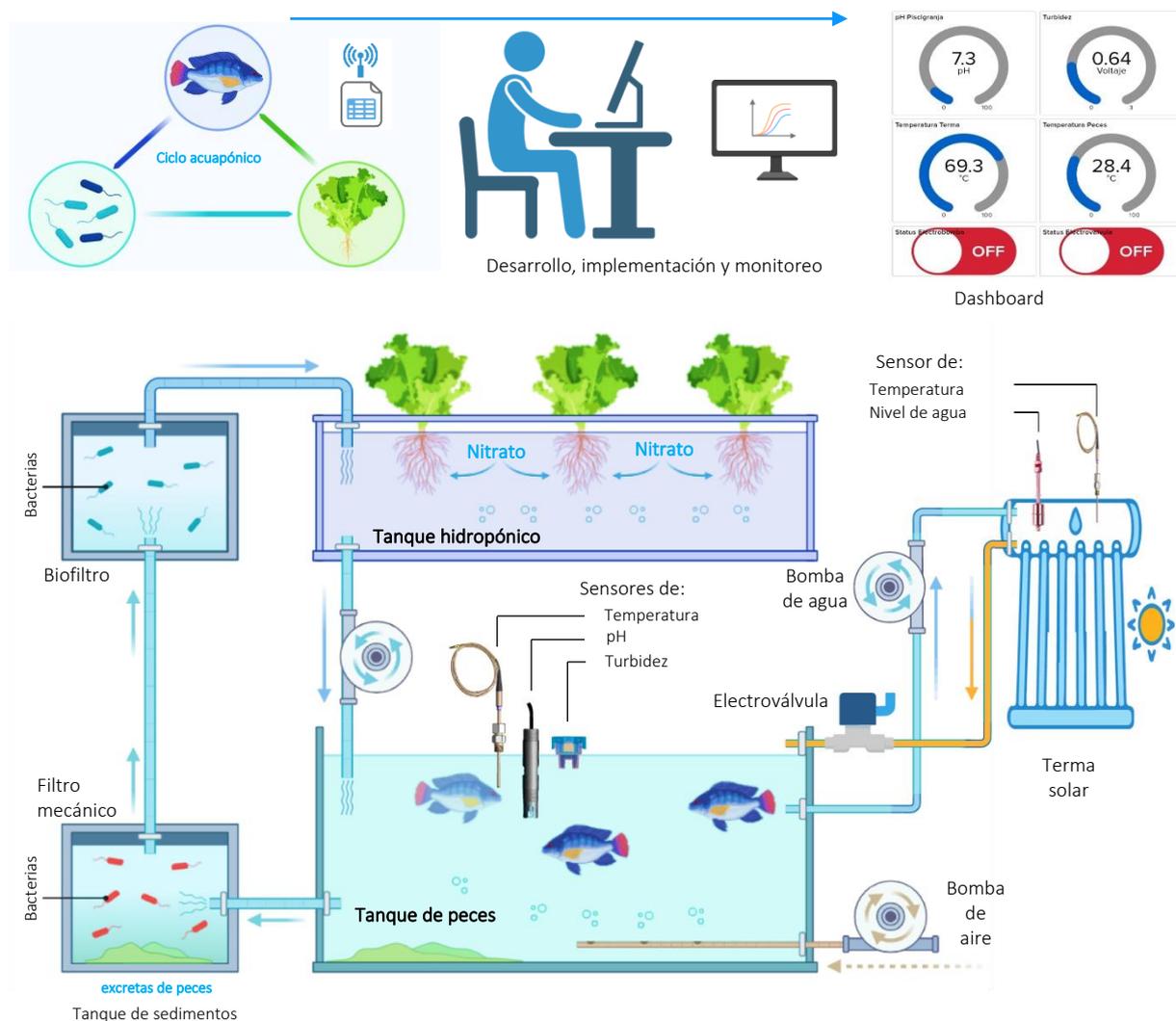
El prototipo desarrollado e implementado se destacó por su capacidad de comunicación remota. La integración del módulo ESP32 SIM700G, con capacidades de comunicación



GSM/3G, permitió la transmisión eficiente de los datos sensoriales hacia el broker MQTT, posibilitando su visualización y análisis en tiempo real. La transmisión de los datos se llevó a cabo de manera estable, evidenciando la capacidad del sistema para operar en entornos con conectividad limitada. Respecto al ciclo acuapónico Taha et al. (2022) indica que consta de tres partes (Figura 4), primero los peces excretan amoníaco a través de las branquias y desechos, luego pasa a los tanques de sedimentos donde las bacterias oxidantes de amoníaco convierten el amoníaco en nitrito, simultáneamente, mediante una bomba de agua es bombeado hacia un tanque de biofiltro donde las bacterias oxidantes de nitrito convierten el nitrito en nitrato. Posteriormente, dentro del tanque hidropónico las plantas absorben los nutrientes y filtran el agua. Finalmente, el agua filtrada retorna al tanque de los peces.

