

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO IOT PARA EL PROTOTIPO
EXPERIMENTAL OWC DEL SENA**

**JERSON LEWIS OROBIO LERMA
CÓDIGO: 202026147**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2025**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO IOT PARA EL PROTOTIPO
EXPERIMENTAL OWC DEL SENA**

**JERSON LEWIS OROBIO LERMA
CÓDIGO: 202026147**

Proyecto de grado para optar por el título de: Ingeniero Electrónico

DIRECTOR

FABIO G. GUERRERO

CODIRECTOR

FREDY FERNANDO MIRAMAG MARTINEZ

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2025**

RESUMEN

El presente trabajo de grado tiene como propósito diseñar e implementar un sistema de monitoreo basado en tecnologías del Internet de las Cosas (IoT), aplicado al prototipo experimental de generación de energía undimotriz mediante Columna de Agua Oscilante (OWC), desarrollado por el grupo ASTIN del SENA. Este prototipo busca ofrecer una solución energética sostenible y replicable en zonas no interconectadas (ZNI) del litoral pacífico colombiano.

La solución propuesta integra sensores para la medición de variables clave como voltaje, corriente, velocidad de la turbina, presión del aire, velocidad del viento y altura del oleaje. Los datos recolectados son procesados por una Raspberry Pi y transmitidos en tiempo real mediante WebSockets a una aplicación web desarrollada en Node.js, con almacenamiento en bases de datos MySQL alojadas en Railway y en servidores del SENA.

El sistema fue validado mediante pruebas de laboratorio que confirmaron su precisión y funcionalidad. Los resultados obtenidos evidencian que esta herramienta fortalece significativamente la capacidad de análisis experimental del prototipo, permitiendo la visualización, gestión, almacenamiento y trazabilidad de datos en tiempo real, lo cual abre nuevas posibilidades para investigaciones futuras y aplicaciones en escenarios reales.

Palabras clave: Energía undimotriz, IoT, monitoreo, sensores, Raspberry Pi, WebSocket, energías renovables.

ABSTRACT

This thesis aims to design and implement a monitoring system based on Internet of Things (IoT) technologies, applied to the experimental prototype of wave energy generation using an Oscillating Water Column (OWC) developed by the ASTIN research group at SENA. The prototype is intended to provide a sustainable and replicable energy solution for non-interconnected zones (ZNI) along Colombia's Pacific coast.

The proposed solution integrates sensors for the measurement of key variables such as voltage, current, turbine speed, air pressure, wind speed, and wave height. Data is collected by a Raspberry Pi and transmitted in real time via WebSockets to a web application developed in Node.js, with storage in MySQL databases hosted on Railway and SENA servers.

The system was validated through laboratory tests, which confirmed its precision, functionality, and technical viability. The results show that this tool significantly enhances the experimental analysis capabilities of the prototype, enabling real-time data visualization, management, and traceability. It opens new possibilities for future research and real-world applications.

Keywords: Wave energy, IoT, monitoring, sensors, Raspberry Pi, WebSocket, renewable energy.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo con profundo amor y gratitud a mis padres **Wilber Orobio Portocarrero** y **Fénix Lerma Solís**, quienes han sido mi guía incondicional, mi ejemplo de fortaleza y el motor que me ha impulsado a superar cada desafío. Gracias por sus enseñanzas y por confiar en mí incluso en los momentos más difíciles.

A mi familia, por su compañía y palabras de aliento, y a mis abuelos, por forjar el legado de una familia de luchadores y profesionales, del cual hoy me enorgullece hacer parte.

A mis amigos de infancia **Juan David Mina**, **Jhon Edward Ordoñez**, **Jeison Salas**, **Javier Portocarrero**, **Samir Murillo** y **Jorge Iván Ordoñez** que han compartido conmigo este camino de crecimiento personal y académico, gracias por su lealtad y por estar presentes en cada etapa de este proceso.

A mis amigos que me brindaron su apoyo incondicional la ciudad de Cali y en la Universidad del Valle, especialmente a **Yisely Prado**, **Erick Caicedo** y **Juan Camilo Aroca**.

Agradezco profundamente a **Cadhubev** por enseñarme a reconocer y valorar mi identidad como joven negro, y por mostrarme el potencial y las capacidades que poseo para contribuir a las comunidades negras y defender nuestro territorio.

Este logro también es suyo. Gracias por creer en mí.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco, en primer lugar, a Dios por darme la fortaleza, la salud y la perseverancia necesarias para culminar esta etapa tan importante de mi vida.

Expreso mi más sincero agradecimiento al profesor **Fabio G. Guerrero**, director de este proyecto, por su valiosa orientación, su disposición constante que guiaron el desarrollo de esta tesis. Su compromiso y exigencia fueron fundamentales para alcanzar este logro.

De igual forma, agradezco al ingeniero **Fredy Fernando Miramag**, codirector del proyecto, y a los instructores del SENA **Juan Manuel Hurtado** y **Andrés Felipe Torres Recalde**, por su apoyo técnico, acompañamiento y confianza durante cada fase del proceso.

Mi reconocimiento especial al experto **Henry Jiménez**, del equipo de TecnoParque SENA Nodo Valle por su respaldo constante, por compartir su conocimiento con generosidad y por ser un pilar fundamental en la consolidación de esta propuesta.

A mis compañeros de carrera **John Wilmar Ortiz, Héctor Fabio Hernández, Juan Camilo Vargas Pantoja, Juan Sebastián Rodríguez, Yobin David Vergara, Jhonatan Rubianes, Michael Castrillón, Sebastián Quintero Corzo, Christian Homero Erazo, Joao Rincón y Juan José Aguirre**, gracias por su amistad, trabajo en equipo y compromiso. Juntos afrontamos cada reto y aprendimos que los logros compartidos tienen mayor valor.

Finalmente, a mi familia y seres queridos, por creer en mí sin reservas y brindarme su apoyo emocional en cada paso.

