Desarrollo y Calibración de un Sistema Automatizado para la Adquisición de Parámetros Físico-Químicos en Estanques Acuícolas de Agua Dulce

Machado-Diaz, E[1] ; Coto-Fuentes, H.[2], Barrón Quintero, AOH[3]

Datos de Adscripción:

[1] ✉ Eduardo Machado Díaz, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, División de Ingeniería en Sistemas Automotrices. eduardo.md@itsledo.edu.mx https://orcid.org/0000-0003-2610-7570

[2] Hesner Coto Fuentes, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de La Laguna, División de Ingeniería en Sistemas Automotrices, hesnercf@lalaguna.tecnm.mx https://orcid.org/0000-0002-9548-7864

[3] Alfredo Orlando Hassan Barrón Quintero, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, División de Ingeniería en Sistemas Automotrices, alfredo.bq@itslerdo.edu.mx https://orcid.org/0009-0007-5299-558X

Resumen **- El monitoreo preciso de los parámetros físico-químicos del agua es esencial para la estabilidad y productividad de los estanques acuícolas de agua dulce. Factores como el pH, los sólidos disueltos totales (SDT) y la temperatura pueden influir directamente en la salud y el crecimiento de las especies cultivadas, por lo que es necesario contar con sistemas de medición automatizados y confiables. Este trabajo presenta el desarrollo y calibración de un sistema automatizado para la adquisición de las variables pH, SDT, temperatura del agua y humedad ambiente, empleando sensores de bajo costo y una plataforma embebida basada en Raspberry Pi Pico. Para la medición del pH se utilizó el sensor PH-4502, mientras que el SDT fue registrado mediante un sensor analógico. La temperatura y humedad ambiente fueron monitoreadas con un sensor DHT11, y la temperatura del agua con un sensor termopar tipo K con MAX6675. Cada sensor fue calibrado y validado mediante comparaciones con dispositivos comerciales de referencia para asegurar la precisión de las mediciones. El sistema fue programado en Python, lo que permitió la adquisición y visualización de datos en tiempo real. La validación de los sensores se realizó a través de análisis estadísticos, demostrando su viabilidad para su uso en estanques acuícolas. Este estudio representa un avance en el desarrollo de sistemas automatizados para la gestión de la calidad del agua en acuicultura.**

Palabras Clave **- acuicultura, automatización, calidad del agua, sensores, sistemas embebidos.**

Abstract **- Accurate monitoring of physicochemical water parameters is crucial to maintaining stability and productivity in freshwater aquaculture systems. Variables such as pH, total dissolved solids (TDS), and temperature directly affect the health and growth of cultured species, underscoring the need for reliable and automated measurement solutions. This study presents the design, development, and calibration of a low-cost automated system for monitoring pH, TDS, water temperature, and ambient humidity using a Raspberry Pi Pico embedded platform. The PH-4502 sensor was employed for pH measurement, TDS values were obtained through an analog sensor, ambient temperature and humidity were monitored with a DHT-11, and water temperature was recorded with a thermocouple coupled to a MAX6675 module. All sensors were calibrated and validated against commercial reference devices to ensure accuracy. The system was programmed in Python, enabling real-time acquisition and visualization of data. Statistical analyses confirmed the validity of the sensors, demonstrating their suitability for aquaculture applications. The proposed system represents a cost-effective and practical advancement for automated water quality management, contributing to more sustainable and efficient aquaculture practices.**

Keywords **- academic management, automation, generation of meeting minutes, Google Apps Script, higher education.**

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Monitoreo de parámetros fisicoquímicos en acuarios

La calidad del agua en los acuarios de agua dulce es un factor determinante para la salud y supervivencia de los peces ornamentales. Los parámetros físico-químicos del agua, como la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto, la conductividad, la luminosidad y la concentración de compuestos nitrogenados (amoníaco, nitritos y nitratos), influyen directamente en el bienestar de los organismos acuáticos (Patrick & Zhen, 2014). Estos parámetros deben mantenerse dentro de rangos óptimos para garantizar un ambiente estable y saludable, ya que variaciones significativas pueden provocar estrés, enfermedades e incluso la muerte de los peces (Martins & Galhardo, 2018).

La temperatura del agua es uno de los parámetros más críticos en la acuicultura, ya que afecta el metabolismo, la reproducción y el comportamiento de los peces. Cada especie de pez ornamental tiene un rango de temperatura óptimo, y desviaciones fuera de este rango pueden causar estrés térmico, lo que debilita el sistema inmunológico y aumenta la susceptibilidad a enfermedades. Además, la temperatura influye en la solubilidad del oxígeno en el agua, lo que puede afectar la respiración de los peces (Ahmed & Thompson, 2019).

El pH es una medida de la acidez o alcalinidad del agua y es fundamental para mantener el equilibrio químico en el acuario. Un pH inadecuado puede afectar la toxicidad de ciertos compuestos, como el amoníaco, que se vuelve más tóxico en condiciones alcalinas. Los peces ornamentales suelen requerir un pH entre 6.5 y 8.0, aunque este rango puede variar según la especie. Cambios bruscos en el pH pueden causar estrés y daños en las branquias, lo que afecta la capacidad respiratoria

h t t p s : / / d o i . o r g / 1 0 . 6 2 8 0 5 / c i d 2 0 2 5 . C I D 0 6 4

This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Año: 2025. Volumen: 1. Numero:11 ISSN: 2448-623X

de los peces (Martínez y otros, 2022). El pH se mide de acuerdo con una escala que va de 0 a 14 en soluciones acuosas a 25 grados Celsius.
El oxígeno disuelto (OD) es esencial para la respiración de los peces y otros organismos acuáticos. Niveles bajos de oxígeno pueden provocar hipoxia, lo que afecta el crecimiento, la reproducción y la supervivencia de los peces (Thurein & Rafiza Abdul, 2024). La concentración de oxígeno disuelto depende de factores como la temperatura, la presión atmosférica y la actividad biológica en el acuario. Mantener niveles adecuados de OD es crucial, especialmente en acuarios con alta densidad poblacional, donde la demanda de oxígeno es mayor.