Figura 4

Esquema de la implementación del sistema autónomo en acuaponía



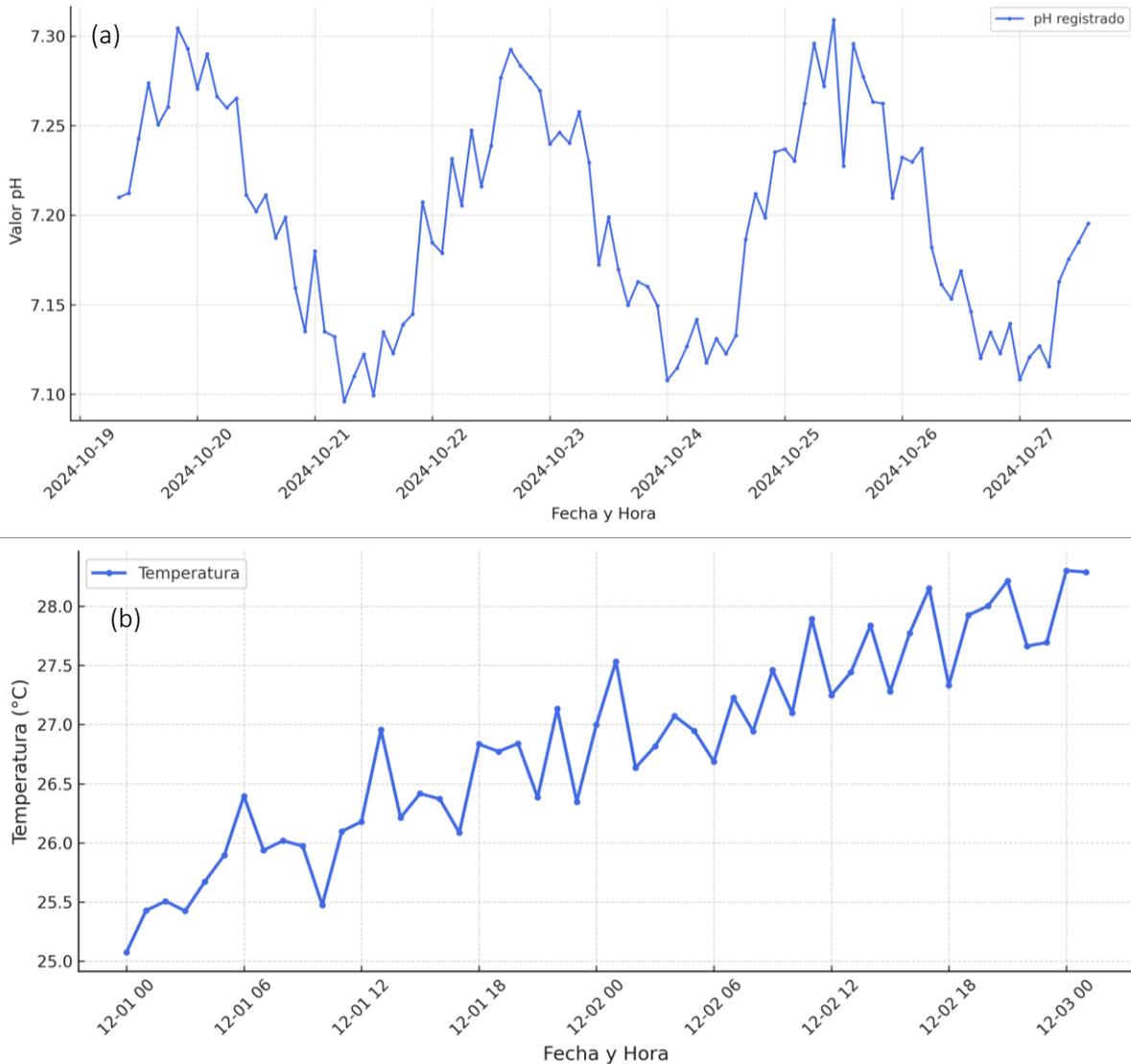
Nota. El esquema fue generado en Biorrender.com.