Tabla de contenido

RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
DEDICATORIA	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
1. INTRODUCCIÓN	10
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
3. JUSTIFICACIÓN	14
4.OBJETIVOS	15
4.1. OBJETIVO GENERAL	15
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
5. MARCO TEÓRICO	16
5.1. Internet de las Cosas (IoT).....	16
5.2. Raspberry Pi como plataforma embebida	16
5.3. Comunicación y protocolos de transmisión de datos	17
5.4. Tecnología OWC y energía undimotriz	17
5.5. Aplicaciones IoT en energías renovables	17
5.6. Sensores y adquisición de datos.....	18
5.7. Interfaz web y almacenamiento en la nube	18
6. METODOLOGÍA.....	19
6.1. Servidor SENA	19
6.2. Administrador del servidor (Proxmox)	20
6.3. Estudiar los sensores implementados en el prototipo anteriormente	21
6.3.1 Tarjeta DAQ integrada al prototipo de escala real	21
6.3.2. Acondicionamiento de Señal y Diseño del Circuito Electrónico	23
6.4. Estudio de la arquitectura del prototipo experimental OWC del SENA	28
6.4.1. Validación del prototipo experimental	30
6.4.1.1. Experimento 1	30
6.4.1.2. Experimento 2	31
6.4.1.3. Experimento 3.....	32
6.5. Estrategias para implementar un sistema de monitoreo por medio de IoT	

para sistemas de energías renovables	33
6.6. Estudio de las variables a medir	35
6.6.1. <i>Altura de ola (distancia)</i>	35
6.6.2. <i>Presión del viento</i>	35
6.6.3. <i>Velocidad del viento</i>	35
6.6.4. <i>Velocidad de la turbina (RPM)</i>	35
6.6.5. <i>Voltaje generado</i>	36
6.6.6. <i>Corriente generada</i>	36
6.7. Definición de los sensores a emplear	36
6.7.1. <i>Sensor de distancia: HC-SR04</i>	36
6.7.2. <i>Sensor de presión: MPX7002DP</i>	37
6.7.3. <i>Sensor de velocidad de la turbina (RPM): LJ12A3-4-Z/BX</i>	37
6.7.4. <i>Sensor de corriente: ACS712 – 5A</i>	37
6.7.5. <i>Sensor de voltaje: FZ0430</i>	38
6.7.6. <i>Sensor de velocidad del viento: MPX7002DP con tubo Pitot</i>	38
6.8. Diseño de la arquitectura para la ubicación de los sensores	39
6.9. Diseño de adecuación de las señales de los sensores.....	43
6.10. Esquema de ubicación de los sensores.....	45
6.11. Diseño de los circuitos de adecuación de la señal.....	47
6.12. Desarrollo de la tarjeta de circuito impreso para el bloque sensorial	47
6.12.1 <i>Cálculos de variables con los sensores implementados</i>	50
6.13. DESARROLLO PAGINA WEB	51
6.13.1. <i>Tecnologías de desarrollo web analizadas</i>	51
6.13.2. <i>Frontend: HTML, CSS y JavaScript</i>	53
6.13.3. <i>Backend: Node.js y Express.js</i>	53
6.13.4. <i>Base de datos: MySQL</i>	54
6.13.5. <i>Despliegue en la nube: Railway</i>	54
6.13.6. <i>Comunicación en tiempo real: WebSocket</i>	54
6.14. Diseño estructura de la base de datos.....	54
6.15. Creación de la interfaz	57
6.16. Integración de servicios de almacenamiento en la nube para gestionar y almacenar la información de monitoreo	61
6.17. Desplegar la aplicación en los servidores del SENA.....	63

7. RESULTADOS	66
7.1. Prueba envío de datos a la nube	66
7.4. Instalación física de los sensores en la planta experimental del SENA	67
7.5. Realizar pruebas de la interfaz.....	69
7.6. Recolectar los datos obtenidos de todas las pruebas	73
7.7. Verificación de la efectividad de la interfaz de comunicación entre los sensores y la plataforma de monitoreo	74
7.8. Realización de las pruebas del sistema para garantizar la precisión y confiabilidad de los datos recopilados.....	77
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS	78
9. CONCLUSIONES.....	80
10. TRABAJOS FUTUROS	81
11. REFERENCIAS	83

Lista de figuras

Figura 1. Servidor físico SENA.....	19
Figura 2. Entorno de Proxmox.	20
Figura 3. Tarjeta de adquisición de datos.....	22
Figura 4. Bloque de alimentación.	24
Figura 5. Conexión de sensores en el esquemático.....	25
Figura 6 Bloque acondicionamiento de señales	26
Figura 7 Acondicionamiento RPM.	26
Figura 8. Visualización tarjeta 2D.....	27
Figura 9. Visualización de la tarjeta en 3D.	27
Figura 10. Interfaz gráfica en LabVIEW.....	28
Figura 11. Prototipo experimental OWC del ASTIN – SENA.	29
Figura 12. Resultados experimento 1.....	30
Figura 13. Resultados experimento 2.....	31
Figura 14 Resultados experimento 3.....	32
Figura 15 Esquema del sistema IoT propuesto para el prototipo OWC, con sensores conectados al sistema embebido y transmisión de datos hacia el servidor.	34
Figura 16. Sensor ultrasónico HCSR04.....	36
Figura 17. Sensor MPX7002DP.	37
Figura 18. Sensor inductivo LJ12A3-4-Z/BX.	37
Figura 19. Sensor de corriente ACS712-5A.	38
Figura 20. Sensor de voltaje FZ0430.	38
Figura 21. ADS1115.....	41
Figura 22. Protocolo I2C.	41
Figura 23. Diagrama de bloques general del sistema de adquisición.	42
Figura 24. Esquema de acondicionamiento de señal con divisor resistivo y seguidor de voltaje (LM324).	44
Figura 25. Esquemático convertidor lógico bidireccional.	45
Figura 26. Modelado prototipo experimental OWC.....	45
Figura 27. Ubicación sensores vista lateral.	46
Figura 28. Ubicación sensores.....	46
Figura 29. Esquemático del circuito completo de adecuación de señal.....	47
Figura 30. Diseño 2D tarjeta acondicionamiento de señal para prototipo experimental OWC.	48
Figura 31. Vista 3D tarjeta acondicionamiento de señal para prototipo experimental OWC.	48
Figura 32. Tarjeta acondicionamiento de señal construida.....	49
Figura 33. Tarjeta acondicionamiento de señal con componentes montados.....	49
Figura 34. Pseudocódigo Raspberry pi	51
Figura 35. Tabla Usuarios BD.....	55
Figura 36. Tabla Usuarios_privilegiados BD.	55
Figura 37. Tabla datos_capturados BD.....	56
Figura 38. Tabla cola_proceso BD.....	56
Figura 39. Relación entre tablas en base de datos.	57
Figura 40. Diseño para la interfaz.	58
Figura 41. Página Login.html	59
Figura 42. Página principal.html	60
Figura 43. Página consultar.html	60
Figura 44. Página registrar.html	61
Figura 45. Despliegue de contenedores en Railway.....	62
Figura 46. Despliegue de base de datos en la nube.....	62

