

Automatización y Control en Sistemas de Recirculación Acuícola: Implementación de un SCADA Basado en Redes de Sensores Inalámbricos

Coto Fuentes, H.¹; Rocha Magallanes, R.R.²; Machado Díaz, E.³; Valdés Perezgasga, F.⁴

Datos de Adscripción:

¹ ✉ Hesner Coto Fuentes, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de la Laguna, División de Estudios de Posgrado e Investigación, hesnercf@lalaguna.tecnm.mx, <https://orcid.org/0000-0002-9548-7864>

² Roy Rob Rocha Magallanes, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de la Laguna, División de Ingeniería Electrónica, rocharoy6@gmail.com

³ Eduardo Machado Díaz, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, División de Ingeniería en Sistemas Automotrices, eduardo.md@itslerdo.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0003-2610-7570>

⁴ Francisco Valdés Perezgasga, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de la Laguna, División de Estudios de Posgrado e Investigación, fvaldesp@lalaguna.tecnm.mx, <https://orcid.org/0000-0002-7176-3641>

Resumen - La automatización en acuicultura intensiva, particularmente en sistemas de recirculación acuícola (RAS), requiere soluciones accesibles, escalables y técnicamente confiables. En este trabajo se presenta el desarrollo e implementación de un sistema SCADA inalámbrico basado en tecnologías abiertas, orientado al monitoreo y control de parámetros críticos en RAS a pequeña escala. La solución emplea módulos M5Stack Station-485, simuladores de señales analógicas tipo 4–20 mA, y una interfaz de visualización en LabVIEW. Se diseñaron nodos sensores distribuidos capaces de adquirir variables como oxígeno disuelto, temperatura y pH, y un nodo coordinador encargado del procesamiento centralizado y la activación de actuadores. El sistema fue validado en laboratorio mediante pruebas de conectividad, latencia y respuesta ante condiciones críticas simuladas. Los resultados demuestran una arquitectura estable, funcional y de bajo costo, adecuada para contextos académicos, comunitarios o de producción acuícola con recursos limitados. El artículo también discute las limitaciones del sistema y plantea líneas futuras de mejora, como la integración de sensores físicos y el desarrollo de una interfaz web para monitoreo remoto.

Palabras Clave - Acuicultura, automatización, LabVIEW, M5Stack, RAS, SCADA, sensores.

Abstract - Automation in intensive aquaculture, particularly within recirculating aquaculture systems (RAS), requires cost-effective, scalable, and technically reliable solutions that remain accessible to small-scale producers. Although commercial SCADA platforms exist, their high cost and limited adaptability restrict their use in academic and community-based contexts. This work presents the development and laboratory validation of a wireless SCADA system based on open technologies, designed to monitor and control critical water quality parameters in small-scale RAS. The proposed architecture integrates M5Stack Station-485 modules, analog signal simulators (4–20 mA), and a

LabVIEW-based visualization interface. Distributed sensor nodes were implemented to acquire dissolved oxygen, temperature, and pH, while a central coordinator managed data processing and actuator control. System performance was assessed through connectivity stability, latency, and critical-response tests. Results confirm that the platform is functional, stable, and low-cost, making it suitable for educational, community-oriented, and resource-limited aquaculture applications. The article also discusses current limitations, such as the use of simulated signals, and outlines future improvements including the integration of physical sensors, advanced data analytics, and the development of a web-based remote monitoring interface.

Keywords - Aquaculture, SCADA, RAS, sensors, automation, M5Stack, LabVIEW

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Sistemas de acuicultura

La acuicultura se ha posicionado como una respuesta estratégica ante los desafíos globales en la producción sostenible de alimentos, superando a la pesca extractiva en volumen y consolidándose como fuente clave de proteína animal (FAO, 2024). Entre las diversas técnicas disponibles, los sistemas de recirculación acuícola (RAS) destacan por su capacidad de mantener condiciones ambientales controladas, reutilizar el agua y reducir los residuos, lo que los convierte en una alternativa eficiente y ambientalmente responsable para el cultivo intensivo de especies como la tilapia (Libey, 1993; Sáenz, 2018).

Figura 1
Modelos de producción acuícola más utilizados.



Los modelos de producción acuícola (ver Figura 1) varían en su grado de tecnificación. Los sistemas tradicionales en flujo abierto (A), aunque simples, presentan limitaciones en el control de la calidad del agua (Estrada et al., 2023). En cambio, los sistemas

biofloc (B) utilizan microorganismos para convertir residuos en biomasa útil (Sáenz, 2018; Salazar, 2003), mientras que los acuapónicos (C) integran peces y plantas en un circuito cerrado, favoreciendo un uso sinérgico de nutrientes (Betancourth y Cárcamo, 2023). En contraste, los RAS (D) sobresalen por su eficiencia en el uso del agua, especialmente en regiones áridas como la Comarca Lagunera, donde el acceso al recurso hídrico es limitado.