El análisis de los sensores empleados evidenció su precisión y confiabilidad en la medición de los parámetros ambientales y del agua en el sistema acuapónico. En el caso del sensor de temperatura, se registró una variación máxima de  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ , lo que confirma su alta sensibilidad. Por otro lado, el sensor de pH presentó valores más elevados durante el día, aproximadamente 0,05 unidades por encima de los valores promedio nocturnos (Figura 5a).

Estas variaciones son coherentes con la literatura, dado que la actividad fotosintética de las plantas durante el día contribuye al incremento del pH en sistemas acuapónicos. Kasozi et al. (2021), Wang et al. (2023) y Yavuzcan Yildiz et al. (2017) resaltan que en sistemas acuapónicos, el pH puede variar debido a procesos como la fotosíntesis de las plantas o la descomposición de materia orgánica, lo que puede generar estrés en los peces si no se controla adecuadamente.

**Figura 5**

*Promedio por horas del pH del sumidero del sistema y temperatura del tanque de peces*



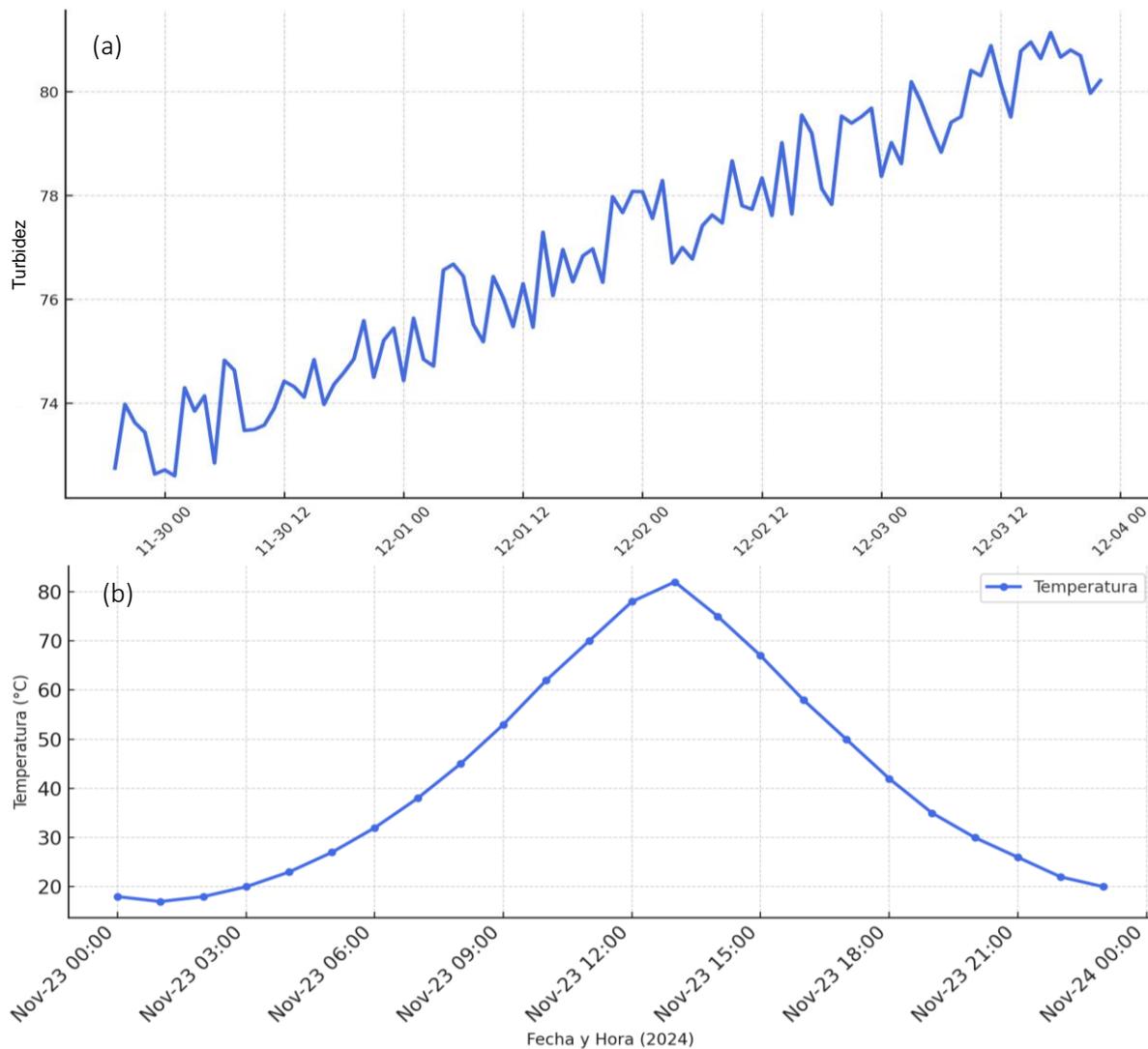
Como parte del objetivo de garantizar condiciones óptimas para el crecimiento y desarrollo de las tilapias, se instaló un sensor de temperatura en uno de los tanques de peces. Debido a que el diseño del sistema acuapónico permite la recirculación continua del agua, la temperatura se mantiene homogénea en todos los tanques (Figura 5b), lo que refuerza la importancia del monitoreo preciso de este parámetro. El sensor, conectado a un ESP32 dedicado, envía los datos en tiempo real al broker, asegurando que la temperatura permanezca dentro del rango (28 °C a 32 °C). Al respecto, Saavedra (2006) menciona que el desarrollo adecuado de algunas variedades de peces está en un rango de temperatura entre 25 y 32 °C,



