

Prototipo para el monitoreo de parámetros físico-químicos de calidad de agua utilizando energía renovable

Prototype for monitoring physicochemical parameters of water quality using renewable energy

Guevara, Richard¹, Pilonieta, Carlos¹ y Ramirez-Bautista, Julián Andres²

Fundación Universitaria de San Gil, UNISANGIL
Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería
Ingeniería de Mantenimiento
San Gil, Colombia

richardguevara@unisangil.edu.co
carlospilonieta@unisangil.edu.co
jramirez@unisangil.edu.co

Fecha de recepción: julio 30 de 2024
Fecha de aceptación: diciembre 12 de 2024

Resumen — El agua es un recurso natural de gran relevancia para la vida y el desarrollo de sus comunidades, de ella no solo depende el hombre, sino todos los ecosistemas vivos del planeta. Actualmente el uso desmedido y las malas prácticas, están ocasionando altos niveles de contaminación en las cuencas hídricas, viendo la necesidad de desarrollar sistemas de monitoreo que permitan a las autoridades competentes la toma de decisiones basadas en datos en tiempo real. De esta forma, se muestra el desarrollo de un prototipo para el monitoreo de parámetros físico-químicos de la calidad del agua utilizando energía renovable. Se consideran parámetros como pH, temperatura, turbidez, caudal, partes por millón y oxígeno disuelto, utilizando sensores electrónicos alimentados por fuentes de energía renovable. La investigación se desarrolla en la cuenca del río Fonce, en Santander, Colombia, y se enfoca en la recolección de datos, identificación de necesidades, diseño y validación del prototipo. Se realizaron pruebas de integración en laboratorio y en campo, mostrando una alta precisión y confiabilidad con un margen de error máximo del 0.04%. Los resultados indicaron que el sistema es factible para su uso, con algunos valores, como la turbidez, superando los límites permitidos. Se concluye que la integración de sensores específicos y técnicas de fabricación rápida son clave para el éxito del prototipo.

Palabras clave— Calidad del agua, energía renovable, monitoreo, parámetros físico-químicos, prototipo.

Abstract - Water is a natural resource of great relevance for life and the development of its communities; not only man depends on it, but also all the living ecosystems of the planet. Currently, the excessive use and bad practices are causing high levels of contamination in water basins, seeing the need to develop monitoring systems that allow the competent authorities to make decisions based on real-time data. Thus, the development of a prototype for monitoring physicochemical parameters of water quality using renewable energy is shown. Parameters such as pH, temperature, turbidity, flow, parts per million and dissolved oxygen are considered, using electronic sensors powered by renewable energy sources. The research is developed in the Fonce river basin, in Santander, Colombia, and focuses on data collection, needs identification, design and validation of the prototype. Integration tests were carried out in the laboratory and in the field, showing high accuracy and reliability with a maximum error margin of 0.04%. The results indicated that the system is feasible for use, with some values, such as turbidity, exceeding the allowable limits. It is concluded that the integration of specific sensors and rapid fabrication techniques are key to the success of the prototype.

Keywords - Renewable energy, monitoring, physico-chemical parameters, prototype, water quality.

¹ Ingeniero de mantenimiento, UNISANGIL.

² Doctor en tecnología de avanzada; Docente – Investigador UNISANGIL.

I. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso esencial para la vida en el planeta, y su calidad es crucial para el bienestar humano, el funcionamiento saludable de los ecosistemas y el desarrollo sostenible de las comunidades [1] [2]. La problemática del agua contaminada en Colombia es una situación crítica que afecta a millones de personas. La contaminación del agua crea ciclos viciosos de pobreza, desigualdad y movilidad forzada, lo que afecta la calidad de vida de las personas [3]. Además, entre 11,8 y 19 millones de personas en Colombia están expuestas a riesgos muy altos por la mala calidad del agua [4].