1.2 Importancia del monitoreo de los parámetros en acuarios

El monitoreo y control de los parámetros físico-químicos del agua es un aspecto fundamental en la acuicultura ornamental, dado que la estabilidad de estos factores influye directamente en la salud y supervivencia de los peces en ambientes controlados. Sin embargo, la mayoría de los métodos empleados actualmente dependen de mediciones manuales, lo que puede introducir errores humanos y dificultar la detección temprana de cambios críticos en la calidad del agua (Boyd & Tucker, 1998).
Ante este escenario, el desarrollo de un sistema automatizado basado en tecnologías de la información (TI) se presenta como una alternativa innovadora para optimizar la gestión de acuarios de agua dulce.
El mantenimiento de condiciones óptimas en acuarios de agua dulce es un desafío constante en la acuicultura ornamental, dado que los peces son altamente sensibles a las variaciones en los parámetros físico-químicos del agua, como la temperatura, el pH, la luminosidad y la calidad del oxígeno disuelto. Actualmente, la mayoría de los procesos de monitoreo en acuarios domésticos y comerciales se realizan de manera manual, lo que no solo incrementa la posibilidad de errores en la medición, sino que también limita la capacidad de respuesta ante cambios abruptos en el ecosistema acuático. La falta de un sistema automatizado y eficiente para la supervisión en tiempo real de estos parámetros puede comprometer la estabilidad del entorno acuático y aumentar la tasa de mortalidad de los peces ornamentales (Naylor y otros, 2021).
El uso de sensores interconectados, almacenamiento en la nube y algoritmos de análisis de datos ofrece una solución viable para optimizar la gestión de acuarios de agua dulce. Investigaciones recientes han demostrado que los sistemas de monitoreo basados en el Internet de las Cosas (IoT) permiten la recopilación y análisis de datos en tiempo real, facilitando la identificación de patrones y tendencias en la calidad del agua (Dos Santos & Branco, 2019). Sin embargo, muchas de estas soluciones han sido desarrolladas para acuarios industriales de gran escala, dejando de lado el sector ornamental y doméstico.

1.3 Métodos tradicionales de monitoreo

Los métodos tradicionales de monitoreo de la calidad del agua en acuarios y sistemas de acuicultura han sido ampliamente utilizados durante décadas. Estos métodos se basan en técnicas manuales y equipos de medición convencionales, que, aunque efectivos, presentan limitaciones en términos de precisión, frecuencia de medición y capacidad de respuesta ante cambios abruptos en los parámetros del agua (Timmons & Ebeling, 2013).
La medición manual de parámetros como la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto y los niveles de amoniaco es uno de los métodos más comunes en la acuicultura tradicional. Estos métodos suelen requerir el uso de equipos portátiles, como termómetros, medidores de pH y kits de prueba química.
La inspección visual del agua y el comportamiento de los peces es un método subjetivo pero arraigado en la acuariofilia tradicional (Martínez Córdova y otros, 2015) donde se visualiza la turbidez del agua y el comportamiento de los peces para identificar signos como letargo o respiración superficial. Existe también el enfoque de muestreo, donde se recolectan muestras de agua para su análisis posterior. Sin embargo, este enfoque retrasa la toma de decisiones (Bregnballe, 2015).

1.4 Limitaciones críticas de los métodos tradicionales

Los métodos tradicionales de monitoreo, aunque históricamente valiosos, presentan desafíos significativos en el contexto de la acuicultura moderna, donde la precisión, la eficiencia y la escalabilidad son prioritarias.
Los métodos manuales suelen realizarse una o dos veces al día, lo que genera brechas temporales entre mediciones. En sistemas dinámicos como acuarios, parámetros como el oxígeno disuelto o el amoníaco pueden fluctuar rápidamente debido a factores biológicos o ambientales, lo que resulta en eventos críticos no detectados.
La dependencia de la interpretación visual introduce sesgos humanos. Un estudio demostró que el 30% de las mediciones de pH con tiras reactivas varían entre operadores debido a diferencias en la percepción del color. Además, la calibración incorrecta de equipos portátiles, como termómetros o medidores de conductividad, genera datos inexactos que comprometen la toma de decisiones.
Algunos métodos tradicionales, como los kits químicos desechables, generan residuos tóxicos. Un informe estimó que el 40% de los acuarios comerciales no gestionan adecuadamente estos desechos, contaminando fuentes hídricas locales (Hargreaves & Tucker, 2018). Además, el consumo energético de equipos como espectrofotómetros contribuye a la huella de carbono de las operaciones acuícolas.
Los análisis de laboratorio, aunque precisos, son económicamente inviables para acuarios domésticos o pequeñas empresas. La necesidad de personal capacitado para operar equipos especializados agrega barreras técnicas, especialmente en regiones con recursos limitados. Así mismo, generan datos fragmentados como lo pueden ser los registros en papel, lo que dificulta la identificación de patrones a largo plazo. Un estudio en granjas de tilapia mostró que el 60% de los incidentes de mortalidad podrían haberse prevenido con un análisis integrado de datos históricos.

1.5 Automatización de monitoreo en acuarios

Los sensores inteligentes son la base de la automatización en acuicultura, permitiendo la medición continua de parámetros críticos como temperatura, oxígeno disuelto, pH y niveles de amoníaco. Estos dispositivos operan con una precisión sin precedentes: en granjas de salmón noruegas, sensores IoT transmiten datos cada cinco minutos a plataformas centrales, activando sistemas de aeración automática ante caídas de oxígeno, lo que ha reducido la mortalidad en un 20% (Føre y otros, 2018). La capacidad de detectar cambios en tiempo

https://doi.org/10.62805/cid2025.CID064
This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Año: 2025. Volumen: 1. Numero:11 ISSN: 2448-623X

real es esencial para prevenir crisis en ambientes dinámicos, donde fluctuaciones repentinas pueden comprometer la salud de los organismos acuáticos.