es decir, en climas cálidos. No obstante, temperaturas inferiores a 15 °C o superiores a 37 °C pueden afectar su bienestar y desarrollo. Ahora bien, en zonas costeras y áridas del hemisferio sur, entre los meses de las estaciones de otoño e invierno las temperaturas pueden disminuir significativamente, alcanzando entre 35°C y 22°C debido a la nubosidad, con registros más bajos de hasta 11 °C por el ingreso de aire frío (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI], 2024).

**Figura 6**

*Promedio por hora de la turbidez del filtro mecánico y de la temperatura de la terma solar*



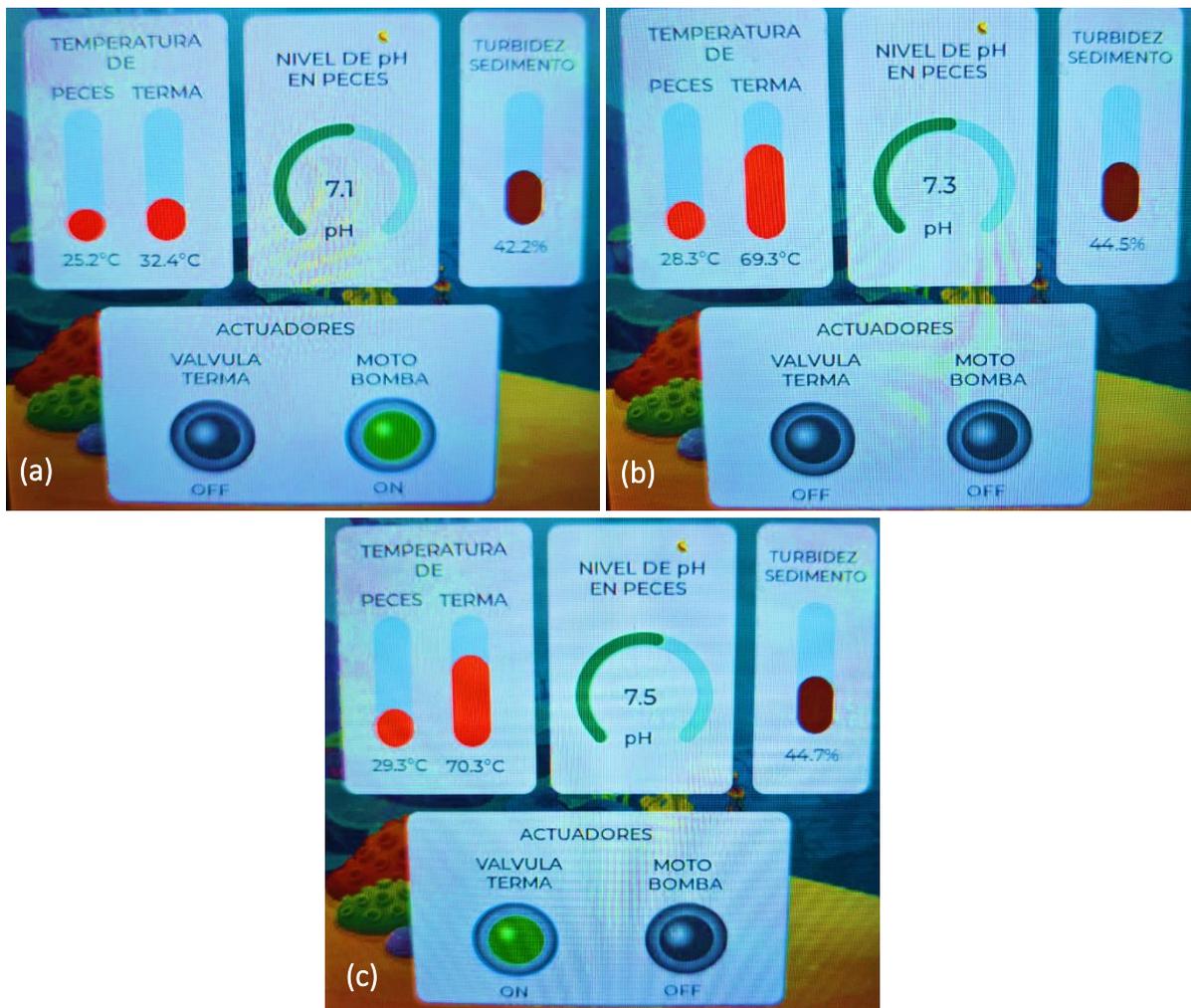
Además, se evaluó la turbidez del agua mediante un sensor óptico, cuyo funcionamiento se basa en la cantidad de luz que atraviesa el medio líquido. Un aumento en el voltaje de salida del sensor indica menor turbidez, mientras que valores bajos sugieren una mayor concentración de partículas en suspensión. Estos valores en voltaje los convertimos en valores de porcentaje de medición del sensor de turbidez, en donde un 100 % evidencia una concentración de partículas lo suficientemente alta para no dejar pasar ningún haz de luz infrarroja hacia el módulo receptor del sensor. El análisis de los datos registrados mostró fluctuaciones en la turbidez a lo largo del día, con una tendencia a disminuir en determinados momentos y posteriormente incrementar nuevamente. Al final del período, se evidenció una

estabilización en valores más altos, lo que sugiere una reducción en la transparencia del agua, posiblemente asociada con la acumulación de residuos orgánicos en el sistema (Figura 6a). Una turbidez elevada puede reducir la penetración de la luz, afectando la fotosíntesis de las plantas acuáticas y alterando el equilibrio del ecosistema. Además, niveles altos de turbidez pueden causar estrés en los peces al obstruir sus branquias y reducir la concentración de oxígeno disuelto en el agua (Kok et al., 2024; Teng et al., 2007; Yavuzcan Yildiz et al., 2017).

Para garantizar la eficiencia térmica del sistema, se implementó un sensor PT100 en la parte superior de la terma solar. La Figura 6b muestra que la temperatura del agua alcanzó su máximo alrededor de las 17:00 horas, registrando 70 °C. Posteriormente, se activó la electroválvula, permitiendo el retorno del agua al sistema acuapónico. Es importante destacar que, una vez que el sensor PT100 dejó de estar en contacto con el agua, la lectura ascendió a 80 °C, lo cual se debe a que esta termocupla pt100 está diseñada para medir la temperatura en contacto con el agua y no en el aire.