Figura 47. Despliegue de backend en Railway.....	63
Figura 48. Configuración máquina virtual de Windows 11.....	65
Figura 49. Datos capturados registrados en Railway.	67
Figura 50. Ubicación física sensor ultrasónico en el prototipo.	68
Figura 51. Ubicación física sensor velocidad de viento en el prototipo.	68
Figura 52. Ubicación física sensor inductivo.	69
Figura 53. Ubicación sistema central con sensores de voltaje y corriente.	69
Figura 54. Conexión abierta a la página Web.....	70
Figura 55. Verificación de comunicación y acceso mediante dirección ip.....	71
Figura 56. Ingreso de parámetros de captura en página principal.html	71
Figura 57. Captura de datos de prueba en página principal.html	72
Figura 58. Consulta de datos en página consultar.html	73
Figura 59. Datos exportados de la captura.....	74
Figura 60. Envío de variables a la base de datos.	75
Figura 61. Captura de datos con los sensores implementados en el prototipo experimental.	75
Figura 62. Integración completa del sistema de monitoreo al prototipo experimental OWC.	76

Tablas

<i>Tabla 1. Características del servidor</i>	20
Tabla 2. Sensores seleccionados para el prototipo de escala real.	22
Tabla 3 Comparativa entre arquitecturas de monitoreo IoT aplicadas a energías solar, eólica y undimotriz	33
Tabla 4. Especificaciones técnicas y criterios de selección de sensores para el sistema OWC	39
Tabla 5. Análisis comparativo de características clave entre ESP32, STM32 y Raspberry Pi 4B+	40
Tabla 6. Esquema de voltajes en la arquitectura del sistema.	43
Tabla 7. Formulas aplicadas para calcular variables.	50
Tabla 8. Comparación de tecnologías virtuales.	51
Tabla 9. Características máquina virtual SimUndimotriz.....	64
Tabla 10. Desempeño metrológico de sensores	77

Ecuaciones

Ecuación 1. Ganancia de amplificador operacional.	43
--	----

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia, el acceso limitado a la energía eléctrica en zonas no interconectadas (ZNI) ha impulsado el desarrollo de alternativas energéticas sostenibles. Ante este desafío, el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), a través de su grupo de investigación ASTIN, ha diseñado un prototipo experimental que simula un sistema de generación de energía undimotriz mediante la tecnología de Columna de Agua Oscilante (OWC), buscando aprovechar el potencial energético del océano Pacífico.

Este prototipo ha permitido estudiar los principios de conversión energética mediante el movimiento de las olas, pero su análisis técnico se ve limitado por la falta de un mecanismo automatizado de recolección y visualización de datos. Sin herramientas que permitan observar y registrar en tiempo real variables operativas clave, resulta complejo validar su eficiencia y escalar su aplicación a contextos reales.

Con el fin de superar esta limitación, se propone la integración de un sistema de monitoreo basado en tecnologías del Internet de las Cosas (IoT), que permita el registro de parámetros como voltaje, corriente, presión de aire, velocidad del viento, altura de ola y velocidad de giro de la turbina. La implementación del sistema facilitará una evaluación precisa del comportamiento del prototipo y el desarrollo de análisis experimentales más avanzados, fundamentales para su aplicación futura en las ZNI.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El acceso a la energía eléctrica es uno de los pilares fundamentales para garantizar el desarrollo de una sociedad. En Colombia, particularmente en las denominadas Zonas No Interconectadas (ZNI), esta necesidad básica continúa siendo un reto estructural que obstaculiza la mejora de la calidad de vida. Según datos del Gobierno Nacional y la Superintendencia de Servicios Públicos, más del 52% del territorio colombiano no cuenta con conexión al Sistema Interconectado Nacional (SIN), lo que evidencia una brecha energética profunda en departamentos como Chocó, Nariño, Cauca y otras zonas costeras del Pacífico colombiano [1].

En estas regiones, la limitada infraestructura eléctrica obliga a la implementación de soluciones energéticas de emergencia, como plantas generadoras a base de diésel, aunque son funcionales a corto plazo, resultan costosas y altamente contaminantes [2]. La dependencia del diésel contribuye significativamente a la emisión de gases de efecto invernadero, generando impactos ambientales negativos e incumpliendo los compromisos nacionales en materia de sostenibilidad y de un ambiente sano [3][4].

En este contexto de exclusión energética y crisis ambiental, la búsqueda de soluciones sostenibles para el entorno cobra una importancia estratégica. La generación de energía a partir de fuentes renovables emerge como una alternativa viable para suplir las necesidades energéticas de estas comunidades que han sido abandonadas por el estado colombiano. Particularmente, la energía undimotriz, obtenida a partir del aprovechamiento del movimiento de las olas del mar, representa una opción con alto potencial, dado que el país cuenta con una extensa línea costera en el Océano Pacífico donde las condiciones de oleaje son favorables para su explotación [5][6].

