

**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
PUEBLA**

Facultad de Ciencias de la Electrónica

Maestría en Ingeniería Electrónica,

Opción Instrumentación Electrónica



BUAP

Tesis presentada para obtener el grado de:

Maestro en Ingeniería Electrónica

**Red inalámbrica de sensores para el monitoreo de la
calidad del agua en un cuerpo de agua**

Presenta:

Mauro Alberto López Muñoz*

Directores:

Dr. Richard Torrealba Meléndez

Dr. Cesar Augusto Arriaga Arriaga

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Andrea y Mauro, las personas que más admiro, y a quienes debo toda mi formación, y calidad de persona, quienes con su apoyo y amor incondicional han estado para mí siempre.

A mis hermanos, Enrique, Rafael y Daniel, de quienes he tomado una parte para convertirme en lo que soy hoy, gracias por hacerme reír y siempre hacerme sentir alguien importante, pero en especial a mi hermano menor, mi mejor amigo.

A Nadia, una mujer muy especial en mi vida, por haberme motivado a realizar este posgrado.

A mis amigos y colegas que fueron parte de esta maestría, pero en especial a Fernando, Guillermo y Mauricio, con quienes inicié este increíble viaje.

Al Dr. Miguel, por su inmenso apoyo y amistad durante mi estancia en CICESE.

Al Dr. Esteban y la Dra. Judith por su invaluable tiempo y provisión de equipo en la Facultad de Ciencias Químicas.

A la destacable plantilla docente, la MC Ana María, por siempre motivarme, al Dr. Víctor por impulsarme a seguir superándome, al Dr. Roberto por la apertura a nuevas formas de trabajar, y en especial a los doctores Richard y Cesar por acompañarme de inicio a fin en el desarrollo de este proyecto.

Al CONAHCYT, por su invaluable apoyo a lo largo de mis estudios de posgrado.

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por acogerme como un miembro importante de esta comunidad, por proporcionar un gran cuerpo académico, espacios de trabajo y el equipo necesario para lograr proyectos de calidad.

Índice

AGRADECIMIENTOS	3
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	10
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	11
1.1 Introducción	11
1.2 Objetivos	12
1.2.1 Objetivo General	12
1.2.2 Objetivos Específicos	12
1.3 Estado del Arte.....	12
1.3.1 Sistemas con un único punto de monitoreo.....	13
1.3.2 Sistemas con múltiples puntos de monitoreo	14
1.4 Justificación	17
1.5 Descripción.....	18
CAPÍTULO 2 REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES Y MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA.....	22
2.1 Red inalámbrica de sensores (WSN).....	22
2.2 Internet de las cosas	24
2.3 Tecnologías y protocolos de comunicación inalámbrica	25
2.3.1 WiFi.....	26
2.3.2 Protocolo TCP/IP.....	26
2.3.3 Protocolo Modbus TCP/IP	27
2.4 Calidad del agua.....	29
2.4.1 Parámetros más priorizados en el IoT para determinar la calidad del agua.....	30
2.4.2 Normas mexicanas sobre la calidad del agua.....	31
2.4.3 PH.....	32
2.4.4 Temperatura	33

2.4.5 Total de sólidos disueltos	34
2.4.6 Turbidez	35
2.4.7 Índices de la calidad del agua	36
2.5 Interfaz gráfica	37
2.5.1 LabVIEW	37
2.6 Microcontroladores	38
2.6.1 Tarjeta de desarrollo ESP32 DEVKIT V1	39
2.7 Base de datos y hojas de cálculo.....	40
CAPÍTULO 3 ARQUITECTURA DE RED INALÁMBRICA DE SENSORES PARA MONITOREO DE AGUA BASADO EN IoT	42
3.1 Desarrollo metodológico	42
3.1.1 Adquisición de datos.....	42
3.1.2 Comunicación.....	52
3.1.3 Gestión de datos.....	60
3.2 Diseño.....	66
3.2.1 Modelo CAD del nodo estático.....	67
3.2.2 Esquema eléctrico del sistema de monitoreo basado en microcontrolador del nodo estático	68
3.2.3 Diseño de PCB del nodo estático.....	69
3.2.4 Modelo CAD del nodo móvil.....	69
3.2.5 Esquema eléctrico del sistema de monitoreo basado en microcontrolador del nodo móvil	73
3.2.6 Diseño PCB del nodo móvil	74
3.2.7 Consumo de energía.....	75
CAPÍTULO 4 IMPLEMENTACIÓN DE LA WSN PARA LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	77
4.1 Implementación	77
4.2 Resultados.....	84
4.3 Discusión de los resultados.....	95
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	99

5.1 Conclusiones	99
5.2 Trabajo Futuro.....	100
BIBLIOGRAFÍA	102
ANEXOS 1	107
ANEXOS 2.....	112

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. 1 A) Sistema de monitoreo de la calidad del agua desarrollado en [1]. B) Sistema de monitoreo de la calidad del agua desarrollado en [13].....	13
Fig. 1. 2 Red de sensores para el monitoreo de la calidad del agua desarrollada en [15].....	14
Fig. 1. 3 Panorama general del proyecto.....	19
Fig. 1. 4 Sistema de monitoreo, protocolo de comunicación y gestión de datos.	20
Fig. 1. 5 Flujo de actividades a realizar.	20
Fig. 2. 1 Comunicación Modbus TCP/IP.....	28
Fig. 2. 2 Escala de pH.....	33
Fig. 3. 1 (a) Muestreo de datos para ver la respuesta en voltaje del sensor de pH. (b) Curva de calibración obtenida del sensor de pH.....	44
Fig. 3. 2 Familia de curvas de voltaje vs pH a diferentes temperaturas.....	45
Fig. 3. 3 Validación de resultados con buffers y potenciómetro de laboratorio.	46
Fig. 3. 4 (a) Muestreo de datos de TDS. (b) Curva de calibración para el sensor de TDS.....	48
Fig. 3. 5 (a) Muestreo de datos de temperatura. (b) Curva de calibración de temperatura.....	49
Fig. 3. 6 Diagrama de flujo del módulo correspondiente a la adquisición de datos.	51
Fig. 3. 7 Creación de variables y objetos necesarios para leer las variables del entorno de medición.	51

Fig. 3. 8 Adquisición de parámetros medidos y su almacenamiento en variables locales alojadas en RAM.....	51
Fig. 3. 9 Diagrama de flujo del módulo para el control de dirección del nodo móvil.	52
Fig. 3. 10 A) Asignación de nombre del dispositivo en el canal de comunicación creado y definición de IP del nodo estático. B) Definición de puerto de comunicación.	53
Fig. 3. 11 Canal de comunicación, dispositivo y creación de etiquetas.	54
Fig. 3. 12 Prueba de conexión entre el servidor y el sistema basado en microcontrolador del nodo estático.	54
Fig. 3. 13 Diagrama de comunicación de la WSN diseñada.....	55
Fig. 3. 14 Diagrama de flujo del sistema de comunicación del nodo móvil. ...	56
Fig. 3. 15 Definición de variables para la comunicación entre el nodo estático y el servidor, mediante el protocolo Modbus TCP/IP.....	56
Fig. 3. 16 A) Inicialización de comunicación usando Modbus TCP/IP y asignación de variables locales a variables en el servidor. B) Asignación de la información para ser enviada al servidor.	57
Fig. 3. 17 Diagrama de flujo del sistema de comunicación del nodo estático.	57
Fig. 3. 18 A) RSSI contra distancia en la configuración 1 antena incorporada- antena incorporada. B) RSSI contra distancia en la configuración 2 antena incorporada- antena externa.	60
Fig. 3. 19 Diagrama de bloques del sistema de gestión de datos.	61
Fig. 3. 20 Conexión de variables del entorno virtual con las variables recibidas por el servidor.....	61
Fig. 3. 21 Panel frontal de la interfaz gráfica.	62
Fig. 3. 22 Ventana de resumen del nodo móvil en la interfaz gráfica.....	63
Fig. 3. 23 Diagrama de flujo para el tratamiento de los datos dentro de la interfaz gráfica.	63
Fig. 3. 24 Diagrama con todas las etapas que componen la interfaz gráfica desarrollada.....	63
Fig. 3. 25 Programación a bloques para el llenado de vectores, filtrado y sumatoria de datos.	64
Fig. 3. 26 Programación a bloques para determinar el valor de cada parámetro registrado por el nodo estático.	65
Fig. 3. 27 Programación a bloques para determinar el valor de cada parámetro registrado por el nodo móvil.	65

Fig. 3. 28 Creación y llenado de la base de datos desde la interfaz desarrollada.....	66
Fig. 3. 29 Comandos de control del nodo móvil y botón para iniciar y detener el registro en la base de datos.....	66
Fig. 3. 30 Diseño en función del tamaño de las sondas de cada sensor para la terminal estática correspondiente a su cara lateral.	67
Fig. 3. 31 A) Modelo CAD renderizado del nodo estático. B) Ensamble y equipamiento del nodo estático con el sistema de monitoreo desarrollado. ..	68
Fig. 3. 32 Esquema eléctrico del sistema de monitoreo de la calidad del agua.	69
Fig. 3. 33 Diseño para la PCB del sistema de monitoreo de la calidad del agua.	69
Fig. 3. 34 A) Diseño de la hélice con la consideración angula de diseño para mejorar su tracción en el agua. B) Diseño de la proa con consideración de forma en el diseño para facilitar la ruptura de la tensión superficial y así mejorar su desplazamiento en el cuerpo de agua.	72
Fig. 3. 35 Diseño de la cara lateral del cuerpo del bote considerando el espacio necesario para albergar el banco de baterías y los sensores.	72
Fig. 3. 36 B) Modelo CAD renderizado del vehículo que compone al nodo móvil.	73
Fig. 3. 37 Esquema eléctrico del sistema de monitoreo de la calidad del agua del nodo móvil.....	74
Fig. 3. 38 Diseño para la PCB del sistema de monitoreo de la calidad del agua.	74
Fig. 4. 1 A) Área de cobertura de la red WiFi con acceso a internet en el entorno de medición 1: Laguna de CU BUAP, representada con la zona azul en el mapa. B) Ubicación aproximada con Googel Earth del nodo estático.	78
Fig. 4. 2 A) Nodo estático situado en las coordenadas 19°00'15''N, 98°12'18''O en el entorno de medición 1: Laguna de CU BUAP. B) Vista superior de la terminal estática.....	78
Fig. 4. 3 Nodos, estático y móvil, instalados en el entorno de medición 1: Laguna de CU BUAP.....	79
Fig. 4. 4 Monitoreo en tiempo real visualizado desde un smartphone utilizando la aplicación de "Escritorio Remoto"	79

Fig. 4. 5 Zona de cobertura de la WSN y posicionamiento del nodo móvil, correspondiente al campo de prueba 1 determinado con las antenas incorporadas de las tarjetas de desarrollo.	80
Fig. 4. 6 Control del vehículo diseñado utilizando un escritorio remoto desde un teléfono inteligente en donde la cámara del dispositivo es activada.....	81
Fig. 4. 7 A) Captura tomada con un dron. B) Captura tomada con una cámara de alta resolución.....	81
Fig. 4. 8 Captura tomada para visualizar una distancia aproximada del nodo móvil respecto a la estación base. B) Captura tomada con zoom.	82
Fig. 4. 9 Instrumentos especializados para medir pH, TDS, y temperatura....	82
Fig. 4. 10 Zona de cobertura de la WSN y posicionamiento del nodo móvil, correspondiente entorno de medición 2 determinado con la antena incorporada de la tarjeta de desarrollo del nodo fijo y la antena externa incorporada al nodo móvil.	83
Fig. 4. 11 A) Nodos, estático y móvil, listos para funcionar en el campo de prueba 2. B) Toma ampliada del nodo móvil en funcionamiento.	83
Fig. 4. 12 Captura amplia del nodo móvil funcionando en el campo de prueba 2.....	84
Fig. 4. 13 Monitoreo continuo de 1 hora en el entorno de medición 1 durante el 29/02, 04/03 y 05/03 de 2024. (a) Temperatura, (b) pH, (c) Turbidez, (d) Total de sólidos disueltos.....	89
Fig. 4. 14 Monitoreo simultáneo entre el nodo estático y móvil en el entorno de medición 1 en el intervalo 19:13hrs.-19:18hrs. durante el 04/03 y 05/03 de 2024. (a) Temperatura, (b) pH, (c) Turbidez, (d) Total de sólidos disueltos....	90
Fig. 4. 15 Monitoreo simultáneo entre el nodo estático y móvil en el entorno de medición 1 en el intervalo 19:22hrs.-19:27hrs. durante el 29/02, 04/03 y 05/03 de 2024. (a) Temperatura, (b) pH, (c) Turbidez, (d) Total de sólidos disueltos.....	91
Fig. 4. 16 Monitoreo continuo de 1 hora en el entorno de medición 2. durante el 29/08, 30/08 y 31/08 de 2024. (a) Temperatura, (b) pH, (c) Turbidez, (d) Total de sólidos disueltos.....	92
Fig. 4. 17 Monitoreo simultáneo entre el nodo estático y móvil en el intervalo de 13:39hrs.-13:45hrs. en el entorno de medición 2. durante el 29/08, 30/08 y 31/08 de 2024. (a) Temperatura, (b) pH, (c) Turbidez, (d) Total de sólidos disueltos.....	93
Fig. 4. 18 Monitoreo simultáneo entre el nodo estático y móvil en el intervalo de 14:09hrs.-14:15hrs. en el entorno de medición 2. durante el 29/08, 30/08 y	

31/08 de 2024. (a) Temperatura, (b) pH, (c) Turbidez, (d) Total de sólidos disueltos.....	94
---	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1 Bibliografía en torno al estado del arte de sistemas para monitorear la calidad del agua.	15
Tabla 2. 1 Comparativa entre protocolos de comunicación inalámbrica.	28
Tabla 2. 2 Especificaciones sanitarias físicas y químicas de los parámetros correspondientes a los sensores seleccionados.	32
Tabla 2. 3 Índice de calidad del agua para consumo humano en base al total de sólidos disueltos [44, 47].	37
Tabla 3. 1 Especificaciones técnicas del sensor pH-4502C.	45
Tabla 3. 2 Respuesta de voltaje en función del TDS.	47
Tabla 3. 3 Especificaciones técnicas del sensor.	48
Tabla 3. 4 Especificaciones del sensor de temperatura.	50
Tabla 3. 5 Datos de la antena incorporada en la tarjeta de desarrollo ESP32 devkit v1 [65].	58
Tabla 3. 6 RSSI promedio correspondiente a las distancias de referencia y pérdida de paquetes para la configuración 1 correspondiente al uso de las antenas integradas en el PCB.	59
Tabla 3. 7 RSSI promedio correspondiente a las distancias de referencia y pérdida de paquetes para la configuración 2 correspondiente al uso de una antena externa y una integrada.	59
Tabla 3. 8 Resumen de los modelos de vehículos acuáticos.	70

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El agua es uno de los recursos naturales fundamentales para la vida de las especies que habitan nuestro planeta, cuyo consumo depende de su disponibilidad y calidad en ríos, lagos y reservas [1], que en los últimos años ha ido disminuyendo debido a la contaminación. Es por eso por lo que hoy en día se considera de suma importancia monitorear y controlar los factores que hacen que este recurso no pueda consumirse o ponga en peligro a las especies que la habitan.

Las Redes Inalámbricas de Sensores (WSNs por sus siglas en inglés) y el Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés) están transformando nuestra manera de monitorear y gestionar diversos aspectos de la vida. Este monitoreo incluye áreas como la recreación, el agua potable, la pesca, la agricultura, la industria y las condiciones ambientales, con un enfoque particular en la calidad del agua [2, 3, 4, 5, 6]. Estos paradigmas, IoT y WSNs, permiten la implementación de redes de nodos equipados con sensores que recopilan datos sobre parámetros críticos como el pH, los sólidos disueltos totales (TDS), la turbidez, la conductividad y la temperatura, esenciales para todos los cuerpos de agua, especialmente aquellos destinados al consumo humano o animal [7, 8]. La integración del IoT facilita la transmisión y el procesamiento eficiente de estos datos, permitiendo el monitoreo y análisis en tiempo real [9, 10].

Para el desarrollo de sistemas de monitoreo de la calidad del agua se han ocupado diversos microcontroladores, desde 8 hasta 32 bits, como son los que se encuentran en las tarjetas Arduino Mega y ESP32 o incluso basados en ARM de 64 bits como el que integra la Raspberry Pi 3, que en conjunto con las variadas tecnologías de comunicación inalámbricas han logrado crear sistemas de monitoreo en tiempo real [11].

Por lo anterior, en el presente trabajo de tesis se diseñará e implementará una red inalámbrica de sensores para monitorear la calidad del agua. Dicha red constará de un vehículo capaz de desplazarse en un cuerpo de agua (nodo móvil), y de una terminal estática (nodo estático), ambas tomarán muestras de manera periódica y se mandarán los parámetros medidos a una base de datos mediante algún protocolo de comunicación inalámbrica para su posterior gestión.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Implementar una red inalámbrica de sensores que monitoree la calidad del agua de un cuerpo de agua.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Diseñar y construir un vehículo equipado con sensores que pueda desplazarse en un cuerpo de agua.
- Desarrollar e implementar una terminal estática equipada con sensores.
- Realizar el muestreo de los parámetros mínimos necesarios para determinar la calidad del agua.
- Almacenar los parámetros muestreados en una base de datos y gestionarlos para generar información visual en tablas y gráficas.

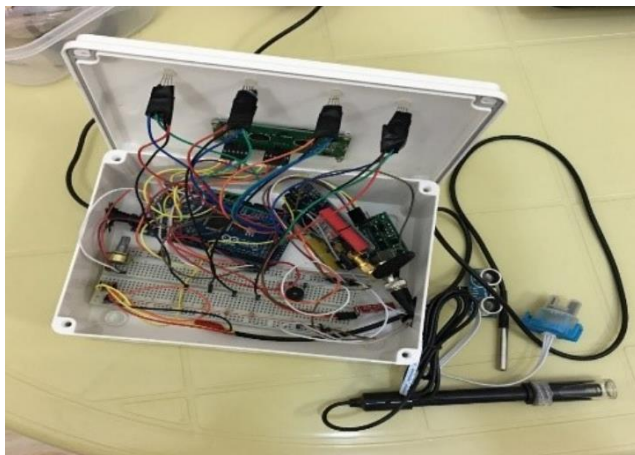
1.3 Estado del Arte

En los últimos años se han realizado proyectos para monitorear la calidad del agua, en ellos se han logrado resultados positivos en su implementación ya que se plantea el uso de diferentes tecnologías de comunicación inalámbrica dependiendo de la extensión del cuerpo de agua, además de los indicadores que van desde LEDs y buzzers, hasta alertas enviadas al celular mediante un mensaje de texto.

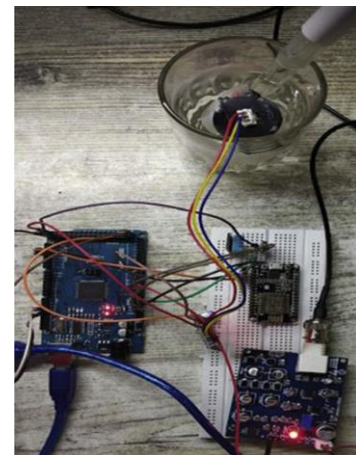
Tras una revisión en la literatura, se encontraron diversos sistemas relacionados al proyecto propuesto, a continuación, se da un repaso a los más sobresalientes, en los que se hace énfasis respecto a los parámetros medidos, tecnología de comunicación y gestión de datos.

1.3.1 Sistemas con un único punto de monitoreo

En [1], en 2019, en la Universidad de Al-Nahrain, Bagdad, se desarrolló el prototipo de un sistema capaz de medir 4 parámetros del agua, temperatura, pH, turbidez y su nivel respecto al suelo, usando un sistema basado en microcontrolador que despliega los datos medidos en una pantalla integrada en conjunto con indicadores luminosos (LED), además, el sistema cuenta con un módulo GSM para enviar información al usuario en caso de tener lecturas fuera de lo normal. Mientras que en [8], en 2020, en la Universidad de Xiamen, China, se usaron sensores para medir el pH, total de sólidos disueltos, turbiedad, y temperatura del agua usando el protocolo de comunicación Bluetooth para transmitir las mediciones a un smartphone. Por otro lado, se tiene que en [12], en 2020, los departamentos de Sistemas de Información e Informática en Indonesia realizaron un proyecto en donde se utiliza el prototipo de un vehículo operado de manera remota, equipado de 3 sensores, pH, total de sólidos disueltos y temperatura, los cuales se comunican con un servidor mediante un cable ethernet para almacenar datos, este sistema se actualiza cada hora diariamente y demostró eficacia en sus mediciones ya que cada sensor fue calibrado con herramientas de medición especializadas. Finalmente, en [13], en 2020, en el Instituto Tecnológico de Chaitanya Bharathi, India, se desarrolló un sistema de monitoreo utilizando el IoT, ya que su diseño consiste en un microcontrolador, 4 sensores, pH, turbiedad, ultrasónico, temperatura y humedad, un módulo WIFI para conectar a la nube y almacenar información, y una interfaz gráfica, Thing Speak, para la interpretación de los parámetros medidos.



A)



B)

Fig. 1. 1 A) Sistema de monitoreo de la calidad del agua desarrollado en [1]. B) Sistema de monitoreo de la calidad del agua desarrollado en [13].

1.3.2 Sistemas con múltiples puntos de monitoreo

En [14], en 2021, la Universidad de la Defensa Nacional, en colaboración con la Academia de la fuerza Aérea de Taiwan presentaron un sistema de monitoreo de la calidad del agua basado en un protocolo de comunicación de largo alcance (LoRa, por sus siglas en inglés), para una granja piscícola, en donde se midieron 5 parámetros, pH, oxígeno disuelto, salinidad, temperatura y nivel del agua. Este sistema fue capaz de respaldar los datos medidos mediante Google Spreadsheets y demostrar que es eficaz con su monitoreo en tiempo real. Mientras tanto, en [15], en 2020, en el Instituto de Tecnología de Huaiyin, en China, se desarrolló un sistema con la tecnología de comunicación Zig Bee, en donde se consideraron 3 sensores para medir pH, oxígeno disuelto y temperatura del agua, se utilizaron nodos conectados inalámbricamente a una unidad que recibe de manera serial los parámetros medidos en una computadora, en donde se procesa la información y finalmente pasa a un módulo GSM para enviar los datos recabados al usuario mediante un mensaje de texto.



Fig. 1. 2 Red de sensores para el monitoreo de la calidad del agua desarrollada en [15].

Un punto para destacar es que algunos sistemas han sido desarrollados para operar en solitario, mientras que otros han sido pensados para generar una red y así abarcar una mayor extensión del cuerpo de agua, además de enriquecer la información recabada. Respecto a la gestión de los datos medidos, algunos prototipos no cuentan con la posibilidad de almacenarlos, mientras que otros si tienen respaldo en bases de datos locales o en la nube, esto con el fin de tener acceso a la información de manera recurrente o generar información visual mediante tablas y gráficas. A continuación, se presenta una tabla en dónde se resume la bibliografía en torno al estado del arte de sistemas de monitoreo de la calidad del agua.

Tabla 1. 1 Bibliografía en torno al estado del arte de sistemas para monitorear la calidad del agua.

Referencia consultada y año	Parámetros medidos	Contribución	Pros y contras
[16]-2023	pH Temperatura TDS Nivel de agua Humedad del suelo	Red inalámbrica de sensores (WSN) con cuatro nodos diseñada para monitorear humedales ecológicos dentro de ciudades inteligentes. Facilita la recopilación y el almacenamiento de datos ambientales en una base de datos.	Pros Buena cobertura de área gracias a 4 nodos Copia de seguridad en la nube Contras: Mayor consumo de energía No se han implementado nodos móviles No tiene monitorización en tiempo real habilitada
[1]-2022	pH Temperatura Turbiedad	El sistema desarrollado comprende un único nodo fijo que monitoriza la calidad del agua y envía alertas mediante tecnología GSM.	Pros: Alertas para el usuario Representación visual (LED) de los parámetros leídos. Contras: No tiene copia de seguridad en la nube Solo un nodo No tiene monitorización en tiempo real habilitada
[14]-2021	pH Temperatura Salinidad Nivel del agua	Se diseñó una WSN para monitorear un estanque de peces, utilizando el protocolo LoRa para los nodos con sensores, cuenta con respaldo en la nube para los	Pros: Cobertura de área de largo alcance Copia de seguridad en la nube Contras: Se requiere un dispositivo adicional

		parámetros registrados.	para la carga en la nube No se permite la monitorización en tiempo real
[12]-2020	pH Temperatura TDS	El sistema se basa en un nodo cableado móvil que utiliza el protocolo Ethernet, y la puerta de enlace está conectada al servidor mediante el mismo protocolo.	Pros: Se implementó un nodo móvil Monitoreo en tiempo real Contras: Sistema cableado Solo un nodo
[10]-2019	pH Temperatura	El Sistema monitorea los parámetros cada 5 segundos y almacena los datos en un servidor local usando SQLite y el protocolo MQTT.	Pros: Monitoreo en tiempo real Respaldo en servidor local. Contras: Solo un nodo El nodo no es móvil

La Tabla 1 presenta cinco estudios cuyo objetivo principal es monitorear la calidad del agua. Estos estudios comparten similitudes notables; por ejemplo, todos ellos monitorean el pH y la temperatura de un cuerpo de agua. En [1, 14, 16], los nodos equipados con sensores son estaciones fijas, compuestas por uno a cuatro nodos que forman una Red Inalámbrica de Sensores (WSN) para monitorear la calidad del agua. En [16, 14], se utiliza WiFi para almacenar los datos recopilados en la nube, mientras que en [1], se emplea tecnología GSM para enviar alertas al usuario cuando los niveles exceden los estándares definidos del sistema. Además, [12] describe el desarrollo de un prototipo móvil, basado en un diseño de código abierto, que puede navegar por un cuerpo de agua mientras está conectado por un cable a una computadora, transmitiendo los datos registrados mediante el protocolo Ethernet. Mientras que [10] muestra un sistema basado en un punto único que habilita el monitoreo en tiempo real.

Cada sistema analizado presenta diferencias significativas, como las tecnologías utilizadas para transmitir los datos recopilados (WiFi, GSM, LoRa y Ethernet) y la cantidad de nodos en la red. Estas variaciones destacan los

diversos enfoques para el monitoreo de la calidad del agua, reflejando la adaptabilidad de la tecnología a diferentes condiciones ambientales y necesidades de monitoreo.

La WSN propuesta se destaca en el campo del monitoreo de la calidad del agua al abordar ciertas brechas que otros sistemas no han considerado. A diferencia de trabajos relacionados, la WSN combina de manera única un terminal estático con una estación móvil completamente inalámbrica, mejorando la flexibilidad y la cobertura. Cada terminal está equipada con los sensores más utilizados para pH, temperatura y sólidos disueltos totales (TDS), que se emplean estratégicamente para correlacionar con otros parámetros. Esta sinergia proporciona un espectro más amplio de información que otros sistemas, incluyendo la conductividad y la turbidez derivadas del sensor TDS, así como la concentración de amoníaco basada en lecturas de pH. El trabajo propuesto también presenta la integración de una interfaz gráfica diseñada para el monitoreo en tiempo real de parámetros y el control direccional del nodo móvil. Esta interfaz es responsable de procesar los datos recopilados por cada nodo, asegurando una experiencia de usuario fluida y eficiente. Sin lugar a duda, la WSN representa una contribución significativa al estado actual del arte, ampliando los límites del monitoreo ambiental y la adquisición de datos.

1.4 Justificación

En 2021, la Comisión Nacional del Agua en México contaba con aproximadamente 2050 sitios en donde se monitorea la calidad del agua, de los cuales, 788 corresponden a aguas superficiales, y el resto a subterráneas [17]. Dichas locaciones corresponden principalmente a los ríos a lo largo del país, así como manantiales y arroyos. Sin embargo, a pesar de contar con altas tecnologías, los monitoreos se realizan de manera presencial, mediante equipo capacitado para realizar las mediciones, lo cual lleva tiempo significativo de muestreo, que se actualiza cada 6 meses aproximadamente.

Además, es importante mencionar que el monitoreo se realiza a cuerpos de agua ajenos a centros de crianza de especies marinas, depósitos destinados a alimentar flora y fauna, y en general a otros cuerpos locales donde se desea tener control de parámetros, tales como el pH, oxígeno disuelto, temperatura y total de sólidos disueltos [13, 12, 8] para efectuar acciones oportunas, así como contrarrestar y/o prevenir su contaminación.

El desarrollo de una red inalámbrica de sensores para monitorear la calidad del agua es un avance importante, de bajo costo y confiable que puede ser escalado en diferentes campos, tales como la piscicultura, donde el monitoreo

de los parámetros antes mencionados es fundamental para mantener la crianza de peces, los depósitos de agua, en donde el monitoreo de su calidad es importante si se planea ser consumida por humanos o especies animales, así como su uso en riegos en el sector agrícola.

Una ventaja diferencial de una red inalámbrica de sensores es que se pueden obtener lecturas de los parámetros en el momento requerido, así como alertas oportunas en caso de registros fuera de los estándares [18, 19]. Además, es posible recopilar datos mediante tablas y gráficas, prevenir el uso de costosos procesos de purificación y mantenimiento, así como ahorrar tiempo y esfuerzo humano.

A pesar de la existencia de investigación y desarrollo en torno a sistemas de monitoreo de la calidad del agua, gran parte de las investigaciones se llevan a cabo fuera de México, y dado su alto grado de tendencia mundial, y efectividad, el desarrollo de un proyecto de este tipo en nuestra localidad es una oportunidad de innovación y avance tecnológico.

1.5 Descripción

La tesis propuesta se inició con un extenso estudio de los parámetros medidos más comunes que determinan la calidad en un cuerpo de agua. Posteriormente, se realizó el estudio de sistemas de monitoreo de la calidad del agua que han sido implementados con diferentes protocolos de comunicación tales como WIFI, Zig Bee, entre otros. Dichos estudios ayudaron a definir la tecnología de comunicación inalámbrica, así como los sensores más apropiados para este proyecto.

Después, se desarrolló un sistema basado en microcontroladores capaz de realizar mediciones de los parámetros que determinan la calidad del agua, para ello se incorporaron los sensores, de pH, total de sólidos disueltos y temperatura, así como el protocolo de comunicación basado en Modbus TCP/IP, WiFi y ESP-NOW. Luego se diseñó una terminal destinada a mantenerse estática en un cuerpo de agua. A continuación, se realizó el estudio de vehículos acuáticos, sus principios de funcionamiento, ventajas y limitantes, todo esto para seleccionar y diseñar el prototipo de un bote capaz de desplazarse en un cuerpo de agua. Una vez construido el navío, se evaluó su desempeño, poniendo a prueba su autonomía y movilidad, esto con el fin de generar ajustes o mejoras. Tanto el nodo estático como el móvil se equiparon con el sistema desarrollado.

Una vez equipados los nodos con el sistema de monitoreo, se diseñó una base de datos para almacenar las muestras tomadas, se estableció conexión

inalámbrica con los nodos gracias a su sistema equipado y finalmente se obtuvieron gráficas que muestran la evolución de los parámetros medidos. A continuación, en la Fig. 1. 3 se presenta el diagrama de bloques que muestra el panorama general de la red inalámbrica de sensores que se implementó.

Como se puede apreciar, el proyecto cuenta con tres partes fundamentales, el entorno de medición, la red de sensores compuesta por 2 nodos, los cuales adquieren la información desde un cuerpo de agua para posteriormente transmitir los datos a un host y llegar a la tercera parte, la visualización, en donde la información se gestiona para poder ser vista de una manera gráfica.

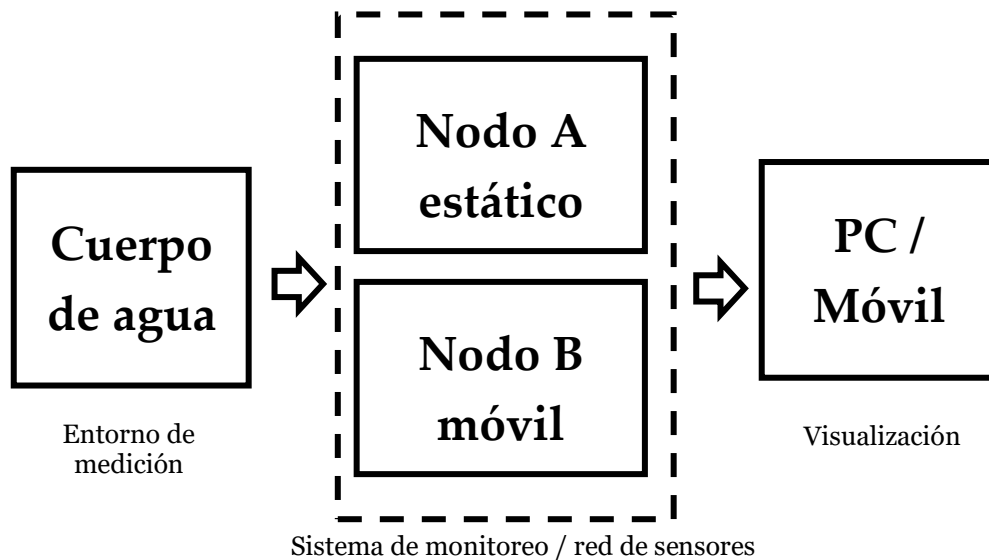


Fig. 1. 3 Panorama general del proyecto.

Después se tiene al sistema basado en microcontroladores que se equipó en cada nodo, el cual cuenta con sensores para medir los parámetros definidos, así como el módulo de comunicación inalámbrica para mandar a gestionar los datos recabados. Para el caso del nodo móvil se requiere un par de actuadores para desplazarse. Finalmente se hace la gestión necesaria usando una base de datos, así como una interfaz para poder visualizar la información recabada. El diagrama de bloques se presenta en la Fig. 1. 4.

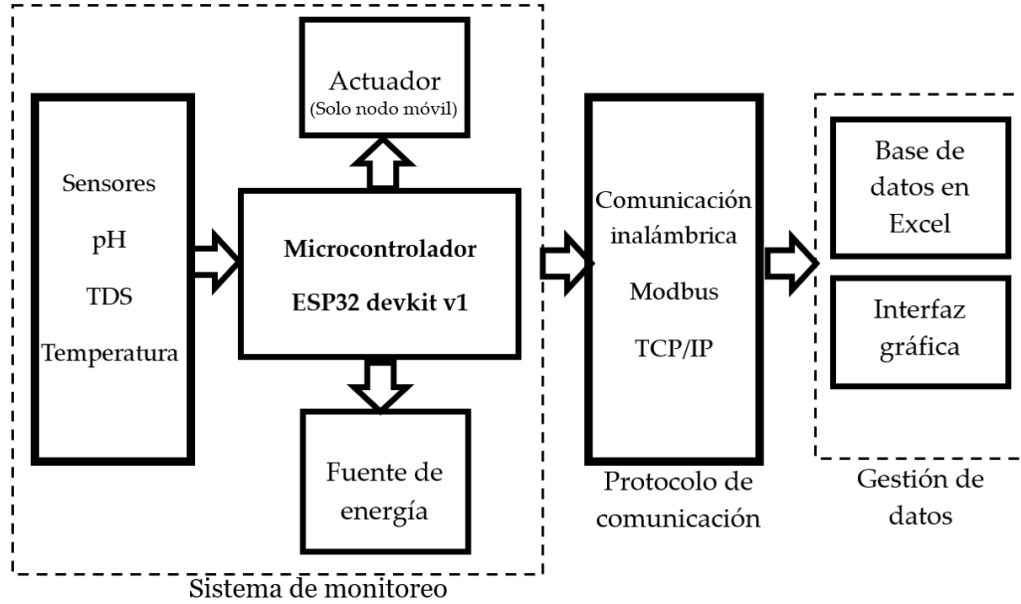


Fig. 1. 4 Sistema de monitoreo, protocolo de comunicación y gestión de datos.