No obstante, el correcto funcionamiento de los RAS exige supervisión constante de variables críticas como el oxígeno disuelto, temperatura, pH y compuestos nitrogenados (Losordo et al., 1999). Desviaciones en estos parámetros pueden comprometer la salud de los organismos y afectar la estabilidad del sistema. En respuesta a esta necesidad, la integración de tecnologías de automatización ha ganado relevancia.

Los sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), combinados con redes de sensores inalámbricos (WSN), permiten el monitoreo continuo, la generación automática de alertas, el registro de datos históricos y el control remoto de procesos. Estas herramientas no solo mejoran la operación, sino que también aumentan la eficiencia energética, reducen el riesgo de fallos y permiten la trazabilidad (Gómez, 2008; Rivera, 2017; Reyes y Samame, 2024; Sumba y Torres, 2019).

1.2 Antecedentes en la aplicación de SCADA en RAS.

Diversos estudios han explorado el uso de tecnologías SCADA en acuicultura, principalmente en sistemas de recirculación acuícola (RAS). Por ejemplo, Sumba y Torres (2019) reportaron la implementación de un sistema SCADA comercial en una granja de tilapia, con énfasis en el monitoreo de oxígeno y temperatura, aunque con limitaciones en cuanto a la escalabilidad y el acceso a programación abierta. Reyes y Samame (2024) propusieron una solución híbrida basada en SCADA y PLCs industriales, logrando mejoras en la eficiencia operativa, pero con altos costos de implementación y dependencia de software propietario.

A nivel experimental, Rivera (2017) analizó redes de sensores inalámbricos (WSN) como base para sistemas SCADA distribuidos, aunque sin integrar control de actuadores ni interfaz visual robusta. En este contexto, el presente trabajo se distingue por ofrecer una solución de bajo costo, programable con herramientas abiertas, y capaz de realizar adquisición, control y visualización en una arquitectura modular adaptable a diferentes escalas (Simbeye et al., 2014).

En el marco antes descrito, el presente artículo tiene como objetivo principal desarrollar un sistema SCADA inalámbrico basado en tecnologías abiertas para el monitoreo de variables críticas en sistemas RAS a pequeña escala. Se plantean como objetivos específicos: integrar una plataforma electrónica de bajo costo, simular señales estándar tipo 4–20 mA, desarrollar interfaces HMI local y remota, y validar el sistema mediante pruebas en entorno controlado.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1 Arquitectura general del sistema

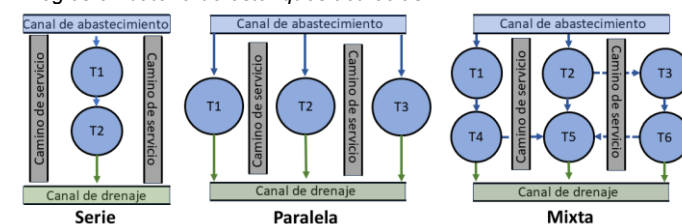
En una granja acuícola, los estanques pueden organizarse según tres configuraciones hidráulicas comunes: en serie, en paralelo o mixtas como se ve en la Figura 2. Estos

arreglos, conocidos como “arreglos en batería”, optimizan el flujo de agua, el manejo operativo y el bienestar de los peces. En el sistema en serie, el agua fluye secuencialmente de un estanque a otro, facilitando la transición entre etapas de cultivo. En paralelo, cada estanque recibe y descarga agua de manera independiente, permitiendo un control más individualizado.

La configuración mixta combina elementos de ambas, adaptándose mejor a condiciones específicas del terreno o infraestructura existente.

Figura 2

Arreglos en batería de estanques acuícolas.

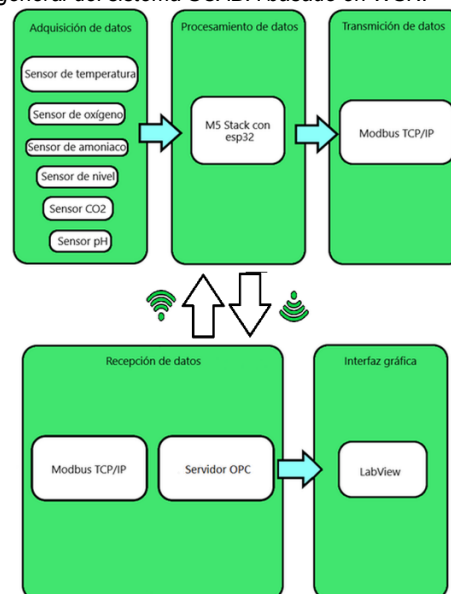


Dado que las distancias entre estanques varían entre 2 y 5 metros y que su número y distribución dependen de múltiples factores logísticos, se justifica el uso de una arquitectura inalámbrica para el monitoreo distribuido, principal razón por la que se diseñó e implementó un sistema SCADA basado en redes de sensores inalámbricos (WSN), orientado a la automatización del control de parámetros críticos en sistemas RAS.