Figura 7

Pantalla del sistema implementado mostrando datos en tiempo real



Finalmente, referente al funcionamiento del nodo central y la automatización del sistema se destacó que el nodo central del sistema estuvo compuesto por dos ESP32 con funciones diferenciadas. Uno de ellos, un LilyGO, se encargó de gestionar la comunicación y el



control del sistema, mientras que el otro ESP32 cumplió la función de medir la temperatura en la terma. Adicionalmente, se integraron módulos de comunicación para transmitir los datos de los sensores PT100, los cuales están conectados a módulos MAX31865, asegurando una medición de temperatura con alta precisión. Al iniciar el sistema, primero se evaluó si la temperatura de los peces era inferior al umbral predefinido. En el caso de la Figura 7a, la temperatura era de 25,2 °C, por lo que se activó la electrobomba de circulación hacia la terma solar. Una hora después, los datos en tiempo real indicaron que la temperatura del agua en el tanque de los peces se mantenía en 28,3 °C, mientras que en la terma se registraron 69,3 °C, con una turbidez de 44,5 (Figura 7b). Gracias a la automatización del sistema, los actuadores de la electroválvula y la electrobomba permanecieron desactivados cuando la temperatura de la terma se encontraba en 69,3 °C, dado que el umbral de activación se establece en 70 °C. Durante las pruebas, se observó que, cuando la temperatura de la terma superó los 70°C, la electroválvula cambió automáticamente su estado a "ON", activando la recirculación del agua caliente hacia el sistema acuapónico. En ese momento, la pantalla del sistema mostró una alerta visual, registrando valores de pH de 7,5, temperatura del agua de 29,3 °C y 70,3 °C, y turbidez de 44,7 % (Figura 7c). La activación de la electrobomba principal permitió una distribución eficiente del agua caliente, manteniendo condiciones adecuadas dentro del sistema acuapónico.

## 4. Conclusiones

El sistema implementado operó de manera autónoma, activando la bomba de circulación hacia la terma solar únicamente cuando la temperatura en el estanque de peces desciende por debajo de un umbral predefinido, detectado mediante una termocupla. La bomba se desactivó automáticamente cuando la terma se llenó por completo, detectado por la boya de electronivel situada en el tope de esta. De igual manera, se activó la electroválvula únicamente cuando se detectó una temperatura en la terma solar, mediante una termocupla, superior a un umbral predefinido, manteniéndose abierta por un span de tiempo predefinido para que toda el agua caliente regrese al estanque de peces. Este mecanismo garantizó un control eficiente de la temperatura sin necesidad de intervención manual. Además, se monitorean otros parámetros críticos como pH y turbidez, esenciales para evaluar la calidad del agua y el bienestar de los peces.

Además, las mediciones de temperatura y pH presentaron márgenes de error mínimos, lo que confirma la fiabilidad del sistema para monitorear las condiciones del agua en aplicaciones acuícolas y otros sectores donde la calidad del agua es un factor crítico. Estos resultados respaldan la viabilidad del prototipo para su implementación en escenarios reales, proporcionando datos precisos que facilitan la toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico.

Un aspecto destacado de este desarrollo es la implementación del protocolo SPI en la comunicación con el sensor PT100, logrando una transmisión efectiva a una distancia de 10 metros mediante cable UTP. Aunque el protocolo SPI suele presentar limitaciones en largas distancias, los resultados obtenidos demostraron que, con una selección adecuada de componentes y una optimización en el diseño del sistema, es posible superar dichas restricciones sin comprometer la calidad de los datos transmitidos.

## Contribución de los autores

**G. J. Cárdenas:** Conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, desarrollo metodológico, administración del proyecto, validación, visualización y redacción del borrador original. **V. A. J. Alarcón:** Conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, desarrollo metodológico, administración del proyecto, software, validación y redacción del borrador original. **H. J. Rivera:** Conceptualización, desarrollo metodológico, administración del proyecto, adquisición de fondos, provisión de recursos, supervisión, validación y redacción – revisión y edición del manuscrito.

## Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés relacionados con esta publicación.