El proyecto se desarrolló en el laboratorio de Caracterización de Sistemas Basados en Microondas, ubicado en la Facultad de Ciencias de la Electrónica, así como en el laboratorio de innovación de INTEL, por lo que se contó con gran infraestructura, tecnología y equipos adecuados para su debido cumplimiento. En el siguiente diagrama se muestra el flujo de actividades realizadas.



Fig. 1. 5 Flujo de actividades a realizar.

La tesis se organiza en cinco capítulos esenciales que proporcionan un enfoque integral al estudio de las redes inalámbricas de sensores (WSN) para el

monitoreo de la calidad del agua. El Capítulo 1 establece la base de la investigación, presentando la introducción, los objetivos y el estado actual del arte. El Capítulo 2 profundiza en el fundamento teórico, abordando las redes inalámbricas de sensores y su aplicación en el monitoreo de la calidad del agua. En el Capítulo 3, se detalla la arquitectura de la WSN basada en IoT, destacando aspectos cruciales como el sensado, la comunicación y la gestión de datos, así como el diseño de terminales estáticas y móviles. El Capítulo 4 se dedica a la implementación práctica de la WSN, analizando los resultados obtenidos y su relevante discusión. Finalmente, el Capítulo 5 cierra la tesis con las conclusiones derivadas del estudio y las perspectivas de trabajos futuros, marcando el camino para investigaciones subsecuentes en este campo dinámico y de vital importancia.

CAPÍTULO 2

REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES Y MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA

El agua es un recurso clave para la sostenibilidad de la civilización humana y la vida en nuestro planeta, por ello, los expertos han comenzado investigaciones para el mantenimiento y manejo de la calidad del agua [20]. Siguiendo esta tendencia, se ha iniciado un enfoque tecnológico en las investigaciones con el fin de diseñar y desarrollar sistemas capaces de sensar, medir y monitorear la calidad del agua de manera remota [21, 22].

Por lo anterior, el uso de las tecnologías de comunicación inalámbricas es imprescindible, el uso de sensores para recabar datos respecto a los parámetros de interés, la interacción con las interfaces gráficas para su interpretación y el uso de bases de datos para su manejo y recopilación. A continuación, se muestran los tópicos más relevantes que han sido utilizados para el desarrollo del presente trabajo de tesis.

2.1 Red inalámbrica de sensores (WSN)

Una Red Inalámbrica de Sensores (WSN) es una infraestructura compuesta por múltiples dispositivos capaces de recolectar datos y transmitirlos a través de conexiones inalámbricas. Esta red se caracteriza por la inclusión de una variedad de sensores diseñados para registrar parámetros ambientales. Un sensor es un aparato que reacciona a estímulos variados, como condiciones físicas o ambientales, y produce una señal eléctrica como resultado. La progresión de los sensores ha sido significativa en años recientes debido a extensas investigaciones científicas [23].

Una WSN es una red que recolecta datos y los transmite mediante una conexión inalámbrica. La información recolectada se transfiere utilizando diversos nodos y varias pasarelas. Con el progreso de la tecnología, se han establecido nuevos estándares para comprobar y balancear las condiciones ambientales para un funcionamiento rápido y confiable de estos sensores en distintos contextos y condiciones. Se reconocen cinco tipos de topologías de red, que se enumeran a continuación:

- Punto a punto: la topología punto a punto es la más sencilla de todas las topologías con un enlace directo entre dos computadoras. Esta conexión es más confiable y rápida de establecer.
- Topología de bus: la topología de bus tiene un cable largo principal que conecta todas las computadoras de la red. Este cable es la columna vertebral de la red. Una de las principales ventajas de la topología de bus es que el cable cuesta menos y es más confiable.
- Topología de estrella: en una topología de estrella, todas las computadoras están conectadas a una computadora central que se considera el centro. Este centro central puede ser una computadora u otro dispositivo que gestiona la conexión entre diferentes computadoras.
- Topología de anillo: en una topología de anillo, los datos viajan en una sola dirección. Como sugiere el nombre, las computadoras en esta red están conectadas de manera circular.
- Topología de malla: en una topología de malla, cada nodo y punto a punto tiene una conexión con todos los demás nodos. Esta conexión es directa y más confiable, pero costosa debido a la redundancia.

Para el presente trabajo, se consideró una topología de punto a punto en la que ambos nodos se encuentran conectados entre sí, pero uno sólo es la estación base que envía los datos necesarios a un servidor hospedado en una computadora.

Por otro lado, existen patrones de diseño especiales para interconectar dispositivos informáticos en una red, conocidos como topología de red. La conectividad inalámbrica es fundamental en el IoT, ya que todos los dispositivos IoT necesitan comunicarse entre sí y establecer un enlace con internet. Cada WSN contiene al menos un transceptor de radio, un microcontrolador, un circuito y una fuente de energía, como una batería o una célula solar, con un propósito espacialmente distribuido, autónomo y dedicado. Un nodo sensor de puerta de enlace en WSN desempeña el papel de la estación base para interconectar los nodos del sensor con el usuario final de forma inalámbrica. Aunque existen limitaciones y desafíos, como la capacidad de almacenamiento, la potencia de procesamiento, el alcance de la comunicación y la vida útil de la batería, la WSN afecta significativamente el desarrollo de la tecnología IoT.

2.2 Internet de las cosas

El Internet de las Cosas (IoT) es una unión de estándares, tecnologías y conexión de dispositivos en el mundo real que se comunican en el ámbito online. El funcionamiento efectivo de la WSN es esencial para IoT. Una WSN es el núcleo de la tecnología IoT. Históricamente, el sistema inalámbrico evolucionó desde el sistema de telegrafía de chispa de Marconi y los sistemas de radio (FM, AM y TV analógica) hasta la conectividad inalámbrica actual que es omnipresente 24/7 en la conectividad a gran escala entre personas. Se estima que el número de suscriptores móviles únicos supera los 5 mil millones, lo que significa que dos tercios de la población mundial se suscriben a un servicio móvil. Se espera que la próxima generación de sistemas inalámbricos nos brinde conectividad a escala tera, conectando esencialmente billones de nodos, todo con todo. Esto es lo que llamamos Internet de las Cosas. Las aplicaciones para el IoT son amplias e incluyen hogares inteligentes, ciudades inteligentes, monitoreo ambiental, aplicaciones industriales y atención médica que monitorea la salud humana dentro y fuera del cuerpo. Estas aplicaciones se basan en las capacidades de las tecnologías actuales. Mientras las aplicaciones impulsan la tecnología, la tecnología también impulsa las aplicaciones. Muchas aplicaciones nuevas se basan en tecnologías celulares. Hay más y más interesantes aplicaciones en desarrollo con el avance de la tecnología. Hasta ahora, el Internet de las Cosas es solo la idea esencial de conectar varios dispositivos y sensores entre nosotros. La conectividad, especialmente la conectividad inalámbrica, es la clave en la WSN y central para el Internet de las Cosas [24].

El Internet de las cosas, (IoT por sus siglas en inglés), hace referencia a mantener dispositivos electrónicos interconectados a través de Internet, haciendo posible acceder y controlar funciones de dichos dispositivos mediante el sensado de variables naturales o accionamiento remoto por humanos. El IoT es una tecnología innovadora y revolucionaria presente en diferentes sectores, dando apertura a una amplia variedad de aplicaciones [25].

Un sistema IoT está compuesto por 3 partes fundamentales, la capa de sensado, de red, y de aplicación. En la primera capa hay contacto directo con las variables físicas que desean ser medidas o monitoreadas, así como etapas de acondicionamiento para su interpretación, en la segunda, se lleva a cabo el acceso y transmisión de los datos recabados en la capa anterior para finalmente llegar a la tercera, en donde usuarios finales pueden gestionar, interpretar e interactuar con la información generada [26, 27].

El IoT es un fenómeno en tendencia mundial impulsado por la tecnología, que hoy en día se encuentra presente no sólo en el área de la investigación, sino

que también en los modelos de negocio, ya que el internet conecta a los negocios con los productos y posteriormente con los usuarios, haciendo posible mejores productos que se ajustan a prácticamente todas las necesidades de los consumidores [28].

Algunos de los factores tecnológicos más comunes para la adopción del IoT tanto para empresas, como para consumidores son:

- Escalabilidad: La posibilidad de mantener conectados millones de dispositivos y darle sentido a su uso.
- Manejabilidad: La administración y control de infraestructura, incluyendo firmware, sistemas operativos, aplicaciones y configuraciones de red son posibles mediante internet.
- Seguridad: uno de los puntos más importantes es la seguridad de una infraestructura IoT, donde se encuentran dispositivos, la red, servicios en la nube y cualquier otro elemento conectado.
- Confiabilidad: Indispensable cuando se toman decisiones tecnológicas, e incluso más cuando se desea accionar algún elemento mecánico mediante un dispositivo conectado o algún servicio en la nube.
- Privacidad: los datos generados en una infraestructura IoT poseen un valor para las empresas y/o el gobierno, por lo que contar con agentes especializados para salvaguardar la privacidad de la información es de suma importancia.
- Estandarización: Debido a la necesidad de conectar una amplia variedad de dispositivos para interoperar en una red requiere estándares para lograr la comunicación, el intercambio de datos, así como mantener la privacidad en el proceso.

2.3 Tecnologías y protocolos de comunicación inalámbrica

Las tecnologías de comunicación inalámbricas son aquellas que permiten transmitir información sin necesidad de cables o hilos conductores. Estas tecnologías se basan en el uso de ondas electromagnéticas, como las de radio, microondas, infrarrojas, ópticas o satelitales, que se propagan por el aire o el espacio. Algunos ejemplos de tecnologías de comunicación inalámbricas son el Wi-Fi, el Bluetooth, el NFC, el GPS, el 5G y el Li-Fi.

Los protocolos de comunicación son conjuntos de reglas y normas que permiten a los dispositivos intercambiar información de manera efectiva. Entre

las tecnologías de comunicación, se diferencian principalmente en dos categorías: inalámbricas y cableadas. Las tecnologías inalámbricas, como Wi-Fi y Bluetooth, utilizan ondas de radio para transmitir datos sin necesidad de cables físicos, ofreciendo flexibilidad y movilidad. Por otro lado, los protocolos TCP/IP y Modbus TCP/IP son fundamentales en la estructura de la comunicación en redes. TCP/IP es el conjunto de protocolos de Internet que facilita la comunicación entre dispositivos en la red mundial, mientras que Modbus TCP/IP es una variante que adapta el protocolo Modbus para su uso en redes TCP/IP, comúnmente utilizado en sistemas de automatización industrial. Ambos protocolos son esenciales para la transmisión de datos confiable y eficiente en sus respectivos ámbitos de aplicación.

2.3.1 WiFi

El WiFi es una tecnología de red inalámbrica mediante la cual múltiples dispositivos, tales como computadoras, de escritorio y portátiles, dispositivos móviles, como teléfonos inteligentes y accesorios, así como otros equipos inteligentes como impresoras y electrodomésticos, pueden interactuar con internet. Hace posible el intercambio de información entre dichos dispositivos y de esta manera establecer una red [29].

Este tipo de tecnología está basado en el estándar IEEE 802.11, y desde el punto de vista técnico, dicho estándar define los protocolos que permiten la comunicación con los dispositivos inalámbricos actuales que admiten wifi, incluidos routers y puntos de acceso inalámbrico. Los puntos de acceso inalámbrico son compatibles con diferentes estándares IEEE. Cada estándar es una modificación que recibe aprobación después de cierto tiempo. Los estándares funcionan con diversas frecuencias, proporcionan distintos anchos de banda y admiten distintas cantidades de canales.

2.3.2 Protocolo TCP/IP

En la actualidad existen diferentes protocolos básicos de comunicación de red, algunos de ellos son el Protocolo de Internet (IP), el Protocolo de Datagramas de Usuario (UDP) y el Protocolo de Control de Transmisión (TCP). El nombre TCP/IP proviene de dos de los protocolos más conocidos del conjunto de protocolos de Internet, el Protocolo de Control de Transmisión y el Protocolo de Internet. Con TCP/IP puede comunicarse a través de redes individuales o redes interconectadas (Internet), además de que proporciona una

interfaz de usuario simple que oculta las complejidades de garantizar comunicaciones de red confiables [30].

El protocolo de Internet (IP) es el sistema de direcciones de Internet y tiene la función principal de entregar paquetes de información desde un dispositivo de origen a un dispositivo de destino. IP no gestiona el orden de los paquetes ni la verificación de errores, esta funcionalidad requiere otro protocolo, normalmente TCP. La relación entre los protocolos TCP e IP es similar a enviar a alguien un mensaje escrito en un rompecabezas por correo postal. El protocolo de Internet garantiza que las piezas lleguen a su dirección de destino. Por su parte, el protocolo TCP sería como la persona que ordena las piezas del rompecabezas en el otro lado. IP es un protocolo sin conexión, lo que significa que cada unidad de datos se aborda individualmente y se enruta desde el dispositivo de origen al dispositivo de destino, que no envía una confirmación de vuelta al origen. Ahí es donde entran en juego protocolos como el TCP. Este último se utiliza junto con el protocolo de Internet para mantener una conexión entre el remitente y el destino y para garantizar el orden del paquete.

TCP es un protocolo de transporte orientado a la conexión que envía datos como un flujo de bytes sin estructura. Utiliza números de secuencia y mensajes de acuse de recibo para proporcionar información de entrega y puede retransmitir datos perdidos. También puede reconocer y descartar mensajes duplicados y emplear mecanismos de control de flujo para ralentizar la transferencia de datos si es necesario. Todas estas características hacen que TCP sea un protocolo de transporte confiable de extremo a extremo [31].

2.3.3 Protocolo Modbus TCP/IP

El protocolo Modbus es un lenguaje común utilizado para implementar controladores electrónicos. A través de este protocolo, los controladores pueden comunicarse entre sí y controlar otros dispositivos conectados a la red, además, existen dispositivos de control manufacturados por diversas empresas que pueden conectarse fácilmente generando una red industrial de monitoreo centralizado. Algunos equipos diseñados especialmente para comunicarse usando este protocolo son PLC, DCS, y en los últimos años, dispositivos inteligentes para medir variables físicas o controlar otros dispositivos [32].

El protocolo Modbus TCP/IP se compone de la integración del protocolo Modbus en el protocolo TCP/IP. Utiliza tecnología de comunicación maestro-esclavo, por lo que en un sistema se tendrán al menos 2 dispositivos, el maestro Modbus y el esclavo Modbus. Las principales funciones del primero de ellos son generar mensajes de solicitud, recibirlos y enviarlos al segundo, así como

analizarlos. Por otro lado, el esclavo Modbus se encarga de atender las solicitudes generadas por el maestro, almacenar y analizar los mensajes para finalmente enviar mensajes de respuesta [33]. A continuación, en la Fig. 2. 1 se presenta un diagrama de la comunicación Modbus TCP/IP.

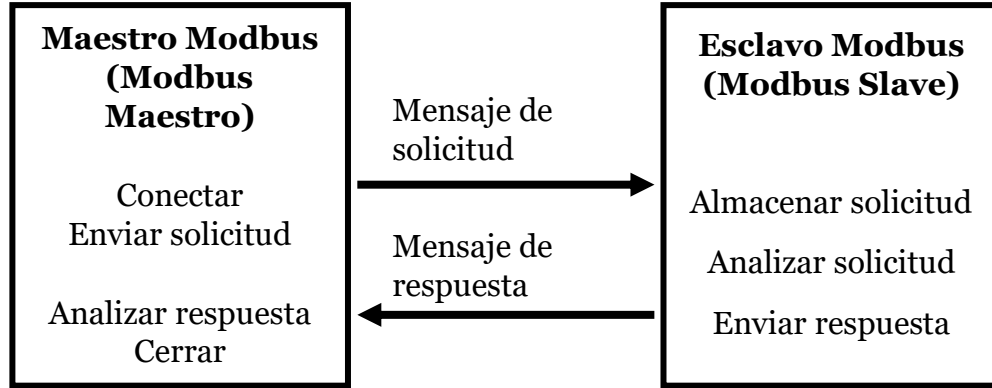


Fig. 2. 1 Comunicación Modbus TCP/IP.

En seguida, se muestra una tabla comparativa que muestra los protocolos de comunicación inalámbrica estudiados.

Tabla 2. 1 Comparativa entre protocolos de comunicación inalámbrica.

Protocolo	Frecuencia de operación	Rango de alcance	Información adicional
WiFi [29]	2.4GHz, 5GHz,	Hasta 250m con WiFi 6	Tasa de transferencia de datos que alcanza el orden de Gbps. Se puede extender el alcance mediante nodos adicionales. Acceso directo a internet.
TCP/IP [30, 31]	2.4GHz, 5GHz, adaptable a la red en la que se encuentre	En 2.4GHz hasta 90m En 5GHz hasta 30m	Se utiliza para realizar la comunicación entre la red informática. Tiene el objetivo de entregar paquetes de datos entre dispositivos de origen y destino, utilizando información de direcciones.
Modbus TCP/IP [32, 33]	2.4GHz, 5GHz, adaptable a la	En 2.4GHz hasta 90m En 5GHz hasta 30m	Para sistemas más complejos en donde se requieren más nodos.

	red en la que se encuentre		Independencia de recepción de datos gracias a la creación de etiquetas. Escalable para aplicaciones simples, automatización e industria.
ZigBee [34]	868MHz, 915MHz, 2.4 GHz	10m – 75m con suficientes nodos	Tecnología inalámbrica de corto alcance Bajo consumo de energía. Uso en seguridad y automatización (domótica). Baja tasa de envío de datos. Hasta 255 nodos. 20kB/s
LoRa	150MHz – 1GHz	2km – 15km	Tolerancia a interferencias. Se utiliza para comunicar y administrar dispositivos LoRa y se compone principalmente de gateways y nodos. Puede usarse para grandes extensiones. Hasta 255 bytes

Como se puede observar en la tabla anterior, el protocolo Modbus es más utilizado para tareas complejas en donde se involucran varios sensores, así como nodos, por lo que se decidió trabajar con él. Además, gracias a su integración con una red WiFi el alcance que puede lograrse en un cuerpo de agua es suficiente, confiable y adecuado para enviar los datos a la nube.

2.4 Calidad del agua

El agua es un recurso fundamental en la tierra para todos los organismos vivos, para la salud humana, para la producción de productos en el sector alimenticio y para una amplia variedad de procesos industriales [35]. Sin embargo, con el acelerado crecimiento de la población mundial y su desarrollo socioeconómico, tanto su uso como su escasez están aumentando drásticamente [36].

La considerable exposición a la contaminación y polución constituye la principal causa del deterioro de la calidad del agua, la cual puede deberse a

fenómenos naturales, así como a actividades asociadas a los humanos [20]. Algunos factores naturales que influyen en la calidad del agua son hidrológicos, atmosféricos, climatológicos, topográficos y litológicos [37]. Por otro lado, las actividades humanas que afectan negativamente la calidad del agua incluyen la minería, ganadería, agricultura, producción y eliminación de aguas residuales, así como la erosión del suelo debido al cambio de uso de la tierra y la contaminación por metales pesados [38].

Monitorear la calidad del agua ayuda a la población para evaluar, predecir y controlar su contaminación y proporciona un medio tangible o estadístico para planificar el uso sostenible de los recursos hídricos [39]. Sin embargo, en los últimos años, los países en desarrollo se han enfrentado a importantes problemas en la preservación de la calidad del agua cuando se trata de mejorar el suministro y saneamiento de este recurso [40].

La calidad del agua es fundamental para asegurar la salud y desarrollo de las especies que la habitan [41]. Particularmente, parámetros como la temperatura y el pH pueden afectar el metabolismo, el calor corporal, lo que puede llegar a causar enfermedades o incluso la muerte. Por lo tanto, es importante monitorear los cuerpos de agua y tratarlos de manera oportuna para lograr los parámetros óptimos, ya sea para la crianza de peces, su uso en el sector agrícola o su consumo por humanos y especies animales [42, 43].

2.4.1 Parámetros más priorizados en el IoT para determinar la calidad del agua

En la actualidad, el IoT se encuentra presente en prácticamente todas las áreas de estudio, una de ellas el análisis y comprensión de la calidad del agua, la cual depende de múltiples parámetros físicos, químicos y biológicos que pueden variar según el contexto y el uso que se le dé al cuerpo de agua. Por eso, es importante identificar cuáles son los parámetros más priorizados en el IoT para determinar su calidad, según el tipo de fuente, el objetivo del análisis y los requisitos normativos.

Algunos de los parámetros más comunes que se miden en el IoT para evaluar la calidad del agua son los que se enlistan a continuación [7]:

- Temperatura: influye en la solubilidad de los gases y las sustancias disueltas, así como en la actividad biológica y química del agua.
- PH: indica el grado de acidez o alcalinidad del agua, lo que afecta a la corrosión, la precipitación y la disponibilidad de nutrientes.

- Conductividad eléctrica: mide la capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica, lo que depende de la concentración y el tipo de sales disueltas.
- Total de sólidos disueltos: se refieren a la cantidad de minerales, metales, materia orgánica y sales que se disuelven en un determinado volumen de agua
- Oxígeno disuelto: refleja el nivel de oxigenación del agua, lo que determina la capacidad de soportar vida acuática y la presencia de procesos de oxidación o reducción.
- Turbidez: mide la cantidad de partículas suspendidas en el agua, lo que afecta a la transparencia, el color y la penetración de la luz.
- Clorofila: indica la cantidad de algas presentes en el agua, lo que puede provocar eutrofización, malos olores y alteraciones en el equilibrio ecológico.
- Nitratos y fosfatos: son nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas acuáticas, pero su exceso puede causar eutrofización, contaminación por nitratos y desequilibrios en el ciclo del nitrógeno y el fósforo.
- Coliformes fecales: son bacterias que provienen de las heces de los animales y los humanos, y que indican la presencia de contaminación fecal y el riesgo de enfermedades infecciosas.

Dicho lo anterior, para el presente proyecto de tesis, se seleccionaron 4 parámetros a monitorear, pH, temperatura, total de sólidos disueltos y turbidez. Esto en base a la revisión de la NOM-127-SSA1-2021 [44], en donde se enlistan los órdenes de importancia, así como la revisión en la literatura respecto a sensores usados en sistemas IoT y revisión en el mercado respecto a costos y disponibilidad.

2.4.2 Normas mexicanas sobre la calidad del agua

El abastecimiento de agua con una calidad adecuada para uso y consumo humano es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades, para lo cual se requiere establecer y mantener actualizados los límites permisibles en cuanto a sus características físicas, químicas, microbiológicas, y radiactivas, con el fin de asegurar y preservar la calidad de este recurso para su

entrega a consumidores por medio de los sistemas de abastecimiento de agua tanto públicos como privados.

Por tales razones la Secretaría de Salud, propuso la emisión de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, con la finalidad de establecer un eficaz control sanitario del agua que se somete a tratamientos de potabilización a efecto de hacerla apta para uso y consumo humano, acorde a las necesidades actuales. Esta norma tiene como objetivos establecer los límites permisibles de calidad que debe cumplir el agua para uso y consumo humano, además, establece que se trata de una norma de observancia obligatoria en el territorio nacional aplicable para los organismos responsables de los sistemas de abastecimiento de agua del sector público y privado, quedando exento su uso en aguas residuales tratadas [44].

De esta manera, la norma establece los límites permisibles para ciertos parámetros que poseen los cuerpos de agua, entre los que se encuentra el pH, el total de sólidos disueltos, la temperatura y la turbidez, los cuales corresponden a los sensores seleccionados para el desarrollo del presente trabajo de tesis. A continuación, se presenta una tabla que recopila la información respecto a las propiedades físicas y químicas del agua, sus límites permisibles y sus unidades de medida, todo ello referente al territorio mexicano.

Tabla 2. 2 Especificaciones sanitarias físicas y químicas de los parámetros correspondientes a los sensores seleccionados.

Parámetros	Límite permisible	Unidades
Potencial de Hidrógeno (pH)	6.5 a 8.5	Unidades de pH
Turbiedad	4.0	UNT (Unidad Nefelométrica de Turbiedad)
Sólidos disueltos totales	1000.0	mg/L
Temperatura	Promedio de 35	Grados centígrados (°C)

2.4.3 PH

El potencial de Hidrógeno (pH, por sus siglas en inglés) mide la concentración de Hidrógeno (H^+) para determinar la acidez o la alcalinidad de una solución. Su escala está determinada de manera logarítmica debido a que puede variar en rangos extremadamente amplios, y va desde 0 hasta 14, siendo

0 el más ácido, 14 el más alcalino y 7 el neutro [45]. El pH se mide con diferentes métodos, como el uso de indicadores químicos, tiras reactivas o medidores electrónicos basados en electrodos de vidrio. El pH sirve para conocer las propiedades y el comportamiento de las sustancias, así como para controlar procesos químicos, biológicos e industriales [46]. En la Fig. 2. 2 se muestra la escala de pH y su correspondencia respecto a la concentración de hidrógeno.

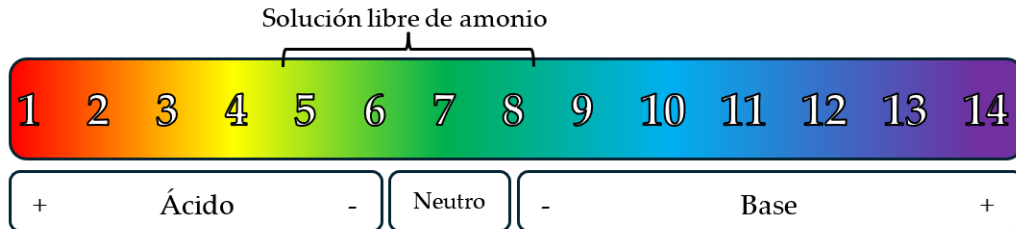


Fig. 2. 2 Escala de pH.

Como se puede apreciar en la figura anterior, la escala de pH también aporta información relevante respecto a la concentración de amonio, según lo enuncia la NOM-127-SSA1-2021 [44], en donde se establece que en rangos de pH de entre 5 y 8, la solución está libre de este compuesto.

2.4.4 Temperatura

La temperatura del agua es uno de los parámetros más importantes ya que influye directamente en sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Es fundamental monitorear la temperatura del agua para lograr el desarrollo de los organismos acuáticos, así como su uso humano, agrícola e industrial. Algunos de los factores que afectan dicha propiedad son el clima, la radiación solar, la profundidad, altitud y el caudal de los cuerpos de agua [47]. A continuación, se enlistan algunas afecciones que tiene esta propiedad respecto al agua [48].

- **Influencia en la vida acuática:** La temperatura del agua afecta las funciones de los organismos acuáticos. Por ejemplo, puede influir en la supervivencia de la fauna y flora acuáticas. Además, regula los tipos y tipos de vida acuática que viven en ella.
- **Química del agua:** La temperatura afecta la química del agua. Por ejemplo, influye en la cantidad de oxígeno que se puede disolver en el agua, lo cual es crucial para la supervivencia de los organismos acuáticos.

- **Procesos biológicos:** La temperatura del agua puede afectar la velocidad de fotosíntesis de las algas y otras plantas acuáticas, así como la velocidad metabólica de los organismos.
- **Sensibilidad a contaminantes:** La temperatura puede afectar la sensibilidad de los organismos a desechos tóxicos, parásitos y enfermedades.
- **Reproducción y migración:** La temperatura del agua puede influir en las épocas de reproducción, migración y estivación de organismos acuáticos.
- **Consumo humano y uso recreativo:** La temperatura del agua puede influir en la calidad del agua para el consumo humano y en el rendimiento de los sistemas de generación de energía hidroeléctrica. Además, puede tener un impacto en la calidad del agua para uso recreativo.

Por lo tanto, medir y controlar la temperatura del agua es esencial para mantener una alta calidad del agua y proteger los ecosistemas acuáticos, según la NOM-127-SSA1-2021 [44], el límite permisible para el consumo humano ronda en un promedio de 35° C, por lo que se tiene como referencia al momento de realizar mediciones de este parámetro, con el sistema que se desarrolla en la presente tesis.

2.4.5 Total de sólidos disueltos

El total de sólidos disueltos (TDS, por sus siglas en inglés) es la medida de todas las sustancias orgánicas e inorgánicas disueltas en un líquido determinado, que revela la proporción de diferentes sólidos. El total de sólidos disueltos se expresan en miligramos por litro (mg/L) o partes por millón (ppm). Los TDS se pueden medir mediante un medidor electrónico o mediante un método gravimétrico que consiste en evaporar una muestra de agua y pesar el residuo seco. Los TDS se utilizan para evaluar la calidad del agua potable, las aguas residuales, las aguas naturales y las aguas tratadas [49, 50].

Los niveles de TDS en el agua tienen implicaciones para la salud humana, el medio ambiente y las aplicaciones industriales. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el nivel óptimo de TDS en el agua potable es de 300 mg/L o menos. Un nivel superior a 1200 mg/L se considera inaceptable. Un nivel bajo de TDS puede indicar una falta de minerales esenciales para la salud, mientras que un nivel alto puede indicar una presencia excesiva de contaminantes nocivos. Además, un nivel alto de TDS puede afectar al sabor, al olor y al

aspecto del agua. Por otro lado, un nivel bajo de TDS es deseable para las aplicaciones industriales que requieren agua pura, como la producción farmacéutica, la electrónica o la generación de vapor. Asimismo, un nivel bajo de TDS es beneficioso para el medio ambiente, ya que reduce la salinidad y la conductividad eléctrica del agua, lo que favorece la vida acuática y la conservación de los ecosistemas [44, 47].

Además, existe una relación entre el TDS y la conductividad eléctrica, esta se encuentra dada por la siguiente ecuación [51, 52].

$$500ppm \approx 1EC \quad (1)$$

Donde $1EC$ se mide en Siemens (S) por metro (m) y equivale a $1000 \frac{mS}{cm}$

De esta manera, es posible calcular una aproximación de la conductividad eléctrica del agua a partir de la obtención del total de sólidos disueltos, en donde se tiene que cuanto mayor sea la cantidad de sales disueltas en el agua, mayor será el valor de la conductividad eléctrica.

2.4.6 Turbidez

La turbidez del agua es una propiedad óptica que provoca que la luz se disperse y absorba, en lugar de ser transmitida. Esto se debe a la presencia de partículas en suspensión, las cuales pueden ser invisibles a la vista, como el fitoplancton, partículas de arcillas, entre otros. Sin embargo, estas partículas tienen el tamaño suficiente para interactuar con la luz. Además, es un parámetro de referencia de la calidad del agua en todos los entornos, desde una instalación municipal de agua potable hasta para el control ambiental. La materia suspendida (sólidos, algas, etc.) en el agua reduce la eficacia de los productos químicos desinfectantes y pueden actuar como un portador de bacterias y parásitos. Además, puede afectar negativamente a los organismos acuáticos [53].

La turbidez se mide en Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU, por sus siglas en inglés). También existen otras unidades para medir la turbidez como FTU (Formazin Turbidity Units), FNU (Formazin Nephelometric Units), y JTU (Jackson Turbidity Units) [54]. Existe una relación entre la turbidez del agua y el total de sólidos disueltos, la cual corresponde a la siguiente equivalencia según fabricantes especializados en la medición de dicho parámetro en cuerpos de agua [55]:

$$1 \frac{mg}{L} \approx 3NTU \quad (2)$$

Por lo tanto, también es posible calcular una aproximación de unidades Nefelométricas de turbidez a partir del monitoreo del total de sólidos disueltos en un cuerpo de agua.

2.4.7 Índices de la calidad del agua

Los índices para determinar la calidad del agua en México son herramientas que permiten evaluar el estado de los recursos hídricos y su aptitud para diferentes usos. Estos índices se basan en el análisis de parámetros físicos, químicos y biológicos que reflejan el grado de contaminación o alteración del agua. Algunos de los índices más utilizados según la Comisión Nacional del Agua y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales en México [17]:

1. Índice de Calidad del Agua (ICA): Es un indicador que integra 9 parámetros (temperatura, pH, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, sólidos suspendidos totales, nitratos, fosfatos, coliformes fecales y conductividad eléctrica) y los pondera según su importancia relativa. El ICA se expresa en una escala de 0 a 100, donde 0 representa la peor calidad y 100 la mejor.
2. Índice de Calidad del Agua para Uso Agrícola (ICAA): Es un indicador que evalúa la aptitud del agua para el riego agrícola, considerando 4 parámetros (sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica, sodio y boro). El ICAA se expresa en una escala de 0 a 100, donde 0 representa la peor calidad y 100 la mejor.
3. Índice de Calidad del Agua para Uso Pecuario (ICAP): Es un indicador que evalúa la aptitud del agua para el abrevadero de animales, considerando 5 parámetros (sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica, nitratos, sulfatos y cloruros). El ICAP se expresa en una escala de 0 a 100, donde 0 representa la peor calidad y 100 la mejor.

Además, la OMS establece un índice de calidad del agua basado en la medición de total de sólidos disueltos, en donde se establece lo enunciado en la siguiente tabla, que además coincide con los límites permisibles de este parámetro estipulado en la NOM-127-SSA1-2021 [44, 47].

Tabla 2. 3 Índice de calidad del agua para consumo humano en base al total de sólidos disueltos [44, 47].

Total de sólidos disueltos (mg/L)	Índice
Menor a 300	Excelente
300-600	Bueno
600-900	Regular
900-1200	Pobre
Mayor a 1200	Inaceptable

Como se puede observar en el ICA, se manejan 3 de los parámetros considerados en presente proyecto, pH, temperatura y sólidos disueltos totales, y en el ICAA e ICAP 2 de ellos, total de sólidos disueltos y conductividad (que puede ser determinada a partir del TDS como se mostró en la sección 2.3.5). Por lo tanto, el índice determinado por el TDS es el que se usará en el sistema desarrollado sin dejar de lado los otros parámetros con los que se determinará información relevante apegada a la NOM-127-SSA1-2021 y otras fuentes oficiales consultadas [44, 47].

2.5 Interfaz gráfica

Las interfaces gráficas son una forma de interacción entre el usuario y el sistema informático, que se basa en elementos visuales como ventanas, botones, menús, iconos, etc. Estos elementos permiten al usuario realizar acciones sobre el sistema de forma intuitiva y sencilla, sin necesidad de conocer el lenguaje de programación o los comandos internos del sistema. Las interfaces gráficas facilitan la usabilidad y la accesibilidad de las aplicaciones informáticas, así como su diseño y estética.