Entre los métodos disponibles para la conversión de energía undimotriz, el sistema de Columna de Agua Oscilante (OWC) destaca por su eficiencia y bajo impacto ambiental. Este sistema consiste en una cámara parcialmente sumergida que, al ser impactada por las olas, genera un movimiento de aire alternante que acciona una turbina conectada a un generador eléctrico. El principio de operación es adaptable a diferentes condiciones marinas [7][8].

En respuesta a esta problemática, el grupo de investigación ASTIN del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) ha desarrollado un prototipo

experimental a escala de laboratorio que simula el comportamiento de un sistema OWC. Este prototipo tiene como propósito evaluar la viabilidad técnica de la energía undimotriz como solución para las ZNI. Sin embargo, pese al esfuerzo realizado en el diseño físico del prototipo, existe una limitación crítica en términos del análisis cuantitativo del comportamiento del sistema, debido a la ausencia de un mecanismo automatizado y en tiempo real que permita la adquisición, transmisión, almacenamiento y análisis de datos operativos clave [9].

Esta limitación representa un obstáculo significativo para la validación experimental del prototipo, ya que sin un sistema de monitoreo preciso es imposible realizar estudios comparativos entre experimentos y configuraciones, identificar comportamientos anómalos y, en última instancia, optimizar el diseño para futuras implementaciones en condiciones reales [10].

En este sentido, surge la necesidad de implementar un sistema de monitoreo basado en el Internet de las Cosas (IoT). Esta tecnología permite la interconexión de sensores, dispositivos electrónicos y plataformas digitales para la recopilación y análisis de datos en tiempo real. Al integrar sensores al prototipo OWC y conectar dichos sensores a una plataforma web, se habilita un nuevo nivel de visibilidad y control sobre las variables operativas del sistema, lo que facilita la toma de decisiones y la validación metrológica de los resultados experimentales [11][12].

Adicionalmente, un sistema IoT permitiría la implementación de una aplicación web que tiene como objetivo principal la visualización remota de los datos de interés, abriendo la posibilidad de que investigadores, docentes y estudiantes accedan al sistema dentro de las instalaciones del SENA, fomentando así, el desarrollo de investigaciones más avanzadas en torno a energías renovables [13].

Bajo este panorama, la pregunta problema que se plantea es la siguiente:
¿Cómo desarrollar un sistema de monitoreo de las variables que intervienen en la generación de energía renovable del prototipo OWC del SENA, basado en tecnologías IoT, que permita mejorar la capacidad de análisis experimental, validación técnica y toma de decisiones para futuras implementaciones en zonas no interconectadas?

Responder a esta pregunta no solo contribuye al fortalecimiento técnico del

prototipo OWC desarrollado por el SENA, sino que también **representa un paso crucial hacia la equidad energética**, permitiendo que comunidades históricamente excluidas puedan acceder a una fuente de energía limpia, autónoma y adaptada a su entorno natural.

3. JUSTIFICACIÓN

Las Zonas No Interconectadas (ZNI) de Colombia presentan un reto crítico en materia de equidad energética. La falta de conexión al Sistema Interconectado Nacional (SIN) y la dependencia de plantas diésel costosas y contaminantes destacan la urgencia de explorar soluciones más sostenibles.

En este escenario, la búsqueda de fuentes alternativas de energía cobra relevancia estratégica. La energía undimotriz, que se obtiene a partir del movimiento de las olas del mar, representa una opción con alto potencial, especialmente en la costa pacífica colombiana, donde las condiciones oceánicas son propicias para su aprovechamiento. El grupo de investigación ASTIN del SENA ha asumido este reto mediante el desarrollo de un prototipo experimental basado en la tecnología de Columna de Agua Oscilante (OWC), el cual permite simular la conversión de la energía de las olas en energía eléctrica bajo condiciones controladas de laboratorio.

No obstante, para validar la viabilidad técnica y operativa del sistema OWC, es indispensable contar con información precisa y continua sobre su desempeño. Actualmente, el prototipo carece de un sistema automatizado que permita medir, almacenar y analizar variables clave como el voltaje, la corriente, la presión de aire y la velocidad de la turbina. Esta carencia impide realizar una caracterización rigurosa del sistema, limita la capacidad de réplica de los ensayos y obstaculiza el proceso de optimización del diseño para futuras aplicaciones reales en zonas costeras aisladas.

Frente a esta necesidad, la incorporación de tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) se perfila como una solución técnica eficaz. El IoT permite integrar sensores y dispositivos que recogen datos en tiempo real, los transmiten a través de redes inalámbricas y los visualizan en plataformas digitales. Al implementar un sistema de monitoreo IoT en el prototipo OWC, introduce un nivel avanzado de gestión de datos experimentales facilitando el análisis metrológico, la comparación entre escenarios, la detección de fallos y la validación técnica del sistema. Además, el acceso remoto a los datos a través de una aplicación web abre nuevas posibilidades para la interacción con el prototipo por parte de investigadores, docentes y aprendices del SENA.

Finalmente, este proyecto tiene un componente formativo y de transferencia de conocimiento muy relevante. La implementación del sistema de monitoreo no solo contribuirá al perfeccionamiento del prototipo, sino que también fortalecerá las capacidades técnicas de los aprendices en áreas como electrónica, instrumentación, telecomunicaciones e IoT. Este enfoque pedagógico, alineado con la misión del SENA, permitirá replicar la experiencia en otros proyectos de energías renovables. Así, el proyecto se convierte en un catalizador para impulsar soluciones energéticas limpias y adaptadas a las realidades de las comunidades más vulnerables del país.

4.OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema de internet de las cosas al prototipo experimental de generación de energía renovable OWC del SENA para la adquisición de datos con el propósito de mejorar la capacidad de análisis experimental en futuros proyectos.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Implementar un sistema para el monitoreo mediante una red de sensores IoT del prototipo experimental del SENA por medio de la adquisición de los valores de por lo menos 3 variables de interés.
2. Desarrollar una aplicación web con servicios de almacenamiento en la nube que permita consultar la información de monitoreo del prototipo experimental OWC desde cualquier sitio conectado a los servidores del SENA.
3. Ejecutar un protocolo de pruebas que permita caracterizar el sistema implementado considerando aspectos metrológicos del sistema de comunicaciones y de la interfaz web.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. Internet de las Cosas (IoT)

El Internet de las Cosas (IoT) se entiende como una evolución de Internet que interconecta objetos físicos inteligentes para intercambiar datos y brindar nuevos servicios [14]. En esta concepción, cada “cosa” (sensor, actuador, dispositivo móvil, etc.) tiene un identificador único y puede comunicarse a través de la red global [14]. Kenaza et al. Define al IoT como una red que conecta dispositivos y sistemas informáticos con el objetivo de intercambiar información [15].