La arquitectura (ver Figura 3) contempla dos tipos de nodos: (1) nodos sensores instalados en campo, dedicados a monitorear variables de un estanque específico, y (2) un nodo coordinador, encargado de centralizar los datos, ejecutar la lógica de control y gestionar la visualización local y remota. La comunicación se establece a través de Wi-Fi, utilizando el protocolo Modbus TCP/IP, permitiendo operar en topologías punto a punto, estrella o árbol.

Figura 3

Diagrama general del sistema SCADA basado en WSN.



2.2 Nodo sensor

El nodo sensor se desarrolló con el módulo M5Stack Station-485 (M5Stack Technology Co., Ltd.), seleccionado por su bajo consumo, conectividad Wi-Fi/BLE integrada, compatibilidad con buses industriales (RS-485, UART, I2C) y capacidad de expansión modular. Esta unidad permite conectar sensores industriales mediante módulos AIN4-20mA y controlar actuadores a través de bloques de relés (ver Figura 4).

Figura 4

Prototipo ensamblado del nodo sensor en carcasa de protección.



La Tabla 1 muestra varias de las opciones contempladas como elemento de adquisición y control de las variables en los estanques. Aunque los PLCs industriales destacan en robustez, presentan barreras de entrada como licenciamiento propietario, mayor costo y menor flexibilidad. En contraste, el M5Stack Station-485 representa una solución económica, compacta y modificable, ideal para aplicaciones académicas, comunitarias o de pequeña escala.

Tabla 1

Comparativa de controladores para adquisición y control.

Dispositivo	E/S integradas	Capacidades HMI	Ventajas	Limitaciones	Costo (USD)
Siemens S7-1200	Entradas/salidas digitales y analógicas según modelo	No cuenta, se puede añadir	Robusto, alta fiabilidad industrial, módulos ampliables	Costo elevado, programación propietaria, tiempos de implementación más largos	\$400–\$600
CLICK PLUS	Requiere módulos adicionales de E/S	No cuenta, se puede añadir	Modular, económico, múltiples protocolos industriales	Necesita módulos extra para E/S, Wi-Fi/Bluetooth requieren antena externa	\$200–\$350
M5Stack Station-485	GPIOs integrados; módulos I2C opcionales	Cuenta con los elementos necesarios	Bajo consumo, pantalla integrada, programación libre, fácil integración IoT	Diseño orientado a la industria, pero con menor robustez para ambientes industriales severos	\$45–\$65
Arduino MKR WiFi 1010 + Shield RS-485 Industrial D21G	GPIOs; entradas analógicas (ADC de 10 bits)	No cuenta, se puede añadir	Modular, compatible con sensores industriales, buena documentación	Costo más alto en conjunto, limitado en potencia de cómputo	\$60–\$90
	Entradas/salidas digitales y analógicas; 24V	No cuenta, se puede añadir	Diseño industrial, bajo costo, programación abierta	Poco soporte, no cuenta con pantalla	\$100–\$140

2.3 Variables monitoreadas y rangos operativos

La propuesta se orientó a sistemas de cultivo de tilapia (*Oreochromis sp.*), por su relevancia productiva y adaptabilidad. Se seleccionaron las siguientes variables clave: oxígeno disuelto, temperatura, pH, conductividad eléctrica, turbidez, y concentración de compuestos nitrogenados (amonio, nitritos, nitratos). Estos parámetros son determinantes para la salud de los peces y la eficiencia de los biofiltros. Para tilapia, los rangos ideales son: oxígeno >5 mg/L, temperatura entre 26–30 °C, y pH de 6.0 a 8.5 (ver Tabla 2). La acumulación de nitrógeno inorgánico afecta negativamente el crecimiento y supervivencia, por lo que su monitoreo es fundamental en RAS.

Tabla 2

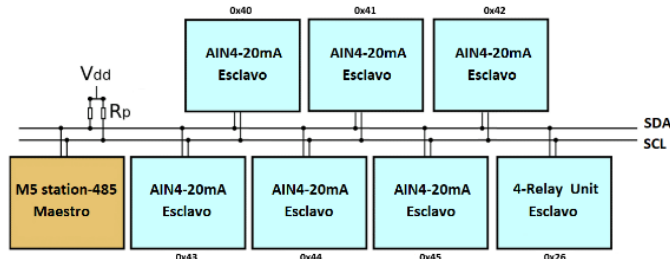
Rangos de referencia para parámetros fisicoquímicos críticos en sistemas de recirculación acuícola (RAS) orientados al cultivo de tilapia.