2.5.1 LabVIEW

El entorno de programación LabVIEW está basado en elementos gráficos, así como bloques que simplifican el proceso de codificación y permiten al usuario enfocarse en su problema de ingeniería. Además, está diseñado para una fácil integración con el hardware, lo que hace posible construir sistemas de adquisición de datos y su posterior gestión para obtener información clara y precisa mediante la utilización de tablas, imágenes, así como otros elementos gráficos que permiten al usuario final una interacción amigable y fluida [56].

El software cuenta con una amplia variedad de bloques, además de ofrecer la posibilidad de crear estructuras propias completamente personalizadas, es decir que es posible diseñar bloques con entradas y salidas que cumplan una función específica y que puede integrarse con las herramientas incorporadas del sistema. Por otro lado, se pueden integrar diferentes diseños desarrollados en LabVIEW para crear un proyecto más grande y tan fácil o complejo como se desee, asegurando siempre la simplicidad de uso para el usuario final.

En el desarrollo del presente trabajo de tesis se seleccionó este software sobre otros ya que LabVIEW es una excelente opción para el diseño de interfaces que reciben datos de sensores, grafican en tiempo real y generan bases de datos debido a su enfoque gráfico y facilidad de uso. A diferencia de MATLAB, que requiere programación textual, LabVIEW utiliza un entorno de programación visual que permite a los usuarios crear aplicaciones mediante el arrastre y colocación de bloques funcionales. Esto no solo acelera el desarrollo, sino que también reduce la posibilidad de errores de codificación. Además, LabVIEW está específicamente diseñado para aplicaciones de adquisición de datos y control de instrumentos, ofreciendo una integración más directa y eficiente con hardware de sensores. Su capacidad para manejar múltiples tareas en tiempo real y su amplia biblioteca de herramientas para análisis de datos y generación de informes lo convierten en una solución más intuitiva y robusta para este tipo de aplicaciones.

2.6 Microcontroladores

Un microcontrolador, también llamado controlador embebido, es una computadora integrada en un solo chip, ya que incorpora los 3 bloques necesarios para poder operar, los cuales son la memoria de programa, memoria de datos y puertos de entrada y salida, sin embargo, existen microcontroladores más sofisticados que cuentan con otros bloques adicionales como temporizadores, contadores, y convertidores analógico-digital (ADC, por sus siglas en inglés). Todos los microcontroladores operan en base a un conjunto de instrucciones almacenado en su memoria, y su funcionamiento parte de leer las instrucciones una por una desde el bloque de memoria de programa, para proceder a decodificar dicha instrucción y finalmente ejecutar la operación requerida [57].

Como ya se ha mencionado, estos dispositivos funcionan a partir del programa almacenado en su memoria, por lo que es posible llevar a cabo el proceso de programación de diferentes maneras. Tradicionalmente se tiene el lenguaje de ensamblador que, a pesar de ser rápido en su ejecución, tiene la desventaja de ser diferente para cada tipo de microcontrolador, haciendo difícil

la transición entre dispositivos de diferentes firmas. Por otro lado, se tienen los lenguajes de alto nivel entre los que se encuentran BASIC, PASCAL o C, con los que codificar programas extensos y complejos es mucho más fácil [57].

En la actualidad, los microcontroladores se encuentran presentes en prácticamente todos los electrodomésticos, tales como sistemas de sonido, consolas de video juegos, lavadoras y hornos de microondas. Además, su gran adaptabilidad y escalabilidad de uso los hace ideales para usarlos en otras áreas como la industria automotriz, así como en el ámbito militar, así como en comunicaciones que es el área en donde se enfocará su uso para la presente tesis.

2.6.1 Tarjeta de desarrollo ESP32 DEVKIT V1

La ESP32 Devkit v1 es una tarjeta de desarrollo basada en el microcontrolador ESP32, que ofrece una solución integrada para aplicaciones de Internet de las cosas (IoT), robótica, domótica y más [58]. Entre sus principales características se encuentran:

- Un procesador de doble núcleo que puede funcionar hasta a 240 MHz, con un rendimiento de hasta 600 DMIPS.
- Una memoria flash integrada de 4 MB y una memoria RAM de 520 KB, que se pueden ampliar mediante una ranura para tarjetas microSD.
- Una conectividad inalámbrica de alta velocidad, que incluye Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth 4.2 y BLE (Bluetooth de bajo consumo).
- Una gran variedad de interfaces periféricas, como GPIO, UART, SPI, I2C, I2S, ADC, DAC, PWM y más.
- Un bajo consumo de energía, que permite alimentar la tarjeta con una batería recargable o un panel solar.

La ESP32 Devkit v1 es superior a otras tarjetas de desarrollo por su versatilidad, potencia y precio. Permite crear proyectos innovadores y complejos con facilidad, aprovechando las ventajas del IoT y la inteligencia artificial. Además, cuenta con una amplia comunidad de usuarios y desarrolladores que ofrecen soporte, tutoriales y librerías para facilitar el aprendizaje y la programación.

2.7 Base de datos y hojas de cálculo

Una base de datos es una recopilación organizada de información o datos estructurados, que normalmente se almacena de forma electrónica en un sistema informático. Generalmente está controlada por un sistema de gestión de bases de datos (DBMS por sus siglas en inglés). Los datos y el DBMS, junto con las aplicaciones asociadas, se conocen como sistema de bases de datos. Los datos se utilizan como estructuras de filas y columnas en tablas para aumentar la eficacia del procesamiento y la consulta de datos. La mayoría de las bases de datos utilizan un lenguaje de consulta estructurada (SQL) para escribir y consultar datos [59].

Las bases de datos han evolucionado drásticamente desde su inicio en la década de 1960. Han pasado de ser medios de almacenamiento basado en modelos de árbol hasta modelos orientados a objetos, en 1990, para finalmente llegar a la actualidad como medios de almacenamiento masivo basado en la nube, las cuales se encuentran abriendo nuevos horizontes en lo que respecta a la forma en la que se recopilan, se almacenan, se gestionan y se utilizan los datos.

Actualmente, tanto las bases de datos como las hojas de cálculo son los medios más comunes y cómodos para almacenar información, sin embargo, existen algunas diferencias importantes, las cuales se enlistan a continuación.

La manera en que se almacenan y se manipulan los datos.

Los usuarios que pueden acceder a los datos.

La cantidad de datos que pueden almacenarse.

Las hojas de cálculo se diseñaron originalmente para un usuario y sus características así lo reflejan. Son perfectas para un único usuario o para un pequeño número de usuarios que no necesiten hacer una gran manipulación de datos increíblemente complicada. Las bases de datos, por otro lado, están diseñadas para contener recopilaciones mucho más grandes de información organizada, a veces en cantidades masivas. Las bases de datos permiten que muchos usuarios accedan y consulten los datos de forma rápida y segura al mismo tiempo mediante una lógica y un lenguaje muy complejos [60].

Las bases de datos locales, también conocidas como bases de datos centralizadas son colecciones de información estructurada o no estructurada que se encuentran en un solo dispositivo físico, es decir, se utiliza una CPU individual, una máquina y un entorno de trabajo que no depende del uso de otros ordenadores. De esta manera, en un mismo lugar se encuentran los datos, el software que los gestiona y la posibilidad de que existan dispositivos

adicionales siempre dependiendo del principal como método de acceso a la consulta o actualización de la información [61, 62].

Una base de datos en la nube es una recopilación de datos, estructurados o no estructurados, que reside en una plataforma de cloud computing privada, pública o híbrida. Existen dos tipos de modelos de bases de datos en la nube: el modelo tradicional y el de base de datos como servicios (database as a service, DBaaS, por sus siglas en inglés). Con DBaaS, un proveedor de servicios realiza las tareas administrativas y el mantenimiento [61, 62].

CAPÍTULO 3

ARQUITECTURA DE RED INALÁMBRICA DE SENSORES PARA MONITOREO DE AGUA BASADO EN IoT

3.1 Desarrollo metodológico

En este capítulo se presenta el desarrollo experimental del proyecto, el cual es fundamental para comprender la estructura y su funcionamiento. Inicia con la etapa de adquisición de datos, un proceso crítico donde se seleccionan y caracterizan los sensores adecuados para la recolección de información. Estos se integran mediante la tarjeta de desarrollo ESP32, que actúa como el cerebro de la operación. La segunda fase se centra en la comunicación, en donde se establece una red inalámbrica de sensores eficiente que usa el IoT para la transmisión y almacenamiento de los datos. Se detallan los protocolos de comunicación que permiten la interacción entre el hardware y el software, asegurando la transferencia de datos precisa y confiable. La fase final aborda la gestión de la información recopilada, destacando la importancia de una interfaz gráfica intuitiva para el usuario, el uso de técnicas de filtrado de datos para mejorar la calidad de la información y la generación de una base de datos que sirva como fundamento para el análisis y la toma de decisiones.

3.1.1 Adquisición de datos

En este apartado se detalla la metodología seguida para caracterizar cada sensor, así como su instrumentación para acondicionar la señal y finalmente lograr la adquisición de los datos. Los datos adquiridos fueron comparados con los datos registrados con instrumental especializado. De esta manera se determinó información adicional de los sensores, como el error, sensibilidad, exactitud, precisión, resultado. Finalmente se realizó el monitoreo de los parámetros medidos por los sensores utilizando el monitor serial del IDE de Arduino.

3.1.1.1 Caracterización de sensores

Para calibrar adecuadamente el sensor de pH, se utilizaron buffers de calibración, que son soluciones con valores fijos de pH, así como soluciones adicionales para cubrir un mayor rango en la escala. Con dichas soluciones se realizaron mediciones utilizando el sensor para obtener datos en términos de voltaje, los cuales se relacionaron más tarde con los valores de pH.

Para una calibración adecuada, se realizaron 200 muestreos por unidad fija de pH, es decir, para cada conjunto de valores cercanos de pH 4, 7 y 9, se tomaron 200 muestras. De esta manera, se analizaron $N = 600$ datos, los cuales se muestran en la gráfica de dispersión de la Fig. 3. 1 (a). Como se puede observar, existe una tendencia lineal, tal como lo marca la hoja de datos del sensor, por lo que el paso siguiente fue realizar una regresión lineal para obtener una función que cubra todo el rango de la escala de pH.

Para poder realizarlo, se obtuvo la pendiente m utilizando la ecuación (3).

$$m = \frac{N\sum(xy) - \sum x\sum y}{N\sum(x^2) - (\sum x)^2} \quad (3)$$

En donde x es el voltaje obtenido por cada valor de y conocido de pH. La sumatoria cubre los 600 pares (voltaje, pH) de datos muestreados.

Con la pendiente m obtenida, se procedió a calcular la intersección b en el eje y con la ecuación (4).

$$b = \frac{\sum y - m\sum x}{N} \quad (4)$$

De esta manera, se obtiene la curva de la Fig. 3. 1 (b) que efectivamente cubre todo el rango de la escala de pH, además de que los valores de voltaje no exceden los 3.3V que acepta el ADC de la tarjeta de desarrollo. La ecuación (5) establece el valor de pH en función con el voltaje obtenido por el sensor PH-4502C.

$$y_{pH} = -12.925x + 34.1252 \quad (5)$$

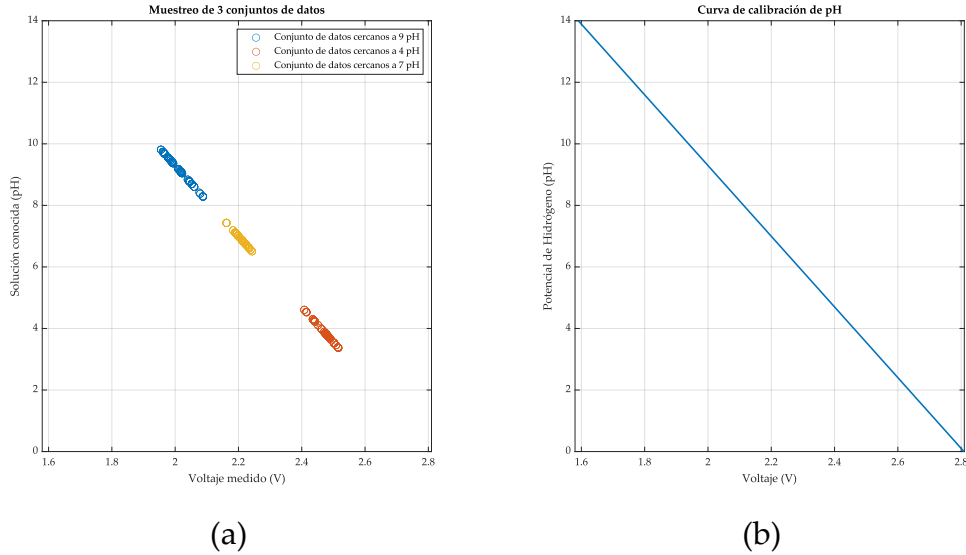


Fig. 3. 1 (a) Muestreo de datos para ver la respuesta en voltaje del sensor de pH. (b) Curva de calibración obtenida del sensor de pH.

Un factor importante que afecta la medición del pH es la temperatura, por lo que es fundamental considerarla para tener registros más adecuados. Para ello se utiliza la ecuación de Nernst (referencia), que enuncia que el pH varía en función de la temperatura, teniendo como referencia la temperatura ambiente 25°C, y cambios de 0.03 pH por cada 10°C de diferencia con respecto a la referencia. De esta manera se tiene que el cambio de pH en función de la temperatura está descrito por la ecuación (6).

$$\Delta pH = 0.03 \times \left(\frac{25 - T_{medida}}{10} \right) \quad (6)$$

Lo cual puede ser utilizado como compensación a la ecuación (5) que se obtuvo con la regresión lineal. Así, la ecuación (7) muestra cómo se determina el pH usando una compensación dada por la ecuación (6) para considerar los cambios de temperatura.

$$y_{pH-comp} = -12.925x + 34.1252 - \left(0.03 \times \left(\frac{25 - T_{medida}}{10} \right) \right) \quad (7)$$

De esta manera, se obtuvo una familia de curvas de pH para diferentes temperaturas, las cuales se muestran en la Fig. 3. 2.

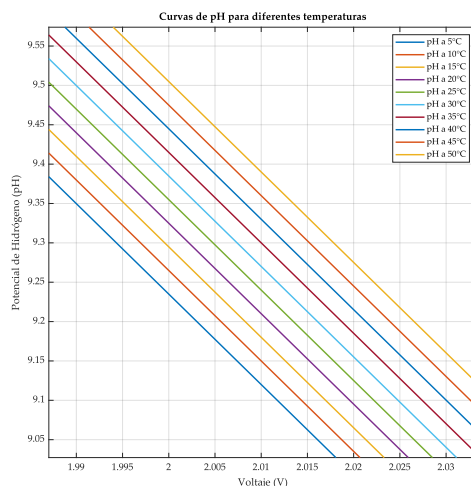


Fig. 3. 2 Familia de curvas de voltaje vs pH a diferentes temperaturas.

Para obtener la exactitud y precisión, se realizaron 200 mediciones más, en esta ocasión con respecto a un valor conocido fijo de 4.01 pH. Con el conjunto de datos recabado se determinó la media, la desviación estándar, el error relativo, el error absoluto, y la sensibilidad con lo que fue posible determinar la precisión y exactitud, así como el porcentaje de error del sensor.

A continuación, se presenta la tabla 3.1 con los datos obtenidos de precisión y exactitud, así como el resto de las especificaciones del sensor.

Tabla 3. 1 Especificaciones técnicas del sensor pH-4502C.

Parámetro para medir	pH
Modelo	PH-4502C
País, marca	China, N/A
Voltaje de operación	5V
Corriente de operación (max.)	10mA
Tiempo de respuesta	5 segundos, estabilización en 1 minuto
Modo de salida 1	Analógica (0V-5V)
Temperatura de operación	De 0°C a 60°C
Dimensiones	42mm x 32mm x 20mm

Rango de medición	De 0-pH a 14-pH
Resolución	Aproximadamente +/- 0.1 pH a 25°C
Sensibilidad	-12.925
Exactitud	
Error relativo	3.5%
Error absoluto	$\pm 0.1437 \text{ pH}$
Tolerancia	$\pm 0.5012 \text{ pH}$
Precisión	
Desviación estándar	0.3024 pH

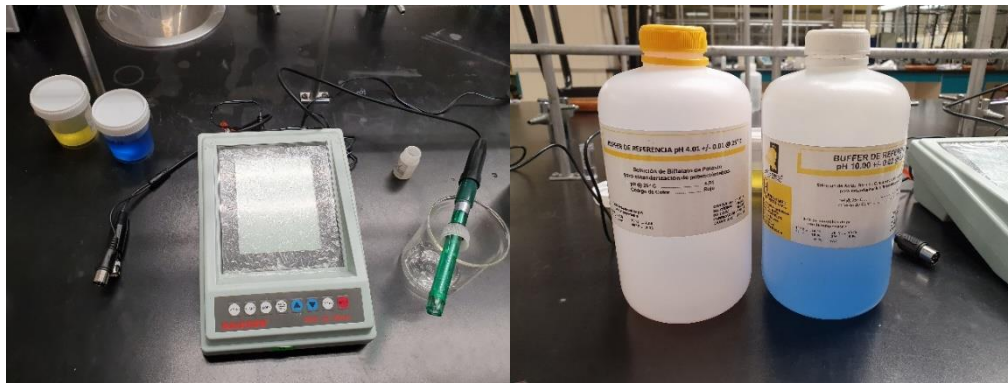


Fig. 3. 3 Validación de resultados con buffers y potenciómetro de laboratorio.

Los resultados fueron validados en un laboratorio en la Facultad de Ciencias Químicas utilizando instrumentos especializados para su medición.

Para calibrar el sensor de total de sólidos disueltos se utilizaron soluciones de calibración, es decir soluciones con valores establecidos y previamente medidos con instrumentos especializados de TDS. De esta manera, se realizó un muestreo de $N=200$ muestras tratando de cubrir el rango completo de 0 a 10000 ppm que posee el sensor. En la Fig. 3. 4 (a) se muestran los valores medidos en voltaje para el muestreo correspondiente a las soluciones conocidas que indican un valor de ppm.

Como se puede observar, los valores medidos tienen una tendencia no lineal, por lo que se decidió utilizar un polinomio de interpolación para construir la curva de calibración. Para ello, se tomaron 5 pares de datos (voltaje, ppm), cubriendo diferentes zonas del rango de 0 a 10000. Los 5 pares de datos seleccionados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. 2 Respuesta de voltaje en función del TDS.

Voltaje (V)	TDS (ppm)
0.18	293.02
1.22	1851.48
2.03	3677.1
2.65	6000
3.32	9910.95

Ya que se tienen 5 puntos, el polinomio de interpolación es de grado 4 y tiene la siguiente forma:

$$P(x) = a_0x^0 + a_1x^1 + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 \quad (8)$$

Se obtuvieron los coeficientes siguientes resolviendo el sistema de ecuaciones:

$$a_0 = 4.7470$$

$$a_1 = 1667.5546$$

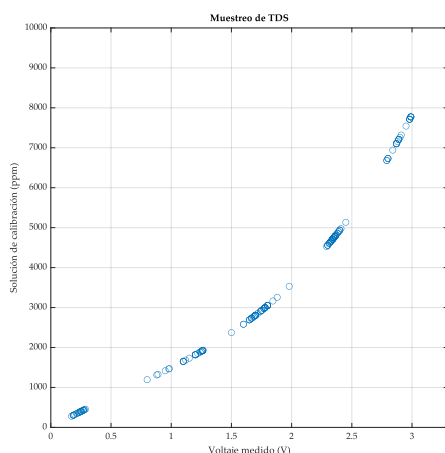
$$a_2 = -407.3422$$

$$a_3 = 223.8007$$

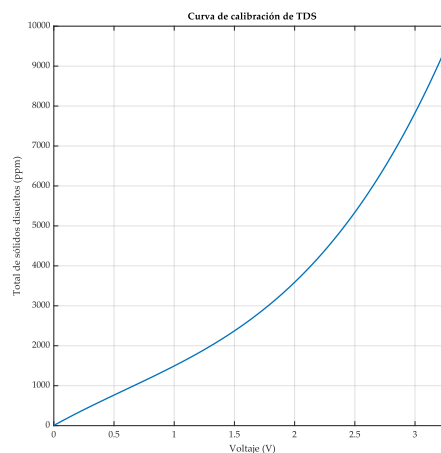
$$a_4 = 5.5143$$

Y finalmente la ecuación (9) describe el comportamiento del sensor cuya curva de calibración se muestra en la Fig. 3. 4 (b).

$$y_{TDS} = 5.5143x^4 + 223.8007x^3 - 407.3422x^2 + 1667.5546x + 4.7470 \quad (9)$$



(a)



(b)

Fig. 3. 4 (a) Muestreo de datos de TDS. (b) Curva de calibración para el sensor de TDS.

Para obtener la exactitud y precisión, se realizaron 200 mediciones más, en esta ocasión con respecto a un valor conocido fijo de 3000 ppm. Con el conjunto de datos recabado se determinó la media, la desviación estándar, el error relativo, el error absoluto, y la sensibilidad con lo que fue posible determinar la precisión y exactitud, así como el porcentaje de error del sensor.

A continuación, se presenta la tabla 3.3 con los datos obtenidos de precisión y exactitud.

Tabla 3. 3 Especificaciones técnicas del sensor.

Parámetro para medir	TSD
Modelo	CQRSENTDS01
País, marca	China, CQRobot
Voltaje de operación	3.3V a 5V
Corriente de operación (max.)	6mA
Modo de salida	Analógica (0V-2.3V)
Temperatura de operación	Punta de prueba a no más de 55°C
Dimensiones	43mm X 32.2mm
Rango de medición	De 0ppm a 10000ppm
Resolución	$\pm 0.1 \text{ ppm}$ (el mínimo valor que puede medir)
Sensibilidad	$S(x) = \frac{dy_{TDS}(x)}{dx}$
Exactitud	
Error relativo	1%
Error absoluto	$\pm 7.6595 \text{ ppm}$
Tolerancia	$\pm 100 \text{ ppm}$
Precisión	
Desviación estándar	73.4191 ppm

El sensor de temperatura ds18b20 se comunica con el microcontrolador mediante el protocolo OneWire [63], por lo que se manda una señal digital al

microcontrolador para obtener la temperatura. Por esa razón, se ocupó el DAC integrado en la tarjeta de desarrollo, el cual convierte una señal digital a una analógica. Debido a que el DAC de la tarjeta funciona con 3.3V, se realizó el mapeo de 0V a 3.3V. Una vez realizado esto, se procedió a utilizar 2 soluciones con diferentes temperaturas, la primera de ellas se midió usando un instrumento calibrado teniendo una temperatura de referencia $T_{Ref1} = 46.31\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se procedió a colocar el sensor y una vez alcanzada la temperatura de referencia, se mantuvo hasta alcanzar la temperatura ambiente de referencia $T_{Amb1} = 24.36\text{ }^{\circ}\text{C}$. Durante el periodo en el que el sensor fue de T_{Ref1} a T_{Amb1} , se registraron los voltajes obtenidos usando la tarjeta de desarrollo y una base de datos para almacenar las lecturas registradas. Las lecturas de voltaje obtenidas fueron comparadas con lecturas de temperatura registradas con el instrumento calibrado. Además, el experimento se repitió usando una solución con temperatura de referencia $T_{Ref2} = 10.51\text{ }^{\circ}\text{C}$ y temperatura ambiente de referencia $T_{Amb2} = 18.38\text{ }^{\circ}\text{C}$. De esta manera, se registraron 200 muestras que se presentan en la Fig. 3.5 (a), en la que se puede notar una tendencia lineal, por lo que se llevó a cabo nuevamente una regresión lineal usando la ecuación (3), con la que se obtuvo la pendiente $m_{Temp} = 54.4736$ y la ecuación (4) con la que se obtuvo la intersección con el eje y , $b_{Temp} = -53.9778$. Finalmente se obtuvo la ecuación (10) que describe el comportamiento del sensor cuya curva característica se muestra en la Fig. 3.5 (b).

$$y_{TEMP} = 54.4736x - 53.9778 \quad (10)$$

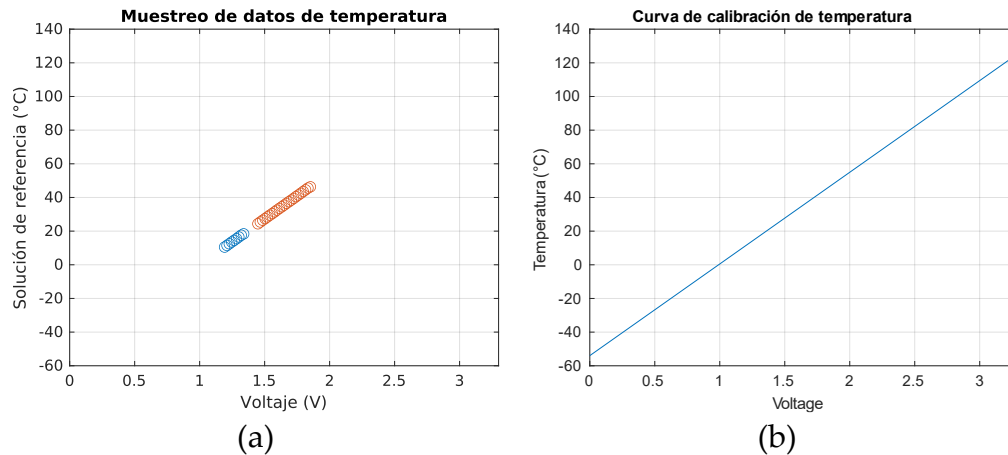


Fig. 3.5 (a) Muestreo de datos de temperatura. (b) Curva de calibración de temperatura.

Para obtener la exactitud y precisión, se realizaron 200 mediciones más, en esta ocasión con respecto a un valor conocido fijo de $24\text{ }^{\circ}\text{C}$. Con el conjunto de datos recabado se determinó la media, la desviación estándar, el error relativo,

el error absoluto, y la sensibilidad con lo que fue posible determinar la precisión y exactitud, así como el porcentaje de error del sensor.

A continuación, se presenta la Tabla 3. 4 con los datos obtenidos de precisión y exactitud.

Tabla 3. 4 Especificaciones del sensor de temperatura.

Parámetro para medir	Temperatura
Modelo	ds18b20
País, marca	Estados Unidos, Maxim Integrated
Voltaje de operación	3.3V a 5V
Corriente de operación (max.)	6mA
Modo de salida	Digital (12 bits)
Dimensiones	43mm X 32.2mm
Rango de medición	De -55 °C a 120 °C
Resolución	$\pm 0.0625^{\circ}\text{C}$
Sensibilidad	-54.4736
Exactitud	
Error relativo	1%
Error absoluto	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
Tolerancia	$\pm 1.75^{\circ}\text{C}$
Precisión	
Desviación estándar	0.1 °C

3.1.1.2 Sistema del nodo estático

El nodo estático, que opera con un sistema basado en microcontrolador, emplea el convertidor analógico a digital (ADC) del ESP32 devkit v1 para recibir la señal de los sensores de pH y Total de Sólidos Disueltos. Este sistema está diseñado para procesar señales que oscilan entre 0V y 3.3V, por lo que el acondicionamiento basado en un arreglo resistivo mencionado anteriormente es de suma importancia para su correcto funcionamiento. Por otro lado, el puerto digital 13 también es utilizado para la comunicación con el sensor de temperatura. De esta manera, se pretende optimizar el consumo energético y delegar la carga de procesamiento a la interfaz gráfica desarrollada. Esta metodología permite una gestión eficiente del sistema y será detallada en la sección dedicada a la gestión de datos.

A continuación, se incluye un diagrama de flujo que ilustra la operatividad del sistema, enfocándose exclusivamente a la adquisición de datos.

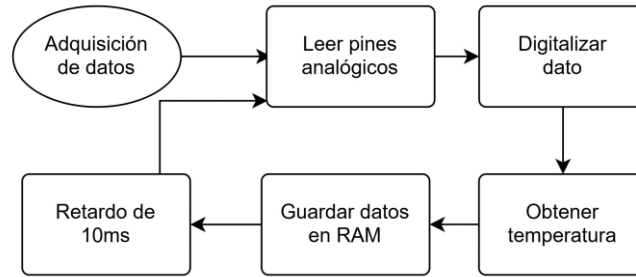


Fig. 3. 6 Diagrama de flujo del módulo correspondiente a la adquisición de datos.

Como se puede observar en el diagrama de la Fig. 3. 6, la lógica de funcionamiento es simple, pero es sólo una parte del sistema completo que se complementa en las secciones siguientes. Además, es importante remarcar que si bien el diagrama presenta todos los puntos a considerar para lograr leer datos del entorno de medición, también se deben considerar las variables que se deben crear para poder guardar los datos antes de ser enviados, así como asegurarse de incluir las bibliotecas necesarias para el correcto funcionamiento de los sensores, haciendo especial énfasis en el sensor de temperatura que requiere del protocolo OneWire, así como la creación del objeto y uso del método correspondiente para obtener la temperatura en grados centígrados.

```

//-----
//Variables PH
const int PH_sign = A0;
//-----
//Variables TSD
const int TSD_sign=A7;
//-----
//variables ADC sensores
int PH_SENSOR, TSD_SENSOR;
//Variables TEM
const int pinDatosDQ = 13;
OneWire oneWireObjeto(pinDatosDQ);
DallasTemperature sensorDS18B20(&oneWireObjeto);
float TEMP_value = 0;
  
```

Fig. 3. 7 Creación de variables y objetos necesarios para leer las variables del entorno de medición.

```

PH_SENSOR=analogRead(PH_sign);
TSD_SENSOR=analogRead(TSD_sign);
sensorDS18B20.requestTemperatures();
TEMP_value = sensorDS18B20.getTempCByIndex(0);
  
```

Fig. 3. 8 Adquisición de parámetros medidos y su almacenamiento en variables locales alojadas en RAM.

3.1.1.3 Sistema del nodo móvil

El nodo móvil, equipado con un sistema de microcontrolador, emplea el Convertidor Analógico a Digital (ADC) para recoger la información de los sensores. Utiliza el pin digital 13 para el sensor de temperatura y comparte consideraciones operativas con el nodo estático. No obstante, se distingue por su sistema de dirección, el cual opera según las instrucciones recibidas del nodo 1. A continuación, se muestra un diagrama de flujo para ilustrar su operatividad.

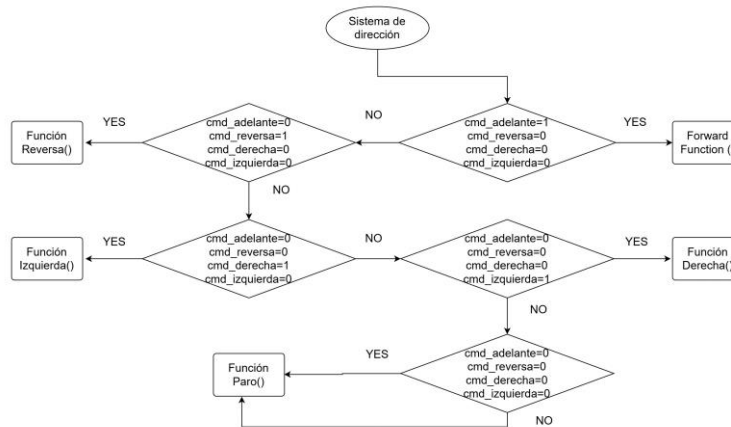


Fig. 3. 9 Diagrama de flujo del módulo para el control de dirección del nodo móvil.

3.1.2 Comunicación

3.2.2.1 Canal de comunicación en OPC Servers

Para la creación del servidor se utiliza OPC Server [64], con el que se define el canal de comunicación vinculado a la red de internet al que se encuentra conectada la PC. Se agrega un dispositivo nuevo, en este caso se trata del nodo estático que recibe todos los parámetros muestreados para después enviarlos al servidor. También se define la dirección IP asignada al sistema basado en microcontrolador para recibir los datos deseados.

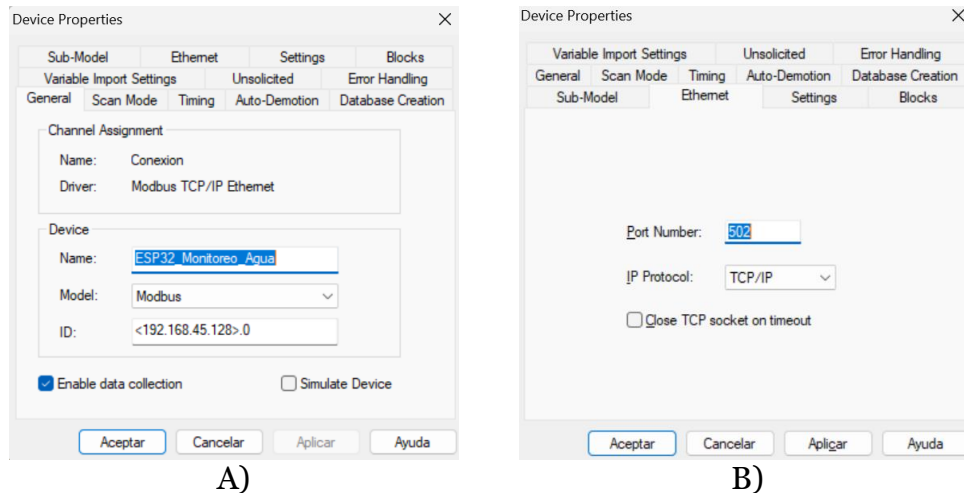


Fig. 3. 10 A) Asignación de nombre del dispositivo en el canal de comunicación creado y definición de IP del nodo estático. B) Definición de puerto de comunicación.

Además, en esta ventana de configuración, en la sección “Ethernet” es posible configurar el puerto de comunicación, el cual debe coincidir con el puerto definido en el sistema de comunicación del nodo estático, en este caso, se trata del puerto 502.

El siguiente paso es generar etiquetas relacionadas a cada parámetro con el fin de tener variables independientes para cada lectura recibida desde el microcontrolador, esto con el fin de facilitar la gestión de datos, lo cual será explicado en la siguiente sección. Además, se define el tipo de dato, la dirección de registro, así como los permisos de lectura o escritura para cada etiqueta, en este caso, para todas las variables correspondientes al nodo estático, el tipo seleccionado para cada una es WORD con permiso de sólo lectura y con números de registro del 300001 al 300004, mientras que para las variables correspondientes al nodo móvil, todas aquellas referentes a parámetros para monitorear la calidad del agua corresponden al mismo tipo y con los mismos permisos. Adicionalmente se definen etiquetas vinculadas al RSSI para aproximar la distancia entre nodos, así como las que representan comandos de dirección para controlar el vehículo diseñado, en este caso, dichas etiquetas son de tipo booleano con permiso de lectura y escritura y tienen registros del 000001 al 000004, con lo que es suficiente para poder desplazarse en todas direcciones. En la Fig. 3. 11 se muestra el canal de conexión totalmente configurado y listo para enlazarse con el sistema y recibir los datos monitoreados, así como poder controlar los actuadores del nodo móvil.