La arquitectura típica del IoT se organiza en capas. Por ejemplo, en una arquitectura de cinco capas se distingue la capa de percepción (sensores y actuadores para adquirir datos físicos), la capa de red (que transmite datos con tecnologías como Wi-Fi, Zigbee, Bluetooth o 5G), la capa de procesamiento (para procesar y almacenar información), y capas superiores de aplicación y negocio [15]. En la capa de percepción se ubican los sensores que miden variables físicas (temperatura, presión, vibración, etc.) y las envían hacia la red mediante módulos de comunicación inalámbrica. El rol de estas capas es garantizar que los datos recopilados en el entorno físico lleguen a servidores o la nube para su análisis.

El IoT tiene aplicaciones en múltiples sectores: hogares inteligentes, ciudades inteligentes, salud remota, agricultura de precisión, logística, manufactura, transporte, etc. Por ejemplo, aplicaciones actuales incorporan IoT en sistemas de monitoreo ambiental, automatización industrial, medición de consumo energético y gestión de redes inteligentes. En la literatura se documentan proyectos de sensores IoT para medir calidad del aire, riego automatizado, seguimiento de activos, entre otros, aprovechando la flexibilidad de esta tecnología para recolectar datos críticos en tiempo real.

5.2. Raspberry Pi como plataforma embebida

La Raspberry Pi es una computadora de placa única (Single-Board Computer, SBC) de bajo costo ampliamente adoptada en proyectos IoT y sistemas embebidos debido a su versatilidad y poder de cómputo. Cuenta con procesador ARM, memoria RAM, sistema operativo Linux y múltiples interfaces: puertos GPIO para sensores, USB, Ethernet, Wi-Fi y Bluetooth integrados. Estas características permiten que la Raspberry Pi ejecute software complejo en el mismo dispositivo, al tiempo que se conecta fácilmente a la red o la nube [16].

Las Raspberry Pi son muy usadas como nodos finales IoT y plataformas de monitoreo. Su sistema operativo completo facilita el desarrollo de aplicaciones en Python, C/C++ u otros lenguajes, integrando bibliotecas para

manejar sensores (temperatura, humedad, presión, acelerómetros, cámaras, etc.). Por ejemplo, Nadaf et al. Diseñaron un espejo inteligente basado en Raspberry Pi 3 con pantalla táctil y comandos de voz, que despliega en tiempo real información de clima, temperatura y noticias [16]. En este caso, la Pi 3 ejecuta el sistema operativo y controla la interfaz gráfica, mientras recibe datos de sensores ambientales y de usuario.

La Raspberry Pi permite implementar protocolos IoT complejos (MQTT, HTTP) y gestionar flujos de datos de sensores críticos. Investigaciones recientes han analizado distintas SBC para IoT; por ejemplo, Galkin et al. evaluaron computadoras de placa única como Raspberry Pi para soluciones IoT embebidas, subrayando sus ventajas en potencia de cálculo y conectividad frente a plataformas más simples [17].

5.3. Comunicación y protocolos de transmisión de datos

La transmisión de datos en IoT emplea múltiples tecnologías de comunicación. En el nivel físico y de enlace se usan tecnologías de corto alcance (Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee) para entornos limitados; y tecnologías de muy bajo consumo y largo alcance como LoRaWAN, Sigfox o NB-IoT para redes distribuidas con dispositivos remotos. Por ejemplo, Saleem et al. señalan que protocolos como ZigBee, LoRaWAN y MQTT son comunes en diferentes aplicaciones IoT debido a su balance entre alcance y tasa de datos.

A su vez, en la capa de aplicación se emplean protocolos de mensajería para redes con recursos limitados. Los más difundidos son MQTT (mensaje-publicación sobre TCP/IP) y CoAP (protocolo ligero sobre UDP). Según Saleem et al, se han estudiado mensajería IoT comunes (MQTT, CoAP, HTTP) identificando sus características clave para despliegues IoT [18].

5.4. Tecnología OWC y energía undimotriz

La Columna de Agua Oscilante (OWC) es un tipo de convertidor de energía undimotriz de olas marinas donde las olas entrantes hacen oscilar una columna de agua dentro de una cámara cerrada. Este movimiento genera un flujo de aire bidireccional que acciona una turbina neumática conectada en la parte superior de la cámara. Al comprimirse la cámara, se expulsa aire; al retroceder la ola, el aire es succionado. La turbina de doble flujo aprovecha ambos movimientos para generar energía eléctrica.

5.5. Aplicaciones IoT en energías renovables

La integración del IoT en el sector de energías renovables permite monitorear y optimizar plantas solares, eólicas y undimotrices. Por ejemplo, se emplean

redes de sensores para registrar en tiempo real la radiación solar, la velocidad del viento o el nivel del mar, alimentando modelos de predicción y sistemas de control. Estas aplicaciones aprovechan protocolos IoT y plataformas en la nube para ajustar automáticamente generadores y realizar mantenimiento predictivo[24][25][28].

Existen casos prácticos de IoT en renovables: sensores inalámbricos en paneles fotovoltaicos transmiten datos de rendimiento a una plataforma web; medidores de energía conectados por GPRS informan la producción eólica a centros de control remoto.

5.6. Sensores y adquisición de datos

Los sensores son dispositivos que capturan variables físicas críticas y las convierten en señales eléctricas. Pueden ser analógicos o digitales. En sistemas IoT, cada sensor suele conectarse a un microcontrolador o placa embebida (Arduino, Raspberry Pi, ESP32, etc.) que realiza la adquisición de datos.