Parámetros	Mínimo	Rango óptimo	Máximo
pH	4.5	6.0-8.5	10.5
Temperatura (°C)	18	25-30	38
Nitritos (ppm)	0	0	5
Nitratos (ppm)	0	0	300-400
Amonio (TAN)(ppm)	0	0	2
Sólidos suspendidos (SST)(ppm)	0	25	100
Oxígeno disuelto (OD)(ppm)	1.6	>5	-
Dióxido de carbono (ppm)	9	9-30	60

Cada nodo sensor se configuró con seis entradas analógicas (módulos AIN4-20mA), asignadas a oxígeno, temperatura, pH y hasta tres variables ajustables según necesidades específicas. El sistema permite expansión mediante buses I2C si se requieren más entradas. Además, se incluyó un módulo de 4 salidas digitales por relevador para controlar dispositivos como bombas, soplores o válvulas, activados en función de umbrales definidos en la lógica de control. El esquema de conexión del sistema se muestra en la Figura 5.

Figura 5

Esquema de comunicación I2C entre periféricos del nodo sensor base.



Esta configuración modular busca equilibrar funcionalidad, escalabilidad y eficiencia de costos, evitando la sobredimensión de hardware.

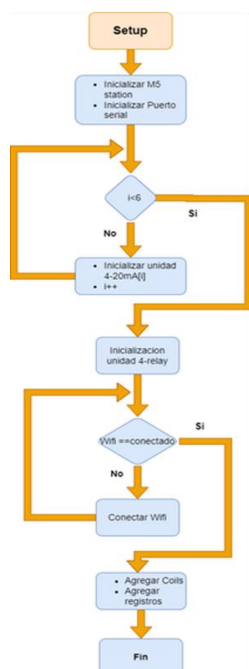
2.4 Lógica de operación del nodo sensor

El nodo sensor opera como una unidad autónoma encargada de adquirir, procesar y reportar variables fisicoquímicas clave en el sistema de recirculación acuícola. Su funcionamiento se organiza en dos bloques principales: el proceso de inicialización (setup) y el ciclo de ejecución continua (loop), ambos implementados en el microcontrolador ESP32 dentro del módulo M5Stack Station-485.

Durante el setup, el nodo establece las condiciones necesarias para su funcionamiento. Se configura la comunicación Wi-Fi, se inicializan los buses de comunicación (I2C, UART), se activan las unidades AIN4-20 mA que permiten la adquisición de señales analógicas desde sensores industriales, y se habilita el módulo de relés para el control de actuadores. También se intenta la conexión a la red inalámbrica definida y, en caso de éxito, se establece el servidor Modbus TCP que hará accesibles los registros de entrada y salida para el nodo coordinador. La Figura 6 muestra el diagrama de flujo correspondiente a esta etapa.

Figura 6

Diagrama de flujo del procedimiento de configuración (**setup**) del nodo sensor. Incluye la inicialización de periféricos, configuración de buses de comunicación, establecimiento de la conexión Wi-Fi y registro de variables en el servidor Modbus TCP.

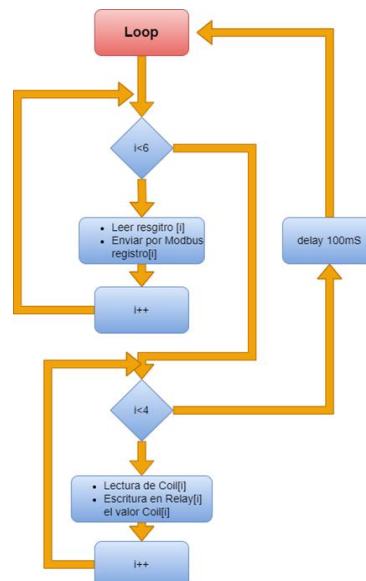


Una vez completada la inicialización, el sistema entra en el ciclo principal (**loop**), donde se realiza la lectura periódica de señales desde los sensores conectados. Estos valores se procesan, convierten a escala digital, y se escriben en los registros Modbus correspondientes. Adicionalmente, si el control se encuentra configurado en modo distribuido, el nodo también evalúa los umbrales definidos para cada parámetro y activa localmente las salidas digitales (relés) en caso de que se detecten condiciones fuera de rango. En este esquema, el nodo puede operar de manera semi autónoma sin depender del SCADA para decisiones críticas inmediatas. La Figura 7 representa este proceso.

Este diseño modular permite que el sistema funcione tanto con control centralizado (donde las decisiones son tomadas desde LabVIEW) como con lógica de control distribuido (local), incrementando la flexibilidad operativa y adaptándose a distintos escenarios de implementación.

Figura 7

Diagrama de flujo del ciclo de operación continua (**loop**) del nodo sensor. Describe la lectura de sensores y actualización de registros Modbus.



2.5 Nodo coordinador: visualización y control

El nodo coordinador centraliza el procesamiento de datos y la supervisión global del sistema. Se plantearon dos configuraciones: una embebida, mediante el mismo M5Stack Station-485; y otra en PC, programado utilizando el entorno gráfico de LabVIEW 2012 Service Pack 1 (SP1), v12.0.1f5 (Ver Figura 8 y 9). Ambas versiones son compatibles y pueden operar en paralelo, adaptándose a diversos escenarios de implementación.