Los sistemas de control y monitoreo de parámetros físico-químicos del agua con energía renovable son esenciales para la gestión y conservación del agua [5] [6]. La necesidad de monitorear y controlar los parámetros físico-químicos del agua para garantizar su calidad y disponibilidad para las generaciones futuras es innegable.

En este contexto, se han desarrollado proyectos como el de Arana et al. [7], donde desarrollaron un analizador de agua de bajo costo utilizando tecnologías abiertas para medir parámetros como temperatura, pH y turbidez. Sin embargo, existen áreas de mejora en estos sistemas, especialmente en términos de precisión y confiabilidad. El estudio de Bernal Suarez, et al, [8] implementa un prototipo IoT energizado por energía fotovoltaica para monitorear parámetros de calidad del agua en sistemas acuapónicos, demostrando su viabilidad y facilitando la toma de decisiones en tiempo real.

El trabajo presentado se centra en el monitoreo de parámetros físico-químicos del agua, tales como pH, temperatura, turbidez, caudal, partes por millón (ppm) y oxígeno disuelto, que son indicadores clave de su calidad. De esta forma, se muestra el desarrollo de un prototipo para el monitoreo diario de parámetros físico-químicos de calidad de agua en condiciones de intemperie, utilizando electrónica de bajo consumo y energía renovable. La metodología utilizada se basó en el análisis de datos cuantitativos mediante instrumentos de medición y técnicas estadísticas y analíticas. Se utilizaron protocolos de comunicación IoT para la transmisión de información, asegurando una estructura funcional adecuada a través del análisis nodal, que involucra nodos de censado y control. Se enfatiza la necesidad de un monitoreo continuo para mejorar la gestión y conservación del agua, así como la sostenibilidad ambiental. Se llevaron a cabo pruebas de integración en laboratorio de los sensores de PPM, caudal, turbidez, temperatura y pH, donde se verificó su funcionamiento y la transmisión de datos. Los resultados de las pruebas mostraron diferencias mínimas entre las lecturas del prototipo y los patrones de referencia, indicando que el sistema es factible para su uso. Así mismo, se realizaron las pruebas con el prototipo en aguas del río Fonce. Los

resultados mostraron una alta precisión y confiabilidad, con un margen de error máximo del 0,04%, respecto a los patrones de medida utilizados. Se compararon datos obtenidos en el laboratorio y en campo, encontrando consistencia en las mediciones. Los sensores midieron pH, temperatura, oxígeno disuelto, turbidez, caudal y PPM, con algunos valores, como la turbidez, superando los límites permitidos. El dispositivo demostró ser impermeable y efectivo en la transmisión de datos a través de un módulo GSM.

II. METODOLOGÍA

Después de revisar los antecedentes y la información teórica, se determina que el método más eficiente para llegar a una solución óptima es a través del análisis nodal. Este análisis involucra dos nodos, a saber: el de censado, el de control. El nodo de censado medirá las diferentes variables evaluadas en el proyecto y el nodo de control facilitará la comunicación para garantizar una estructura funcional adecuada. Para lograrlo se utiliza una metodología por etapas donde:

Etapa 1: Recolección de datos importantes e información

Se indagó y se evaluó la información relacionada con los distintos procedimientos que se llevaban a cabo en los procesos de monitoreo y en la gestión ambiental. El objetivo fue identificar las variables técnicas, químicas y físicas críticas para el proceso y el sistema, con el fin de enfocarse en ellas y obtener los mejores resultados posibles.

Se investigaron los procesos, desarrollos y aplicaciones tecnológicas relevantes que se habían llevado a cabo, con el fin de obtener información valiosa para el proyecto en cuestión.

Se recopiló y seleccionó la información que se empleaba para consolidar los conocimientos previos y alcanzar los objetivos principales del proyecto en desarrollo.

Etapa 2: Identificación y reconocimiento funcional

Permitió determinar los requerimientos técnicos del hardware y software, analizando diferentes sistemas electrónicos de adquisición de datos referentes a calidad de agua en ríos. Así como diseñar el sistema electrónico considerando funcionalidades y comportamiento en el entorno seleccionado, para construir el prototipo utilizando técnicas de manufacturado rápido.