La precisión del sistema depende de muchos factores como la resolución del convertidor análogo a digital y la capacidad de procesamiento del microcontrolador o sistema embebido. Además, para las aplicaciones IoT se debe tener en cuenta cómo se van a transmitir los datos ya que muchos de estos sistemas no poseen la capacidad de conectarse a una red de internet que les permita interactuar con otros dispositivos.

5.7. Interfaz web y almacenamiento en la nube

Para presentar y almacenar los datos recolectados, las soluciones IoT suelen incluir interfaces web y servicios en la nube. El front-end web se desarrolla con frameworks modernos que consumen APIs RESTful expuestas por el servidor IoT. Esto permite crear dashboards para visualizar en tiempo real variables críticas.

Pierleoni et al. compara soluciones en la nube (AWS, Google Cloud, Azure), destacando sus servicios especializados (pasarelas MQTT, gestores de dispositivos, analítica) para aplicaciones IoT [19]. Estos sistemas cloud proporcionan almacenamiento duradero y procesamiento en tiempo real para los datos de los sensores, además de asegurar autenticación y seguridad.

6. METODOLOGÍA

6.1. Servidor SENA

Con el fin de garantizar una integración eficiente del sistema de monitoreo IoT con la infraestructura tecnológica del SENA, se llevó a cabo un estudio detallado de las capacidades del servidor que será utilizado para recibir, almacenar los datos medidos del prototipo experimental.

El servidor del SENA corresponde a un equipo físico de alto rendimiento, específicamente un Dell PowerEdge R650, diseñado para aplicaciones empresariales. Este servidor se encuentra montado en un chasis *rack de 1U* y presenta almacenamiento de grandes volúmenes de datos y soporte de múltiples máquinas virtuales.

Figura 1. Servidor físico SENA



Elaboración propia.

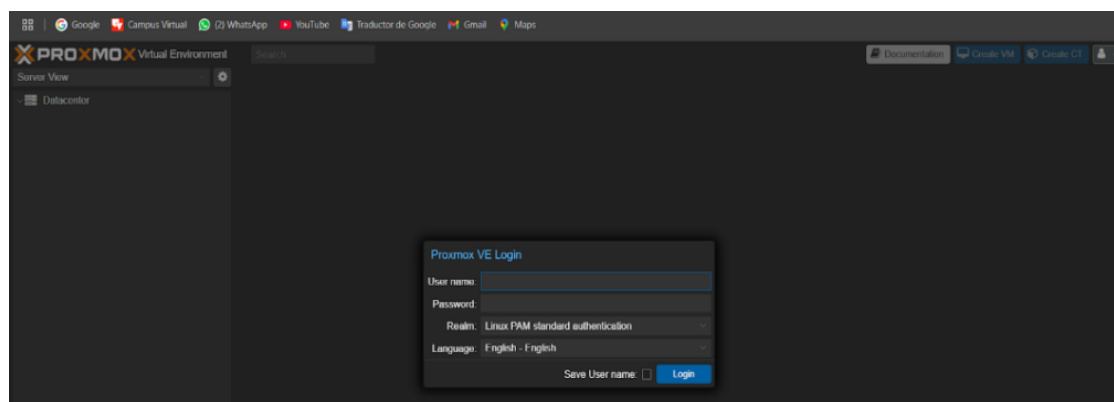
Tabla 1. Características del servidor

Parámetro	Especificación
Modelo	Dell PowerEdge R650 (Rack 1U)
Procesador	Dual CPU
Memoria RAM	192 GB DDR4 (12 x 16 GB a 3200 MHz)
Almacenamiento	4 x SSD SATA de 480 GB (montaje frontal)
Expansión PCIe	3 ranuras x16
Conectividad de red	Broadcom 5720 de 1 Gb
Administración remota	iDRAC Group Manager
Sistema de virtualización	Proxmox VE (4 máquinas virtuales: 2 Linux, 2 Windows)
Sistema operativo (VM principal)	Windows 11 Pro (VM "SimUndimotriz") con 8 vCPU y 8 GB RAM

6.2. Administrador del servidor (Proxmox)

El servidor del SENA corresponde a un equipo físico que es gestionado por el área de sistemas de la institución mediante la plataforma **Proxmox VE (Virtual Environment)**, una herramienta de virtualización que permite implementar y administrar tanto máquinas virtuales como contenedores desde una única infraestructura física. En esta institución, se emplea con el fin de optimizar el uso del servidor, permitiendo la ejecución simultánea de varios entornos virtuales. Actualmente, el servidor funciona con cuatro máquinas virtuales activas: dos con sistema operativo Linux y dos con Windows, todo esto gracias al entorno virtual proporcionado por Proxmox.

Figura 2. Entorno de Proxmox.



6.3. Estudiar los sensores implementados en el prototipo anteriormente

El prototipo experimental del sistema OWC (Columna de Agua Oscilante), desarrollado por el grupo ASTIN del SENA, fue diseñado inicialmente sin un sistema automatizado para la adquisición de datos. Durante las pruebas experimentales, las mediciones se llevaron a cabo de forma manual utilizando herramientas tradicionales. Entre los instrumentos empleados se encuentran un multímetro digital para medir voltajes y corrientes generadas, un anemómetro portátil para estimar la velocidad del viento y su efecto sobre la turbina eólica y una regla graduada para medir visualmente la altura de las olas.

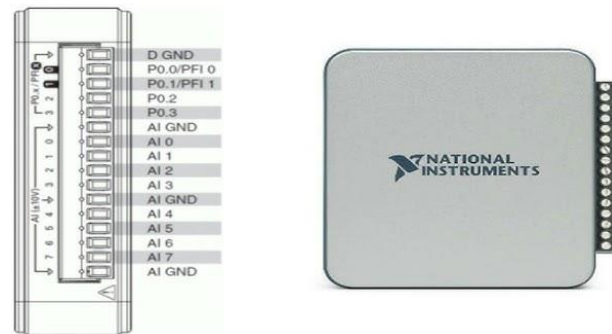
Esta metodología presenta varias limitaciones, como la imposibilidad de obtener registros continuos lo que dificultó el seguimiento de variables que cambiaban rápidamente. Además, las mediciones visuales estaban sujetas a la interpretación del observador, especialmente en el caso de la altura de las olas, que eran muy variables. También resultaba inviable conservar un historial de los datos registrados. Por ello, se realizó el estudio de los sensores implementados dirigido al prototipo de escala real al cual se le integró una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments en el año 2018.