## 5. Referencias Bibliográficas

- Ataucusi-Mayor, D. J., Serrano-Guzmán, K. L., Paulino-Inga, J. L., & Huamanchahua, D. (2022, del 9 al 11 de diciembre). Automation and sensor control for an aquaponic system in the rural town of de San José de Quero district, Peru 2021 [conferencia]. *2022 7th International Conference on Mechatronics System and Robots (ICMSR)*, Singapur, Singapur. <https://doi.org/10.1109/ICMSR2020.2022.00018>
- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Burnell, G. M. (Eds.). (2019). *Aquaponics food production systems: Combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6>
- Jaya, D. S., Styawati, S., & Syahirul, A. (2024). Automation of aquaponics systems through integration of RTC modules, turbidity sensors, and water level sensors. *Journal of Soft Computing Exploration*, 4(4), 262–275. <https://doi.org/10.52465/josce.v4i4.267>
- Kasozi, N., Abraham, B., Kaiser, H., & Wilhelmi, B. (2021). The complex microbiome in aquaponics: significance of the bacterial ecosystem. *Annals of Microbiology*, 71(1). <https://doi.org/10.1186/s13213-020-01613-5>
- Khandelwal, G., Ansari, N., & Ostwal, R. (2024). A comprehensive review on : Aquaponic farming water quality prediction. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, 10(4), 167–180. <https://doi.org/10.32628/cseit2410420>
- Khaoula, T., Abdelouahid, R. A., Ezzahoui, I., & Marzak, A. (2021). Architecture design of monitoring and controlling of IoT-based aquaponics system powered by solar energy. *Procedia Computer Science*, 191, 493–498. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.07.063>
- Kok, C. L., Kusuma, I. M. B. P., Koh, Y. Y., Tang, H., & Lim, A. B. (2024). Smart aquaponics: An automated water quality management system for sustainable urban agriculture. *Electronics*, 13(5), 820. <https://doi.org/10.3390/electronics13050820>
- Krastanova, M., Sirakov, I., Ivanova-Kirilova, S., Yarkov, D., & Orozova, P. (2022). Aquaponic systems: biological and technological parameters. *Biotechnology, Biotechnological Equipment*, 36(1), 305–316. <https://doi.org/10.1080/13102818.2022.2074892>



- Saavedra, M. A. (2006). *Manejo del cultivo de Tilapia* [Trabajo de grado, Centro de Investigaciones de Ecosistemas Acuáticos de Managua]. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/1095629>
- Nair, C. S., Manoharan, R., Nishanth, D., Subramanian, R., Neumann, E., & Jaleel, A. (2025). Recent advancements in aquaponics with special emphasis on its sustainability. *Journal of the World Aquaculture Society*, 56(1). <https://doi.org/10.1111/jwas.13116>
- Pérez, M., Téllez, R., Avelino, R., y Tenorio, F. (2015). Sistema Acuapónico. *Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias*, 2(4), 538-546. <https://goo.su/LuJhcrw>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI] (2024). Heladas y friajes. <https://goo.su/FudZ>
- Shete, R. P., Bongale, A. M., & Dharrao, D. (2024). IoT-enabled effective real-time water quality monitoring method for aquaculture. *MethodsX*, 13(102906), 102906. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.102906>
- Sun, L., Wang, B., Yang, P., Wang, X., Li, D., & Wang, J. (2022). Water quality parameter analysis model based on fish behavior. *Computers and Electronics in Agriculture*, 203(107500), 107500. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107500>
- Taha, M. F., ElMasry, G., Gouda, M., Zhou, L., Liang, N., Abdalla, A., Rousseau, D., & Qiu, Z. (2022). Recent advances of smart systems and Internet of things (IoT) for aquaponics automation: A comprehensive overview. *Chemosensors (Basel, Switzerland)*, 10(8), 303. <https://doi.org/10.3390/chemosensors10080303>
- Teng, W., Guoxiang, W., & Qiang, L. (2007). Effects of water turbidity on the photosynthetic characteristics of *Myriophyllum spicatum* L. *Asian journal of plant sciences*, 6(5), 773–780. <https://doi.org/10.3923/ajps.2007.773.780>
- Wahyuningsih, S., Effendi, H., y Wardiatno, Yusli. (2015). Nitrogen removal of aquaculture wastewater in aquaponic recirculation system. *AACL Bioflux*, 8(4), 491-499. <https://goo.su/MXpSphf>
- Wang, Y.-J., Yang, T., & Kim, H.-J. (2023). PH dynamics in aquaponic systems: Implications for plant and fish crop productivity and yield. *Sustainability*, 15(9), 7137. <https://doi.org/10.3390/su15097137>
- Wongkiew, S., Hu, Z., Chandran, K., Lee, J. W., & Khanal, S. K. (2017). Nitrogen transformations in aquaponic systems: A review. *Aquaculture Engineering*, 76, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.01.004>
- Yavuzcan Yildiz, H., Robaina, L., Pirhonen, J., Mente, E., Domínguez, D., & Parisi, G. (2017). Fish welfare in aquaponic systems: Its relation to water quality with an emphasis on feed and Faeces—A review. *Water*, 9(1), 13. <https://doi.org/10.3390/w9010013>