Etapa 3: Diseño y construcción

Se diseñó un sistema electrónico, lo que involucró la planificación de su lógica y el método de envío de información, y el ensamblaje de los componentes. Se

seleccionaron los sensores y otros componentes electrónicos que cumplieran con los requisitos del sistema, examinando minuciosamente la información técnica de cada uno de ellos. Se realizaron inspecciones para identificar posibles fallos que pudieran afectar la toma de datos, el funcionamiento del sistema y el consumo energético, con el fin de prevenir problemas que pudieran comprometer el éxito del proyecto.

Etapa 4: Validación de prototipo

Se realizó un análisis del funcionamiento del sistema, incluyendo los circuitos, la programación y todas las funciones en general. Se prestó especial atención a la lectura precisa de los datos recopilados para asegurar la eficiencia y confiabilidad del sistema en su totalidad. Se llevaron a cabo pruebas en campos de trabajo controlados después del análisis inicial para verificar la calibración adecuada de los sensores y su capacidad para detectar y medir con precisión

los parámetros necesarios. Se simularon diferentes escenarios para replicar condiciones reales y se recopilaron datos correspondientes para su análisis posterior. Finalmente, se realizaron pruebas en campo para evaluar el rendimiento y la eficacia del sistema en un entorno real, para evaluar la capacidad del prototipo para proporcionar información precisa y oportuna en situaciones reales.

III. CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO

En el prototipo construido para monitoreo de parámetros fisicoquímicos del agua se utilizaron sensores de bajo costo, pero calibrados con patrones de medida del laboratorio de Aguas de UNISANGIL, sede San Gil. En la Figura 1, se muestra el diagrama de conexión electrónica del prototipo.