Los sistemas de control automático, como los controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo), ajustan variables clave sin intervención humana. En Tailandia, su implementación en granjas de camarones optimizó el uso de bombas de circulación, reduciendo el consumo energético en un 40% (Yanuar y otros, 2021). Estos sistemas no solo mantienen condiciones estables, sino que también integran actuadores inteligentes, como bombas dosificadoras de químicos, para corregir desequilibrios en tiempo real, especialmente en sistemas de recirculación donde la acumulación de nitritos es un riesgo constante.

La conectividad IoT ha revolucionado la supervisión remota en acuicultura. Mediante redes inalámbricas de bajo consumo (ej.: LoRaWAN), los datos de sensores se transmiten a dashboards en la nube, permitiendo monitoreo desde dispositivos móviles. En China, esta tecnología redujo un 25% las pérdidas por hipoxia en piscifactorías, gracias a alertas automáticas que activan aeradores ante caídas de oxígeno (Rasheed Abdul Haq, 2022). Esta integración es crucial en instalaciones extensas, donde la gestión manual sería inviable.

El advenimiento de la Internet de las Cosas (IoT) ha revolucionado la gestión de sistemas acuáticos al posibilitar la monitorización y el control en tiempo real de parámetros ambientales críticos. En la acuicultura, la integración de dispositivos IoT permite interconectar sensores, actuadores y sistemas de control, lo que optimiza la calidad del agua y mejora la salud de los organismos acuáticos. La implementación de estas tecnologías favorece la toma de decisiones basada en datos precisos y actualizados, promoviendo entornos más estables y sostenibles.

La presente investigación busca abordar un problema clave en la acuicultura ornamental: la estabilidad de los parámetros físico-químicos del agua y su impacto en la salud de los peces. La creciente necesidad de mejorar la eficiencia en el monitoreo y control de la calidad del agua ha llevado al desarrollo de sistemas basados en tecnologías de la información e inteligencia artificial.

A través de este desarrollo, se pretende demostrar cómo la integración de sensores inteligentes puede optimizar la gestión de acuarios, minimizando riesgos y mejorando la salud de los organismos acuáticos. Sin embargo, para ello es necesario comenzar con la calibración de los sensores que van a ser utilizados para la medición.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1 Metodología implementada

A continuación, se detalla la metodología implementada para el proceso de selección, calibración y validación de resultados de los sensores de las principales variables de interés en acuarios de agua dulce tomando como referencia los trabajos anteriormente citados. El proceso puede resumirse en las siguientes fases:

- Fase 1: Análisis de requerimientos
- Fase 2: Selección de los sensores a utilizar
- Fase 3: Elección del sistema de adquisición de datos.
- Fase 4: Calibración y validación de medición de los diversos sensores.
- Fase 5: Ajustes del sistema

2.2 Selección de sensores a utilizar

Con base en la literatura consultada, se definieron tres variables principales que intervienen en la calidad del agua y en la salud de los peces ornamentales de agua dulce:

- Temperatura
- Concentración de iones de hidrógeno (pH)
- Sólidos Disueltos Totales (SDT).

Para ello, como sensor de temperatura se seleccionó un Termopar de tipo K con acondicionamiento digital de señal a través de un circuito integrado MAX6675 como el que se muestra en la Figura 1.

Figura 1
Módulo de sensor de temperatura con termopar MAX6675 (Fuente: Maxim Integrated)

Las características principales del módulo del sensor se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1
Características técnicas del módulo termopar MAX6675 (Fuente: Maxim Integrated)

Parámetro	Valor / Descripción
Tipo de termopar compatible	Tipo K (níquel-cromo / níquel-aluminio)
Rango de medición	0 °C a 1024 °C (limitado por el MAX6675);
Resolución de lectura	0.25 °C
Precisión típica	±2 °C en el rango de 0 °C a 700 °C
Interfaz de comunicación	SPI (Serial Peripheral Interface)
Tasa de muestreo	Aproximadamente 0.25 Hz (una lectura cada 4 segundos)
Voltaje de alimentación	3.0 V a 5.5 V

El módulo fue seleccionado debido a su capacidad de proporcionar lecturas digitales precisas con una resolución de 0.25°C que es suficiente para la medición de acuarios de agua dulce.

Para la medición de pH se optó por el sensor PH-4502 que se muestra en la Figura 2, el cual cuenta con una sonda sumergible.

Figura 2
Módulo de sensor PH-4502(Fuente: Droking)

Este dispositivo permite monitorear en tiempo real el equilibrio ácido-base del entorno acuático, un parámetro crítico para la salud de peces ornamentales y otras especies hidrobiológicas. El resumen técnico del módulo se presenta en la Tabla 2.

https://doi.org/10.62805/cid2025.CID064

This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Año: 2025. Volumen: 1. Numero:11 ISSN: 2448-623X

Tabla 2
Características técnicas del módulo termopar MAX6675 (Fuente: Droking)

Parámetro	Valor / Descripción
Modelo del módulo	PH-4502C
Tipo de electrodo	Electródo de pH de vidrio, tipo combinado (unión simple, Ag/AgCl)
Rango de medición de pH	0 a 14
Voltaje de salida (analógica)	Aproximadamente 0 a 3 V, dependiendo del pH y calibración
Precisión	±0.1 pH (dependiendo de la calibración y condiciones de medición)
Resolución de medición	~0.01 pH (limitada por el ADC del microcontrolador)
Tiempo de respuesta	≤1 min (estabilización del electrodo)

Su rango de medición de 0 a 14 unidades de pH, su salida analógica compatible con microcontroladores y su capacidad de calibración mediante soluciones buffer estandarizadas lo hacen adecuado para aplicaciones de monitoreo continuo. Adicionalmente, el módulo incorpora circuitería de acondicionamiento de señal, lo que mejora la estabilidad y reduce el ruido eléctrico, características esenciales para garantizar la confiabilidad en entornos de instrumentación doméstica o experimental.
Por último, la medición de sólidos disueltos totales (SDT) se realizó a través del sensor Gravity de DFRobots® que se presenta en la Figura 3. Este sensor es un módulo analógico diseñado para medir la concentración de sólidos disueltos en agua, lo que incluye sales, minerales y materia orgánica.