La versión embebida utiliza la pantalla LCD integrada del M5Stack para mostrar variables críticas en tiempo real, permitir interacción básica mediante botones físicos y activar funciones locales de forma autónoma. Esta opción resulta ideal para validaciones en campo o ambientes sin infraestructura de red.

Figura 8

Panel frontal de la interfaz gráfica desarrollada en LabVIEW.



La versión en PC permite una interfaz HMI avanzada, diseñada en LabVIEW (ver Figuras 8 y 9), con visualización numérica y gráfica, controles virtuales, indicadores LED y conexión a un

255 | P á g i n a

2.7 Comunicación mediante Modbus TCP

Una parte clave en la implementación del sistema fue definir una forma eficiente y estandarizada de comunicar los datos entre los nodos sensores y el nodo coordinador. Para ello, se optó por utilizar Modbus TCP/IP, un protocolo ampliamente usado en entornos industriales que permite establecer comunicación sobre redes Ethernet y Wifi de manera simple y directa.

Lo que hace especialmente útil a Modbus en este tipo de sistemas es su estructura basada en espacios de memoria organizados por tipo, como registros de entrada, registros de retención y bobinas (*coils*), que funcionan como contenedores de datos accesibles por cualquier dispositivo conectado a la red. Esto facilita que los nodos sensores publiquen sus mediciones directamente en registros específicos, los cuales pueden ser leídos por el nodo coordinador o por la interfaz SCADA sin procesos intermedios.

Esta forma de trabajo permite, por ejemplo, que cada nodo actualice sus variables en tiempo real y que el SCADA las tome desde una ubicación fija en memoria. Del mismo modo, el SCADA puede escribir en otros registros para enviar comandos o activar salidas digitales, sin necesidad de protocolos propietarios ni configuraciones complejas.

Además, al tratarse de un protocolo abierto y bien documentado, Modbus TCP facilita mucho la integración con diferentes plataformas, sensores o actuadores, y mantiene el sistema abierto a futuras expansiones.

Tabla 3

Asignación de direcciones Modbus utilizadas para el intercambio de información entre el primer nodo sensor y el nodo coordinador. Los registros de entrada almacenan variables analógicas provenientes de los sensores, mientras que las coils de salida se emplean para activar dispositivos como relés o actuadores digitales.

Tipo de variables	Rango de direcciones Modbus	Uso de las variables
Coils de salida	00001 a 00005	Variables digitales utilizadas para el encendido y apagado de los relés. Representan estados tipo 1 o 0.
Registros de entrada	10001 a 10006	Variables analógicas que almacenan los valores adquiridos por las unidades AIN4-20 mA (sensores industriales).

En la Tabla 3 se muestra la asignación de direcciones Modbus correspondiente al primer nodo sensor, donde se ubican las variables medidas, como temperatura, oxígeno y pH, así como registros reservados para recibir instrucciones desde LabVIEW o desde la versión embebida del coordinador. Este enfoque no solo simplifica la implementación, sino que también permite adoptar esquemas de control más flexibles, en los que la lógica puede ejecutarse tanto en el nodo sensor como en el sistema SCADA.

2.8 Metodología de validación

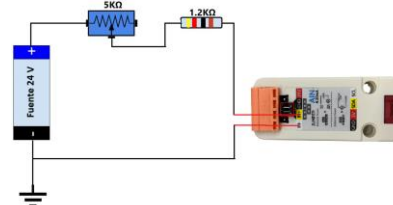
La validación experimental del sistema se llevó a cabo en condiciones de laboratorio. Se implementaron generadores de señales de 4–20 mA para simular sensores analógicos de variables físico-químicas, como oxígeno disuelto, temperatura y pH. Estos se conectaron a los nodos sensores, cuya comunicación inalámbrica con el nodo coordinador se evaluó mediante pruebas de conectividad, estabilidad y latencia.

Para la simulación de señales de corriente de 4–20 mA se diseñó un circuito de prueba que emula el comportamiento de sensores industriales. Este circuito consistió en una fuente de 24 V conectada en serie con una resistencia fija y un potenciómetro. El valor del potenciómetro se ajustó para permitir el paso de una corriente dentro del rango estándar de 4 a 20 mA, utilizado comúnmente en instrumentación industrial. El cálculo de la resistencia necesaria para simular correctamente ese rango de corriente se realizó aplicando la ley de Ohm, determinando un mínimo de 1200 Ω para 20 mA y un máximo de 6000 Ω para 4 mA.