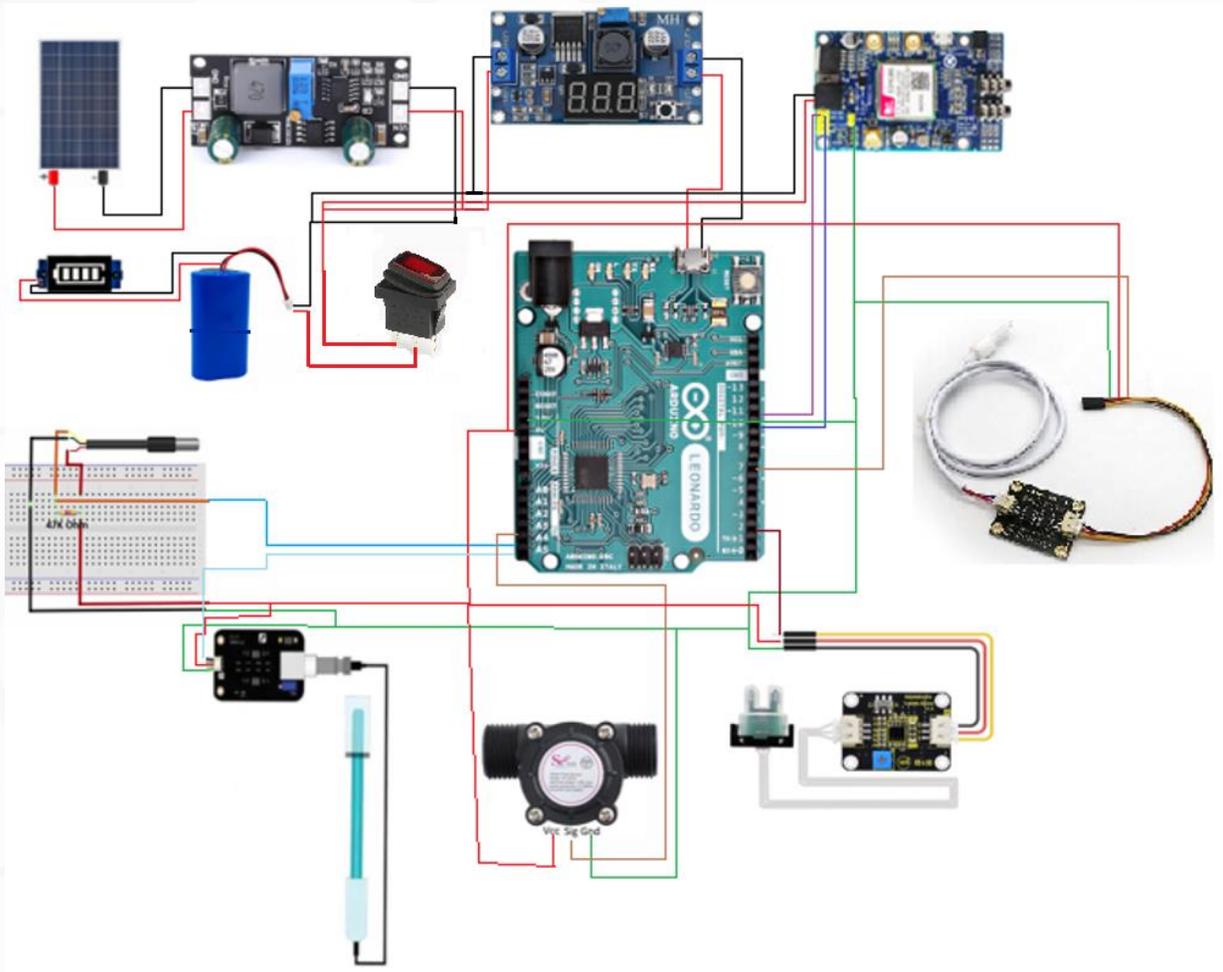


Fig 1. Diagrama de conexiones del circuito de adquisición y envío de información.

El sensor **DS18B20** fue utilizado para medir la temperatura del agua, para la caracterización de este sensor, la temperatura ambiente del agua se encontraba aproximadamente a los 23°C, se adicionó agua fría para disminuir la temperatura, alcanzando un valor cercano a los 10 °C. Las medidas dadas por el sensor fueron comparadas con una cámara termográfica, obteniendo una variación de temperatura de 0.53 por encima del valor del sensor.

El sensor de pH **SEN0161** se calibra según su ficha técnica, se toma el valor de pH bajo y se calibra con ayuda de un potenciómetro, y luego se hace el mismo procedimiento, pero con la muestra de mayor pH, luego se hizo verificación con diferentes muestras para verificar que el sensor estuviera en perfecto funcionamiento. La calibración del mismo con patrón de medida se realizó en la fecha 12/09/2023 en el laboratorio de aguas de la Fundación Universitaria de San Gil - UNISANGIL.

El Sensor de Turbidez **SKU SEN0189** se caracterizó con ayuda del turbidímetro con el que cuenta el laboratorio de aguas, para la calibración, se utiliza su ficha técnica, así como con un sensor patrón, con ayuda de un potenciómetro, luego se hizo verificación con diferentes muestras para verificar que el sensor estuviera en perfecto funcionamiento.

El sensor de **PPM** utilizado para medir la cantidad de partículas por millón se calibró utilizando su ficha técnica donde se cambiaron sus parámetros normales, agregando agua sucia y se agita el fin de representar turbidez en el agua para cambiar el valor de lectura.

El sensor de caudal se utiliza para medir la velocidad y el volumen del agua en el momento de la toma de datos, como un valor adicional para análisis posteriores.

Finalmente, para la medición del OD existen sensores propicios para ello, pero debido a factores como altos costos, se optó por hacer una medida indirecta, para ello es importante denotar que, al aumentar la temperatura, disminuye la cantidad de oxígeno disuelto en el agua. Cuando el agua contiene todo el oxígeno disuelto a una temperatura dada, se dice que está 100/100 saturada de oxígeno.