Tag Name	Ad...	Data Type	Scan Rate	Scaling	Description
FORWARD	000001	Boolean	10	None	BOTÓN ADELANTE
BACKWARD	000002	Boolean	10	None	BOTÓN ATRÁS
RIGHT	000003	Boolean	10	None	BOTÓN DERECHA
LEFT	000004	Boolean	10	None	BOTÓN IZQUIERDA
PH	300001	Word	10	None	MEDICIÓN DE PH
TSD	300002	Word	10	None	TDS
TEM	300003	Word	10	None	TEMPERATURA PARTE ENTERA
TEM_N	300004	Word	10	None	TEMPERATURA PARTE DECIMAL
PH2	300005	Word	10	None	PH móvil
TDS2	300006	Word	10	None	TDS móvil
TEM2	300007	Word	10	None	TEM2 móvil
TEM_N2	300008	Word	10	None	TEM_N2 móvil
CNT	300009	Word	10	None	contador

Fig. 3. 11 Canal de comunicación, dispositivo y creación de etiquetas.

Una vez creado el canal de comunicación, definida la IP correspondiente al sistema de monitoreo, y generadas las etiquetas para cada parámetro y comando de control, se pone en marcha el servidor para comprobar la conexión y verificar los datos recibidos. En la Fig. 3. 12 se muestra el servidor corriendo y las lecturas enviadas desde el microcontrolador.

Item ID	Data ...	Value	Timestamp	Quality	Update Count
Conexion.ESP32_Monitoreo_Agua.BACKWA...	Boolean	0	17:26:59.966	Good	4
Conexion.ESP32_Monitoreo_Agua.FORWARD	Boolean	0	17:26:59.966	Good	4
Conexion.ESP32_Monitoreo_Agua.LEFT	Boolean	0	17:26:59.966	Good	4
Conexion.ESP32_Monitoreo_Agua.RIGHT	Boolean	0	17:26:59.966	Good	4
Conexion.ESP32_Monitoreo_Agua.CNT	Word	6	17:27:06.327	Good	13
Conexion.ESP32_Monitoreo_Agua.PH	Word	0	17:26:58.675	Good	8
Conexion.ESP32_Monitoreo_Agua.PH2	Word	0	17:26:58.675	Good	6
Conexion.ESP32_Monitoreo_Agua.RSSI	Word	0	17:26:58.675	Good	6
Conexion.ESP32_Monitoreo_Agua.TDS2	Word	0	17:26:58.675	Good	6
Conexion.ESP32_Monitoreo_Agua.TEM	Word	65409	17:27:01.225	Good	7
Conexion.ESP32_Monitoreo_Agua.TEM_N	Word	0	17:26:58.675	Good	6
Conexion.ESP32_Monitoreo_Agua.TEM_N2	Word	0	17:26:58.675	Good	6
Conexion.ESP32_Monitoreo_Agua.TEM2	Word	0	17:26:58.675	Good	6
Conexion.ESP32_Monitoreo_Agua.TSD	Word	0	17:26:58.675	Good	6

Fig. 3. 12 Prueba de conexión entre el servidor y el sistema basado en microcontrolador del nodo estático.

Como se puede observar en la Fig. 3. 12 los valores recibidos para las variables de pH y total de sólidos disueltos corresponden a las lecturas digitalizadas de los sensores que pueden tomar valores entre 0 y 4096, donde 0 corresponde a 0V y 4096 a 3.3V por ser el máximo valor aceptado por el ADC de 12 bits incorporado en el microcontrolador. Por otro lado, se tiene a la temperatura cuyos datos recibidos corresponden a su parte entera y decimal. Además, se puede observar que los valores de los comandos de dirección varían únicamente entre cero y uno, ya que se trata de valores lógicos para accionar o desactivar los actuadores del nodo móvil.

3.2.2.2 Diseño de la WSN

Para el diseño de la red inalámbrica de sensores se presenta el diagrama de la Fig. 3. 13, en donde se pueden apreciar los 2 nodos que la forman. El nodo móvil es un vehículo equipado de sensores y actuadores capaz de desplazarse en un cuerpo de agua, con lo cual hace posible el monitoreo de diversos puntos con un único dispositivo. Utiliza el protocolo de comunicación propio de la tarjeta de desarrollo llamado ESP-NOW, con el que envía las lecturas tomadas de cada parámetro al nodo estático, además, utiliza el mismo protocolo de comunicación para recibir los comandos y poder controlar la dirección de los actuadores. Por otro lado, el nodo estático utiliza el protocolo antes mencionado para recibir las lecturas tomadas del nodo móvil, mientras envía los comandos de dirección. Dicho nodo, está equipado con los mismos sensores, pero no cuenta con ningún actuador. Además, el nodo estático también se comunica con un servidor local hospedado en la PC, a donde envía toda la información recolectada por cada uno de los nodos, esto mediante el protocolo Modbus TCP/IP. En la PC se encuentra corriendo una interfaz gráfica desarrollada en LabVIEW, en la que es posible monitorear en tiempo real los parámetros registrados por cada nodo, además de contar con botones para controlar la dirección del vehículo. Adicionalmente, la interfaz gráfica almacena las lecturas de los parámetros monitoreado en una base de datos generada automáticamente en Excel, la cual se aloja en la nube de Microsoft para futuras consultas y análisis.

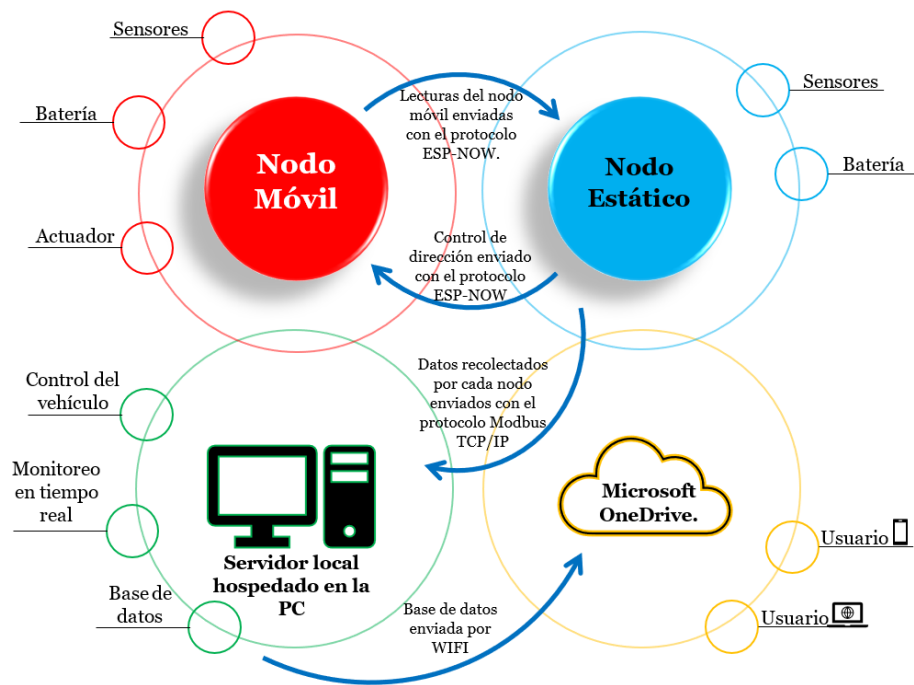


Fig. 3. 13 Diagrama de comunicación de la WSN diseñada.

3.2.2.2 Sistema de comunicación de los nodos que componen la red

Cada uno de los nodos que componen la WSN utiliza un sistema de comunicación para comunicarse entre un nodo y otro, así como para enviar y recibir información desde la interfaz gráfica. Tanto el nodo móvil como el estático tienen un sistema que los mantiene conectados entre sí, el cual permite que el nodo móvil reciba los comandos de dirección y paro a la vez que envía las lecturas captadas por sus sensores equipados. De manera similar, este sistema permite al nodo estático enviar los comandos de dirección mientras recibe los parámetros capturados por el otro nodo. A continuación, se muestra el diagrama que corresponde a la comunicación entre nodos que incorpora el nodo móvil.

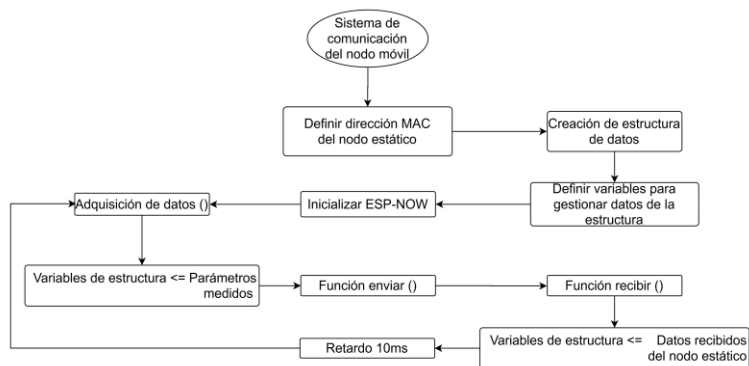


Fig. 3. 14 Diagrama de flujo del sistema de comunicación del nodo móvil.

Como se mencionó anteriormente, el nodo estático también tiene comunicación con un servidor alojado en una PC, por lo que incorpora un sistema de comunicación basado en el protocolo Modbus TCP/IP, el cual se programó desde el IDE de Arduino, en donde se creó cada una de las variables para cada parámetro muestreado, se le asignó un registro adecuado según su tipo, entrada, salida, de escritura, lectura o ambos. También se definió el objeto de la clase Modbus TCP/IP.

```

//Variables Modbus
const int PH_IREG = 0;//registro para PH
const int TSD_IREG = 1;//registro para TSD
const int TEM_IREG = 2;//registro para TEMPERATURA
const int TEM_N_IREG = 3;

const int PH2_IREG = 4;//registro para PH
const int TSD2_IREG = 5;//registro para TSD
const int TEM2_IREG = 6;//registro para TEMPERATURA
const int TEM2_N_IREG = 7;

//Variables de control
const int FORWARD_COIL = 0;//De frente
const int BACKWARD_COIL = 1;//Reversa
const int RIGHT_COIL = 2;//Derecha
const int LEFT_COIL = 3;//Izquierda

ModbusIP mb;//objeto ModbusIP
    
```

Fig. 3. 15 Definición de variables para la comunicación entre el nodo estático y el servidor, mediante el protocolo Modbus TCP/IP.

Posteriormente en la función setup() se inicializó la comunicación Modbus TCP/IP y se añadió cada una de las variables creadas a los registros correspondientes en el servidor, los cuales fueron creados en la sección 3.2.2.1 Canal de comunicación en OPC Servers.

<pre>mb.server();//iniciamos Modbus Ip //Se añaden sensores a registros mb.addIreg(PH_IREG); mb.addIreg(TSD_IREG); mb.addIreg(TEM_IREG); mb.addIreg(TEM_N_IREG); mb.addIreg(PH2_IREG); mb.addIreg(TSD2_IREG); mb.addIreg(TEM2_IREG); mb.addIreg(TEM2_N_IREG); mb.addIreg(CNT_IREG); mb.addCoil(FORWARD_COIL); mb.addCoil(BACKWARD_COIL); mb.addCoil(RIGHT_COIL); mb.addCoil(LEFT_COIL);</pre>	<pre>myDataSen.a = mb.Coil(FORWARD_COIL); myDataSen.b = mb.Coil(BACKWARD_COIL); myDataSen.c = mb.Coil(RIGHT_COIL); myDataSen.d = mb.Coil(LEFT_COIL); mb.Ireg(PH_IREG,PH_SENSOR); mb.Ireg(TSD_IREG,TSD_SENSOR); mb.Ireg(TEM_IREG,TEMP_P); mb.Ireg(TEM_N_IREG,TEMP_N); mb.Ireg(PH2_IREG,myDataRec.PH_NOW); mb.Ireg(TSD2_IREG,myDataRec.TDS_NOW); mb.Ireg(TEM2_IREG,myDataRec.TEM_P_NOW); mb.Ireg(TEM2_N_IREG,myDataRec.TEMP_N_NOW);</pre>
A)	B)

Fig. 3. 16 A) Inicialización de comunicación usando Modbus TCP/IP y asignación de variables locales a variables en el servidor. B) Asignación de la información para ser enviada al servidor.

En la función principal, se le asigna a cada variable creada para controlar el vehículo el comando recibido desde la interfaz. Además, cada una de las lecturas capturadas por el sistema de adquisición de datos, así como las recibidas del otro nodo se asignan a las variables que son enviadas al servidor utilizando el protocolo Modbus TCP/IP y el objeto creado previamente. En el diagrama de la Fig. 3. 17, se detalla todo el proceso mencionado.

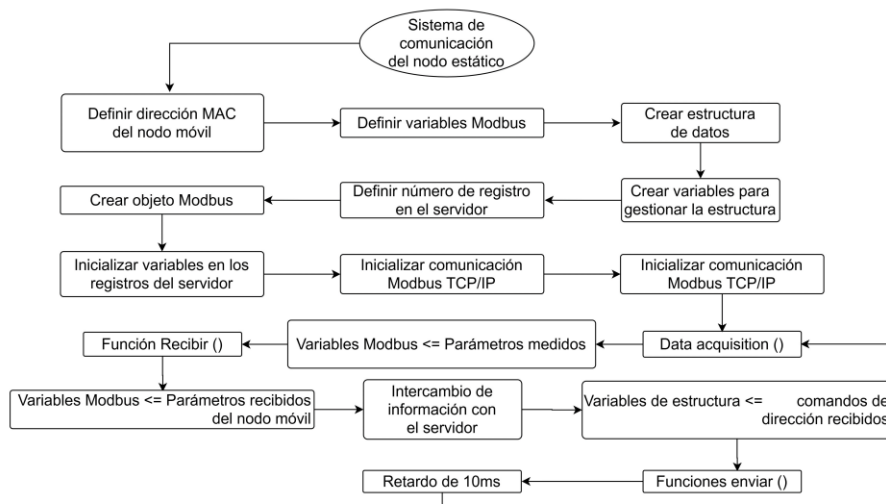


Fig. 3. 17 Diagrama de flujo del sistema de comunicación del nodo estático.

3.2.2.2 Dimensionamiento de la red

La red se desarrolló utilizando las tarjetas ESP32 devkit 1 para cada nodo. Dichas tarjetas incorporan el módulo ESP32-mini-1 que viene con una antena PCB. A continuación, se muestra una tabla con las especificaciones proporcionadas por el fabricante.

Tabla 3. 5 Datos de la antena incorporada en la tarjeta de desarrollo ESP32 devkit v1 [65].

Nombre	Descripción
Rango de frecuencia central del canal de funcionamiento.	2412 ~ 2484 MHz
Estándar inalámbrico Wi-Fi	IEEE 802.11b/g/n
Velocidad de datos	20MHz
	11b: 1, 2, 5.5 and 11 Mbps 11g: 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps 11n: MCS0-7, 72.2 Mbps (Max)
	40MHz
	11n: MCS0-7, 150 Mbps (Max)
Tipo de antena	Antena de PCB integrada

Para dimensionar la red, se empleó la estimación de distancias utilizando el indicador RSSI, el cual opera bajo el principio de que la intensidad de la señal se reduce conforme la distancia entre el emisor y el receptor se incrementa.

Se consideraron 2 configuraciones de sistemas para realizar el dimensionamiento, la primera de ellas corresponde a ambos nodos usando la antena integrada en el PCB, mientras que, para la segunda, se utilizó la antena integrada en el nodo fijo y una antena externa en el nodo dinámico.

En consecuencia, se llevaron a cabo pruebas en campo abierto, recopilando 20 mediciones de RSSI para cada distancia específica. Esto permitió calcular el promedio de RSSI por cada distancia, así como el monitoreo de pérdida de paquetes entre nodos, resultando en la elaboración de la Tabla 3.6 que ilustra la correlación existente entre la intensidad de la señal y la distancia para la configuración uno de antenas.

Tabla 3. 6 RSSI promedio correspondiente a las distancias de referencia y pérdida de paquetes para la configuración 1 correspondiente al uso de las antenas integradas en el PCB.

Distancia en metros	RSSI promedio en dB	Pérdida de paquetes
3	-51	0/100
6	-60	0/100
9	-64	0/100
12	-75	0/100
15	-82	6/100
18	-90	39/100
21	-100	88/100

Basándose en los resultados obtenidos en la Tabla 1, se determinó establecer un dimensionamiento de la red de 15 metros radiales. Este tamaño garantiza una comunicación eficiente entre los nodos móvil y estático, así como la transmisión y recepción de datos con nulas o mínimas pérdidas, que como se puede ver en la columna de “Pérdida de paquetes”, hay un 6% de pérdida a partir de 15m. Esta medida es fundamental para mantener la integridad y el rendimiento óptimo del sistema.

Por otro lado, para la configuración 2, se elaboró la Tabla 3.7, que muestra una considerable diferencia y mejora con la recepción y alcance de la red, además de reducir la pérdida de paquetes, al menos hasta alcanzar una mayor distancia. De esta manera, se obtiene un dimensionamiento de 40m con una intensidad de señal excepcional sin pérdida de paquetes.

Tabla 3. 7 RSSI promedio correspondiente a las distancias de referencia y pérdida de paquetes para la configuración 2 correspondiente al uso de una antena externa y una integrada.

Distancia en metros	RSSI promedio en dB	Pérdida de paquetes
3	-55	0/100
6	-58	0/100
9	-61	0/100
12	-64	0/100
15	-67	0/100
18	-69	0/100
21	-71	0/100
30	-73	0/100
40	-75	0/100
50	-77	3/100
60	-80	4/100
70	-83	6/100

80	-87	39/100
90	-90	41/100
100	-102	91/100

A continuación, se muestran las gráficas de RSSI contra distancia que definen el dimensionamiento de la red para cada configuración.

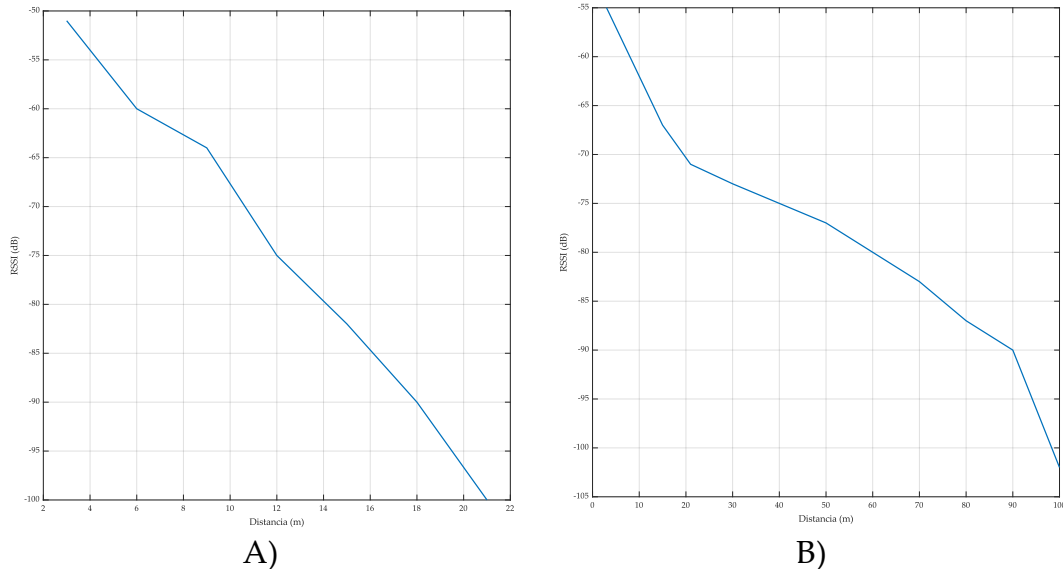


Fig. 3. 18 A) RSSI contra distancia en la configuración 1 antena incorporada- antena incorporada. B) RSSI contra distancia en la configuración 2 antena incorporada- antena externa.

3.1.3 Gestión de datos

La gestión de datos se lleva a cabo utilizando LabVIEW® [66], en donde se definen variables para cada etiqueta generada en el servidor para después vincularlas entre sí. Es importante mencionar que, gracias a la creación de etiquetas independientes, los datos recibidos pueden almacenarse y manipularse más fácilmente ya que no es necesario agregar algoritmos adicionales para identificar a qué parámetro pertenece cada dato recibido.

En la Fig. 3. 19 se muestran los bloques que componen al sistema de gestión de datos, en donde se pueden observar las entradas y salidas de cada elemento. Es notable el paradigma de diseño estructural y en cascada de tipo secuencial, con el que se logra un orden de ejecución específico para un mejor manejo de los datos que involucra el sistema. En el primer bloque se capturan las variables S0 a S5 para las lecturas obtenidas de los sensores, después se procesan los datos digitales para obtener un valor en su escala correspondiente (°C, pH, ppm, NTU). Posteriormente se aplica un filtro para eliminar máximos y mínimos para

ajustar un valor más estable de cada parámetro hasta llegar al bloque de monitoreo en tiempo real y almacenamiento en la base de datos. Por otra parte, se tiene el bloque que se encarga del sistema de dirección del navío y activa el monitoreo para el nodo móvil.

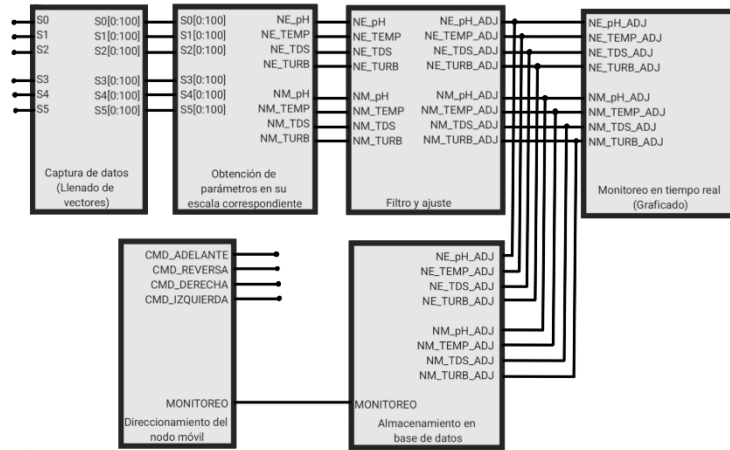


Fig. 3. 19 Diagrama de bloques del sistema de gestión de datos.

En la Fig. 3. 20 se muestra la configuración seguida para conectar cada variable virtual con los datos recibidos en el servidor.

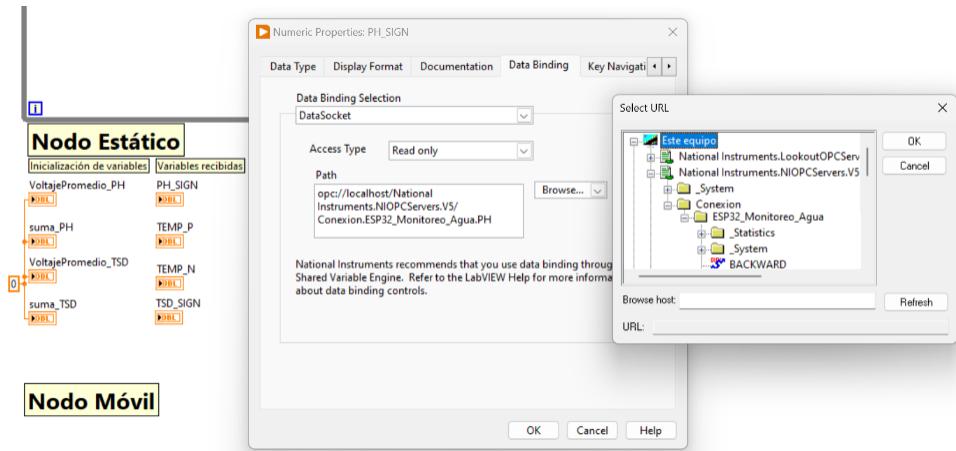


Fig. 3. 20 Conexión de variables del entorno virtual con las variables recibidas por el servidor.

En la Fig. 3. 20 se muestran los pasos necesarios para asignar cada una de las etiquetas creadas en OPC Servers con las variables virtuales creadas en el entorno de LabVIEW. Con mayor precisión, se debe crear una variable, se establece como un bloque indicador, se da clic derecho, y se selecciona propiedades. Después se muestran las ventanas que aparecen en la Fig. 3. 20, en la pestaña de "Data Binding" se lleva a cabo la conexión, para ello, se selecciona "Data Socket" para el tipo de enlace de datos, se selecciona el tipo de acceso para cada variable, que puede ser de sólo lectura para todos los parámetros monitoreados o con permisos de lectura y escritura para las

variables que controlan los actuadores del vehículo. Finalmente se da clic en “Browse...” y se selecciona “DSTP Server” para abrir el navegador correspondiente a la última imagen de la Fig. 3. 20, en donde se selecciona el canal de conexión creado, el dispositivo en cuestión y las etiquetas correspondientes. El campo de “path” se llena de manera automática una vez finalizada la selección de la etiqueta.

En la Fig. 3. 21 se muestra el panel frontal de la interfaz gráfica que consiste en 3 pestañas para navegar entre las gráficas de los 4 parámetros principales que monitorea tanto el nodo estático, como el nodo móvil, además de la pestaña de resumen.

Para cada nodo, se muestran 4 pestañas que corresponden a cada parámetro que se monitorea, pH, temperatura, total de sólidos disueltos y turbiedad. Cada gráfica tiene una escala personalizada que ayuda a visualizar de mejor manera la evolución de cada parámetro en función del tiempo.

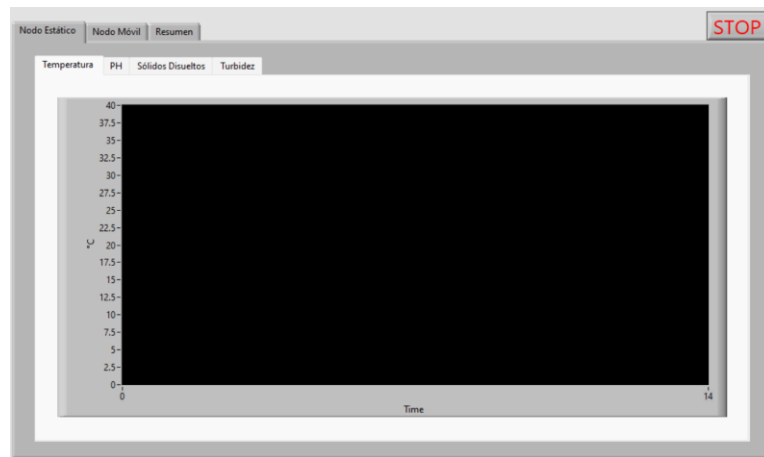


Fig. 3. 21 Panel frontal de la interfaz gráfica.

Por otro lado, en la Fig. 3. 22 se muestra la pestaña de resumen seleccionada, en la que se puede observar un conjunto de información que se obtiene a partir de las mediciones realizadas para cada nodo. Se puede observar que en esta pestaña se determina la calidad del agua en base al índice de total de sólidos disueltos y la OMS, en conjunto con la norma mexicana NOM127 SA1 2021. Adicionalmente, y también sustentado en las fuentes antes mencionadas, se muestra la información referente a la concentración de amonio en función del pH medido, así como la conductividad eléctrica que se determina con base en (referencia de la equivalencia). Además, se muestran indicadores gráficos que ayudan a identificar los niveles registrados.

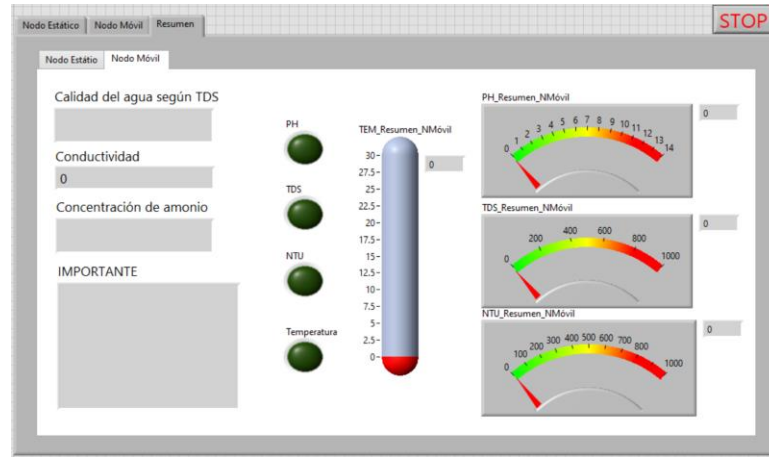


Fig. 3. 22 Ventana de resumen del nodo móvil en la interfaz gráfica.

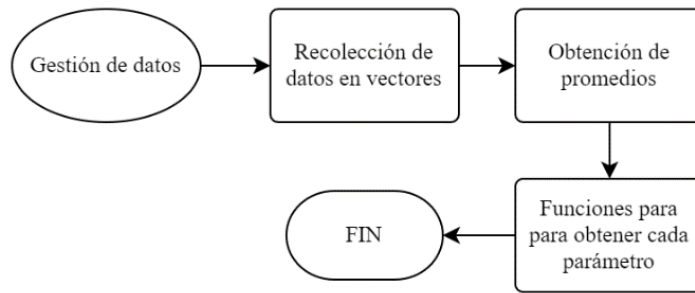


Fig. 3. 23 Diagrama de flujo para el tratamiento de los datos dentro de la interfaz gráfica.

Para entender mejor qué pasa con la gestión de datos detrás de la interfaz gráfica se muestra el diagrama de flujo de la Fig. 3. 23 en donde se aprecian las etapas de recolección y ajuste de los datos recibidos.

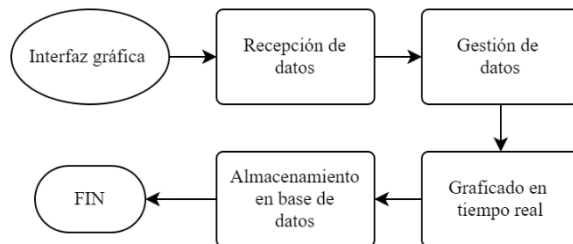


Fig. 3. 24 Diagrama con todas las etapas que componen la interfaz gráfica desarrollada.

Como se puede apreciar en el diagrama de la Fig. 3. 24, la interfaz gráfica tiene la capacidad de generar una base de datos ubicada en la nube al mismo tiempo que se monitorean los parámetros del cuerpo de agua. De esta manera, se puede realizar la consulta de los datos recabados en cualquier momento,

además de que es posible generar gráficas con intervalos definidos en función del día y/u hora de captura de datos.

Para lograr lo mostrado en los diagramas de flujo anteriores se utilizó en primer lugar una estructura “while” para obtener la ejecución continua de la interfaz, cuyo paro está condicionado al botón de “STOP”. Posteriormente, se usó la estructura “Flat Sequence”, que ayuda a tener un desempeño secuencial, es decir, cada etapa programada en un “frame” se ejecuta al término del anterior, tal como se muestra en el diagrama de flujo anterior. A continuación, se muestra la programación secuencial del sistema.

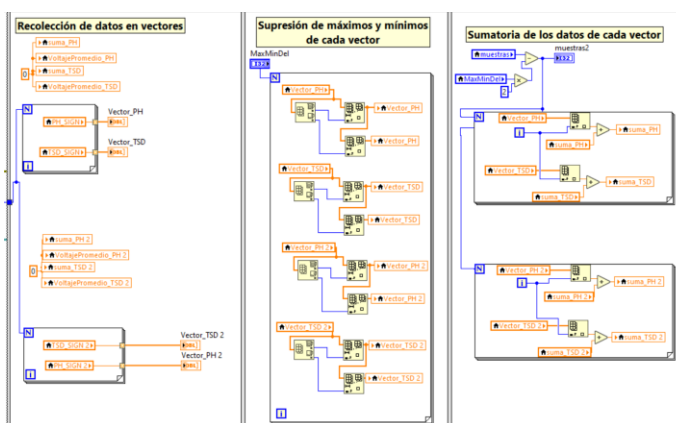


Fig. 3. 25 Programación a bloques para el llenado de vectores, filtrado y sumatoria de datos.

Como se puede observar, en la primera etapa o “frame” se inicializan las variables mostradas en cero y posteriormente se utilizan estructuras de tipo “for” para llenar cada uno de los vectores. Estos corresponden a las lecturas digitalizadas obtenidas de los sensores de pH y TDS de los nodos estático y móvil.

Como se puede observar, la creación de variables locales permite manipular las variables creadas en la primera etapa en todas las demás sin ningún inconveniente. De igual manera, se pueden observar las etapas de recolección de datos en vectores, así como los pasos siguientes que ayudan a eliminar máximos y mínimos para de esta forma lograr una mejor precisión en el cálculo de los valores de cada parámetro. Además, la sumatoria es el primer paso para obtener los promedios de los datos almacenados en los vectores. Para culminar en la última etapa que se muestra en la Fig. 3. 26, en la que se obtienen los valores de cada parámetro utilizando las ecuaciones obtenidas en la sección 3.1.1.1, así como las mencionadas en la sección de Parámetros para determinar la calidad del agua.

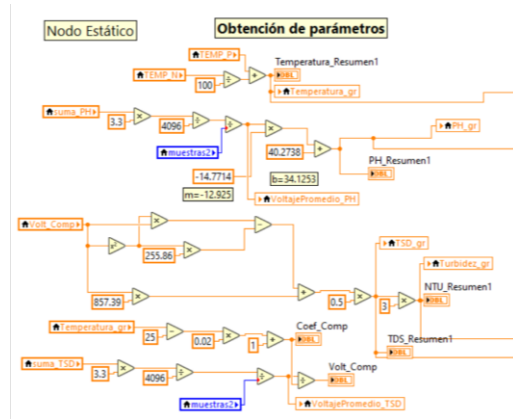


Fig. 3. 26 Programación a bloques para determinar el valor de cada parámetro registrado por el nodo estático.

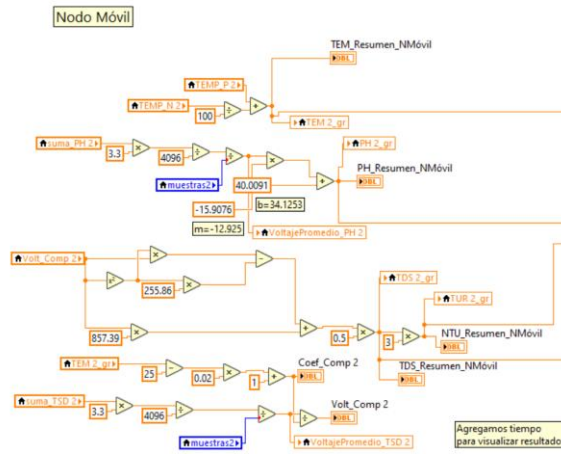


Fig. 3. 27 Programación a bloques para determinar el valor de cada parámetro registrado por el nodo móvil.

Una vez que finaliza el procesamiento en la estructura secuencial, los datos son graficados en tiempo real, y posteriormente, en la estructura “while”, fuera de la estructura “Flat sequence” se encuentran los bloques que proveen la información que se despliega en la ventana de “Resumen” en el panel frontal. Además, los datos recibidos se mandan a una base de datos generada automáticamente y formateada en Excel.

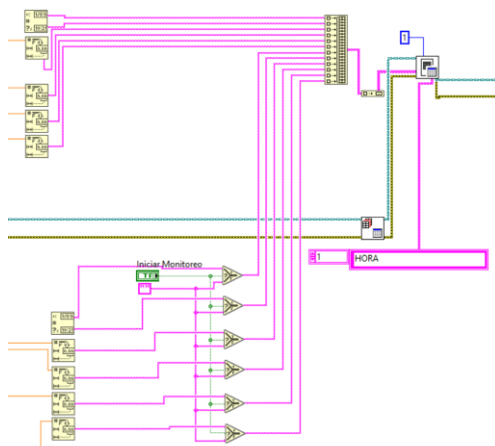


Fig. 3. 28 Creación y llenado de la base de datos desde la interfaz desarrollada.