6.3.1 Tarjeta DAQ integrada al prototipo de escala real

La tarjeta de adquisición de datos (DAQ) en el año 2018 tuvo como objetivo fundamental automatizar el proceso de medición de variables críticas en el prototipo a escala real del sistema undimotriz OWC. Esta automatización permitiría realizar un monitoreo en tiempo real del comportamiento del sistema. A diferencia del prototipo experimental de laboratorio, donde las mediciones eran manuales.

Desde el punto de vista técnico, se utilizó una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) de National Instruments. Este dispositivo cuenta con múltiples entradas analógicas (AI0 a AI7) y entradas/salidas digitales (P0.0 a P0.3). Gracias a su convertidor analógico-digital, la tarjeta permite capturar señales analógicas como presión o voltaje, transformándolas en datos digitales para su análisis. Además, la interfaz USB facilitó su integración con la plataforma de control desarrollada en el entorno de LabVIEW, permitiendo la visualización de diferentes variables de interés.

Figura 3. Tarjeta de adquisición de datos.



Tomada de [21].

Su diseño la hizo ideal para el entorno del prototipo a escala real del sistema undimotriz. Los sensores fueron seleccionados con base en su compatibilidad en ambientes industriales y marinos.

Tabla 2. Sensores seleccionados para el prototipo de escala real.

Variable medida	Sensor/Componente	Rango de medición	Tipo de salida
Presión	MPX4250	0 – 250 kPa	Voltaje analógico
Nivel de agua	Ultrasónico nivel metro	20 cm–4M	Pulso digital
Velocidad del viento	MPX4250	0 – 30 m/s	Voltaje analógico
Voltaje	Divisor resistivo	0 – 30 V	Voltaje analógico
Corriente	ACS71240KEXBLT-030B3	–30 A a +30 A	Voltaje analógico
Temperatura	AD595	–55 °C a +125 °C	10 mV/°C
Velocidad (RPM)	NJK-5002C	Hasta ~3000 RPM	Pulsos digitales (NPN)

6.3.2. Acondicionamiento de Señal y Diseño del Circuito Electrónico

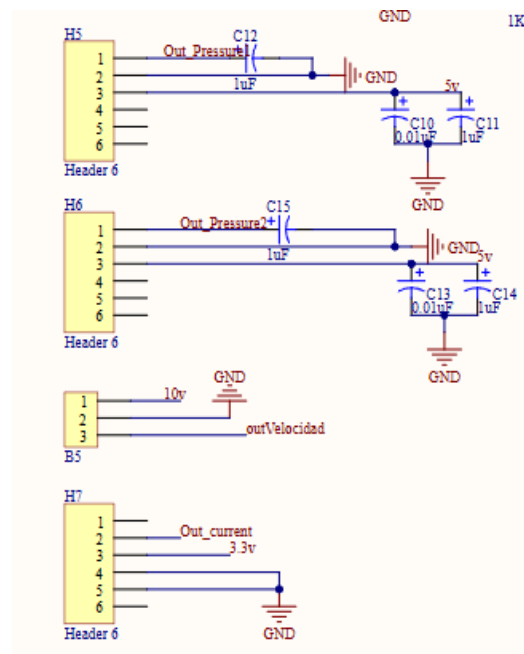
Al identificar los sensores que iban a ser implementados para la adquisición de las magnitudes físicas, se realizó el diagrama de bloques y el esquemático con el propósito de desarrollar una tarjeta capaz de acondicionar y distribuir correctamente las señales provenientes de dichos sensores. Esta tarjeta fue diseñada considerando los niveles de voltaje de salida de cada sensor y el tipo de señal (analógica o digital).

El diseño electrónico de la tarjeta de acondicionamiento se estructura en bloques funcionales bien diferenciados, que permiten una lectura clara del flujo de señal desde los sensores hasta la interfaz con el sistema de procesamiento. A continuación, se presenta el análisis detallado de cada uno de estos bloques.

El sistema cuenta con una etapa de alimentación compuesta por múltiples reguladores de voltaje. Inicialmente, la tarjeta recibe una entrada de alimentación a través del conector H4, que se filtra y regula mediante un regulador AMS1117 configurado para generar 3.3 V (U4). Posteriormente, se incluyen dos circuitos basados en el LM317T (U2) y LM323T (U14), configurados con una red resistiva para generar una tensión ajustable, lo cual permite alimentar tanto sensores de tipo analógico como módulos lógicos que operan con distintos niveles de tensión.

La tarjeta incorpora la capacidad de leer múltiples variables físicas, cada una asociada a un sensor específico. Por ejemplo, para la medición de temperatura, se incluye el sensor AD595AQ (U5). Para la medición de presión, se encuentran varias líneas rotuladas como Out_Pressure, las cuales provienen de dos sensores MPX4250. Para medir voltaje, se emplea un divisor de tensión, asimismo se pueden observar las salidas de los sensores de Velocidad de viento, nivel y corriente.