La Figura 11 muestra la conexión propuesta, donde la diferencia entre estos valores define el rango total de resistencia que debe cubrir el potenciómetro. Por tanto, se seleccionó un potenciómetro de 5 k Ω en combinación con una resistencia fija de 1.2 k Ω para garantizar un ajuste fino dentro del rango requerido y simular con precisión la variación de las señales analógicas.

Figura 11

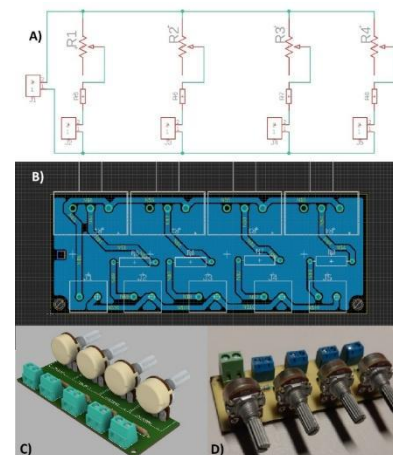
Circuito utilizado para simular señales de corriente 4-20mA.



Para el diseño final del banco de pruebas se contemplaron cuatro canales independientes conectados a unidades AIN4-20mA, lo que facilitó la verificación simultánea de las entradas analógicas del nodo sensor. Cada canal permitió validar la adquisición de señales, su conversión a valores digitales y su transmisión mediante bus I2C hacia el microcontrolador principal. Esta estrategia de simulación fue clave para evaluar la funcionalidad del sistema sin necesidad de sensores reales y proporcionó una base confiable para las pruebas de conectividad, procesamiento y respuesta ante condiciones críticas.

Figura 12

Desarrollo del generador de prueba para la simulación de los sensores: A) Esquemático, B) Diseño PCB, C) Vista 3D del circuito, D) Implementación final del circuito.



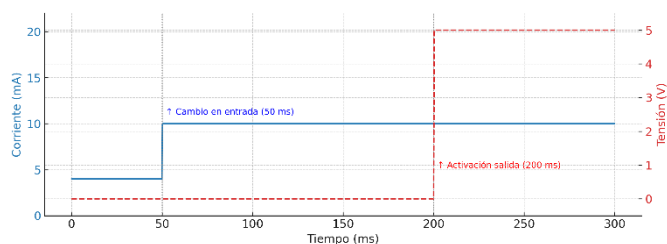
La Figura 12 muestra el esquemático, el diseño de la PCB, la vista en 3D y el generador de prueba completamente ensamblado. Tanto el circuito como la placa y las carcasas utilizadas fueron diseñados en el programa Fusion 360, versión v.2.0.20460.

Se midió el tiempo promedio de respuesta desde la lectura del valor hasta su despliegue en la HMI, así como la eficacia del sistema ante eventos críticos (por ejemplo, caída del oxígeno por debajo del umbral). En estas condiciones, se verificó que las salidas digitales dieran una respuesta correcta y se activaran los actuadores correspondientes.

Para validar este comportamiento de forma precisa, se empleó un osciloscopio digital de dos canales: uno conectado a la salida del simulador de corriente (4–10 mA) (entrada del nodo sensor) y otro a la línea de activación del actuador (salida del nodo coordinador). Esta configuración permite visualizar en tiempo real el retardo entre el cambio en la entrada analógica y la respuesta digital del sistema, observándose una latencia consistente inferior a los 200 ms (ver Figura 13). El experimento corroboró la estabilidad del tiempo de respuesta bajo condiciones controladas, reforzando la confiabilidad de la arquitectura propuesta.

Figura 13

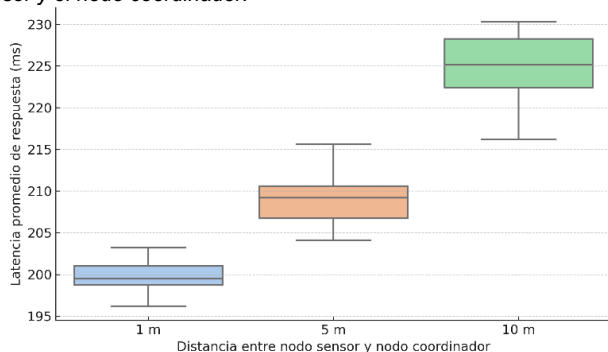
Medición con osciloscopio de la respuesta del sistema SCADA. El cambio en la corriente de entrada (4–10 mA) ocurre a los 50 ms y la salida digital se activa a los 200 ms, mostrando una latencia aproximada de 150 ms.



Para evaluar el impacto de la distancia en el tiempo de respuesta del sistema SCADA, se realizó el mismo experimento en tres configuraciones: 1 m, 5 m y 10 m de separación entre el nodo sensor y el nodo coordinador, manteniendo las demás condiciones constantes. En cada caso se realizaron múltiples ensayos, cuyos resultados se muestran en la Figura 14.

Figura 14

Comportamiento de la latencia en función de la distancia entre el nodo sensor y el nodo coordinador.