Como se puede observar en la Fig. 3. 28, existen 2 conjuntos de datos. El primer conjunto pertenece al nodo estático y se actualizan todo el tiempo, mientras que el segundo conjunto pertenece a los parámetros registrados por el nodo móvil y su actualización se encuentra condicionada a un botón que puede ser accionado en la pestaña del nodo móvil, y subsección control, como se muestra en la Fig. 3. 29.

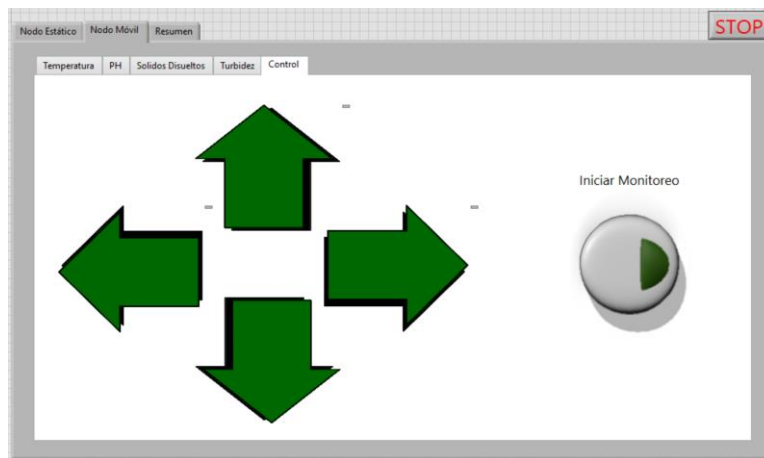


Fig. 3. 29 Comandos de control del nodo móvil y botón para iniciar y detener el registro en la base de datos.

3.2 Diseño

En esta sección se presenta el proceso de diseño seguido para el bosquejo y construcción de las terminales estática y móvil, además de los esquemas eléctricos elaborados, así como la PCB diseñada. En la sección de ANEXOS 1 se encuentran los planos completos de las terminales.

3.2.1 Modelo CAD del nodo estático

Previo al diseño de la terminal estática, se consideraron los factores críticos del sistema, entre los que se encuentra el hecho de que cada uno de los sensores tienen una forma de sonda, teniendo diámetros de 20mm para el sensor de pH, 10mm para el de TDS y 9mm para el de temperatura. Además, otro factor importante a considerar es que no todo el cuerpo del sensor es impermeable, por lo que se debe aislar la parte restante junto con el microcontrolador y la fuente de poder. Por ello, se consideró un material resistente a la intemperie, ligero y duradero, con propiedades aislantes eléctricas y amigable con el planeta, se trata del acrílico.

Como primer prototipo, se desarrolló el modelo del nodo estático consistente en un prisma cuadrangular de 14cm de ancho por 14cm de largo con una altura de 10cm, esto para almacenar el sistema basado en microcontrolador, así como los 3 sensores seleccionados, pH, total de sólidos disueltos, y temperatura, además del banco de energía consistente en 2 baterías recargables tipo 18650 de 3.7V cada una. Para el prototipo final, se desarrolló un prisma de 10cm de ancho por 10cm de largo con una altura de 8cm, optimizando el volumen en un 59% gracias a la implementación de una PCB.

En la Fig. 3. 29 se presenta el diseño de la cara lateral de la estación estática en donde se aprecia la ranura que permite la salida de cualquiera de los sensores incorporados, además de las cavidades propuestas para facilitar la sujeción de la terminal en un punto fijo.

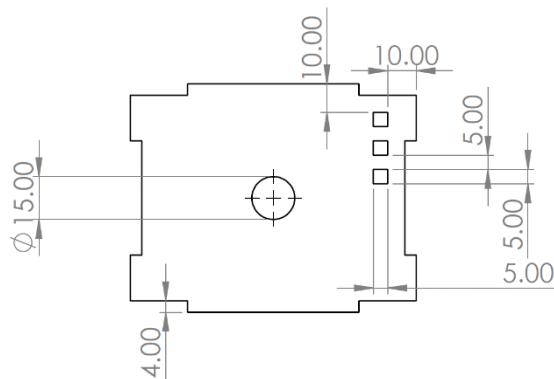


Fig. 3. 30 Diseño en función del tamaño de las sondas de cada sensor para la terminal estática correspondiente a su cara lateral.

A continuación, se presenta el modelo CAD del prisma ensamblado. Para ver a detalle las dimensiones del modelo, en la sección de ANEXOS 1 se encuentran los planos completos.

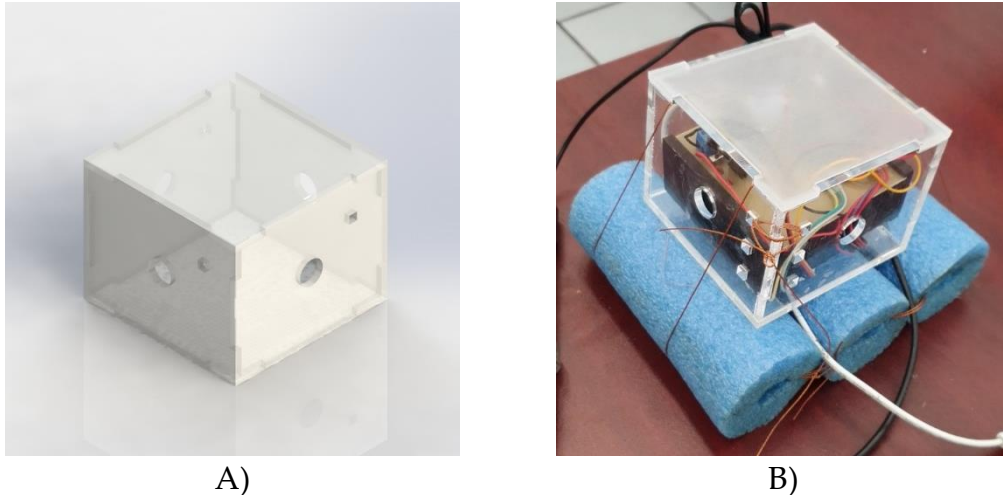


Fig. 3. 31 A) Modelo CAD renderizado del nodo estático. B) Ensamble y equipamiento del nodo estático con el sistema de monitoreo desarrollado.

Como se puede apreciar en la Fig. 3. 31 A), la terminal estática cuenta con ranuras en cada una de sus caras laterales, esto con el fin de facilitar la lectura de los parámetros utilizando los sensores seleccionados. Además, cuenta con aperturas cuadradas adicionales que se diseñaron para ser usadas para utilizar cinchos de seguridad y de esta manera fijar cada uno de los sensores, evitar su movimiento excesivo, así como desconexiones con el sistema.

La terminal fue fabricada utilizando acrílico de 4mm de espesor, posteriormente se colocó el sistema desarrollado dentro del prisma, se fijaron los cables de cada sensor y se selló tanto el prisma como cada orificio utilizando silicón y de esta manera aislando la parte del sistema que no es impermeable. En la Fig. 3. 31 B) se puede ver el nodo estático completamente ensamblado y equipado con el sistema de monitoreo de la calidad del agua.

3.2.2 Esquema eléctrico del sistema de monitoreo basado en microcontrolador del nodo estático

El esquema eléctrico del sistema desarrollado fue elaborado en el Software KiCad 7.0, un software libre con altas prestaciones tanto para el diseño de esquemáticos como de PCB. Se utilizó un regulador de voltaje L7805 para dotar a los sensores del voltaje necesario sin dañarlos, además, se implementó una ganancia de 0.5 a la salida del sensor de pH con el fin de tener una señal adecuada para ser procesada con el microcontrolador. Mientras que para el sensor de temperatura se utilizó una resistencia de pull-up y para el de TDS pasó su salida directamente al ADC de la tarjeta de desarrollo ya que va de 0V a 3.3V. En la Fig. 3. 32 se muestra el esquemático con todos los componentes utilizados. Además, se muestran las tres etapas principales que corresponden a alimentación, sensores y microcontrolador.

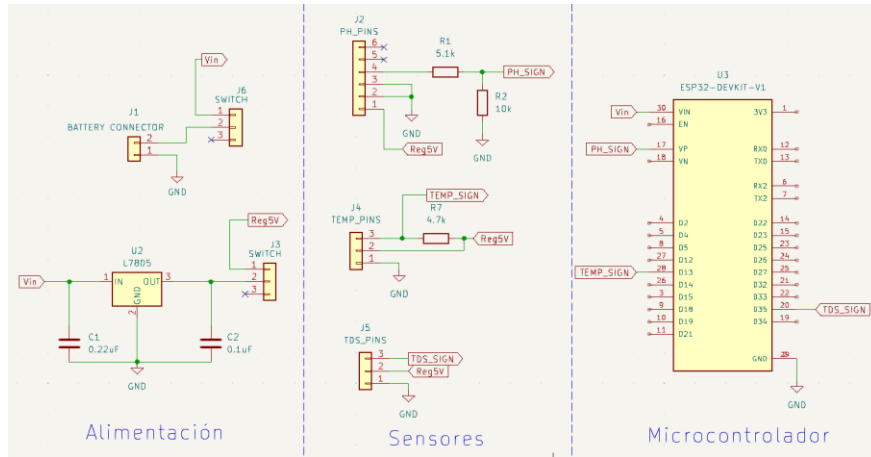


Fig. 3. 32 Esquema eléctrico del sistema de monitoreo de la calidad del agua.

3.2.3 Diseño de PCB del nodo estático

Con el esquema eléctrico listo, el siguiente paso fue seleccionar la huella a utilizar para cada componente, al igual que en el paso anterior, se usó el software KiCad 7.0 con el cual se procedió a diseñar la PCB. En la Fig. 3. 33 se muestra PCB lista para manufacturar, en la cual se puede ver que el área de tierra excede al resto de los componentes, esto debido al diseño del resto del sistema.

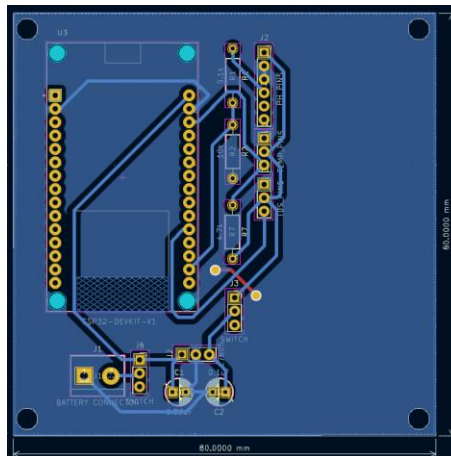


Fig. 3. 33 Diseño para la PCB del sistema de monitoreo de la calidad del agua.

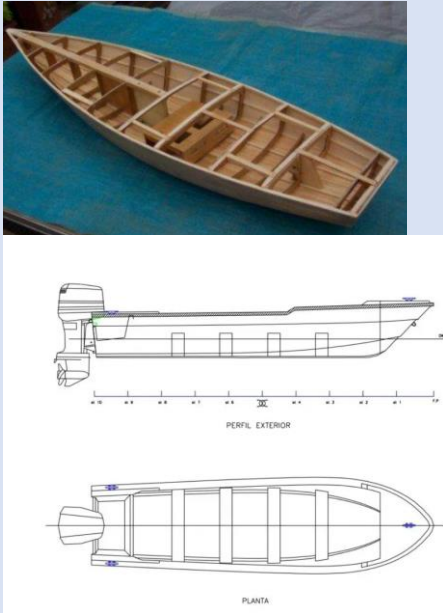
3.2.4 Modelo CAD del nodo móvil

Para el prototipo del nodo móvil se hizo una revisión respecto a vehículos que se desplazan en el agua, de esta manera se seleccionaron algunos modelos, y se desecharon otros que resultaban no ser tan adecuados para su implementación en este proyecto.

A continuación, se muestra una tabla que muestra los 3 modelos más relevantes que se consideraron para diseñar el vehículo capaz de desplazarse en un cuerpo de agua.

Tabla 3. 8 Resumen de los modelos de vehículos acuáticos.

Fuente consultada	Tipo de vehículo y descripción	Modelo a escala
[67]	<p>El Reef Rover es un vehículo autónomo de superficie pequeño y de bajo costo diseñado para mapear y monitorear arrecifes de coral y otros hábitats bentónicos. Utiliza software de código abierto Ardupilot y consta de 2 hélices como propulsión.</p>	
[68]	<p>Un catamarán es una embarcación que se distingue por tener dos cascos paralelos, lo que le confiere una estabilidad y velocidad superiores en comparación con los monocascos. Estos barcos pueden ser de vela o motor y ofrecen una experiencia de navegación segura y confortable, con menos inclinación y resistencia al avance en el agua.</p>	

[69]	<p>Las lanchas con una sola hélice y “Deep Vee” son una opción común para muchas embarcaciones, especialmente aquellas diseñadas para la velocidad y la eficiencia. La elección de la hélice adecuada depende de varios factores, incluyendo el tipo de embarcación, el motor y el uso previsto.</p>	
------	--	--

El análisis de los modelos de vehículos acuáticos como el Reef Rover, Catamarán, y lanchas deep vee ha llevado al diseño innovador de un vehículo híbrido que combina las mejores características de estos modelos. La elección del diseño de doble casco del Catamarán para la estabilidad y la incorporación de dos hélices del modelo Reef Rover para la propulsión reflejan un enfoque meticuloso para mejorar la eficiencia y el control en el agua. La inclinación específica de 45° de las hélices no solo optimiza el torque, sino que también minimiza las salpicaduras, protegiendo así los componentes internos del vehículo. En la Fig. 3.33 A) se muestra el diseño de la hélice, además, la Fig. 3.33 B) muestra la popa del vehículo que fue diseñada considerando el modelo Deep Vee, con el fin de romper la tensión superficial y tener un desplazamiento más suave sobre los cuerpos de agua. Respecto al cuerpo del navío, se optó por una forma de prisma cuadrangular con caras laterales irregulares, como se muestra en la Fig. 3.34, con el espacio suficiente para almacenar de manera segura el banco de baterías, así como los sensores. Para cada elemento que compone el nodo móvil se encuentra un plano detallado que puede consultarse en la sección de ANEXOS 1.

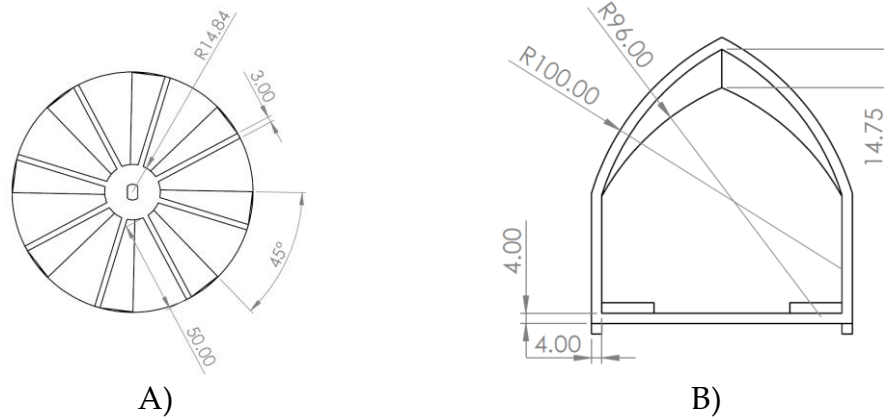


Fig. 3. 34 A) Diseño de la hélice con la consideración angula de diseño para mejorar su tracción en el agua. B) Diseño de la proa con consideración de forma en el diseño para facilitar la ruptura de la tensión superficial y así mejorar su desplazamiento en el cuerpo de agua.

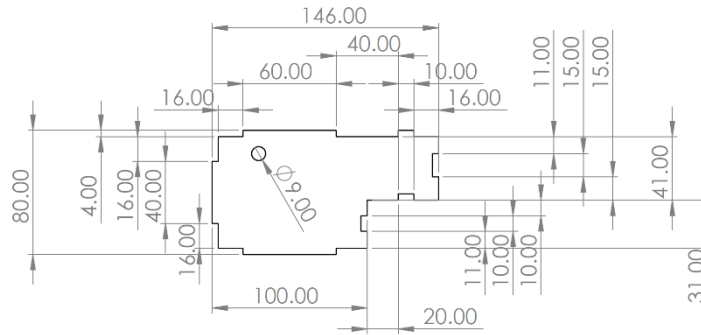


Fig. 3. 35 Diseño de la cara lateral del cuerpo del bote considerando el espacio necesario para albergar el banco de baterías y los sensores.

La integración de un sistema de monitoreo de la calidad del agua es un testimonio de la estabilidad alcanzada con este diseño, permitiendo que el vehículo realice mediciones precisas sin comprometer su funcionamiento. La selección de materiales como el acrílico para la estructura principal, el poliestireno expandido para la flotabilidad y el EVA para los cascos, demuestra una consideración cuidadosa de la durabilidad, la funcionalidad y la seguridad. Este enfoque holístico en el diseño no solo asegura que el vehículo se mantenga a flote, sino que también cumple con su función esencial de monitorear los parámetros del agua de manera confiable.

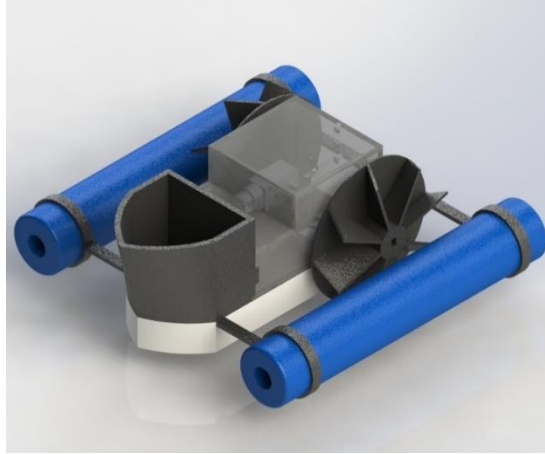


Fig. 3. 36 B) Modelo CAD renderizado del vehículo que compone al nodo móvil.

Este vehículo representa un avance significativo en la tecnología de vehículos acuáticos, ofreciendo una plataforma robusta y versátil para la investigación y el monitoreo ambiental. Su capacidad para operar de manera eficiente y precisa en diversos entornos acuáticos lo convierte en una herramienta valiosa para científicos y conservacionistas.

3.2.5 Esquema eléctrico del sistema de monitoreo basado en microcontrolador del nodo móvil

El esquema eléctrico del sistema desarrollado fue elaborado en el Software KiCad 7.0 al igual que el del nodo estático, sin embargo, para este nodo se agregaron terminales para controlar los actuadores utilizando un módulo de 2 puentes H. A continuación, se muestra el diagrama eléctrico del nodo móvil. Es importante mencionar que cuenta con terminales listas para usarse con un módulo GPS.

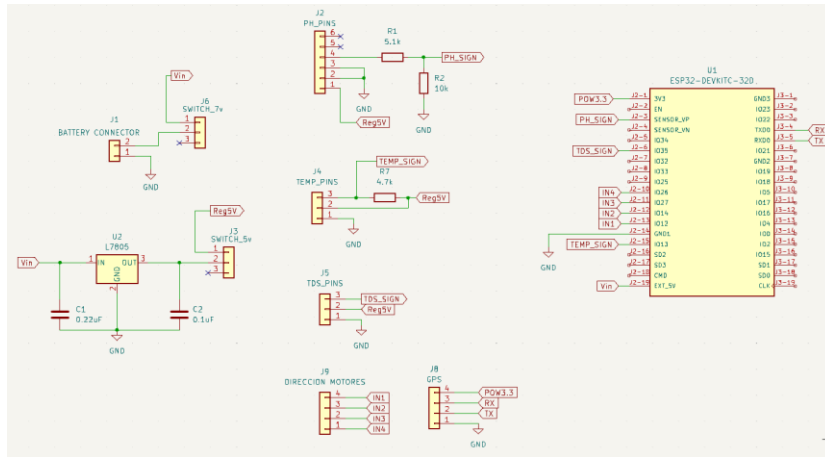


Fig. 3. 37 Esquema eléctrico del sistema de monitoreo de la calidad del agua del nodo móvil.

3.2.6 Diseño PCB del nodo móvil

Con el esquema eléctrico listo, el siguiente paso fue seleccionar la huella a utilizar para cada componente, al igual que en el paso anterior, se usó el software KiCad 7.0 con el cual se procedió a diseñar la PCB. En la Fig. 3. 38 se muestra la PCB diseñada, que a diferencia de la del nodo estática, esta cuenta con más conectores para el control de motores, además de que su forma se adapta a la proa del barco diseñado.

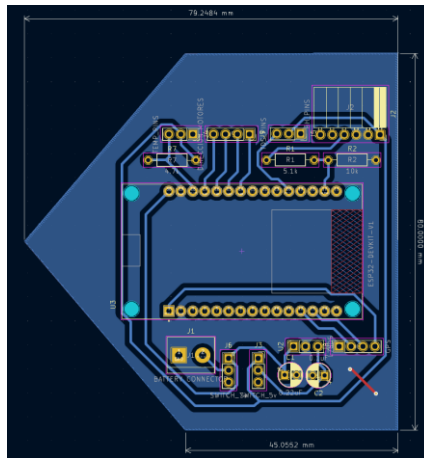


Fig. 3. 38 Diseño para la PCB del sistema de monitoreo de la calidad del agua.

3.2.7 Consumo de energía

El consumo energético del sistema se desglosa a continuación:

1. ESP32
 - Modo activo con WiFi: 240 mA (transmitiendo datos) y 100 mA (recibiendo datos).
 - Consumo: Ya que la transmisión y recepción se realizan de manera continua, se considera el consumo de 240mA.
2. Sensor de pH PH-4502C
 - Consumo típico: 5-10 mA, se considera un promedio de 7.5mA
3. Sensor de TDS CQRSENTDS01
 - Consumo típico: 3-5 mA, se considera un promedio de 4mA
4. Sensor de temperatura DS18B20
 - Consumo típico: 1.5 mA.
5. Puente H L298N
 - Consumo propio del módulo: 20 mA (sin carga).
 - Consumo con carga (motores): 500mA por motor.

Cálculo Total para la terminal estática

Se suman los consumos de cada componente para obtener el consumo total del sistema:

$$\text{Consumo total NE} = 240 \text{ mA} + 7.5 \text{ mA} + 4 \text{ mA} + 1.5 \text{ mA}$$

$$\text{Consumo total NE} = 253 \text{ mA}$$

Consumo en mAh

Si el sistema funciona continuamente durante una hora, el consumo en mAh sería:

$$\text{Consumo total NE} = 253 \text{ mA} \times 1 \text{ hora} = 253 \text{ mAh} \quad (11)$$

Dado que el banco de energía tiene 7.4V, el consumo en mAh se ajusta de la siguiente manera:

$$\text{Consumo ajustado NE} = \frac{253 \text{ mA} \times 3.7 \text{ V}}{7.4 \text{ V}}$$

$$\text{Consumo ajustado NE} = 126.5 \text{ mA} \quad (12)$$

Y se obtiene la autonomía siguiente:

$$\text{Autonomía NE} = \frac{2200 \text{ mAh}}{126.5 \text{ mA}}$$

$$\text{Autonomía NE} \approx 17.39 \text{ horas} \quad (13)$$

Cálculo total para la terminal móvil:

Primero se debe de calcular el consumo del sistema considerando al módulo de puente H en reposo, con lo que se tiene

$$\text{Consumo total NM reposo} = 253 \text{ mA} + 20 \text{ mA}$$

$$\text{Consumo total NE reposo} = 273 \text{ mA} \quad (14)$$

Se calcula el consumo durante la activación suponiendo 1000mA por 2 minutos cada media hora, se tiene un promedio de consumo adicional por hora como se muestra a continuación:

$$\text{Consumo adicional} = \frac{1000 \text{ mA} \times 2 \text{ minutos}}{60 \text{ minutos}}$$

$$\text{Consumo adicional} = 33.33 \text{ mA} \quad (15)$$

Se ajusta el consumo en base al banco de energía utilizado:

$$\text{Consumo total NM} = \frac{(273 \text{ mA} + 33.33 \text{ mA}) \times 3.7 \text{ V}}{7.4 \text{ V}}$$

$$\text{Consumo total NM} = 153.165 \text{ mA} \quad (16)$$

Se calcula la autonomía para el nodo móvil:

$$\text{Autonomía NM} = \frac{2200 \text{ mAh}}{153.165 \text{ mA}}$$

$$\text{Autonomía NM} \approx 14.36 \text{ horas} \quad (17)$$

CAPÍTULO 4

IMPLEMENTACIÓN DE LA WSN PARA LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo destaca cómo, con un diseño innovador que incluye solo dos nodos, de los cuales uno de ellos móvil, el sistema ha logrado monitorear eficazmente varios parámetros que determinan la calidad del agua, entre ellos el pH, el total de sólidos disueltos y la temperatura. La movilidad de uno de los nodos es particularmente significativa, ya que permite una cobertura más amplia y una recolección de datos más rica en comparación con sistemas estáticos. Además, el análisis detallado de las gráficas generadas durante tres días consecutivos a la misma hora proporciona una visión clara de la consistencia y fiabilidad del sistema de red inalámbrica de sensores (WSN, por sus siglas en inglés). Estos resultados no solo demuestran la viabilidad del sistema diseñado, sino que también abren la puerta a futuras investigaciones y mejoras en el monitoreo ambiental a través de tecnologías inalámbricas.

4.1 Implementación

Con los sensores calibrados correctamente, los nodos conectados entre sí, y la comunicación establecida con la interfaz gráfica, se procedió a realizar pruebas en un cuerpo de agua, en este caso en la alguna de Ciudad Universitaria ubicada en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, en donde habitan algunas especies animales tales como patos, garzas, tortugas y peces, además de contar con árboles y arbustos a los alrededores, así como algunos islotes. Antes de colocar la estación fija, o nodo estático, se verifico la cobertura de internet, esto con el fin de poder conectarse y acceder al servidor alojado en la PC. En el mapa de la Fig. 4. 1 A) se muestra la cobertura de internet en la zona, y en la Fig. 4. 1 B) se muestra la ubicación aproximada en donde se estableció la terminal estática.



Fig. 4. 1 A) Área de cobertura de la red WiFi con acceso a internet en el entorno de medición 1: Laguna de CU BUAP, representada con la zona azul en el mapa. B) Ubicación aproximada con Googel Earth del nodo estático.

Como se puede observar, la cobertura en la zona de la laguna no es muy extensa, pero hay un área suficiente, marcada en azul, para colocar el nodo estático y de esa manera establecer la conexión con la interfaz utilizando el IoT. Por otra parte, el desempeño del nodo móvil no se ve comprometido ya que su conexión con el nodo fijo se realiza sin necesidad de estar ambos conectados a internet. En la Fig. 4. 1 B) también se pueden observar las coordenadas obtenidas en Google Earth para el punto en donde se estableció la terminal fija. Además, en Fig. 4. 2 A) y B) se muestra el nodo fijo situado en las coordenadas antes mencionadas.

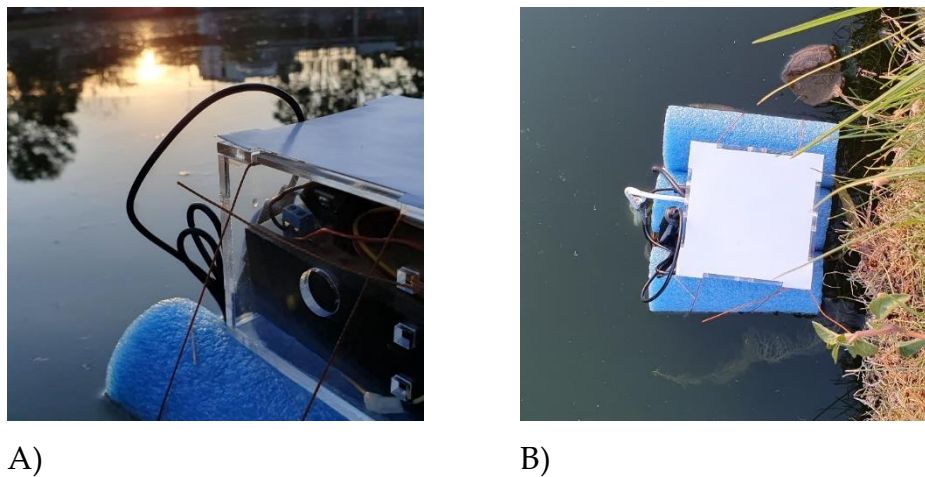


Fig. 4. 2 A) Nodo estático situado en las coordenadas $19^{\circ}00'15''N$, $98^{\circ}12'18''O$ en el entorno de medición 1: Laguna de CU BUAP. B) Vista superior de la terminal estática.

El siguiente paso fue usar el IoT para conectar el nodo fijo a la interfaz gráfica. Dicho paso se explica con mayor detalle en la sección Canal de comunicación en OPC Servers y Gestión de datos. Una vez establecida la comunicación, se procedió a colocar el vehículo diseñado en el cuerpo de agua, se encendió el dispositivo y se comprobó su conexión con el otro nodo, esto gracias a

indicadores led incorporados en ambos sistemas. En la Fig. 4. 3 se muestra el vehículo listo para operar.

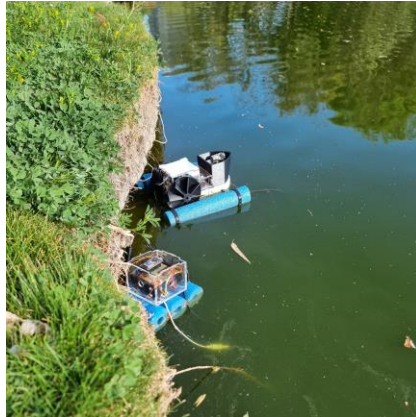
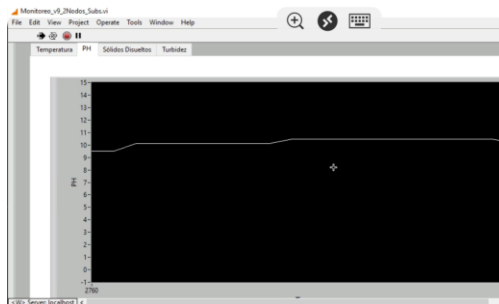


Fig. 4. 3 Nodos, estático y móvil, instalados en el entorno de medición 1: Laguna de CU BUAP.

Una vez establecida la comunicación entre cada uno de los nodos, se inicializó la interfaz gráfica, y se utilizó la aplicación de Escritorio remoto en un teléfono inteligente, donde se pudo visualizar el comportamiento de los parámetros del agua, además de controlar el desplazamiento del vehículo. Esto se realizó así ya que hay una mayor independencia para monitorear en tiempo real, además de que, durante la ejecución del escritorio remoto, es posible utilizar otras funciones del teléfono, por ejemplo la cámara.



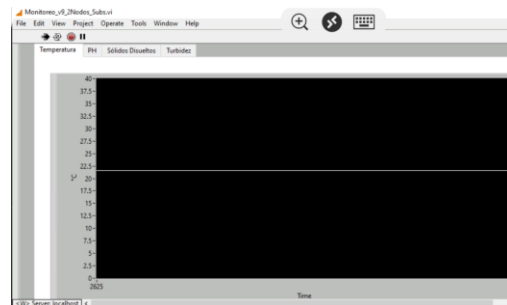
A) pH en tiempo real.



B) TDS en tiempo real.



C) Turbidez en tiempo real.



D) Temperatura en tiempo real.

Fig. 4. 4 Monitoreo en tiempo real visualizado desde un smartphone utilizando la aplicación de "Escritorio Remoto".

Una vez comprobada la comunicación de la WSN, se puso en marcha al nodo móvil. Todo esto desde la interfaz gráfica, y con ayuda de un dron y Google Eath, se determinó su posición. A continuación, en la Fig. 4. 5 se muestra el área de cobertura óptima teniendo en cuenta el dimensionamiento de la red realizado previamente.

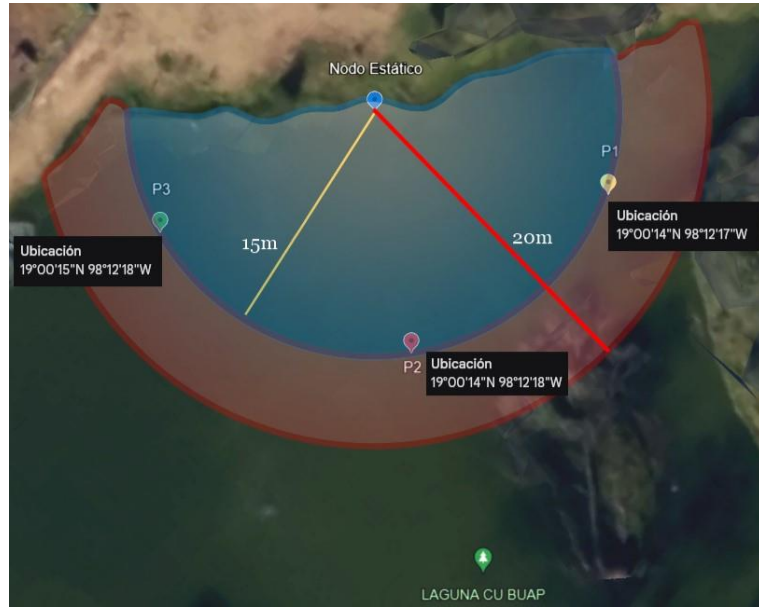


Fig. 4. 5 Zona de cobertura de la WSN y posicionamiento del nodo móvil, correspondiente al campo de prueba 1 determinado con las antenas incorporadas de las tarjetas de desarrollo.

En la Fig. 4. 5 se pueden observar 2 zonas, la azul, en donde el RSSI está catalogado como un indicador de que la señal es buena, y la roja, en la que la intensidad de señal es mala. De esta manera, se tiene que el dimensionamiento es adecuado, con un área de cobertura de 15m de radio para un óptimo desempeño y hasta una superficie de 20m de radio con un desempeño reducido, en la que existe pérdida de datos y de conexión. Además, la figura muestra los 3 principales puntos en donde se situó el nodo móvil, así como sus coordenadas aproximadas.

Para la toma de muestras, el procedimiento fue el siguiente: primero se utilizaron los controles de la interfaz gráfica para situar al nodo móvil en el punto de interés, una vez encontrada la posición de interés se detuvieron los actuadores y se presionó el botón para iniciar el monitoreo de ambos nodos. Pasado el tiempo deseado, se volvió a utilizar el control de direcciones para llevar al nodo móvil al siguiente punto y repetir el procedimiento cuantas veces fuera necesario. En la Fig. 4. 6 se muestra una captura tomada desde el teléfono inteligente en donde se controla al vehículo al mismo tiempo que la cámara se encuentra activada.