Otro dispositivo de gran importancia en la construcción es el módulo SIM 808 el cual es un dispositivo diseñado para facilitar la comunicación a través de la red GSM (Global System for Mobile Communications). Para realizar las pruebas de comunicación se enviaron mensajes de texto como se muestra en la Figura 2.

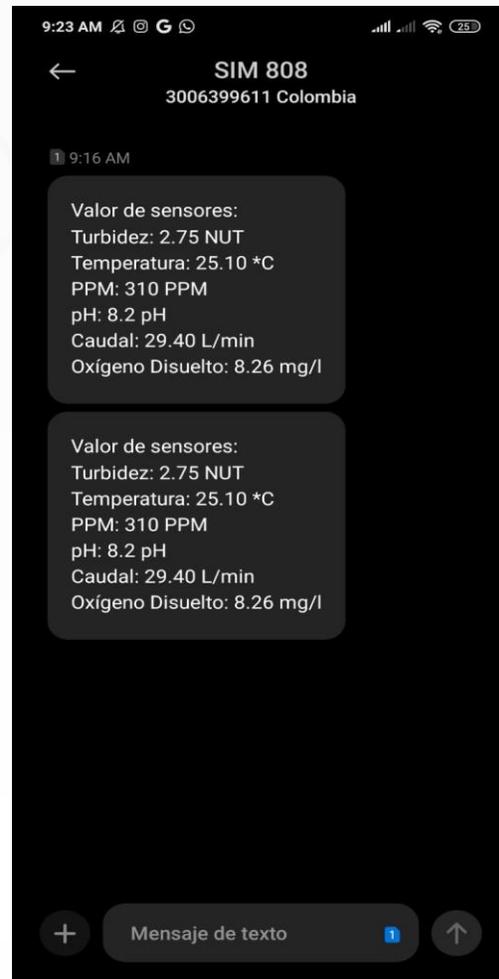


Fig 2. Mensajes recibidos desde el módulo.

Empleando técnicas de prototipado rápido, se construye la carcasa del dispositivo, el cual pudiera brindar espacio para la ubicación adecuada de los sensores, así como impermeabilidad, considerando las condiciones donde operaría. Obteniendo el dispositivo que se observa en la Figura 3.



Fig.3. Prototipo construido.

IV. RESULTADOS

En la primera etapa, se llevó a cabo una prueba en condiciones controladas para evaluar la impermeabilidad del prototipo, sumergiéndolo en una pila con agua (Fig. 4). Durante 30 minutos se realizó el envío y la recolección de datos por parte de cada uno de los sensores, con el fin de verificar su desempeño antes de la prueba en campo. En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos por los sensores.



Fig 4. Prueba del prototipo en condiciones controladas.

TABLA 1. DATOS ADQUIRIDOS CON EL DISPOSITIVO DESARROLLADO

Fecha	Hora	Sensor	Sensor proyecto	Sensor patrón	Diferencia	Factible
16/04/2024	14:30	pH	8.67 pH	8.71 pH	0.04	Si
16/04/2024	14:30	Temperatura	26.72 C°	26.74 C°	0.02	Si
16/04/2024	15:30	Oxígeno disuelto	7.88 mg/l	n	n	n
16/04/2024	14:30	Turbidez	2.63 NUT	2.66 NUT	0.03	Si
16/04/2024		Caudal	n	n	n	n
16/04/2024	14:30	PPM	301 PPM	n	n	n

Finalmente, se ubica el dispositivo en el lugar seleccionado, sector conocido como Monas (Fig. 5), más exactamente en latitud 6,476534 y longitud -73,117762. Esta ubicación ha sido seleccionada por su accesibilidad, su seguridad, y se considera ideal para llevar a cabo el proyecto debido a que el cauce del río es amplio y es apacible.



Fig 5. Lugar donde se realizaron pruebas de campo.