Se observa que a medida que la distancia aumenta, también lo hace la latencia promedio, pasando de 200 ms en promedio a

210 ms y 225 ms, respectivamente. Esta tendencia es coherente con las limitaciones inherentes al protocolo Wi-Fi TCP/IP, donde factores como la atenuación de señal, el retardo de propagación y la calidad del enlace afectan el tiempo de transmisión.

En la Tabla 4 se puede observar el resumen estadístico de todas las mediciones realizadas para evaluar la latencia entre el cambio de una variable en el nodo sensor y la respuesta de una salida indicada por el nodo coordinador.

Tabla 4

Resumen estadístico de los tiempos de latencia (en milisegundos) medidos en 100 ensayos para cada distancia entre el nodo sensor y el nodo coordinador.

Distancia	Promedio (ms)	Desviación estándar (ms)	Mínimo (ms)	Máximo (ms)
1 m	199.7	1.9	196.2	203.2
10 m	224.9	4.1	216.2	230.3
5 m	209.2	2.9	204.1	215.6

Además, se evaluó la consistencia del registro de datos en la plataforma LabVIEW, comprobando la precisión del almacenamiento de información en archivos Excel y la emisión oportuna de alarmas visuales. La Figura 15 muestra un ejemplo del formato de almacenamiento de los datos adquiridos por el nodo sensor, destacando que el tiempo de muestreo es configurable desde el SCADA, así como las variables que se almacenarán. El sistema también fue probado utilizando únicamente la versión embebida, confirmando su utilidad como herramienta autónoma de monitoreo y control para instalaciones pequeñas o ubicaciones remotas.

Figura 15

Ejemplo de registro de parámetros fisicoquímicos del agua almacenado por el SCADA en archivo Excel, con intervalos de medición de 5 minutos el día 16 de diciembre de 2024. Se incluyen variables críticas como nivel, temperatura, oxígeno disuelto, CO₂, amoníaco y pH.

Fecha y hora	Nivel (cm)	Temperatura (°C)	O ₂ disuelto (mg/L)	CO ₂ (mg/L)	Amoníaco (mg/L)	pH
16/12/2024 08:00	39.5	26.1	6.72	14.9	0.058	8.16
16/12/2024 08:05	41.8	29.9	5.78	11.4	0.203	7.89
16/12/2024 08:10	40.9	29.3	6.08	10.5	0.023	8.12
16/12/2024 08:15	40.4	26.8	6.23	17.6	0.365	8.05
16/12/2024 08:20	38.6	26.7	6.41	17.7	0.111	7.64
16/12/2024 08:25	38.6	26.7	7.07	16.5	0.268	8.09
16/12/2024 08:30	38.2	27.2	5.9	12.4	0.132	6.92
16/12/2024 08:35	41.5	28.1	6.53	10.8	0.213	7.07
16/12/2024 08:40	40.4	27.7	6.68	15.5	0.223	6.86
16/12/2024 08:45	40.8	27.2	5.59	13.5	0.082	7.26

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El sistema SCADA propuesto fue evaluado en condiciones de laboratorio, utilizando generadores de señal analógica tipo 4–20 mA que simulaban variables críticas del agua en sistemas de recirculación acuícola (RAS). Se validó la capacidad del nodo sensor para adquirir dichas señales, transmitir las vía Wi-Fi bajo el protocolo TCP/IP y activar salidas digitales desde el nodo coordinador en función de los valores recibidos. La Figura 13 muestra la medición realizada con osciloscopio, en la que se evidencia una latencia inferior a los 200 ms entre el cambio en la entrada analógica y la activación de la salida digital.

La interfaz HMI desarrollada en LabVIEW permite visualizar en tiempo real los valores adquiridos, registrar datos históricos en archivos Excel y generar alertas ante condiciones críticas, como la caída del oxígeno disuelto por debajo del umbral establecido. En paralelo, se validó la versión embebida del sistema utilizando

la pantalla LCD del módulo M5Stack Station-485, confirmando su utilidad como solución autónoma de monitoreo para contextos donde no se dispone de infraestructura computacional completa. Para analizar la influencia de la distancia en la comunicación entre nodos, se repitió el experimento variando la separación entre el nodo sensor y el nodo coordinador (1 m, 5 m y 10 m). Los resultados, presentados en la Figura 14, indican un incremento progresivo en la latencia promedio (200 ms, 210 ms y 225 ms respectivamente), lo que concuerda con las limitaciones conocidas del protocolo TCP/IP sobre enlaces Wi-Fi. El comportamiento estadístico asociado a cada distancia se resume en la Tabla 4.

Adicionalmente, se simularon y registraron mediciones representativas de condiciones típicas en un sistema RAS con tilapia. La Figura 15 muestra el formato de almacenamiento de estos datos, destacando variables como temperatura, oxígeno disuelto, amoníaco y pH, todos dentro de los rangos recomendados para la especie. El tiempo de muestreo es configurable desde el SCADA, permitiendo adaptabilidad en función del entorno.