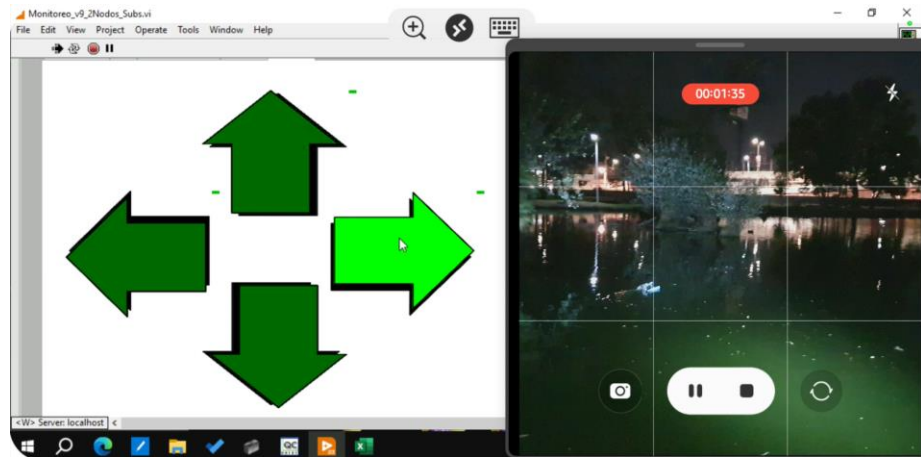
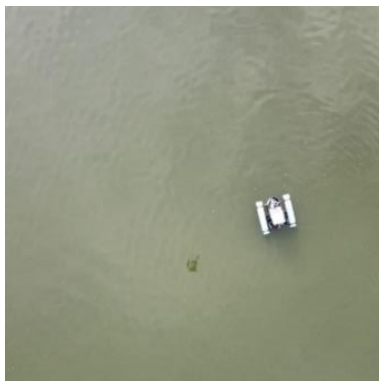


Fig. 4. 6 Control del vehículo diseñado utilizando un escritorio remoto desde un teléfono inteligente en donde la cámara del dispositivo es activada.

También se muestra una captura tomada con el dron enfocando al nodo móvil en la laguna, la cual se muestra en Fig. 4. 7 A). Como se puede apreciar, el dispositivo no tiene problemas con permanecer flotando en el cuerpo de agua, además de que se puede ver que se trata de un vehículo totalmente inalámbrico. Por otro lado, en la Fig. 4. 7 B) se muestra una foto de alta resolución del nodo móvil en un punto de interés, así como capturas con diferentes niveles de zoom para visualizar la distancia aproximada del nodo móvil respecto a la estación base. Además, durante el monitoreo también se tomaron medidas con herramientas dedicadas a la lectura de los parámetros que contiene el sistema desarrollado, esto con el fin de comparar y verificar el correcto funcionamiento del prototipo construido. En la Fig. 4. 9 se muestran los instrumentos utilizados para corroborar las lecturas obtenidas por el sistema desarrollado.



A)



B)

Fig. 4. 7 A) Captura tomada con un dron. B) Captura tomada con una cámara de alta resolución.



A)



B)

Fig. 4. 8 Captura tomada para visualizar una distancia aproximada del nodo móvil respecto a la estación base. B) Captura tomada con zoom.



Fig. 4. 9 Instrumentos especializados para medir pH, TDS, y temperatura.

Se realizó una segunda implementación en la que se consideró un cuerpo de agua diferente, en esta ocasión un lago ubicado en el Parque Ecológico Revolución Mexicana en la ciudad de Puebla.

Para este nuevo conjunto de mediciones se utilizó el dimensionamiento de la Tabla 3. 7, que proporciona un mayor alcance respecto al dimensionamiento de la Tabla 3. 6. Además, en el periodo correspondiente al muestreo de parámetros, del 29 al 31 de agosto de 2024, se utilizó un teléfono móvil como punto de acceso a internet para el nodo fijo y así poder guardar los datos en la nube. De esta manera, en la Fig. 4. 10 se muestran las ubicaciones de cada uno de los puntos de interés monitoreados, así como la del nodo estático.

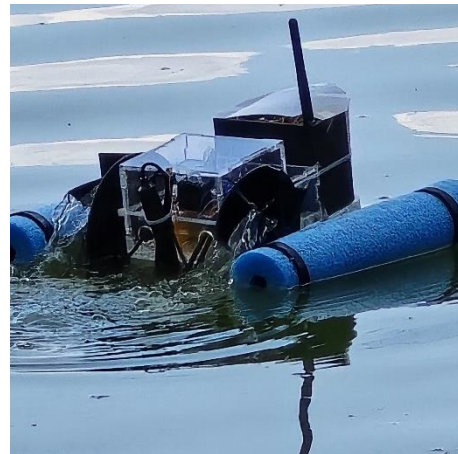


Fig. 4. 10 Zona de cobertura de la WSN y posicionamiento del nodo móvil, correspondiente entorno de medición 2 determinado con la antena incorporada de la tarjeta de desarrollo del nodo fijo y la antena externa incorporada al nodo móvil.

En la Fig. 4. 11 A) se muestran los 2 nodos listos para funcionar. Como se puede apreciar, el nodo fijo se sitúa cerca de la orilla del lago, mientras que el nodo dinámico con la antena incorporada parte del mismo sector para después recorrer el área y situarse para recopilar datos en los puntos P1, P2, P3 y P4. En la Fig. 4. 11 B) se muestra una captura fotográfica ampliada del nodo móvil en funcionamiento en el cuerpo de agua, mientras que en la Fig. 4. 12 se muestra una toma panorámica del entorno en donde se realizó el monitoreo.



A)



B)

Fig. 4. 11 A) Nodos, estático y móvil, listos para funcionar en el campo de prueba 2. B) Toma ampliada del nodo móvil en funcionamiento.



Fig. 4. 12 Captura amplia del nodo móvil funcionando en el campo de prueba 2.

4.2 Resultados

Para verificar la operatividad de la red, se efectuaron muestreos a lo largo de seis días. En este lapso, se mantuvieron condiciones constantes, monitoreando puntos comparables en el mismo horario. Se estableció una hora de monitoreo ininterrumpido, con intervalos de recolección de datos simultáneos no mayores a seis minutos, permitiendo así mediciones concurrentes entre los nodos móviles y fijos.

Así, considerando que las pruebas se efectuaron en dos diferentes cuerpos de agua, se expone la Tabla 4. 1, que detalla el procedimiento de monitoreo en el primer entorno de medición, y la Tabla 4. 2, que describe el proceso de muestreo en el segundo entorno.

Tabla 4. 1 Monitoreo correspondiente al entorno de medición 1

Laguna de Ciudad Universitaria BUAP, Puebla, México.

Puntos de interés:	Intervalo de muestreo simultáneo	Días monitoreados
NE–NM(P2)	19:13hrs-19:18hrs.	04/03 y 05/03 de 2024
NE–NM(P3)	19:33hrs-19:38hrs.	
NE–NM(P1)	19:22hrs-19:27hrs.	29/02, 04/03 y 05/03 de 2024

Tabla 4. 2 Monitoreo correspondiente al entorno de medición 2

Lago del Parque Ecológico Revolución Mexicana, Puebla, México.

Puntos de interés:	Intervalo de muestreo simultáneo	Días monitoreados
NE–NM(P1)	13:39hrs-13:45hrs.	
NE–NM(P2)	13:56hrs-14:02hrs.	29/08, 30/08 y 31/08 de
NE–NM(P3)	14:09hrs-14:15hrs.	2024
NE–NM(P4)	14:20hr – 14:26hrs	

En la Fig. 4. 13 se muestran las gráficas correspondientes al intervalo de monitoreo continuo del primer entorno de medición. Además, en la Fig. 4. 14 se presentan las gráficas que corresponden al intervalo de 19:13hrs a 19:18hrs cuyos registros pertenecen al 04/03 y 05/03 de 2024, mientras que la Fig. 4. 15 muestra la información recabada en el intervalo 19:22hrs. a 19:27hrs. en donde se pueden apreciar las curvas de los 3 días, 29/02, 04/03 y 05/03 de 2024.

Por otro lado, se tiene la Fig. 4. 16 que muestra el lapso de monitoreo continuo correspondiente al entorno de medición 2 durante los 3 días en que se realizó la implementación. Adicionalmente, en la Fig. 4. 17 se exponen las curvas de los 3 días para los puntos de interés NE–NM(P1), mientras que en la Fig. 4. 18 se detalla la evolución de los parámetros en el intervalo correspondiente a los puntos NE–NM(P3).

Con los datos recabados de cada nodo en cada punto de interés a lo largo de los periodos de monitoreo establecidos se obtuvo la Tabla 4. 3 que muestra los datos estadísticos, promedio, máximos, mínimos y desviación estándar, para cada caso en el entorno de medición 1. Mientras tanto, la Tabla 4. 4 muestra la colección de estadísticas correspondientes al entorno de medición 2.

Tabla 4. 3 Datos estadísticos obtenidos de los datos almacenados en la base de datos en el entorno de medición 1.

Información de nodo	Promedio	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
NE TEMPERATURA29/02/2024	20.9152157	21	20.87	0.028510029
NM TEMPERATURA29/02/2024	20.8318824	20.87	20.75	0.032589395
NE TEMPERATURA04/03/2024	21.6407451	21.75	21.5	0.048512589
NM TEMPERATURA04/03/2024	21.5756471	21.62	21.56	0.026369614
NE TEMPERATURA05/03/2024	21.5645882	21.62	21.5	0.024950384
NM TEMPERATURA05/03/2024	21.3680588	21.5	21.12	0.096078085
NE PH29/02/2024	8.7846682	9.057871	8.061186	0.376302859

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

NM PH29/02/2024	11.9948662	13.569317	11.618728	0.532527559
NE PH04/03/2024	9.21585117	9.748117	8.751098	0.445918441
NM PH04/03/2024	12.1142052	13.107935	11.636772	0.464279592
NE PH05/03/2024	8.99217753	9.419688	8.420356	0.446348239
NM PH05/03/2024	6.58713682	7.404734	5.982138	0.397573794
NE TURBIDEZ29/02/2024	926.794673	937.281345	919.842531	3.570883993
NM TURBIDEZ29/02/2024	1040.39249	1060.95702	1027.99566	7.474939274
NE TURBIDEZ04/03/2024	982.758795	986.229057	976.769358	2.022944803
NM TURBIDEZ04/03/2024	814.686725	867.972048	727.300803	31.52550515
NE TURBIDEZ05/03/2024	986.518309	990.917112	977.448747	1.677763071
NM TURBIDEZ05/03/2024	1034.97831	1049.49284	1022.98796	6.221559044
NE TDS29/02/2024	308.931558	312.427115	306.614177	1.190294664
NM TDS29/02/2024	346.797495	353.652341	342.665221	2.491646425
NE TDS04/03/2024	327.586265	328.743019	325.589786	0.674314934
NM TDS04/03/2024	271.562242	289.324016	242.433601	10.50850172
NE TDS05/03/2024	328.839436	330.305704	325.816249	0.559254357
NM TDS05/03/2024	344.992769	349.830946	340.995985	2.073853015
NE TEMPERATURA04/03/2024	21.7975446	21.87	21.75	0.031306349
NM TEMPERATURA04/03/2024	21.6078125	21.68	21.56	0.030633003
NE TEMPERATURA05/03/2024	21.5887946	21.62	21.56	0.030009287
NM TEMPERATURA05/03/2024	21.5235938	21.62	21.43	0.047757639
NE PH04/03/2024	9.33350183	9.745302	8.753411	0.418153044
NM PH04/03/2024	11.9458496	13.107935	11.631544	0.350999739
NE PH05/03/2024	8.83398538	9.419354	8.420356	0.434771063
NM PH05/03/2024	6.6524984	7.225307	5.982138	0.411715404
NE TURBIDEZ04/03/2024	941.209209	946.382076	936.501756	2.176286055
NM TURBIDEZ04/03/2024	778.664331	829.636188	690.26232	21.06725058
NE TURBIDEZ05/03/2024	991.988203	996.247611	976.070112	3.550950893
NM TURBIDEZ05/03/2024	1010.85254	1028.01774	991.205688	10.13878774
NE TDS04/03/2024	313.736403	315.460692	312.167252	0.725428685
NM TDS04/03/2024	259.554777	276.545396	230.08744	7.022416859
NE TDS05/03/2024	330.662734	332.082537	325.356704	1.183650298
NM TDS05/03/2024	336.950847	342.672581	330.401896	3.379595912
NE TEMPERATURA04/03/2024	21.5758667	21.62	21.56	0.026491668
NM TEMPERATURA04/03/2024	21.4998667	21.56	21.43	0.032960528
NE TEMPERATURA05/03/2024	21.4472667	21.5	21.43	0.030208555
NM TEMPERATURA05/03/2024	21.3333333	21.43	21.25	0.043952799
NE PH04/03/2024	9.23250731	9.743323	8.753912	0.410308653
NM PH04/03/2024	13.2710123	13.622943	12.954141	0.221018653
NE PH05/03/2024	9.01772722	9.419688	8.42515	0.425195616
NM PH05/03/2024	6.36218028	6.994616	5.828344	0.40305752
NE TURBIDEZ04/03/2024	975.27221	979.468662	969.944184	2.00398942
NM TURBIDEZ04/03/2024	862.572636	882.714237	843.676431	12.60245886
NE TURBIDEZ05/03/2024	990.02078	994.373526	986.216922	1.891074396
NM TURBIDEZ05/03/2024	1049.07335	1095.4215	1030.41728	9.644328085

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

NE TDS04/03/2024	325.090737	326.489554	323.314728	0.667996473
NM TDS04/03/2024	287.524212	294.238079	281.225477	4.200819621
NE TDS05/03/2024	330.006927	331.457842	328.738974	0.630358132
NM TDS05/03/2024	349.691117	365.1405	343.472425	3.214776028

Tabla 4. 4 Datos estadísticos obtenidos de los datos almacenados en la base de datos en el entorno de medición 2.

Información de nodo	Promedio	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
NE TEMPERATURA29/08/2024	24.3170706	24.38	24.26	0.037361208
NM TEMPERATURA29/08/2024	24.1866258	24.23	24.12	0.030484482
NE TEMPERATURA30/08/2024	24.0743098	24.13	24	0.039419548
NM TEMPERATURA30/08/2024	24.0034969	24.06	23.94	0.039753986
NE TEMPERATURA31/08/2024	23.8954141	23.99	23.86	0.033311549
NM TEMPERATURA31/08/2024	24.201135	24.24	24.11	0.030569608
NE TDS29/08/2024	235.687048	238.37208	233.781429	1.346860008
NM TDS29/08/2024	190.980251	201.24292	185.451397	3.775392301
NE TDS30/08/2024	219.801551	230.5279	212.167252	7.368138251
NM TDS30/08/2024	161.532757	181.65019	128.75744	9.46866222
NE TDS31/08/2024	231.043906	232.30379	225.356704	1.135008164
NM TDS31/08/2024	145.737584	176.93086	136.681274	4.988811908
NE PH29/08/2024	9.0972088	9.299922	8.984187	0.078476276
NM PH29/08/2024	8.79242025	8.9695	8.6975	0.067900802
NE PH30/08/2024	8.49265701	8.753902	8.207797	0.170325843
NM PH30/08/2024	8.15937307	8.387254	7.848165	0.155592001
NE PH31/08/2024	8.61802622	8.963156	8.332424	0.177622436
NM PH31/08/2024	7.19840085	7.491307	6.888138	0.141695302
NE TURBIDEZ29/08/2024	707.061144	715.11624	701.344287	4.040580025
NM TURBIDEZ29/08/2024	572.940753	603.72877	556.35419	11.3261769
NE TURBIDEZ30/08/2024	659.404653	691.5837	636.501756	22.10441475
NM TURBIDEZ30/08/2024	484.598272	544.95057	386.27232	28.40598666
NE TURBIDEZ31/08/2024	693.131719	696.91136	676.070112	3.405024493
NM TURBIDEZ31/08/2024	437.212752	530.79257	410.043822	14.96643572
NE TEMPERATURA29/08/2024	24.3896007	24.51	24.25	0.075724326
NM TEMPERATURA29/08/2024	24.3399501	24.39	24.29	0.037222272
NE TEMPERATURA30/08/2024	23.9521797	24	23.94	0.024153833
NM TEMPERATURA30/08/2024	23.9590682	24	23.88	0.031397404
NE TEMPERATURA31/08/2024	23.8853577	23.92	23.8	0.032556312
NM TEMPERATURA31/08/2024	24.0753245	24.24	23.99	0.056641589
NE TDS29/08/2024	226.434088	231.17893	216.527704	3.600904735
NM TDS29/08/2024	198.397913	202.96316	190.705203	2.363922223
NE TDS30/08/2024	225.136016	226.48955	223.314728	0.614031516
NM TDS30/08/2024	179.335035	192.15807	160.831632	5.282324197
NE TDS31/08/2024	229.769533	232.5277	228.514393	0.747931564

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

NM TDS31/08/2024	153.239196	159.83095	138.769146	4.991094494
NE PH29/08/2024	9.37904451	9.578927	9.011657	0.130255236
NM PH29/08/2024	9.0721822	9.2415	8.9335	0.091272744
NE PH30/08/2024	8.55097373	8.738038	8.231599	0.141118143
NM PH30/08/2024	8.13587175	8.388872	7.89943	0.141447538
NE PH31/08/2024	8.62648941	8.959192	8.332424	0.182898285
NM PH31/08/2024	7.19125505	7.452454	6.888138	0.168994499
NE TURBIDEZ29/08/2024	679.302263	693.53678	649.583112	10.8027142
NM TURBIDEZ29/08/2024	595.193739	608.88949	572.115609	7.091766669
NE TURBIDEZ30/08/2024	675.408049	679.46866	669.944184	1.842094548
NM TURBIDEZ30/08/2024	538.005106	576.47422	482.494896	15.84697259
NE TURBIDEZ31/08/2024	689.308598	697.58309	685.543179	2.243794693
NM TURBIDEZ31/08/2024	459.717587	479.49284	416.307438	14.97328348
NE TEMPERATURA29/08/2024	24.4101975	24.52	24.37	0.046003563
NM TEMPERATURA29/08/2024	24.1653321	24.26	24.12	0.045234472
NE TEMPERATURA30/08/2024	23.9598205	24	23.88	0.030238323
NM TEMPERATURA30/08/2024	24.0047397	24.06	23.94	0.039133769
NE TEMPERATURA31/08/2024	23.8423339	23.92	23.8	0.029643138
NM TEMPERATURA31/08/2024	24.0644165	24.24	23.99	0.06674249
NE PH29/08/2024	9.43147942	9.594793	9.275505	0.114046428
NM PH29/08/2024	8.96364363	9.1415	8.7275	0.110898785
NE PH30/08/2024	8.55650888	8.78432	8.207797	0.147648777
NM PH30/08/2024	8.06349359	8.233055	7.808908	0.122471489
NE PH31/08/2024	8.63950653	8.959192	8.332424	0.190403804
NM PH31/08/2024		7.439638	6.888138	
NE TURBIDEZ29/08/2024	715.029878	735.48199	688.846518	9.247698812
NM TURBIDEZ29/08/2024	674.432291	683.21799	665.155094	5.042553878
NE TURBIDEZ30/08/2024	674.797436	680.13267	669.944184	1.675556617
NM TURBIDEZ30/08/2024	545.943403	579.34327	517.286877	24.51494934
NE TURBIDEZ31/08/2024	687.682821	693.59036	677.448747	2.613899995
NM TURBIDEZ31/08/2024	472.499842	525.4215	425.206689	13.65803765
NE TDS29/08/2024	238.343293	245.16066	229.615506	3.082566271
NM TDS29/08/2024	224.810764	227.73933	221.718365	1.680851293
NE TDS30/08/2024	224.932479	226.71089	223.314728	0.558518872
NM TDS30/08/2024	181.981134	193.11442	172.428959	8.171649781
NE TDS31/08/2024	229.227607	231.19679	225.816249	0.871299998
NM TDS31/08/2024	157.499947	175.1405	141.735563	4.552679218

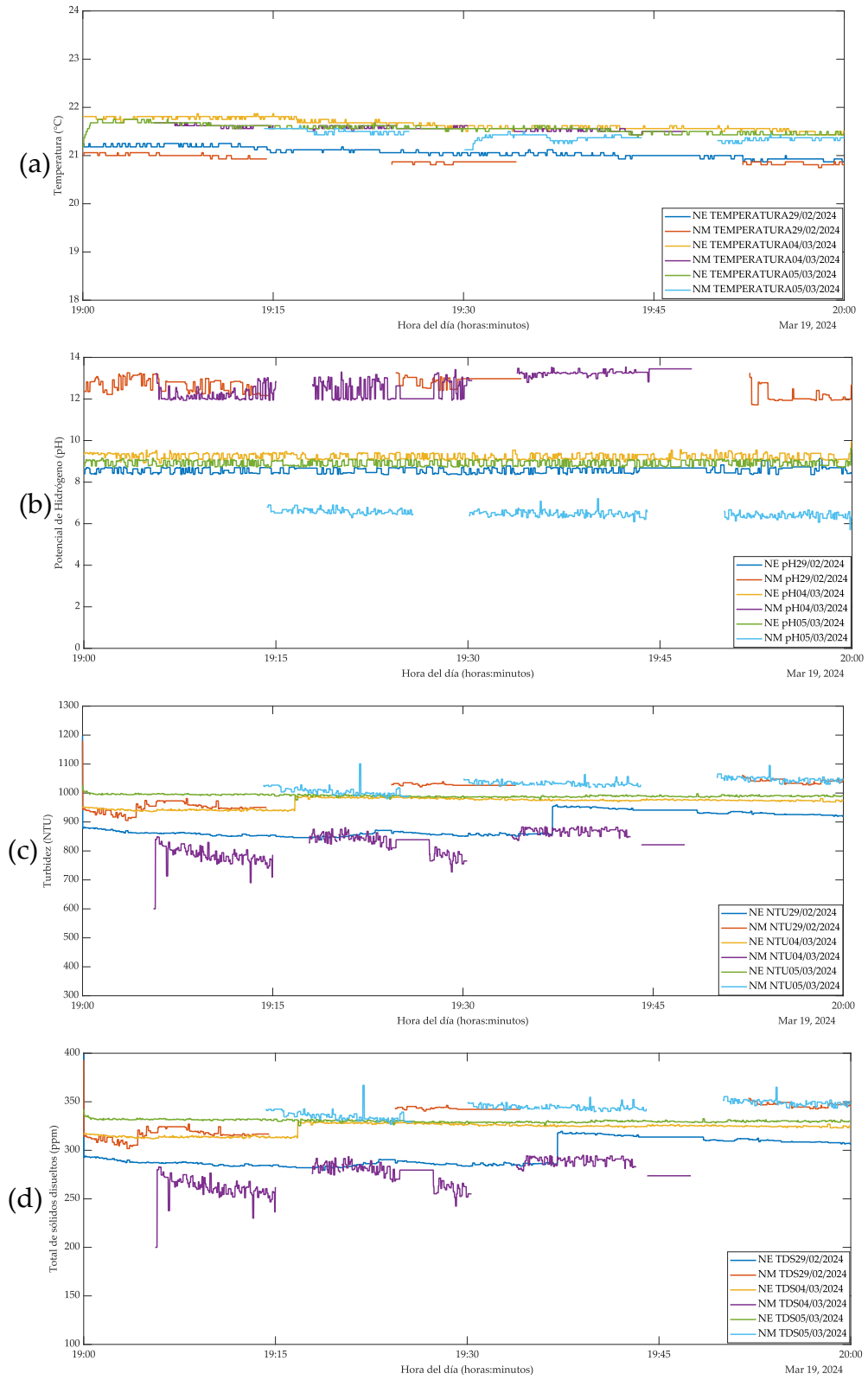


Fig. 4. 13 Monitoreo continuo de 1 hora en el entorno de medición 1 durante el 29/02, 04/03 y 05/03 de 2024. (a) Temperatura, (b) pH, (c) Turbidez, (d) Total de sólidos disueltos.

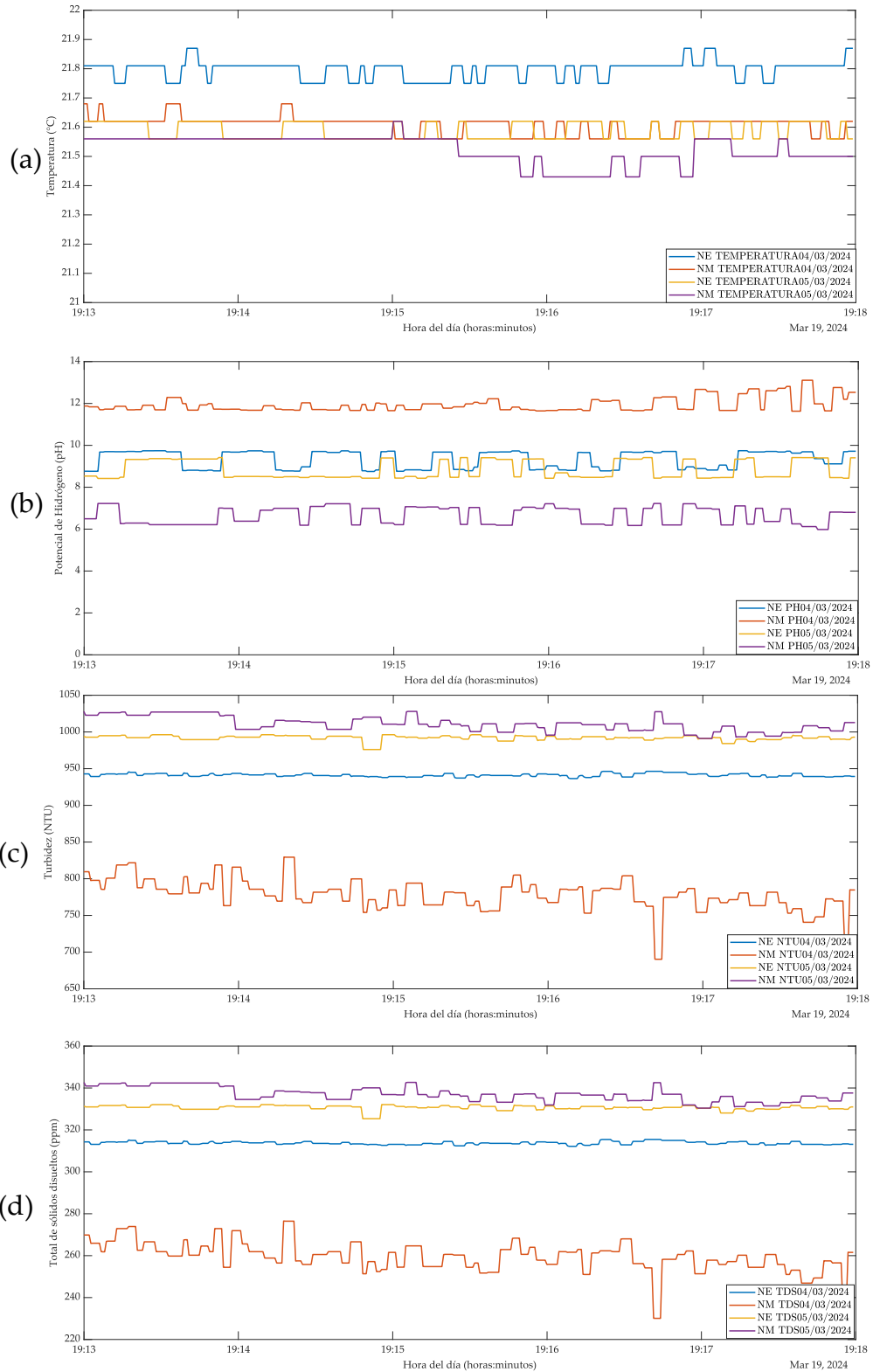


Fig. 4. 14 Monitoreo simultáneo entre el nodo estático y móvil en el entorno de medición 1 en el intervalo 19:13hrs.-19:18hrs. durante el 04/03 y 05/03 de 2024. (a) Temperatura, (b) pH, (c) Turbidez, (d) Total de sólidos disueltos.

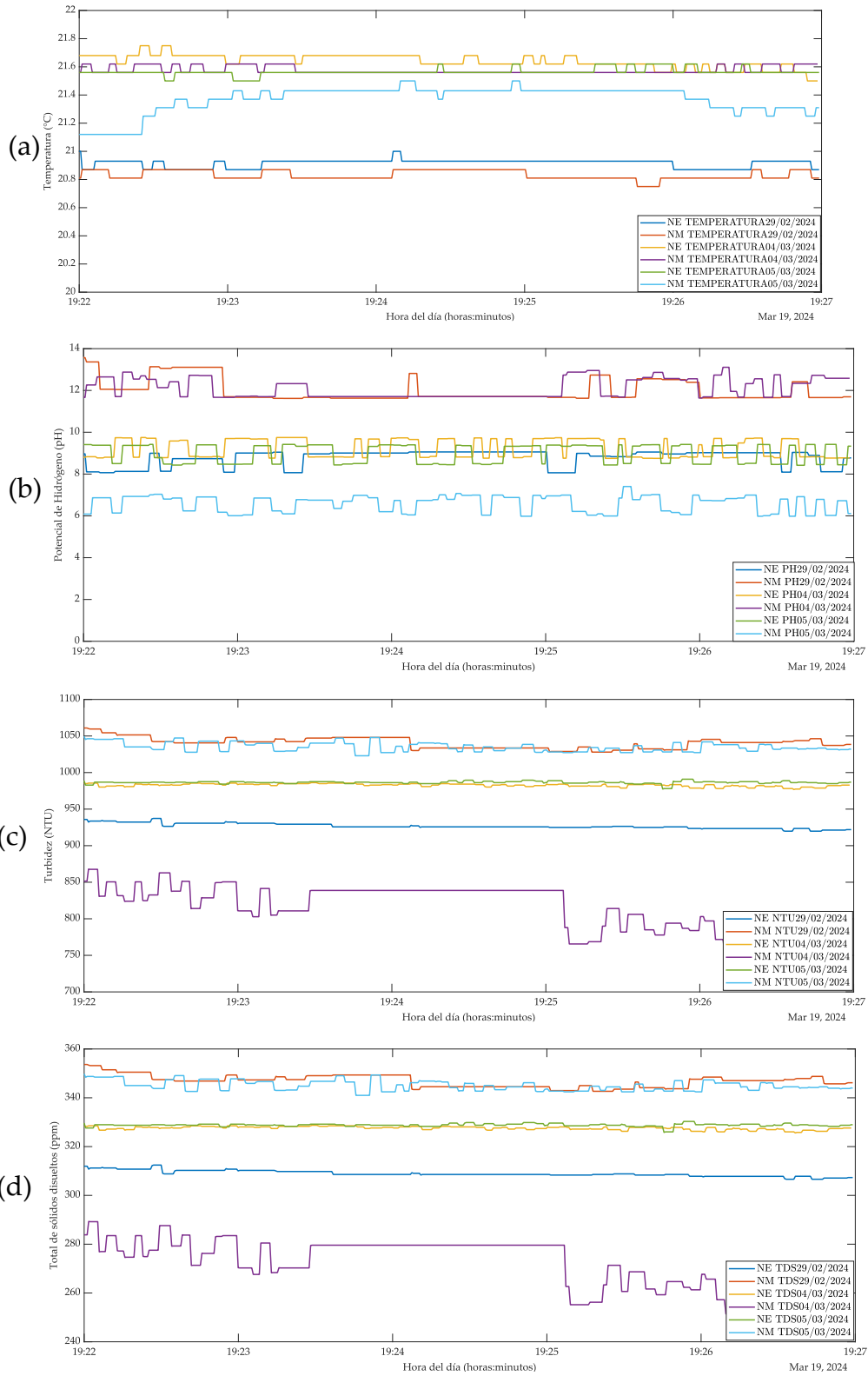


Fig. 4. 15 Monitoreo simultáneo entre el nodo estático y móvil en el entorno de medición 1 en el intervalo 19:22hrs.-19:27hrs. durante el 29/02, 04/03 y 05/03 de 2024. (a) Temperatura, (b) pH, (c) Turbidez, (d) Total de sólidos disueltos.

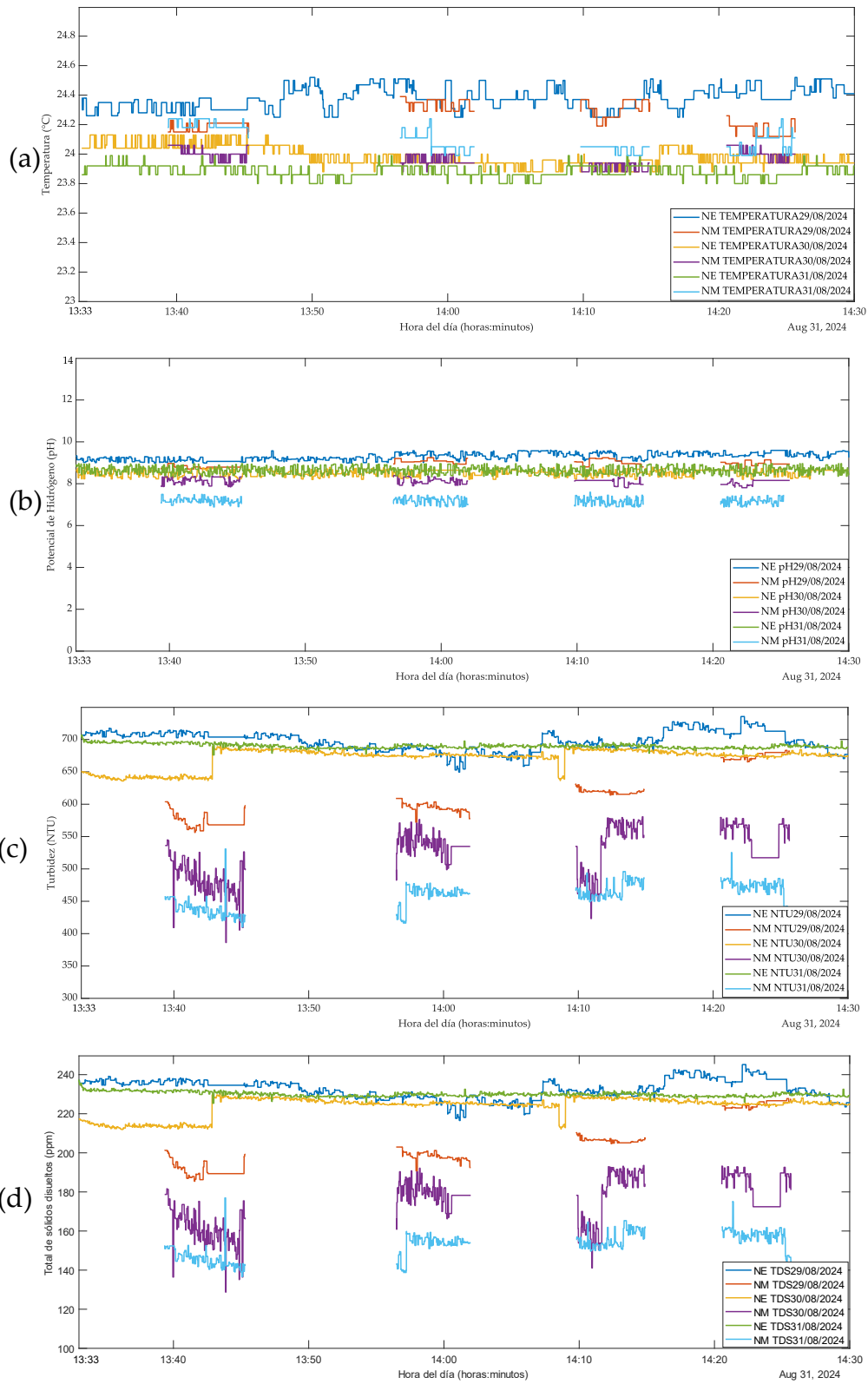


Fig. 4. 16 Monitoreo continuo de 1 hora en el entorno de medición 2. durante el 29/08, 30/08 y 31/08 de 2024. (a) Temperatura, (b) pH, (c) Turbidez, (d) Total de sólidos disueltos.