Figura 3
Sensor SDT (Fuente: DFRobots®)

Este sensor se adapta bien a sistemas de adquisición de datos en acuarios, ya que permite obtener una estimación aproximada de la concentración de sales disueltas, lo cual puede ser un indicador indirecto de la calidad del agua. Sus prestaciones se enlistan en la Tabla 3.

Tabla 3
Características técnicas del sensor SDT (Fuente: DFRobots®)

Parámetro	Valor / Descripción
Rango de medición	0 – 1000 ppm
Precisión	±10 % (puede mejorar con calibración adecuada)
Resolución de salida	Depende del ADC utilizado (normalmente 10 bits en Arduino → ~1 ppm resolución)
Voltaje de operación	3.3 – 5.5 V DC
Interfaz de salida	Analógica (0 – ~2.3 V aprox.)

2.3 Medición de temperatura en agua

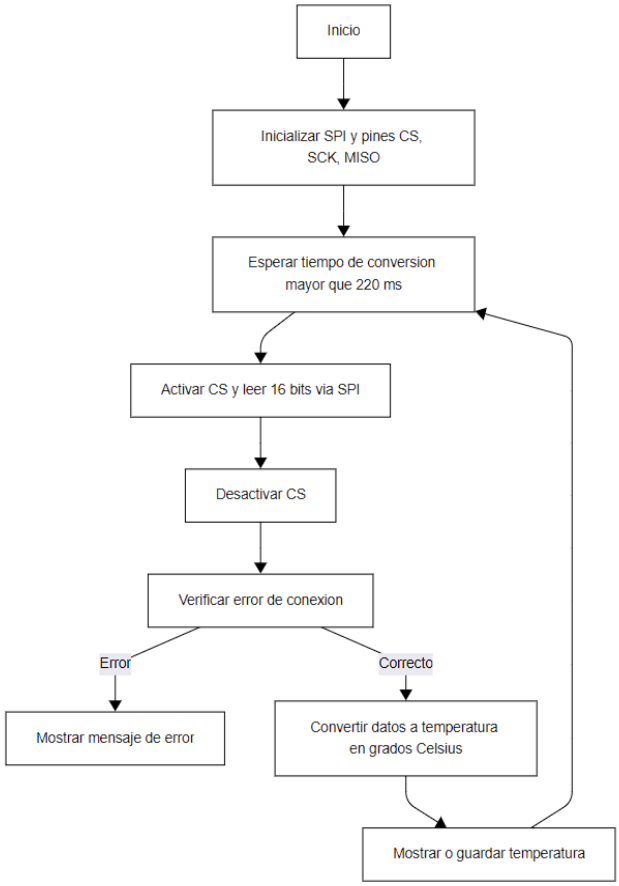
El sistema de medición se basa en el efecto Seebeck, el cual establece que al unir dos metales distintos (en este caso, níquel-cromo y níquel-aluminio, materiales del termopar tipo K), se genera un voltaje termoeléctrico proporcional a la diferencia de temperatura entre la unión caliente y la unión fría (normalmente ubicada en el módulo de conversión). Este voltaje es del orden de microvoltios por grado Celsius, por lo que no puede ser leído directamente con precisión por microcontroladores.

Para resolver esto, se utiliza el circuito integrado MAX6675 que cumple tres funciones principales:

- Amplificación del voltaje del termopar
- Compensación de la unión fría, midiendo la temperatura ambiente con un sensor interno
- Conversión digital de la temperatura, entregando el valor como una palabra de 12 bits mediante interfaz SPI.

El resultado es una medida de temperatura absoluta en grados Celsius. El diagrama de flujo del programa de medición se muestra en la Figura 4.

Figura 4
Diagrama de flujo para medición de temperatura



El código básico para la medición de temperatura utilizando MicroPython en una Raspberry Pi Pico H con el módulo utilizado es el que se muestra en el Código Fuente 1.

https://doi.org/10.62805/cid2025.CID064
This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Año: 2025. Volumen: 1. Numero:11 ISSN: 2448-623X

Código Fuente 1
Medición básica de temperatura del sensor en MicroPython.

```
from max6675 import MAX6675
from machine import Pin
import time

sck = Pin(2, Pin.OUT)
cs = Pin(3, Pin.OUT)
so = Pin(4, Pin.IN)

sensor = MAX6675(sck, cs , so)

while True:
    print("temperature=")
    print(sensor.read())
    time.sleep(1)
```

El programa está basado en la comunicación digital mediante el protocolo SPI. En él, se inicializan los pines correspondientes (SCK, CS y MISO) y se configura el periférico SPI del microcontrolador. Posteriormente, se envía una solicitud de lectura al MAX6675, el cual responde con una palabra de 16 bits que contiene la información de temperatura codificada.

2.4 Calibración del sensor y medición de pH

Para asegurar la precisión de las mediciones del sensor de pH PH-4502C, fue necesario realizar un procedimiento de calibración empleando soluciones buffer de referencia. Este proceso permite establecer una relación adecuada entre la señal analógica de salida del sensor (voltaje) y los valores reales de pH.
En esta investigación, se utilizaron soluciones patrón con valores de pH conocidos, específicamente 4.01 y 6.68, que corresponden a puntos comúnmente aceptados para calibración en aplicaciones acuosas de rango ácido a neutro. Las soluciones se prepararon utilizando buffers comerciales diluidos en agua destilada como los que se muestran en la Figura 5.