Estos resultados validan el desempeño del sistema propuesto en cuanto a adquisición, transmisión, visualización, control y registro de parámetros. La arquitectura demostró ser escalable, estable y flexible, con un tiempo de respuesta aceptable y una interfaz adaptable a diferentes condiciones de operación.

IV. CONCLUSIONES

El desarrollo e implementación del sistema SCADA basado en redes de sensores inalámbricos (WSN) demostró ser una alternativa funcional, accesible y eficiente para el monitoreo y control de sistemas de recirculación acuícola (RAS) a pequeña escala. La arquitectura propuesta, compuesta por nodos sensores distribuidos y un nodo coordinador, permitió validar la transmisión inalámbrica de datos, la visualización en tiempo real, el registro de variables y el control de actuadores mediante simulación de señales analógicas estándar (4–20 mA).

Entre los dispositivos evaluados, el M5Stack Station-485 destacó por su compacidad, conectividad nativa, soporte para múltiples protocolos y compatibilidad con entornos de desarrollo abiertos como Arduino y MicroPython. Su versatilidad y capacidad de modificación permiten adaptar el sistema a distintas condiciones operativas, favoreciendo la creación de soluciones personalizadas y reduciendo la dependencia de tecnologías propietarias. Esto lo convierte en un recurso valioso para proyectos en contextos académicos, comunitarios o de producción acuícola con recursos limitados.

El sistema respondió de forma estable durante las pruebas con señales simuladas, validando su viabilidad técnica y funcionalidad. Se comprobó la adquisición en tiempo real, la generación de alertas, el control automatizado de salidas y el registro histórico de datos para análisis posterior.

En conjunto, la solución desarrollada promueve un enfoque de innovación tecnológica accesible, adaptable y orientado a la soberanía tecnológica en la acuicultura, sin comprometer la calidad del monitoreo ni la eficiencia operativa de los sistemas productivos.

Como trabajo futuro, se contempla la validación del sistema en condiciones reales de producción mediante la integración de sensores físicos, así como su evaluación frente a variaciones ambientales y dinámicas biológicas. También se prevé el desarrollo de una interfaz web para visualización remota y la incorporación de funciones de control predictivo basadas en algoritmos adaptativos, con el objetivo de optimizar la operación automática de sistemas RAS en tiempo real.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México (TecNM) por el respaldo institucional brindado durante el desarrollo del presente trabajo, así como a la Secretaría de Medio Ambiente del Estado de Coahuila por el apoyo técnico y logístico proporcionado.

VI. REFERENCIAS

- Crab, R., Avnimelech, Y., Defoirdt, T., Bossier, P., & Verstraete, W. (2007). Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production. *Aquaculture*, 270(1-4), 1-14.
- Betancourth, D. A., & Cárcamo, A. E. (2023). *Diseño y evaluación comparativa de dos biofiltros en un modelo acuapónico para la producción de lechuga (Lactuca sativa) y tilapia (Oreochromis sp.)*. Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. <https://bdigital.zamorano.edu/items/6f9e4571-ffca-4b17-b908-cfe8e48a6e63>
- Bregnballe, J. (2022). *A guide to recirculation aquaculture: an introduction to the new environmentally friendly and highly productive closed fish farming systems*. Food & Agriculture Org..
- De Schryver, P., Crab, R., Defoirdt, T., Boon, N., & Verstraete, W. (2008). The basics of bio-flocs technology: the added value for aquaculture. *Aquaculture*, 277(3-4), 125-137.
- Estrada, M. D. L. L., Flores, P., Caltzontzin Rabell, V., & Zarazúa, G. (2023). *Tecnologías para optimizar el agua en la acuicultura*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. https://nthe.mx/NTHE_v2/pdf/Articulos/PDF_Articulo20230426121453.pdf
- FAO. (2024). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2024*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <https://pldaldia.com/portada/fao-el-estado-mundial-de-la-pesca-y-la-acuicultura-2024/>
- Gómez, J. (2008). *Automatización de procesos industriales con SCADA: Conceptos, tecnologías y aplicaciones*. Alfaomega.
- Lee, P. G. (1995). A review of automated control systems for aquaculture and design criteria for their implementation. *Aquacultural engineering*, 14(3), 205-227.
- Losordo, T. M., Masser, M. P., & Rakocy, J. E. (1999). *Recirculating aquaculture tank production systems: A review of component options*. Southern Regional Aquaculture Center. <https://cales.arizona.edu/azaqua/extension/Classroom/SRAC/1453fs.pdf>
- Simbeye, D. S., Zhao, J., & Yang, S. (2014). Design and deployment of wireless sensor networks for aquaculture monitoring and control based on virtual instruments. *Computers and Electronics in Agriculture*, 102, 31-42. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.01.004>