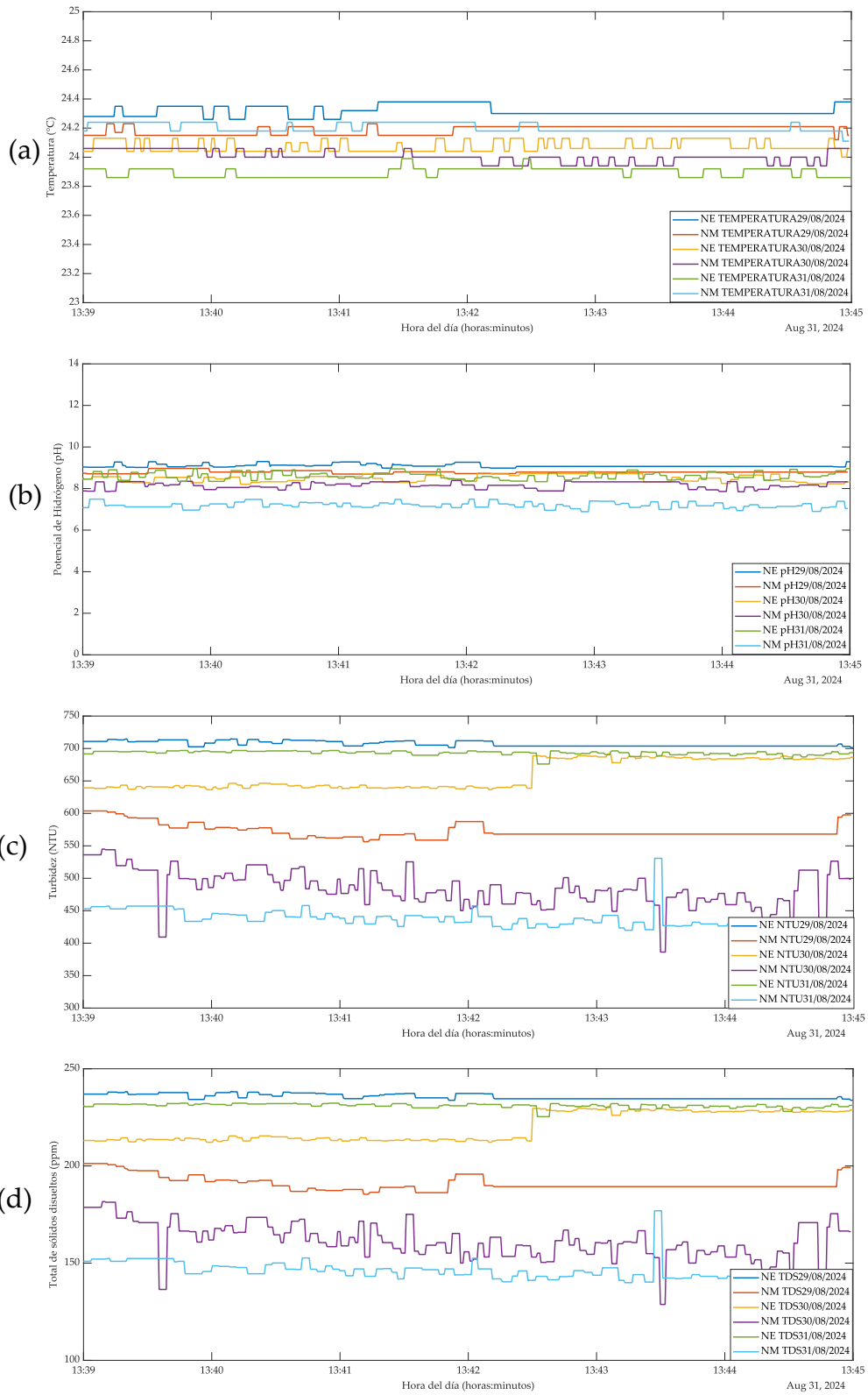


Fig. 4. 17 Monitoreo simultáneo entre el nodo estático y móvil en el intervalo de 13:39hrs.-13:45hrs. en el entorno de medición 2. durante el 29/08, 30/08 y 31/08 de 2024. (a) Temperatura, (b) pH, (c) Turbidez, (d) Total de sólidos disueltos.

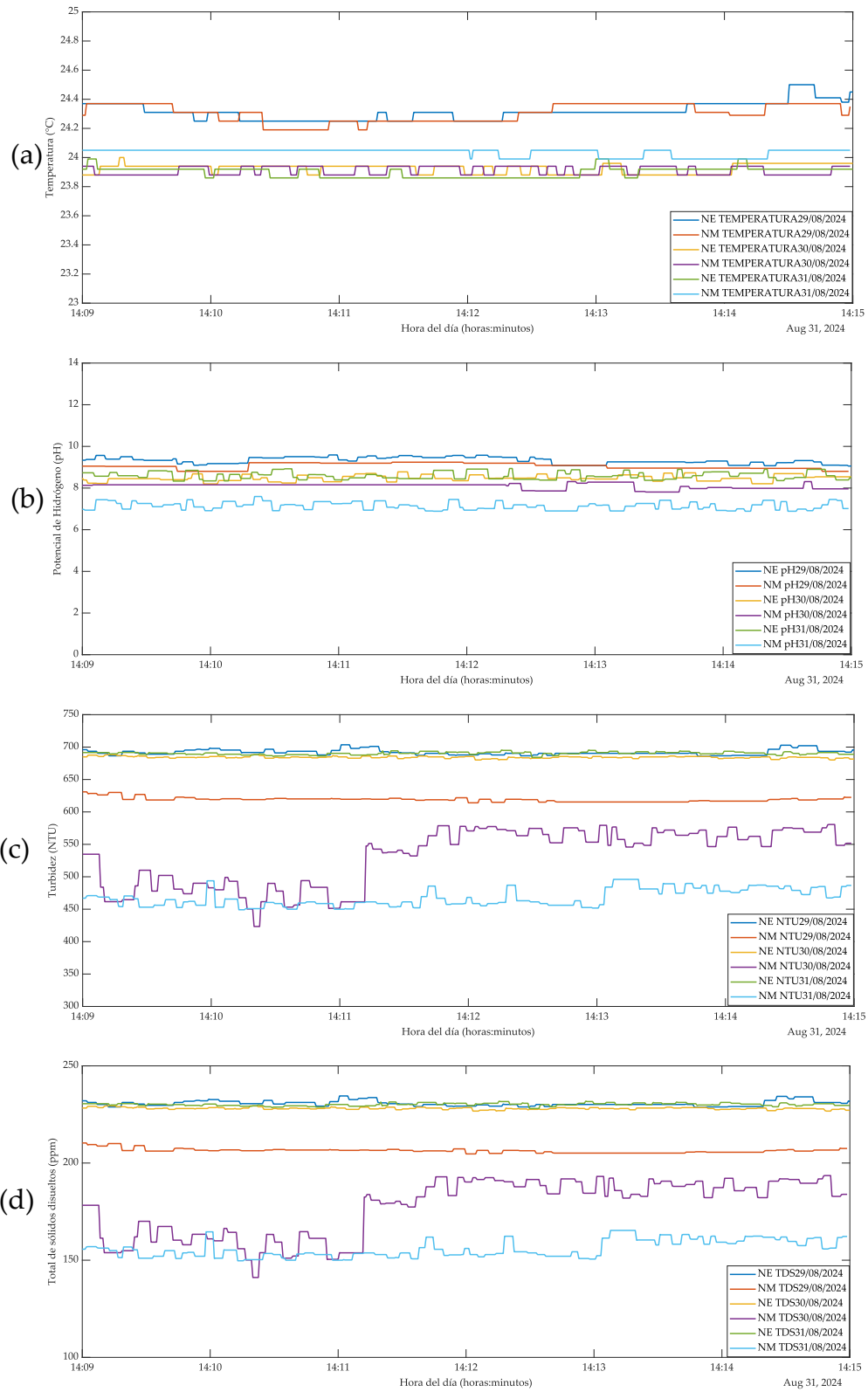


Fig. 4. 18 Monitoreo simultáneo entre el nodo estático y móvil en el intervalo de 14:09hrs.-14:15hrs. en el entorno de medición 2. durante el 29/08, 30/08 y 31/08 de 2024. (a) Temperatura, (b) pH, (c) Turbidez, (d) Total de sólidos disueltos.

4.3 Discusión de los resultados

La Fig. 4. 13 ilustra la variabilidad de los parámetros observados durante una hora ininterrumpida en comparación con el nodo estático, así como los intervalos registrados por el nodo móvil. Se observa que la temperatura media el 29 de febrero de 2024 fue de 21°C, en tanto que los días 4 y 5 de marzo de 2024, la temperatura se mantuvo en 22°C. En cuanto al pH, se reportaron variaciones significativas durante el periodo de tres días, oscilando entre 7 y 13. Con respecto al TDS y la turbidez, los valores fluctuaron entre 250 ppm y 750 NTU hasta alcanzar 350 ppm y 1050 NTU, respectivamente, siendo el 4 de marzo de 2024 el día que presentó la mayor variabilidad en los datos obtenidos por el nodo móvil.

En la Fig. 4. 14 (a) se muestran las curvas de la temperatura, en donde la variación es despreciable debido a que no se superan los 0.4° de diferencia entre los registros obtenidos por ambos nodos. Comprobando nuevamente que el agua no cambia de temperatura tan rápido, esto debido a sus puentes de Hidrógeno [70].

En cuanto al potencial de Hidrógeno, en la Fig. 4. 14 (b) se muestra el comportamiento del pH, en donde se observa que, respecto al nodo estático, las lecturas fueron muy similares con un promedio de 9 pH y variaciones que no superan 1 nivel de pH. Por otro lado, el nodo móvil registró niveles diferentes de pH en cada día, ya que para el cuatro de marzo se captaron niveles promedio de 11.8 pH determinando alcalinidad en esa zona de la laguna, mientras que para el día cinco, las lecturas arrojaron niveles neutros de pH de un promedio de 6.7 pH.

En la Fig. 4. 14 (c) se muestra el gráfico con las curvas obtenidas referentes a la turbidez del agua. Se puede apreciar que en el día cuatro de marzo el nodo estático reportó niveles promedio de 940 NTU, mientras que el nodo móvil presentó niveles inferiores alrededor de 790 NTU, las variaciones en el monitoreo pueden deberse a turbulencias en el agua. Respecto a la Fig. 4. 14 (d) se muestran las curvas obtenidas del total de sólidos disueltos, que como se mencionó anteriormente, son proporcionales a las curvas obtenidas en la gráfica de turbidez. En este sentido, la variación más significativa también se encuentra en el nodo móvil del día cinco de marzo, con niveles promedio de 265 ppm.

De esta manera, para los días cuatro y cinco de marzo, la calidad del agua es buena ya que las lecturas arrojan mediciones que superan las 300 ppm. Además, respecto a la turbidez, los datos indican que el agua no es apta para ser consumida por humanos ya que se sobrepasan los límites permisibles establecidos en [71, 72]. Por otro lado, el potencial de Hidrógeno reportado indica que se trata de una zona neutral y una alcalina con posibles

concentraciones de amonio. Respecto a la temperatura, la laguna muestra un comportamiento normal y dentro de los límites permisibles.

En la Fig. 4. 15 (a) se puede observar que el día 29 de febrero, la temperatura en el nodo móvil y estático es de 20.91°C y 20.8°C respectivamente con variaciones registradas que no superan los 0.3°C. Por otro lado, en las curvas correspondientes al día 4 de marzo, las curvas de ambos nodos se encuentran sobrepuestas una sobre la otra, teniendo un promedio de 21.64°C y 21.57°C. Finalmente, en el día 5 de marzo se muestra la mayor variación, que no sobre pasa los 0.5°C. De esta manera, es posible inferir que tal como lo muestra la literatura, la temperatura de un cuerpo de agua se conserva relativamente encontrando variaciones significativas sólo en tiempos prolongados.

En cuanto a los registros obtenidos sobre el pH, en la Fig. 4. 15 (b) las mediciones de pH arrojan una tendencia que se mantiene respecto al nodo estático, ya que, para los 3 días de muestreo, las curvas individualmente no varían más allá de 1 nivel de pH, mientras que juntas no superan las variaciones de dos niveles, estableciendo una tendencia de pH de 9 general. Por otro lado, existen variaciones importantes con el nodo móvil. Para el día 29 de febrero y 5 de marzo, los registros arrojan lecturas muy parecidas, de un potencial básico que oscila entre 12 y 13, mientras que para el día 4 de marzo, el potencial registrado es neutro, con un promedio de 6.5.

Después, en la Fig. 4. 15 (c) se muestran las curvas de la turbidez registradas por la WSN. En ella se puede apreciar que el nodo estático, en los días 4 y 5 de marzo, presentan lecturas similares de aproximadamente 990 NTU comparables con el día 29 de febrero, en donde presenta lecturas inferiores que rondan las 940 NTU. Por otro lado, el nodo móvil presenta una similitud en los días 29 de febrero y 5 de marzo, con lecturas promedio de 1050 NTU comparables con el día 4 de marzo, donde se registra la tendencia más baja que cae hasta las 850 NTU.

Finalmente, en la Fig. 4. 15 (d) se tiene la gráfica con las curvas del TDS, en donde las tendencias son proporcionales a las obtenidas en la gráfica de turbidez. Esto debido a la relación que existe entre ambos parámetros. De esta manera, se tiene que la calidad del agua en base al total de sólidos disueltos según la OMS y la NOM127-SA1-2021 es buena, con una temperatura adecuada para la vida de especies en ella, pero no puede consumirse por humanos ya que supera los niveles de pH y turbidez.

En la Fig. 4. 16 se muestran las gráficas (a), (b), (c) y (d) correspondientes a la evolución de la temperatura, pH, turbidez y TDS durante el muestreo ininterrumpido realizado por el nodo estático, así como los 4 intervalos de recolección del nodo móvil llevados a cabo en el segundo entorno de medición los días 29, 30 y 31 de agosto de 2024. En cuanto a la temperatura se pueden ver

curvas que se superponen unas con otras, sobre todo en los días 30 y 31 con promedios de 24.1 y 23.9°C respectivamente, dejando al día 29 con los registros más altos y sin embargo casi despreciables por tener un promedio de 24.4°C. Los registros de pH durante este muestreo continuo denotan una mejora en la calibración y lectura del parámetro, teniendo curvas más constantes. En cuanto a las gráficas de turbidez y TDS se perciben tendencias similares en las lecturas recabadas por el nodo estático durante los 3 días y variaciones más significativas por las registradas por el nodo móvil en el mismo periodo. Es importante mencionar que las variaciones no superan la tolerancia determinada al calibrar los sensores por lo que los registros son válidos y comparables con las mediciones realizadas con los instrumentos de referencia.

Con respecto a la Fig. 4. 17 (a), se pueden apreciar las curvas de temperatura que confirman la capacidad de guardar la energía de los cuerpos de agua, ya que se tiene registros de 23.9°C hasta 24.4°C cuya diferencia no supera los 0.5°C. Por otro lado, la Fig. 4. 17 (b) muestra el comportamiento del pH que presenta un promedio de 9pH, con lecturas que arrojan zonas básicas a partir de 8pH y una zona neutra registrada por el nodo móvil el 31 de agosto.

La Fig. 4. 17 (c) y (d) muestren tendencias similares para el nodo estático durante los tres días, mientras que las lecturas obtenidas por el nodo móvil en cada punto de interés si presentan variaciones que alcanzan hasta 80 ppm y 250NTU de la lectura más alta respecto a la más baja. Este fenómeno de tener registros inferiores y variaciones en el nodo móvil también apareció en las gráficas del primer entorno de medición, no obstante, su desviación se mantiene de acuerdo con lo determinado en la sección de calibración, donde la desviación estándar está dada por 75ppm y existe una tolerancia de ± 100 ppm.

Finalmente, el último conjunto a analizar, presentado en la Fig. 4. 18, se muestra que en (a) las temperaturas registradas por cada nodo durante los 3 días fueron similares con promedios de 23.95°C y 24.4°C y sin variaciones que superen los 0.5°C. En cuanto al pH, las curvas no tienen mayor variación con respecto al intervalo de la Fig. 4. 18 (b) teniendo un promedio de 8.5pH y una zona neutra de 7pH. Es importante mencionar que una concentración de amonio puede estar presente en niveles mayores a 8 pH, lo que vuelve a este cuerpo de agua en no apta para el consumo y un punto a considerar para el ecosistema. Respecto a las gráficas presentes en la Fig. 4. 18 (c) y (d) se tiene la turbidez y TDS registrados. Al igual que con el entorno de medición 1, existen curvas similares para el nodo estático, mientras que, para el nodo móvil, las lecturas presentan variaciones, que como se explicó anteriormente, se deben a la turbulencia del cuerpo de agua, y no superan las tolerancias establecidas, además de que podría representar una distribución no uniforme de los sólidos presentes en el cuerpo de agua.

Con esta información es posible determinar que, en términos generales, la calidad del agua del entorno de medición 2 registrada en el mes de agosto es mejor que la que se registró en el entorno 1 en el mes de marzo, ya que presenta niveles más bajos de TDS y por lo tanto de turbidez, además de tendencias menos dispersas y más cercanas al punto neutro respecto al pH. En referencia a la temperatura si existen diferencias en la temperatura, pero su variabilidad y dispersión permanecen constantes, teniendo diferencias entre mediciones en un mismo entorno no mayores a 0.5°C. También es importante mencionar que, si bien es posible la vida acuática en estos entornos monitoreados, los registros nos dan información para determinar que no es apta para el consumo humano. Además, aun cuando el índice de calidad basado en el TDS y apegado a la OMS y la NOM127SSA1 [71, 72], este sistema sólo muestra una parte de los factores que deben considerarse para determinar la calidad del agua y dependiendo del fin requerido, el sistema desarrollado podría carecer de dicha información ya que por el momento se encuentra limitado a 3 parámetros directos, temperatura, pH y TDS, y 3 indirectos, conductividad, turbidez y concentración de amonio. Otros factores relevantes que pueden ser necesarios para determinar la calidad del agua son la presencia de contaminantes microbiológicos, metales pesados, así como nitratos, por lo que debe tomarse en consideración antes de tomar decisiones de consumo.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1 Conclusiones

La implementación del sistema de monitoreo de la calidad del agua en una laguna ha demostrado ser un éxito, evidenciado por la eficaz recolección y análisis de datos críticos como el pH, la temperatura y el total de sólidos disueltos. La utilización de tecnologías avanzadas, como una red inalámbrica de sensores (WSN) con arquitectura de punto a punto y un nodo móvil, ha permitido una cobertura amplia y detallada del área de estudio. Este enfoque innovador ha facilitado la monitorización de múltiples puntos de interés, mejorando significativamente la precisión y la eficiencia del proceso de recolección de datos.

La interfaz gráfica desarrollada ha jugado un papel crucial en la visualización y el manejo de los datos recopilados, permitiendo un control intuitivo sobre el movimiento del nodo móvil y la gestión del tiempo de monitoreo. Además, la capacidad de generar resúmenes completos de los parámetros medidos ha mejorado la comprensión de las condiciones del entorno de medición. La gestión de datos se ha optimizado mediante la creación de una base de datos en Microsoft Excel, lo que ha simplificado la realización de consultas y el análisis de la información recabada.

Los resultados obtenidos indican que la calidad del agua del entorno de medición 1 se mantuvo dentro de los estándares aceptables, respecto al total de sólidos disueltos y la temperatura, durante el período de estudio, mientras que, respecto al pH y turbidez, la calidad no es excepcional para su consumo en humanos. Además, los datos obtenidos en el entorno de medición 2 confirman el resultado aceptable respecto a la temperatura y TDS, así como refutan su capacidad de consumo debido a los índices registrados en torno al pH y la turbidez.

El uso de la WSN desarrollada pretende ser una referencia en el monitoreo de la calidad del agua, que al momento se encuentra acotada por el uso de 3 sensores para determinar de manera directa el pH, la temperatura y el total de sólidos disueltos, y de manera indirecta la conductividad, la turbidez y la concentración de amonio, por lo que se recomienda tomar esto en cuenta, así como la incorporación de sensores adicionales para cubrir más parámetros.

En conclusión, la combinación de un diseño de red inalámbrica eficiente, una interfaz gráfica funcional y un sistema de gestión de datos robusto ha resultado en una metodología de monitoreo de agua altamente efectiva. Este enfoque integrado ha proporcionado una herramienta valiosa para la evaluación continua de la calidad del agua, asegurando la preservación del cuerpo de agua y su ecosistema para las generaciones futuras. La adaptabilidad y la escalabilidad del sistema sugieren un gran potencial para su aplicación en una variedad de contextos acuáticos, marcando un hito importante en la gestión ambiental y la conservación del agua.

5.2 Trabajo Futuro

El desarrollo del sistema dinámico actual ha marcado un avance significativo en la monitorización y análisis de cuerpos de agua, ofreciendo una plataforma robusta para la integración de tecnologías emergentes. La incorporación de puertos para GPS con comunicación serial abre la posibilidad de automatizar completamente el vehículo, lo que permitiría operaciones más eficientes y autónomas. La capacidad del sistema para monitorear parámetros clave como la temperatura, los sólidos disueltos totales y el pH, junto con la medición indirecta de la turbidez, la conductividad y la concentración de amonio, ha establecido una base sólida para la expansión futura.

Mirando hacia adelante, la integración de sensores adicionales es una prioridad, lo que no solo aumentaría la cantidad de parámetros monitoreados, sino que también mejoraría la precisión con la que se puede determinar la calidad del agua. Esto es crucial para la identificación temprana de problemas ambientales y la implementación de medidas correctivas. Además, la transición a un software libre para la interfaz de usuario promete facilitar la distribución y adopción del sistema, permitiendo una colaboración más amplia y una mejora continua a través de la comunidad de código abierto.

La inteligencia artificial (IA) representa un horizonte prometedor para el proyecto, con el potencial de revolucionar la forma en que se clasifican y evalúan los cuerpos de agua. Mediante el uso de algoritmos avanzados, la IA podría predecir con precisión el tipo de cuerpo de agua, evaluar su calidad y recomendar los parámetros óptimos para su monitoreo. Además, la IA podría desempeñar un papel crucial en la optimización de la red de sensores, calculando el número ideal de nodos necesarios para cubrir completamente un área dada, asegurando así una monitorización exhaustiva y eficiente.

El trabajo futuro también contempla la integración de sistemas de energía renovable para alimentar el vehículo y sus sensores, reduciendo la dependencia

de fuentes de energía no sostenibles y minimizando el impacto ambiental del sistema. La posibilidad de realizar análisis predictivos mediante la recopilación y el procesamiento de grandes volúmenes de datos ambientales podría proporcionar insights valiosos para la conservación del agua y la gestión de recursos naturales. La colaboración interdisciplinaria con expertos en hidrología, ingeniería ambiental y ciencias de la computación será fundamental para llevar a cabo estas innovaciones y asegurar que el sistema se mantenga a la vanguardia de la tecnología de monitoreo ambiental. Con estos avances, el sistema no solo se convertirá en una herramienta más poderosa para la investigación científica, sino que también jugará un papel vital en la protección y gestión sostenible de los recursos hídricos.

BIBLIOGRAFÍA

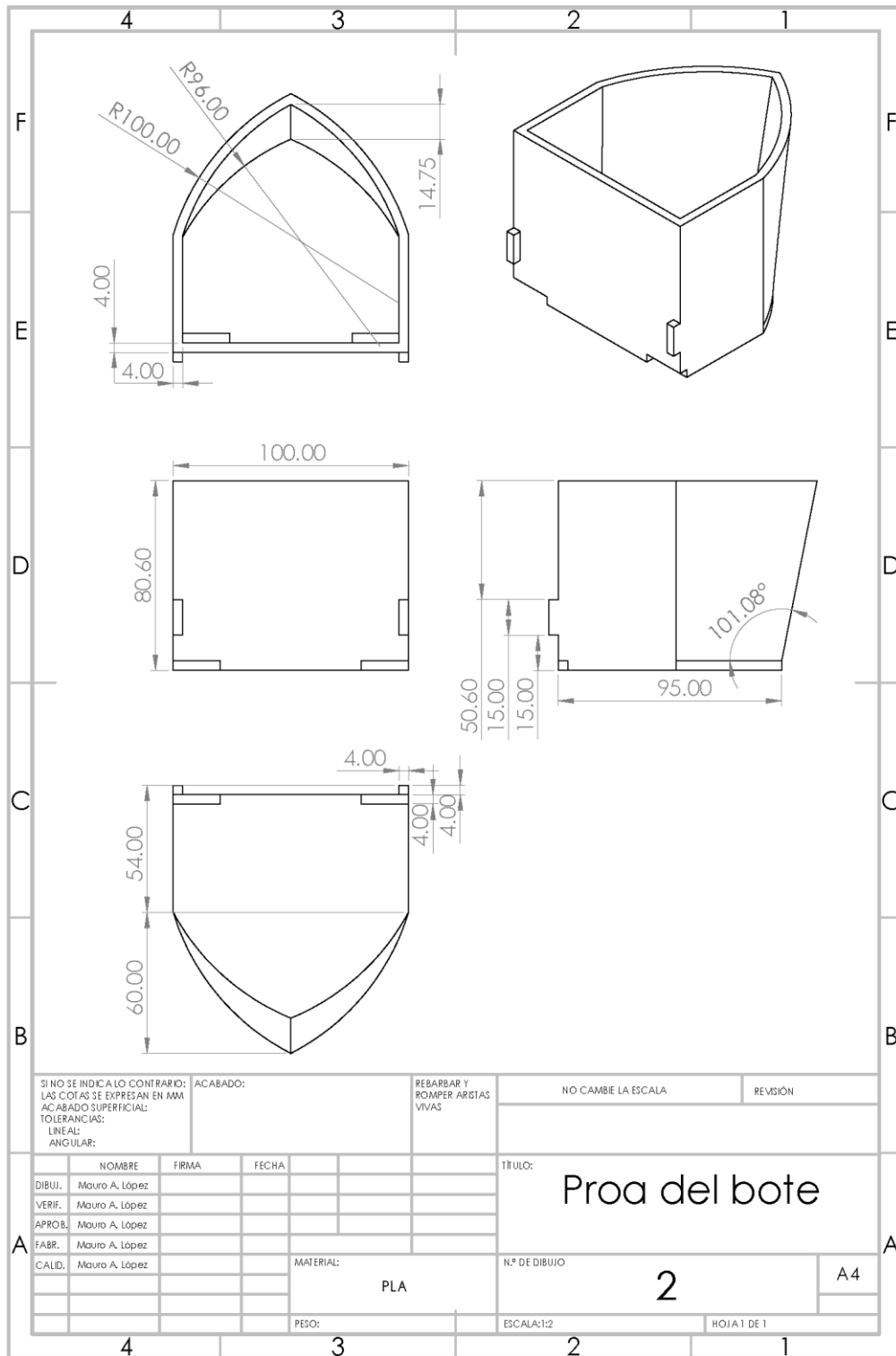
- [1] A. A. Atiast y K. D. Aljafaar, «Automation system for monitoring the quality of water sources to maintain their sustainability using microcontrollers,» *Internationa Conference of Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*, pp. 1-4, 2022.
- [2] F. Mosheni, F. Saba, S. M. Mirmazloumi, M. Amani, M. Mokhtarzade, S. Jamali y S. Mahdavi, «Ocean water quality monitoring using remote sensing techniques: A review,» *Marine Environment Research*, vol. 180, 2022.
- [3] M. Yadav, Preety, E. Saxena y A. Das, «Smart Agriculture System Using Artificial Intelligence and Internet of Things,» *Reshaping Intelligent Business and Industry: Convergence of AI and IoT at the Cutting Edge*, pp. 403-418, 2024.
- [4] L. Parri, S. Parrino, G. Peruzzi y A. Pozzebon, «A LoRaWAN Network Infrastructure for the Remote Monitoring of Offshore Sea Farms,» *2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, p. 1–6, 2020.
- [5] S. Rani , D. Koundal , Kavita, M. Ijaz , M. Elhoseny y M. Alghamdi , «An Optimized Framework for WSN Routing in the Context of Industry 4.0. Sensors (Basel),» *Sensors*, p. 6474, 2021.
- [6] K. S. Adu-Manu, F. Engmann, G. Sarfo-Kantanka, G. E. Baiden y B. A. Dulemordzi, «WSN Protocols and Security Challenges for Environmental Monitoring Applications: A Survey,» *Sensors*, pp. 1-21, 2022.
- [7] D. Prapti, A. Mohamed Shariff, H. Che Man, N. Ramli, T. Perumal y M. Shariff, «Internet of Things (IoT)-based aquaculture: An overview of IoT application o water quality monitoring,» *Rev AQUac*, vol. 14, pp. 979-992, 2022.
- [8] C. Feng, J. Yuan, Y. Sun y J. You, «Design of Water Quality Monitoring System,» de *International Conference on Artificial Intelligence and Computer Engineering (ICAICE)*, Beijing, 2020.
- [9] M. S. U. Chowdury, T. B. Emran, S. Ghosh, A. Pathak, M. Alam, N. Absar, K. Andersson y M. S. Hossain, «IoT Based Real-time River Water Quality Monitoring System,» *Procedia Computer Science*, vol. 155, pp. 161-168, 2019.
- [10] R. P. N. Budiarti, A. Tjahjono, M. Hariadi y M. H. Purnomo, «Development of IoT for Automated Water Quality Monitoring System,» de *2019 International Conference on Computer Science, Information Technology, and Electrical Engineering (ICOMITEE)*, Jember, 2019.
- [11] L. Imran, R. M. A. Latif y M. Farhan, «Smart City Based Autonomus Water Quality Monitoring System Using WSN,» *Wireless Pers Commun*, vol. 115, pp. 1805-1820, 2020.
- [12] O. M. Prabowo, Y. Tresnawati y D. Kusumastuti, «Design of Water Quality Monitoring System using Remote Operated Vehicle,» de *2020 International Conference on ICT for Smart Society*, Bandung, 2020.
- [13] S. T. G. Sathish Pasika, «Smart water quality monitoring system cost-effective using IoT,» *Heliyon*, vol. 6, n° 7, 2020.
- [14] S. -T. Chen, S. -S. Lin, C. -W. Lan y T. -I. Chou, «Design and development of a LoRa based Water Quality Monitoring System,» de *2021 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS)*, Hualien, 2021.
- [15] Q. Bai, J. Wu y C. Jin, «The Water Quality Online Monitoring System Based on Wireless Sensor Network,» *13th International Symposium on Computational Intelligence and Designs (ISCID)*, pp. 234-237, 2020.