Figura 5
Buffers de pH utilizados para la calibración del sensor (Fuente: propia)

La preparación de las disoluciones se realizó en contenedores estériles graduados en mililitros como se ve en la Figura 6

Figura 6
Buffers de pH utilizados para la calibración del sensor (Fuente: Propia)

En este punto es importante mencionar que los sobres se deben diluir en 250mL de agua destilada. Para comodidad y seguridad se utilizaron solamente 50mL.

Para tener una referencia de los valores se utilizó un medidor de pH comercial. Se introdujo en ambas soluciones obteniendo los valores que se muestran en la Figura 7.

Figura 7
Medición con instrumento comercial de referencia (Fuente: Propia)

La discrepancia entre los valores mostrados por el instrumento comercial y los de referencia se debe a la temperatura, ya que el nivel dado por el fabricante está calibrado para 25°C. Sin embargo, los obtenidos se encuentran dentro del rango.
Con las soluciones calibradas se procedió a la calibración de la sonda del sensor PH-4502C. La calibración consistió en sumergir cuidadosamente el electrodo del sensor en la solución buffer de pH 4.01, permitiendo que la señal de salida se estabilizara completamente. Posteriormente, se registró el valor de voltaje entregado por el módulo PH-4502C a la salida analógica. Este procedimiento se repitió con la solución buffer de pH 6.86 como se muestra en la Figura 8.

Figura 8
Obtención de valores de pH con sonda para cálculo (Fuente: Propia)

Con los valores de voltaje correspondientes a cada solución de referencia, se construyó una relación lineal entre el voltaje y el valor de pH, dado que el comportamiento del electrodo dentro del rango operativo es aproximadamente lineal.
A partir de los datos, se obtuvo una ecuación de calibración de la forma (1).

$$pH = m \cdot V + b \quad (1)$$

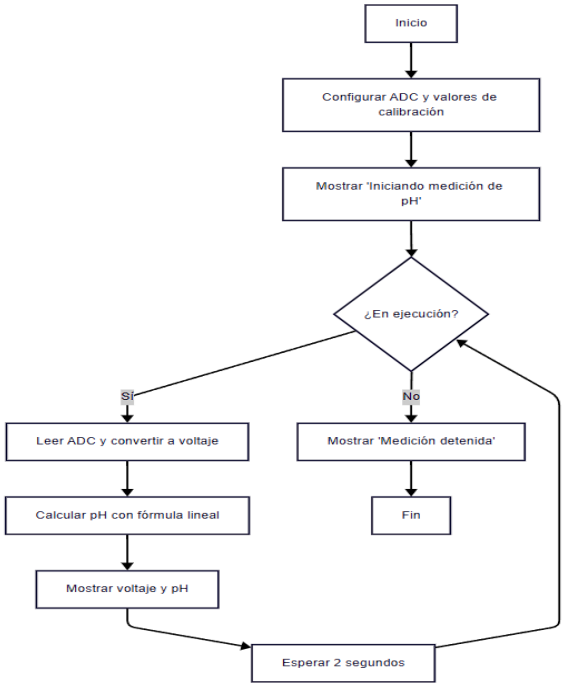
Donde V representa el voltaje leído por el microcontrolador (en voltios), m corresponde a la pendiente y b el término independiente, calculados a partir de los dos puntos de referencia. Esta ecuación fue implementada en el programa del microcontrolador para convertir automáticamente los valores de voltaje en lecturas de pH corregidas.
Para este procedimiento se siguió la metodología que se describe en el diagrama de flujo de la Figura 9.

https://doi.org/10.62805/cid2025.CID064

This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Año: 2025. Volumen: 1. Numero:11 ISSN: 2448-623X

Figura 9
Diagrama de flujo de calibración del sensor de pH (Fuente: Propia)



Con el código implementado se procedió a llevar a cabo las pruebas obteniendo los resultados de la Tabla 4.

Tabla 4
Valores de voltaje de calibración (Fuente: Propia)

Solución utilizada	Valor de Voltaje
4.01	3.027V
6.68	2.547V

A partir de esos valores se obtuvo la ecuación de la recta (1) o de calibración que se muestra en (2). La solución relaciona el valor de voltaje obtenido en el conversor analógico-digital y lo escala a pH permitiendo el uso en todo el rango lineal del sensor.

$$pH = 5.5625 \cdot V + 20.841 \quad (2)$$

La ecuación fue programada en la Raspberry Pi Pico® utilizando Micro Python y el Código Fuente 2.

Código Fuente 2
Programación de la ecuación de la recta para pH

```
from machine import ADC, Pin
from time import sleep
# Configura el ADC en el pin 26 (ADC0)
adc = ADC(26)
# Función para convertir el valor del ADC a voltaje
def leer_voltaje():
    lectura = adc.read_u16()  # Lectura de 16 bits
    voltaje = lectura * 3.3 / 65535  # Conversión a voltaje
    return voltaje
# Función para calcular pH con base en la fórmula lineal
def calcular_ph(voltaje, v_ph4, v_ph6_86):
    # Cálculo de la pendiente m y ordenada b con pH
    m = (4.01 - 6.86) / (v_ph4 - v_ph6_86)
    b = 4.01 - m * v_ph4
    ph = m * voltaje + b
    return ph
# === Calibración manual ===

v_ph6_86 = 2.547 # voltaje medido en la solución de pH 6.86
v_ph4 = 3.027 # voltaje medido en la solución de pH 4.01
print("Iniciando medición de pH. Ctrl+C para detener.")
try:
    while True:
        voltaje = leer_voltaje()
        ph = calcular_ph(voltaje, v_ph4, v_ph6_86)
        print("Voltaje: {:.3f} V | pH estimado:
{:.2f}".format(voltaje, ph))
        sleep(2)
except KeyboardInterrupt:
    print("Medición detenida.")
```

Inicialmente, se definen los valores de voltaje medidos en soluciones buffer patrón de pH 4.01 y 6.68. A partir de estos puntos de referencia, el programa calcula la pendiente y la ordenada al origen de la ecuación lineal que modela la relación entre el voltaje de salida y el valor de pH. Durante la ejecución, el microcontrolador adquiere continuamente datos del ADC, convierte la señal a voltaje, estima el pH utilizando la ecuación calibrada y muestra los resultados en consola.