El dispositivo es amarrado a una roca del lugar y pues en funcionamiento (Fig. 6). Se realizaron mediciones en 3 oportunidades diferentes para visualizar la variación en las lecturas de los sensores.



Fig 6. Prototipo durante pruebas de campo.

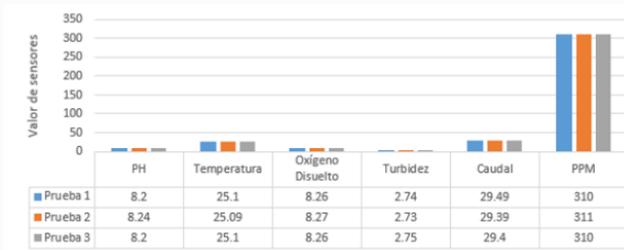


Fig 7. Resultados pruebas de campo.

Respecto a la Figura 7, se detallan los datos obtenidos en el río Fonce, en los cuales las mediciones de pH, temperatura, ppm, oxígeno disuelto, tuvieron valores normales y dentro de los rangos permitidos, no obstante la turbidez no tuvo resultados permitidos, ya que supera los valores permitidos.

V. CONCLUSIONES

La integración de sensores específicos y comunicación inalámbrica asegura precisión y fiabilidad en las mediciones, y la optimización del diseño electrónico garantiza la funcionalidad en el río Fonce.

La comparación de los valores obtenidos por los sensores del prototipo con sensores patrones proporciona una validación importante de la precisión de los datos recopilados. El margen de error máximo fue de 0.04%, lo que sugiere una alta fiabilidad de los sensores utilizados en el prototipo.

Las pruebas en el río Fonce confirmaron la capacidad del prototipo para medir con precisión los parámetros físico-químicos del agua, proporcionando resultados coherentes y fiables.

REFERENCIAS

- [1] Enel X, *¿Qué es un sistema fotovoltaico y cómo funciona?*, Enel X, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://corporate.enelx.com/es/question-and-answers/how-does-a-photovoltaic-system-work>
- [2] M. I. Chávez-Cadena, G. C. Herrera-Morales y M. Y. Jiménez-Gutiérrez, "Monitoreo y calidad del agua en contribución a una experiencia sostenible de vida", *Rev. Arbitrada Interdiscip. Koinonía*, vol. 6, no. 11, pp. 34–43, 2021. doi: 10.35381/r.k.v6i11.1146
- [3] Banco Mundial, *Colombia: rica en agua, pero con sed de inversiones*, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2020/09/02/colombia-water-security>
- [4] M. D. Flórez, *Causas y consecuencias de la contaminación del agua en Colombia*, Observatorio Ambiental de Bogotá, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://oab.ambientebogota.gov.co/causas-y-consecuencias-de-la-contaminacion-del-agua-en-colombia/>
- [5] Aguas Urbanas, *Monitoreo de variables físico-químicas de agua*, Aguas Urbanas, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.aguasurbanas.ei.udelar.edu.uy/index.php/2018/11/15/monitoreo-de-variables-fisico-quimicas-de-agua/>
- [6] A. A. Moreno Tovar, M. Y. Toro Botero y L. F. Carvaja, "Revisión de criterios y metodologías de diseño de redes para el monitoreo de la calidad del agua en ríos", *Avances en Recursos Hidráulicos*, no. 18,

2008. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/arh/article/view/9283>
- [7] J. Arana Obra *et al.*, *Analizador de agua conectado a IoT*, ADDI, 2020. [En línea]. Disponible en: https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/43094/TFG_JavierAranaObra.pdf?sequence=1
- [8] W. F. Bernal Suárez, L. A. Páez Guevara, L. P. Villamil Moreno y E. R. Riaño Castillo, "Sistema automatizado soportado en IoT para monitoreo de calidad de agua en sistemas acuapónicos", *Ciencia en Desarrollo*, vol. 15, no. 1, pp. 194–204, 2024. doi: 10.19053/01217488.v15.n1.2024.15933