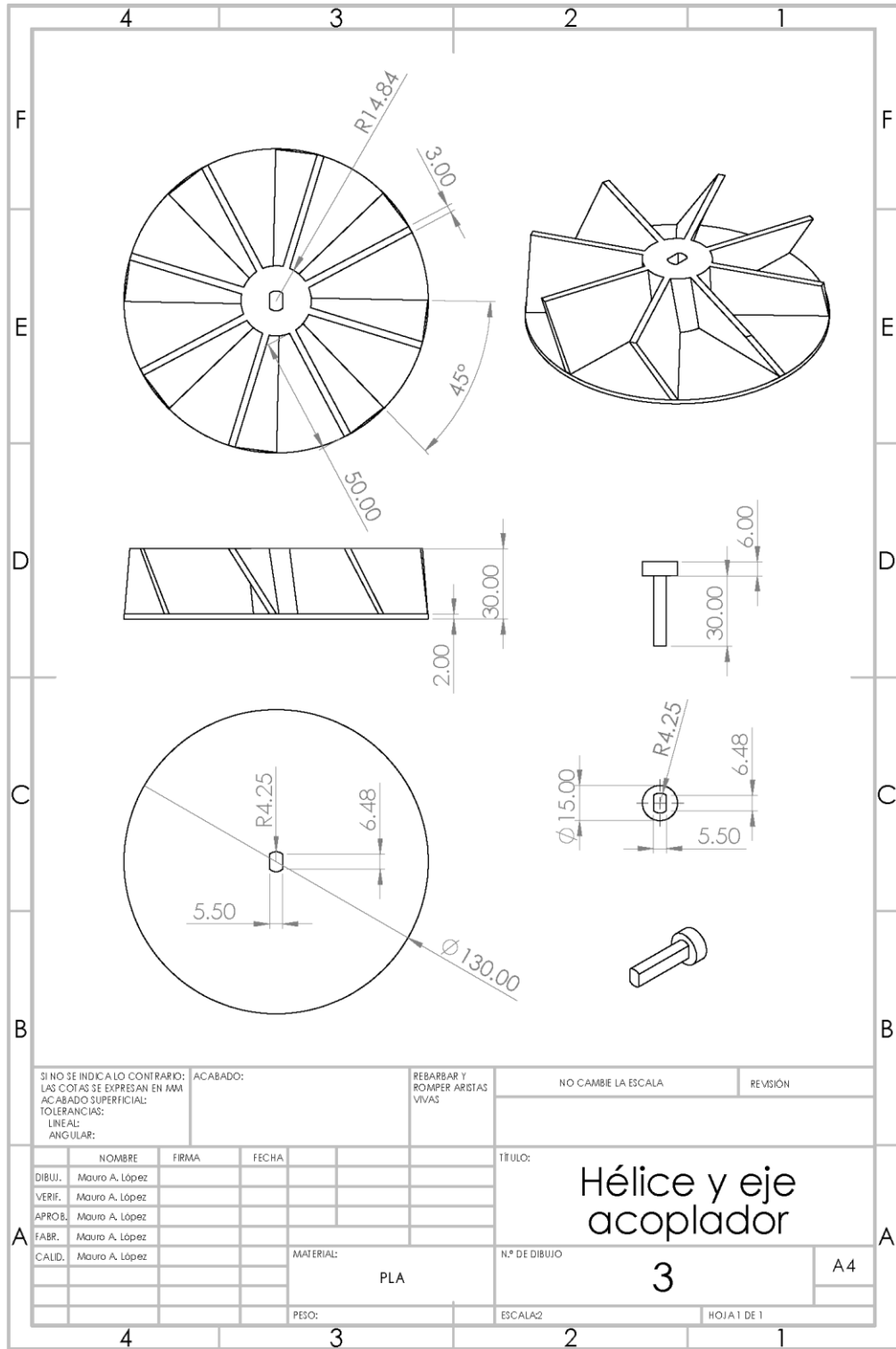
-
- [16] S.-L. Chen, H.-S. Chou, C.-H. Huang, C.-Y. Chen, L.-Y. Li, C.-H. Huang, Y.-Y. Chen, J.-H. Tang, W.-H. Chang y J.-S. Huang, «An Intelligent Water Monitoring IoT System for Ecological Environment and Smart Cities,» *Sensors*, vol. 23, n° 8540, 2023.
- [17] «Gobierno de México,» Comisión Nacional del Agua, 1 Marzo 2021. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>. [Último acceso: 10 Febrero 2023].
- [18] C. o. F. Regulations, «U. S. Food and Drug Administration,» Department of Health and Human Services, 17 Enero 2023. [En línea]. Available: <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcfr/CFRSearch.cfm?fr=114.90>. [Último acceso: 20 Febrero 2023].
- [19] F. READER, «FDA READER: Best pH Meters for Food Processing,» 23 Diciembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.fdareader.com/blog/best-ph-meter-for-haccp-food-processing>. [Último acceso: 20 Febrero 2023].
- [20] G. M. Uddin, S. Nash y A. I. Olbert, «A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality,» *Ecological Indicators*, vol. 122, n° 107218, 2021.
- [21] R. Drasovean y G. Murariu, «Water Quality Parameters and Monitoring Soft Surface Water Quality Using Statistical Approaches,» de *Promising Techniques for Wastewater Treatment and Water Quality Assessment*, United Kingdom, Intech Open, 2021, pp. 217-230.
- [22] M. A. Islam, R. H. Khan y M. Syeed, «A Smart and Integrated Surface Water Monitor System Architecture: Bangladesh Perspective,» de *International Conference on Computing Advancements*, 2020.
- [23] A. Yarali, «Wireless Sensor Networks (WSNs) and Their Applications,» de *Wireless Sensor Networks (WSN) Technology and Applications*, New York, Nova, 2020, pp. 67-99.
- [24] A. YARALI, «Wireless Sensor Network for the Internet of Things: An Introduction,» de *Wireless Sensor Networks (WSN) Technology and Applications*, New York, Nova, 2020, pp. 157-173.
- [25] A. A. da Conceic, L. P. Ambrosio, T. R. Leme, A. C. Rosa, F. F. Ramborger, G. P. Aquino y E. C. Vilas, «Internet of Things Environment Automation: A Smart Lab Practical Approach,» *IEEE Xplore*, pp. 322-327, 2022.
- [26] «Internet of Things Global Standards Initiative,» ITU, July 2015. [En línea]. Available: <https://www.itu.int/en/ITU-T/gsi/iot/Pages/default.aspx>. [Último acceso: 15 June 2023].
- [27] «The IoT Global Standards Initiative,» LX Group, 5 March 2014. [En línea]. Available: <https://lx-group.com.au/iot-global-standards-initiative/#:~:text=The%20ITU%E2%80%99s%20Internet%20of%20Things%20Global%20Standards%20Initiative,the%20Internet%20of%20Things%20on%20a%20global%20scale.> [Último acceso: 15 June 2023].
- [28] S. Arjmand y S. Cameron, «Making Internet of Things Real,» *IEEE Internet of Things Magazine*, pp. 10-12, 2019.
- [29] «What is WiFi,» Cisco Systems, 2023. [En línea]. Available: https://www.cisco.com/c/es_mx/products/wireless/what-is-wifi.html. [Último acceso: 22 Septiembre 2023].
- [30] «Comunicación TCP/IP Básica en LabVIEW,» National Instruments, 3 Marzo 2023. [En línea]. Available: <https://www.ni.com/es/support/documentation/supplemental/06/basic-tcp-ip-communication-in-labview.html>. [Último acceso: 12 Abril 2023].
- [31] «Información general de TCP/IP,» CISCO, 10 Agosto 2005. [En línea]. Available: https://www.cisco.com/c/es_mx/support/docs/ip/routing-information-protocol-rip/13769-5.html. [Último acceso: 12 Abril 2023].
-

-
- [32] F. Shu, H. Lu y Y. Ding, «Novel Modbus Adaptation Method for IoT Gateway,» de *IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC 2019)*, 2019.
- [33] J. Wang, Z. Chen, G. Hou, H. Gao, P. Li, A. Gao y X. Wu, «A Modeling and Verification Method of Modbus TCP/IP Protocol,» *Springer Nature Switzerland*, pp. 527-539, 2022.
- [34] K. Raghunandan, *Introduction to Wireless Communications and Networks*, Switzerland: Springer, 2022.
- [35] T. M. Nguyen, P. S. Agbohessou, T. H. Nguyen, N. T. Thi y P. Kestemont, «Immune responses and acute inflammation in common carp *Cyprinus carpio* injected by *E.coli* lipopolysaccharide (LPS) as affected by dietary oils,» *Fish & Shellfish Immunology*, vol. 122, pp. 1-12, 2022.
- [36] H. V. S. Z. A. e. a. Najafi Saleh, «Assessment of groundwater quality around municipal solid waste landfill by using Water Quality Index for groundwater resources and multivariate statistical technique: a case study of the landfill site, Qaem Shahr City, Iran,» *Environ Geochem Health*, vol. 42, p. 1305-1319, 2020.
- [37] A. Mahmood, «Evaluation of raw water quality in Wassit governorate by Canadian,» *MATEC Web of Conferences*, vol. 162, n° 05020, 2018.
- [38] M. Yousefi, . M. Ghoochani y A. H. Mahvi, «Health risk assessment to fluoride in drinking water of rural residents living in the Poldasht city, Northwest of Iran,» *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 148, pp. 426-430, 2018.
- [39] A. C. Mama, W. K. Bodo, G. F. Ghepdeu, G. N. Ajonina y J. R. Ndam, «Understanding Seasonal and Spatial Variation of Water Quality Parameters in Mangrove Estuary of the Nyong River Using Multivariate Analysis (Cameroon Southern Atlantic Coast),» *Open Journal of Marine Science*, vol. 11, pp. 103-128, 2021.
- [40] T. L. Pham, T. H. Tran, T. T. Tran, X. Q. Ngo y X. D. Nguyen, «Assessment of surface water quality in a drinking water supply reservoir in Vietnam: a combination of different indicators,» *Springer*, vol. 33, p. 653-662, 2022.
- [41] M. Syeed, M. S. Hossain, M. R. Karim, M. F. Uddin, M. Hasan y R. H. Khan, «Surface water quality profiling using the water quality index, pollution index and statistical methods: A critical review,» *Environmental and Sustainability Indicators*, vol. 18, n° 100247, 2023.
- [42] P. J. Bresnahan, T. Wirth, T. Martz, K. Shipley, V. Rowley, C. Anderson y T. Grimm, «Equipping smart coasts with marine water quality IoT sensors,» *Results in Engineering*, vol. 5, n° 100087, 2020.
- [43] B. Mu, Y. Dong, J. Qian, M. Wang, Y. Yang, M. A. Nikitina, L. Zhang y X. Xiao, «Hydrogel coating flexible pH sensor system for fish spoilage monitoring,» *Materials Today Chemisty*, vol. 26, n° 101183, 2022.
- [44] «Secretaría de Gobernación - Diario Oficial de la Federación,» Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua, 2 Mayo 2022. [En línea]. Available: <https://sidof.segob.gob.mx/notas/5650705#:~:text=Norma%20Oficial%20Mexicana%20NOM-127-SSA1-2021%2C%20Agua%20para%20uso%20y,documento%20incluye%20tablas%20que%20podr%C3%ADan%20no%20visualizarse%20correctamente..> [Último acceso: 23 Julio 2023].
- [45] B. Caballero, P. M. Finglas y F. Toldrá, «pH: Principles and Measurements,» de *ENCYCLOPEDIA OF FOOD AND HEALTH*, Elsevier, 2016, pp. 333-338.
- [46] G. D. Christian, «Equilibrio ácido-base,» de *Química Analítica*, México, McGraw Hill, 2009, pp. 219-255.
- [47] O. M. d. I. Salud, *Guías para la calidad del agua de consumo humano*, Ginebra: Organización Mundial de la Salud, 2011.
-

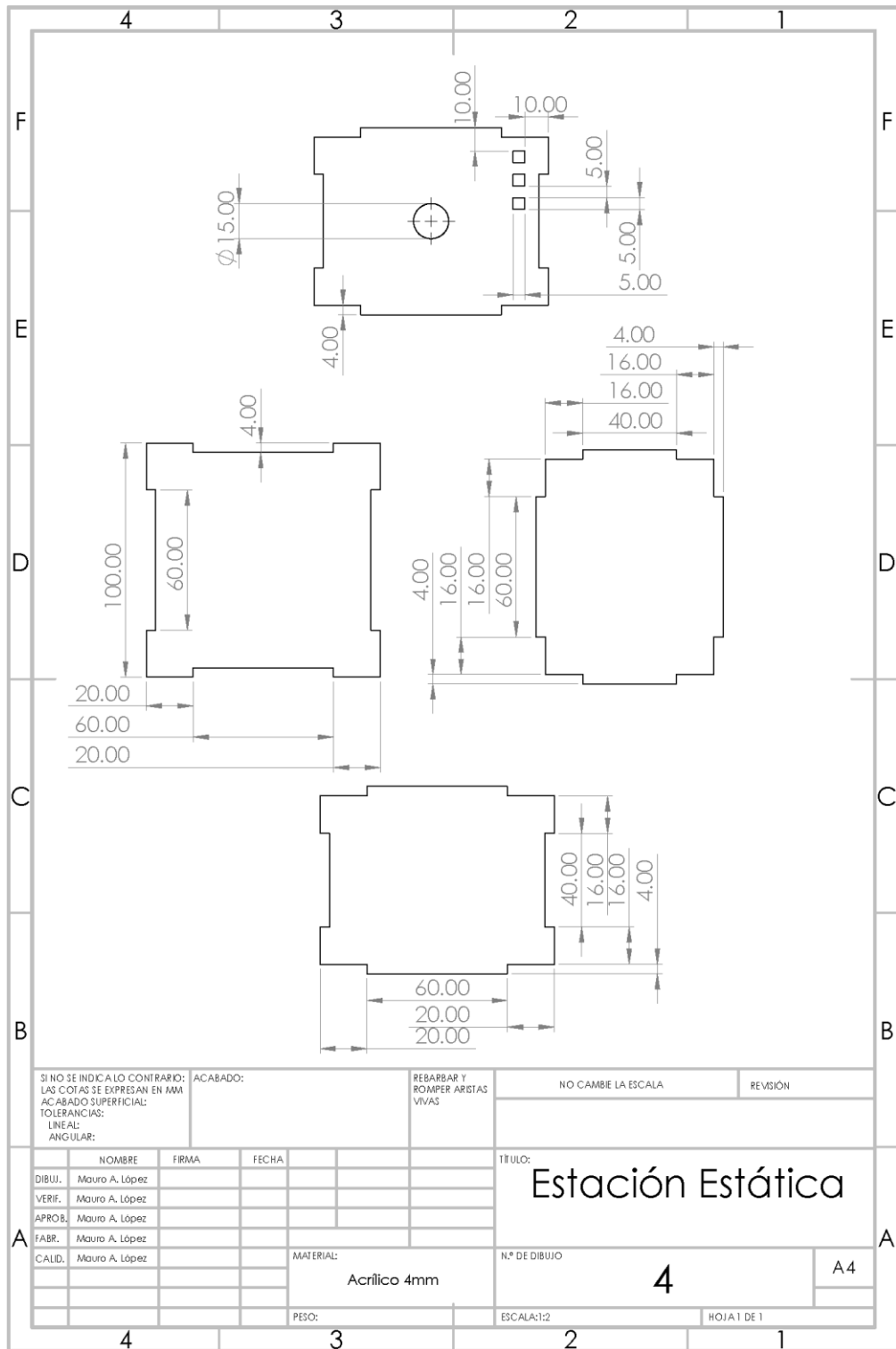
-
- [48] «Folleto Informativo Temperatura,» WaterBoards, [En línea]. Available: https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3120sp.pdf. [Último acceso: 21 Septiembre 2023].
- [49] G. D. Christian, «OBJETIVOS ANALÍTICOS, O: LO QUE HACEN LOS QUÍMICOS ANALÍTICOS,» de *Química Analítica*, México, McGraw Hill, 2009, pp. 1-11.
- [50] «NMX-AA-034-SCFI-2015,» Diario Oficial de la Federación, 18 Abril 2016. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf>. [Último acceso: 18 Septiembre 2023].
- [51] «Conductivity (EC) Vs Total Dissolved Solids (TDS) – What’s The Difference?,» Atlas Scientific, 4 March 2024. [En línea]. Available: <https://atlas-scientific.com/blog/conductivity-vs-tds/>. [Último acceso: 18 April 2024].
- [52] L. Tomas, «How to Convert Tds to Conductivity,» SCIENCING, 5 December 2020. [En línea]. Available: <https://sciencing.com/convert-conductivity-concentration-6925703.html>. [Último acceso: 17 April 2024].
- [53] «¿Qué es la turbidez?,» HANNA® instruments México., 29 Marzo 2019. [En línea]. Available: <https://hannainst.com.mx/blog/que-es-la-turbidez/>. [Último acceso: 18 Septiembre 2023].
- [54] «Turbidez: unidades, métodos, ejemplos,» LIFEDER, 13 Julio 2020. [En línea]. Available: <https://www.lifeder.com/turbidez/>. [Último acceso: 19 Septiembre 2023].
- [55] «¿Qué es la NTU?,» Tecno Converting Engineering, 2018. [En línea]. Available: <https://www.tecnoconverting.es/articulos-tecnicos/que-es-la-ntu/>. [Último acceso: 18 Septiembre 2023].
- [56] N. Instruments, «National Instruments,» National Instruments, 20 Abril 2023. [En línea]. Available: <https://www.ni.com/es-mx/support/downloads/software-products/download.labview.html#477380>. [Último acceso: 20 Abril 2023].
- [57] D. Ibrahim, «Advanced PIC Microcontroller Projects in C,» de *Advanced PIC Microcontroller Projects in C*, Oxford, Elsevier, 2008, pp. 1-6.
- [58] *ESP32 Technical Reference Manual*, Shanghai: Espressif Systems, 2023.
- [59] «¿Qué es una base de datos?,» Oracle, [En línea]. Available: <https://www.oracle.com/mx/database/what-is-database/>. [Último acceso: 16 Junio 2013].
- [60] «Introducing Microsoft 365 Copilot—A whole new way to work,» Microsoft, 16 Marzo 2023. [En línea]. Available: <https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-365/blog/2023/03/16/introducing-microsoft-365-copilot-a-whole-new-way-to-work/?culture=es-mx&country=mx>. [Último acceso: 23 Junio 2023].
- [61] «Todo lo que debes saber sobre la base de datos local,» IINFORMÁTICA PARA TU NEGOCIO, [En línea]. Available: <https://www.informaticaparatunegocio.com/lo-debes-saber-la-base-datos-local/>. [Último acceso: 20 Julio 2023].
- [62] «Crear una base de datos,» Microsoft, 2 Abril 2023. [En línea]. Available: <https://learn.microsoft.com/es-es/sql/relational-databases/databases/create-a-database?view=sql-server-ver16>. [Último acceso: 20 Julio 2023].
- [63] «1-Wire Protocol,» ARDUINO.CC, 19 Septiembre 2023. [En línea]. Available: <https://docs.arduino.cc/learn/communication/one-wire>. [Último acceso: 2023 Septiembre 21].
- [64] «OPC Servers,» National Instruments, 14 Mayo 2019. [En línea]. Available: <https://www.ni.com/es/support/downloads/software-products/download.opc-servers.html#305861>. [Último acceso: 15 Septiembre 2023].
-

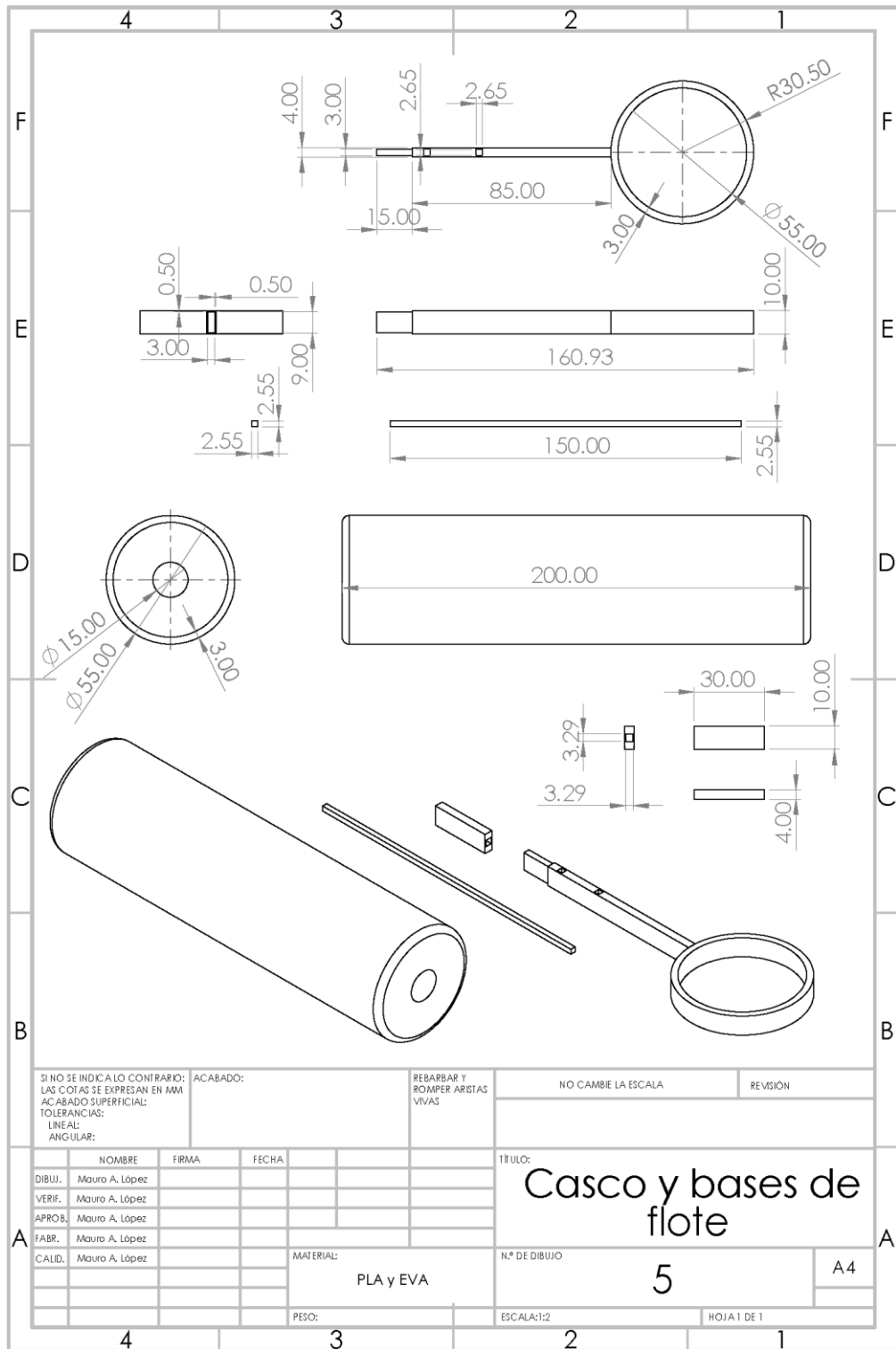
-
- [65] *ESP32-MINI-1 ESP32-MINI-1U*, Shanghai: Espressif Systems, 2023.
- [66] N. Instruments, 20 Abril 2023. [En línea]. Available: <https://www.ni.com/es-mx/support/downloads/software-products/download.labview.html#477380>.
- [67] G. T. Raber y S. R. Schill, «Reef Rover: A Low-Cost Small Autonomous Unmanned Surface Vehicle (USV) for Mapping and Monitoring Coral Reefs,» *drones*, vol. 3, n° 38, pp. 1-22, 2019.
- [68] P. L. Berman, *Catamaran sailing : from start to finish*, New York: New York : W.W. Norton & Co., 2012.
- [69] C. Z. Eugene, J. J. Lim, U. Nirmal, T. Sajjod y W. Lau, «Battery Powered RC Boats: A Review of Its Developments for Various Applications,» *Current Journal of Applied Science and Technology*, vol. 33, n° 5, pp. 1-29, 2019.
- [70] P. M. C. de Oliveira, J. I. R. de Souza, J. A. B. da Silva y R. L. Longo, «Temperature Dependence of Hydrogen Bond Networks of Liquid Water: Thermodynamic Properties and Structural Heterogeneity from Topological Descriptors,» *Journal of Physical Chemistry B*, vol. 127, n° 10, pp. 2250-2257, 2023.
- [71] «Detalle de la norma NOM-127-SSA1-2021,» SINEC, 27 Abril 2023. [En línea]. Available: <https://www.sinec.gob.mx/SINEC/Vista/Normalizacion/DetalleNorma.xhtml?pidn=VUM1Z0YzeXNjcWtxWkxBemVSZWpoQT09#:~:text=Detalle%20de%20la%20norma%20NOM-127-SSA1-2021%20Informaci%C3%B3n%20principal%20Compartir,DOF%3A%2002%2FMay%2F2022%20Fecha%20de%20entrada%20.> [Último acceso: 13 Septiembre 2023].
- [72] *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum.*, Geneva: World Health Organization, 2017.
- [73] C. Zhang, J. Wu y J. Liu, «Water quality monitoring system based on Internet of Things,» de *2020 3rd International Conference on Electron Device and Mechanical Engineering (ICEDME)*, Suzhou, 2020.





SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISION
DIBUJ. Mauro A. López		FIRMA	FECHA	TÍTULO: Hélice y eje acoplador	
VERIF. Mauro A. López				N° DE DIBUJO 3	
APROB. Mauro A. López				MATERIAL: PLA	
FABR. Mauro A. López				PESO:	
CALID. Mauro A. López				ESCALA2	
				HOJA 1 DE 1	
				A4	





SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISION
DIBUJ. Mauro A. López		FIRMA	FECHA	TÍTULO: Casco y bases de flote	
VERIF. Mauro A. López				MATERIAL: PLA y EVA	
APROB. Mauro A. López				N.º DE DIBUJO 5	
FABR. Mauro A. López				ESCALA:1:2	
CALID. Mauro A. López				HOJA 1 DE 1	
PESO:				A4	

ANEXOS 2

Publicaciones y participación en congresos:

IoT-Based USV for Water Quality Monitoring

Mauro A. Lopez
Faculty of Electronic Sciences
Autonomous University of
Puebla
Puebla, Mexico
mauro.lopez @ alumno.buap.mx

Richard Torrealba
Faculty of Electronic Sciences
Autonomous University of
Puebla
Puebla, Mexico
richard.torrealba@correo.buap.m

Cesar A. Arriaga
Faculty of Electronic Sciences
Autonomous University of
Puebla
Puebla, Mexico
cesarau.arriaga@correo.buap.mx

Edna I. Tamariz
Faculty of Electronic Sciences
Autonomous University of
Puebla
Puebla, Mexico
iliana.tamariz@correo.buap.mx

x

Abstract— This paper presents the design and implementation of an Unmanned Surface Vehicle (USV) equipped with sensors for monitoring water quality in a lagoon. Utilizing the Internet of Things (IoT), the USV was connected to a Graphical User Interface (GUI), which allowed for real-time control and visualization of the sampled parameters. The GUI also facilitated data storage, creating a cloud-hosted database. Consequently, graphical representations were generated to compare the behavior of each parameter over three days, providing valuable insights into the water's condition.

Keywords—USV, water quality monitoring, pH, TDS, temperature, IoT

I. INTRODUCTION

Water is crucial for human survival and the existence of all Earth's species [1]. However, the escalating presence of emerging contaminants in water sources, exacerbated by global climate change and anthropogenic activities, underscores the critical need for vigilant water quality monitoring [2, 3]. The detrimental impacts of water pollution on human health and the vitality of aquatic ecosystems cannot be overstated [4]. One of the United Nations' objectives is ensuring access to clean drinking water and enhanced sanitation by 2030. Despite significant progress in countries like Greece, Germany, and Kuwait [5, 6], millions of people continue to endure the lack of safe drinking water and proper sanitation [7, 8]. In Mexico, restricted access to clean water and inadequate water quality pose significant public health challenges, potentially leading to severe health problems, including diarrheal diseases and other waterborne illnesses [9]. Approximately 88% of diarrhea cases are linked to contaminated water, primarily impacting children [10]. These issues emphasize the urgent requirement for improved water supply and sanitation systems to prevent diseases and safeguard public health, especially in vulnerable communities. Enhancing water quality in Mexico is a matter of public health and a crucial step toward sustainable development and social well-being.

The Internet of Things (IoT) revolutionizes how we monitor and manage various aspects of life. IoT includes monitoring recreation, drinking water, fishing, agriculture, industry, and environmental conditions, focusing on water quality [11]. The IoT facilitates the deployment of sensor-equipped systems to collect data on crucial water parameters, including pH, total dissolved solids (TDS), and temperature. These parameters play a vital role in assessing water quality, particularly for bodies of water intended for human or animal consumption [12, 13].

Integrating IoT technology makes seamless data transmission and real-time monitoring possible, enabling efficient analysis and informed decision-making [14].

Unmanned vehicles have become essential technologies for remote data acquisition, offering rapid and precise methods for water quality monitoring. However, addressing their features and limitations remains critical to establishing their widespread use in the field [15]. Unmanned Surface Vehicles (USVs) refer to boats or ships operating on the surface or sub-surface of water bodies without human operators, often called marine drones [16].

Consequently, the main aim of this project is to develop a USV outfitted with sensors capable of measuring pH levels, TDS, and temperature to monitor water quality effectively. Utilizing the IoT, the USV will transmit the collected data to a local server. This data will be managed through a user-friendly graphical interface, providing functionalities for controlling the USV and enabling real-time monitoring of the water quality parameters.

II. METHODOLOGY






A. System functionality

Figure 1 illustrates the operation of the developed system. Initially, an unmanned surface vehicle (USV) was equipped with a control system powered by the ESP32 devkit v1 development board that incorporated three sensors: pH, TDS, and temperature. Two 3.7V batteries also power the USV and include a pair of actuators that allow it to move in all directions on the surface of its water body. Subsequently, a computer hosts the server, receiving data captured by the USV. This computer also includes a graphical interface for data management, where real-time monitoring of the captured parameters is possible, as well as controlling the vehicle and capturing information in the database. This database is generated from the graphical interface and stored in an Excel file format in the cloud, the third element of the diagram, where future queries of the monitored data can be conducted.

Additionally, this data can be used to generate graphs to observe the behavior of the sampled parameters. Regarding communication, it is shown that there is bidirectional communication between the USV and the PC using the Modbus TCP/IP protocol to send the sampled parameters from the USV to the server and directional commands from the graphical interface to the USV. On the other hand, the PC only

Article

Wireless Dynamic Sensor Network for Water Quality Monitoring Based on the IoT

Mauro A. López-Munoz, Richard Torrealba-Melendez *, Cesar A. Arriaga-Arriaga , Edna I. Tamariz-Flores, Mario López-López , Félix Quirino-Morales , Jesus M. Munoz-Pacheco  and Fernando López-Marcos

Faculty of Electronics Sciences, Autonomous University of Puebla, Puebla 72570, Mexico; mauro.lopez@alumno.buap.mx (M.A.L.-M.); cesarau.arriaga@correo.buap.mx (C.A.A.-A.); iliana.tamariz@correo.buap.mx (E.I.T.-F.); mario.lopezlop@correo.buap.mx (M.L.-L.); felix.quirinomor@correo.buap.mx (F.Q.-M.); jesusm.pacheco@correo.buap.mx (J.M.M.-P.); fernando.lopezmarcos@correo.buap.mx (F.L.-M.)

* Correspondence: richard.torrealba@correo.buap.mx; Tel.: +52-222-2-29-55-00 (ext. 7400)

Abstract: Water is a critical resource for human survival worldwide, and its availability and quality in natural reservoirs such as lakes and rivers must be monitored. In that way, wireless dynamic sensor networks can help monitor water quality. These networks have significantly advanced across various sectors, including industrial automation and environmental monitoring. Moreover, the Internet of Things has emerged as a global technological marvel, garnering interest for its ability to facilitate information visualization and ease of deployment—the combination of wireless dynamic sensor networks and the Internet of Things improves water monitoring and helps to care for this vital resource. This article presents the design and deployment of a wireless dynamic sensor network comprising a mobile node outfitted with multiple sensors for remote aquatic navigation and a stationary node similarly equipped and linked to a server via the IoT. Both nodes can measure parameters like pH, temperature, and total dissolved solids (TDS), enabling real-time data monitoring through a user interface and generating a database for future reference. The integrated control system within the developed interface enhances the mobile node’s ability to survey various points of interest. The developed project enabled real-time monitoring of the aforementioned parameters, with the recorded data being stored in a database for subsequent graphing and analysis using the IoT. The system facilitated data collection at various points of interest, allowing for a graphical representation of parameter evolution. This included consistent temperature trends, neutral and alkaline zone data for pH levels, and variations in total dissolved solids (TDS) recorded by the mobile node, reaching up to 100 ppm.

Keywords: WDSN; IoT; water quality; monitoring; mobile node; pH; TDS; temperature; turbidity



Citation: López-Munoz, M.A.; Torrealba-Melendez, R.; Arriaga-Arriaga, C.A.; Tamariz-Flores, E.I.; López-López, M.; Quirino-Morales, F.; Munoz-Pacheco, J.M.; López-Marcos, F. Wireless Dynamic Sensor Network for Water Quality Monitoring Based on the IoT. *Technologies* **2024**, *12*, 211. <https://doi.org/10.3390/technologies12110211>

Academic Editor: Xavier Fernando

Received: 26 September 2024

Revised: 15 October 2024

Accepted: 21 October 2024

Published: 23 October 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Water is one of the essential resources for human survival, as well as the life of all species on Earth. Health and hygiene are vital components of humankind’s sustainability, and any country’s progress comes from a clean, pollution-free, and hazard-free environment. One of the United Nations’ goals is to provide clean drinking water and improved sanitation by 2030 [1]. Another critical challenge of the UN is to guarantee the availability of water, its sustainable management, and sanitation for all. Nevertheless, millions still suffer from the lack of safe drinking water and proper sanitation despite the progress made by some countries like Greece, Iceland, Germany, Singapore, and Kuwait [2,3]. Inadequate water treatment plans and distribution networks lead to low-quality water, which is prone to pollution [4,5]. For that reason, water monitoring becomes essential to ensure that the citizens of any nation can lead a healthy life [6]. Thus, experts worldwide have started several research projects to remotely preserve and manage such an invaluable asset’s quality [7–9]. Monitoring water quality is a critical public health issue, as numerous statistics

Sistema de monitoreo de la calidad del agua con orientación IoT

Mauro A. López M.
Facultad de Ciencias de la Electrónica
Benemérita Universidad Autónoma de
Puebla
Puebla, México
mauro.lopez@alumno.buap.mx

Richard Torrealba Meléndez
Facultad de Ciencias de la Electrónica
Benemérita Universidad Autónoma de
Puebla
Puebla, México
richard.torrealba@correo.buap.mx

Cesar A. Arriaga A.
Facultad de Ciencias de la Electrónica
Benemérita Universidad Autónoma de
Puebla
Puebla, México
cesarau.arriaga@correo.buap.mx

Resumen — El agua es uno de los recursos naturales fundamentales para la vida de las especies que habitan nuestro planeta, cuyo consumo depende de su disponibilidad y calidad en ríos, lagos y reservas. En el presente trabajo se desarrolló el prototipo de una terminal estática equipada con sensores para obtener lecturas del PH, turbidez, temperatura y total de sólidos disueltos, y así determinar la calidad del agua de una laguna dentro de ciudad universitaria en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). El monitoreo se llevó a cabo en tiempo real durante una hora, se utilizó el IoT para enviar los parámetros medidos a un servidor para su posterior visualización e interpretación en una interfaz gráfica, así como su respectiva gestión en una base de datos. Los resultados obtenidos fueron comparados con lecturas captadas con herramientas dedicadas a la medición de estos parámetros.

Palabras clave — PH, turbidez, TDS, temperatura, calidad, IoT, agua, monitoreo.

I. INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento esencial para la supervivencia y prosperidad de la humanidad y la vida en la Tierra, lo que ha llevado a los expertos a iniciar investigaciones para preservar y gestionar su calidad [1]. Siguiendo con esta tendencia, se ha adoptado un enfoque tecnológico en las investigaciones para diseñar y desarrollar sistemas que puedan detectar, medir y supervisar la calidad del agua de forma remota [2, 3].

Actualmente, el Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés) es una innovación tecnológica muy avanzada, ya que está presente en todo el mundo y puede utilizarse en diversos campos para recoger, supervisar y analizar datos de forma remota [4]. La calidad del agua es crucial para garantizar la salud y el desarrollo de las especies que la habitan. En particular, parámetros como la temperatura y el pH pueden afectar al metabolismo y a la termorregulación, lo que puede provocar enfermedades o incluso la muerte [5]. Por lo tanto, es importante supervisar los cuerpos de agua y tratarlos de forma adecuada para alcanzar los parámetros óptimos, ya sea para la cría de peces, su uso en el sector agrícola o su consumo por parte de humanos y especies animales [6, 7].

Por lo anterior, en este artículo se presenta el desarrollo e implementación de una terminal estática equipada con sensores de PH, turbidez, temperatura y total de sólidos disueltos (TDS por sus siglas en inglés), para monitorear la calidad del agua. Dicho dispositivo se encarga de tomar muestras de manera periódica para posteriormente mandar los parámetros medidos a un servidor utilizando el IoT logrando así la recepción y procesamiento de estos utilizando una

interfaz gráfica para una mejor visualización e interpretación, así como su gestión en una base de datos.

II. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

El Sistema de monitoreo de la calidad del agua desarrollado consta de 3 partes fundamentales, la etapa de sensado, la comunicación y la gestión de datos. A continuación, en la Fig. 1 se explica cada uno de los apartados.

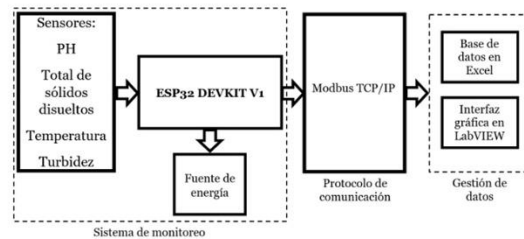


Fig. 1 Bloques que componen el sistema de monitoreo de la calidad del agua. Autoría propia.

A. Etapa de sensado

La etapa de sensado consta de un sistema basado en microcontrolador que equipa cuatro sensores, tres de ellos con salida analógica correspondientes a PH, TDS y turbidez, y uno con salida basada en el protocolo One Wire [8]. Cada uno de ellos fue caracterizado para conocer su comportamiento, además, se realizó el debido acondicionamiento para limitar la salida de cada sensor al valor máximo del convertidor analógico digital de la tarjeta ESP WROOM-32.

Para caracterizar el sensor de PH (PH-4502C) se utilizaron soluciones especializadas con valores fijos de 4.01, 6.86 y 9.18 unidades de PH a una temperatura ambiente controlada de 25°C, en un laboratorio de la Facultad de Ciencias Químicas de la BUAP, con lo cual se obtuvo la curva característica de la Fig. 3 que demuestra el comportamiento lineal del dispositivo, cuya ecuación se describe en (1). Es importante mencionar que existen variaciones de PH respecto a la temperatura, las cuales se muestran en la Fig. 2, que corresponden al buffer de referencia de 4.01, se puede ver que hay una variación de 0.02 unidades de PH hasta alcanzar los 40°C respecto a la temperatura de calibración de 25°C.