2.5 Calibración de sensor del sólido disueltos totales (SDT)

En este procedimiento, se empleó agua destilada, la cual idealmente presenta una concentración cercana a 0 ppm (partes por millón) de sólidos disueltos, y un medidor SDT comercial de referencia. Inicialmente, se sumergió el electrodo del sensor SDT en agua destilada a temperatura ambiente y se registró el valor de salida en voltaje proporcionado por el sensor, el cual correspondió a 0 ppm. El experimento se ve en la Figura 10.

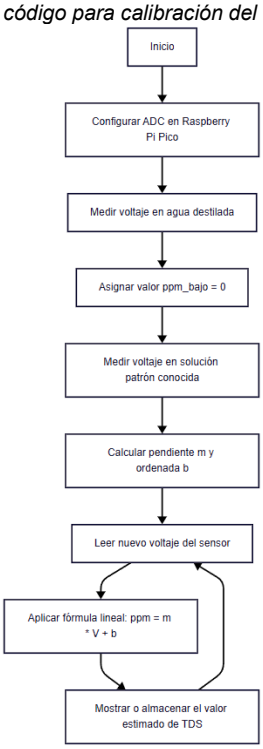
Figura 10
Prueba de calibración de SDT con agua destilada

Posteriormente, se repitió la medición utilizando una solución con concentración SDT conocida (por ejemplo, 342 ppm, una solución estándar de calibración), comparando la lectura del sensor con la del medidor comercial.
Con base en estas dos referencias, se determina la relación lineal entre el voltaje de salida del sensor y la concentración de SDT. Esta calibración permite implementar una ecuación de conversión en el sistema de adquisición para obtener lecturas confiables en tiempo real. El diagrama de flujo del código implementado se muestra en la Figura 11.

https://doi.org/10.62805/cid2025.CID064
This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Año: 2025. Volumen: 1. Numero:11 ISSN: 2448-623X

Figura 11
Diagrama de flujo del código para calibración del SDT (Fuente: Propia)



La obtención de la relación lineal entre el voltaje y el valor de SDT se muestra en (3). Donde el valor obtenido en el agua destilada fue de 0.5 es de aproximadamente 2mV y para la solución de 342 de 0.7866V.

$$TDS\ (ppm) = 434.78 \cdot V \qquad (3)$$

El código implementado para la realización de la prueba se muestra en el Código Fuente 3.

Código Fuente 3
Programación para calibración del sensor SDT.

```
from machine import ADC
from time import sleep
# Configuración del ADC en GP26
adc = ADC(26)
# Función para leer el voltaje
def leer_voltaje():
    lectura = adc.read_u16()
    voltaje = lectura * 3.3 / 65535
    return voltaje
# Función para calcular SDT en ppm con fórmula lineal
def calcular_SDT(voltaje, v_punto_bajo, ppm_bajo, v_punto_alto, ppm_alto):
    m = (ppm_alto - ppm_bajo) / (v_punto_alto - v_punto_bajo)
    b = ppm_alto - m * v_punto_alto
    ppm = m * voltaje + b
    return ppm

v_punto_bajo = 0.002  # ejemplo de voltaje en agua destilada
ppm_bajo = 0
# Solución estándar de 342 ppm
v_punto_alto = 0.7866V  # m
ppm_alto = 342
print("Iniciando lectura de SDT... Ctrl+C para detener.")
try:
    while True:
        voltaje = leer_voltaje()
        SDT = calcular_SDT(voltaje, v_punto_bajo, ppm_bajo, v_punto_alto, ppm_alto)
        print("Voltaje: {:.3f} V | SDT estimado: {:.1f} ppm".format(voltaje, SDT))
        sleep(2)
except KeyboardInterrupt:
    print("Medición detenida.")
```

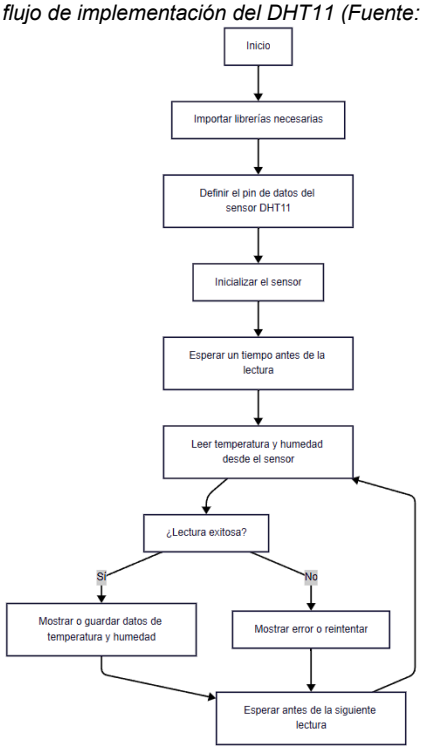
2.6 Medición de temperatura y humedad ambiental.

Por último y para tener una referencia de la temperatura y humedad ambiente con el fin de realizar posteriores análisis al momento de implementar el sistema, se diseñó un programa para la lectura de estas variables utilizando un sensor DHT11 como el mostrado en la Figura 12.

Figura 12
Sensor de temperatura y humedad DHT11

Este sensor es muy común en prácticas de electrónica por su bajo costo y fácil implementación con los microcontroladores. Asimismo, los códigos de referencia pueden encontrarse en la documentación oficial de la Fundación Raspberry Pi®. El diagrama de flujo general de programación se muestra en la Figura 13.

Figura 13
Diagrama de flujo de implementación del DHT11 (Fuente: Propia)



https://doi.org/10.62805/cid2025.CID064

This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

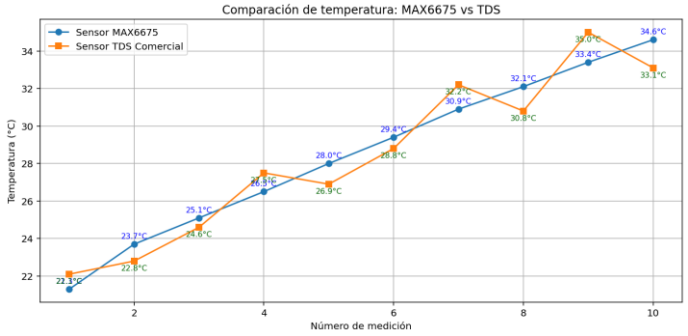
Año: 2025. Volumen: 1. Numero:11 ISSN: 2448-623X

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados de medición de temperatura en agua.

Para verificar el funcionamiento del sensor de temperatura en agua se sometió al termopar tipo K a realizar 10 lecturas en contraste con el sensor SDT comercial que se mostró en la Figura 3 que tiene también la opción de medición de esta variable ya que ambos son sumergibles.
El líquido se calentó utilizando una pistola de calor en un recipiente de vidrio templado, tomando las lecturas en diferentes momentos. Los resultados de la medición se muestran en la Figura 14.

Figura 14
Comparación de resultados de pruebas de temperatura en líquidos (Fuente: Propia)



Como se puede observar, el termopar demostró una medición más estable simulando una sigmoide de primer orden común en los sistemas de calentamiento.
En comparación con el sensor comercial que tiene variaciones más significativas. Sin embargo, los valores se encuentran dentro de un rango de error del 5%, lo que significa que las pruebas de calibración son positivas.

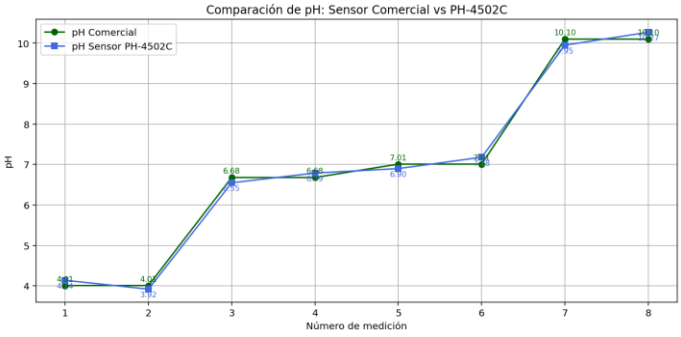
3.2 Resultados de pruebas de pH

Con la finalidad de comprobar más puntos en la curva de funcionamiento del sensor analógico de pH se sometió el mismo a otras 2 soluciones con valor conocido de 7.01 y 10.01 de la marca Hanna Instruments®, las cuales son utilizadas para la calibración de sensores industriales y se muestran en la Figura 15.

Figura 15
Soluciones de calibración de nivel industrial (Fuente: Propia)

Las mediciones se repitieron con los buffers de calibración y las soluciones industriales obteniendo la gráfica que se muestra en la Figura 16.

Figura 16
Mediciones con los buffers de calibración y soluciones industriales (*Fuente: Propia)*

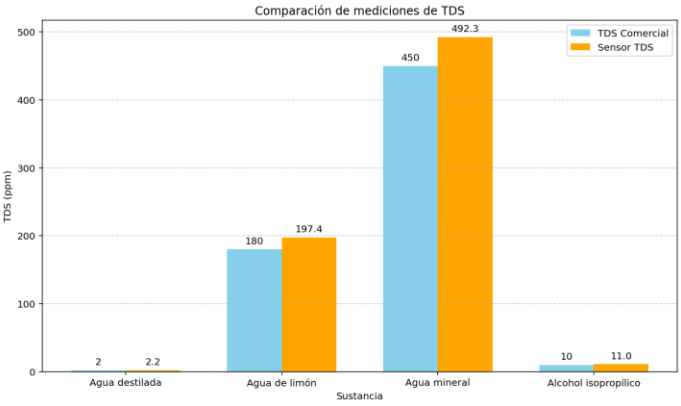


Analizando la gráfica se puede observar un porcentaje de error muy bajo, aproximadamente del 2.03%, lo que significa que se tiene un nivel de confianza similar al sensor comercial utilizado, derivando en un monitoreo preciso al aplicarse en los acuarios.

3.3 Resultados de pruebas para medición de SDT y parámetros ambientales

En la toma de las mediciones, se utilizaron cuatro sustancias comunes: agua destilada, agua de limón diluida, agua mineral y alcohol isopropílico. En cada caso, se tomaron lecturas de SDT utilizando el sensor de bajo costo y se compararon con los valores obtenidos por el medidor comercial.
Los resultados obtenidos permitieron observar las variaciones de SDT en las diferentes sustancias y evaluar la precisión del sensor en comparación con los medidores comerciales, demostrando que el sensor puede ser útil para aplicaciones generales, aunque con ciertas limitaciones en precisión, especialmente en sustancias con SDT más elevados. Los resultados del experimento se muestran en la Figura 17.

Figura 17
Comparación de resultados de la medición de SDT (Fuente: Propia)



Se puede observar que a diferencia de los sensores anteriores en esta ocasión si existe mayor diferencia entre el sensor comercial y el sensor analógico, esto puede deberse a la temperatura y la calidad de la sonda utilizada. Sin embargo, el

https://doi.org/10.62805/cid2025.CID064
This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

error se encuentra dentro de rangos que no afectan el funcionamiento aplicado en sistemas de acuarios de agua dulce (error de 7%).

Para la medición de parámetros ambientales se sometió al sensor DHT11 a pruebas durante el día para probar la robustez. Los valores obtenidos no fueron verificados con instrumentos patrones ya que su funcionamiento está ampliamente validado en la literatura y su uso constante en diferentes aplicaciones.

IV. CONCLUSIONES

El desarrollo y calibración del sistema automatizado propuesto demuestran que la integración de sensores de bajo costo y plataformas embebidas, como Raspberry Pi Pico, constituye una solución viable para el monitoreo en tiempo real de parámetros físico-químicos en estanques acuícolas de agua dulce.

Los resultados obtenidos evidencian que, tras un proceso de calibración con soluciones buffer y dispositivos comerciales de referencia, los sensores PH-4502, termopar tipo K con MAX6675 y SDT alcanzan niveles de precisión compatibles con aplicaciones prácticas. Específicamente, el sensor de pH presentó un error relativo de 2.03%, mientras que el termopar mostró una desviación máxima del 5% en la medición de temperatura, valores que se encuentran dentro de los umbrales aceptables para garantizar la estabilidad del ecosistema acuático. No obstante, el sensor de SDT exhibió un margen de error del 7%, atribuible a factores como la sensibilidad a variaciones térmicas y la calidad de la sonda. No obstante, se encuentra entre el rango para su uso en la aplicación mencionada.

La programación del sistema en Python, junto con la implementación de ecuaciones de calibración lineal, permitió una adquisición de datos eficiente, destacando la flexibilidad de este lenguaje para aplicaciones embebidas. Este enfoque no solo reduce costos, sino que también facilita la escalabilidad del sistema, posibilitando su adaptación a entornos acuícolas de diversos tipos, desde acuarios domésticos hasta instalaciones semiindustriales.

Sin embargo, el estudio no está exento de limitaciones. La dependencia de calibraciones manuales periódicas y la sensibilidad de los sensores a interferencias ambientales subrayan la importancia de desarrollar protocolos de mantenimiento preventivo.

Asimismo, la validación del sistema se realizó en condiciones controladas, por lo que su desempeño en ambientes operativos reales, con fluctuaciones dinámicas y factores biológicos impredecibles, requiere evaluación adicional.

Futuras investigaciones podrían explorar la incorporación de sensores adicionales como oxígeno disuelto o concentraciones de amoníaco y la implementación de redes IoT para monitoreo remoto y el uso de técnicas de aprendizaje automático para predicción proactiva de anomalías.

Este trabajo sienta las bases tecnológicas para facilitar el acceso a sistemas de gestión acuícola automatizados, promoviendo prácticas más sostenibles y resilientes en un sector clave para la seguridad alimentaria global y para mejorar la condición de vida de los peces ornamentales.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Tecnológico Nacional de México (TecNM), al Instituto Tecnológico Superior de Lerdo y al Instituto Tecnológico de La Laguna por las facilidades brindadas. Los trabajos colaborativos como el presentado ejemplifican la sinergia que debe existir entre los investigadores y las instituciones.

VI. REFERENCIAS

Ahmed, N., & Thompson, S. (2019). The Blue Dimensions of Aquaculture: A Global Synthesis. *Science of the Total Environment, 652*, 851-861. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.163

Boyd, C. E., & Tucker, C. S. (1998). *Pond aquaculture water quality management.* Springer Nature.

Bregnballe, J. (2015). *A Guide to Recirculation Aquaculture.* Food and Agriculture Organization.

Dos Santos, L. G., & Branco, S. M. (2019). Smart aquaculture: IoT-based solutions for improving fish farming management. *Journal of Aquaculture Research and Development, 10*(3), 456-472.

DROK. (2016). *PH Sensor Module PH-4502C User Manual.* Obtenido de Droking: https://www.droking.com

Føre, M., Frank, K., & Dempster, T. (2018). Precision Fish Farming: A New Framework to Improve Production in Aquaculture. *Biosystems Engineering, 178*, 176-193. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.10.014

Hargreaves, J. A., & Tucker, C. S. (2018). *Managing Ammonia in Fish Ponds.* SRAC Publication.

Martínez Córdova, L. R., Martínez Porchas, M., & Emerenciano, M. (2015). *Emerging Technologies in Aquaculture.* Springer.

Martínez, J., Pérez, L., & Gómez, R. (2022). Economic impact of smart aquaculture systems in ornamental fish breeding. *Aquaculture Economics and Management, 26*(4), 321-339.

Martins, C., & Galhardo, L. (2018). Behavioural Indicators of Welfare in Farmed Fish. *Fish Physiology and Biochemistry, 44*(1), 161-178. https://doi.org/10.1007/s10695-011-9518-8

Maxim Integrated. (2015). *Analog Devices.* Obtenido de MAX6675: Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX6675.pdf

Naylor, R. L., Hardy, R. W., Bureau, D. P., Chiu, A., Elliott, M., Farrell, A. P., & Nichols, P. D. (2021). A 20-year retrospective review of global aquaculture. *Nature, 1*(591), 551-563. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03308-6

h t t p s : / / d o i . o r g / 1 0 . 6 2 8 0 5 / c i d 2 0 2 5 . C I D 0 6 4

This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Año: 2025. Volumen: 1. Numero:11 ISSN: 2448-623X

Patrick, K., & Zhen, H. (2014). Nutrients Removal and Recovery in Bioelectrochemical Systems: A Review. *Bioresource Technology, 153*, 351-360. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.046

Rasheed Abdul Haq, K. P. (2022). Water Quality Prediction for Smart Aquaculture Using Hybrid Deep Learning Models. *IEEE Access, 10*, 60078 - 60098. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3180482

Thurein, A., & Rafiza Abdul, R. (2024). Artificial intelligence methods used in various aquaculture applications: A systematic literature review. *World Aquaculture Society, 56*(1), 1-31. https://doi.org/10.1111/jwas.13107

Timmons, M. B., & Ebeling, J. M. (2013). *Recirculating aquaculture.* Cayuga Aqua Ventures.

Yanuar, P., Suryanto, A., & Hidayat, R. (2021). Energy-Efficient Control Systems in Shrimp Farming. *Aquacultural Engineering, 95*. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2021.102189

h t t p s : / / d o i . o r g / 1 0 . 6 2 8 0 5 / c i d 2 0 2 5 . C I D 0 6 4

This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/