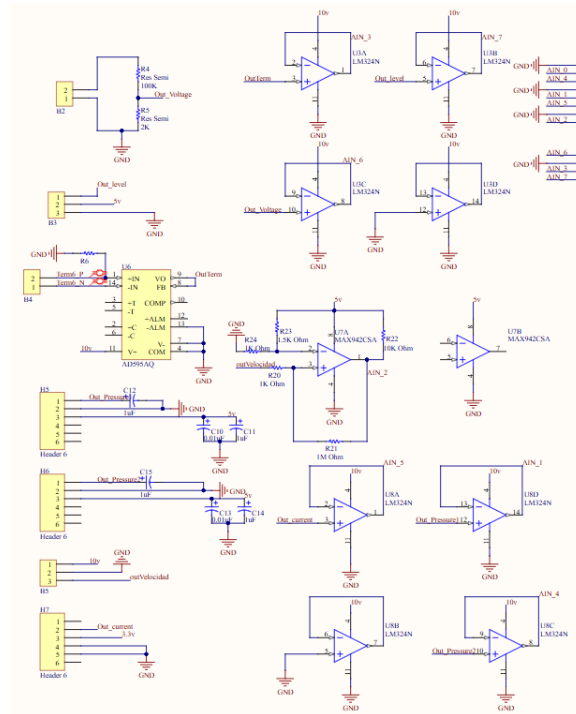
Figura 5. Conexión de sensores en el esquemático.



Elaboración instructores ASTIN – SENA.

El acondicionamiento de las señales se realiza principalmente a través de una red de amplificadores operacionales LM324N el cual contiene integrado cuatro amplificadores operacionales (U3, U6, U8, U9), que se emplean en configuraciones como buffer.

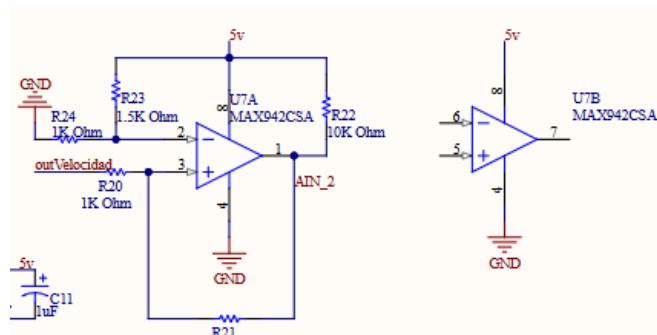
Figura 6 Bloque acondicionamiento de señales



Elaboración instructores ASTIN – SENA.

Para la estimación de velocidad de la turbina (RPM), se ha considerado el uso de sensores de proximidad tipo NJK-5002C, cuya salida genera pulsos digitales. Además, el sistema incorpora comparadores de ventana como el MAX942CSA (U7A y U7B).

Figura 7 Acondicionamiento RPM.

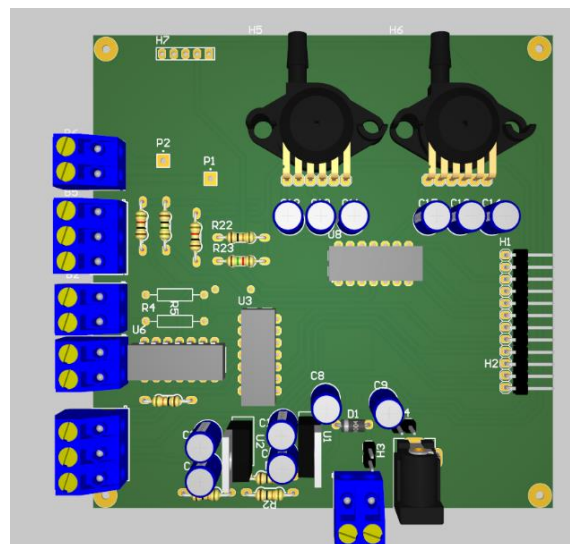


Elaboración instructores ASTIN - SENA

Finalmente, la tarjeta integra múltiples conectores headers (H1 a H7) que permiten la conexión de los sensores con sus señales acondicionadas. Cada

Con el fin de materializar el diseño esquemático y verificar la disposición física de los componentes, se desarrolló el diseño de la tarjeta en el programa EAGLE en vista de PCB y su representación tridimensional. En las siguientes figuras se presentan tanto el diseño de la PCB como su vista tridimensional generada en el software de EAGLE.

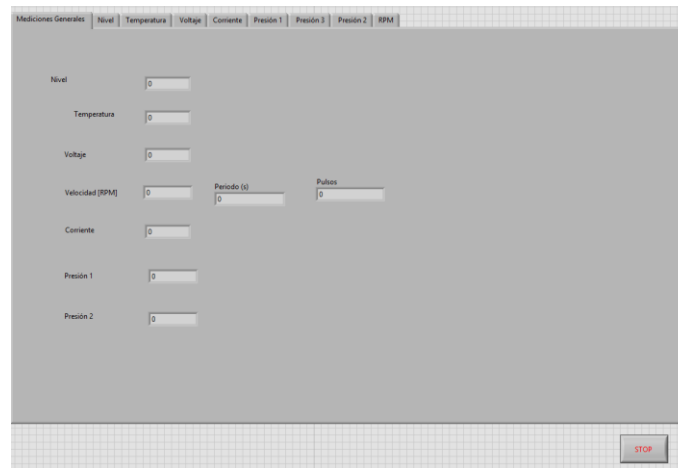
Figura 9. Visualización de la tarjeta en 3D.



Una vez desarrollada la tarjeta PCB y ensamblados los sensores, se procedió

a la fase de validación funcional utilizando una interfaz gráfica desarrollada en el entorno de programación LabVIEW. Para ello, se integró el sistema de adquisición de datos (DAQ). A través del asistente DAQ, se construyó una interfaz que permitió observar en tiempo real las variables medidas, aplicar las fórmulas de conversión necesarias, almacenar los datos y calcular magnitudes derivadas como potencia o energía. Además, se diseñó un diagrama de bloques lógico en LabVIEW que estructura todo el proceso desde la adquisición hasta la visualización.

Figura 10. Interfaz gráfica en LabVIEW.



Elaboración instructores ASTIN – SENA.

El desarrollo de la tarjeta de acondicionamiento de señal, su integración con la tarjeta de adquisición de datos y los sensores seleccionados permitió la validación mediante LabVIEW, lo cual constituyeron un avance significativo en la capacidad de monitoreo del sistema undimotriz, sentando las bases para futuras etapas de control inteligente y automatización por eso es importante realizar la integración de un sistema de monitoreo para el prototipo experimental.

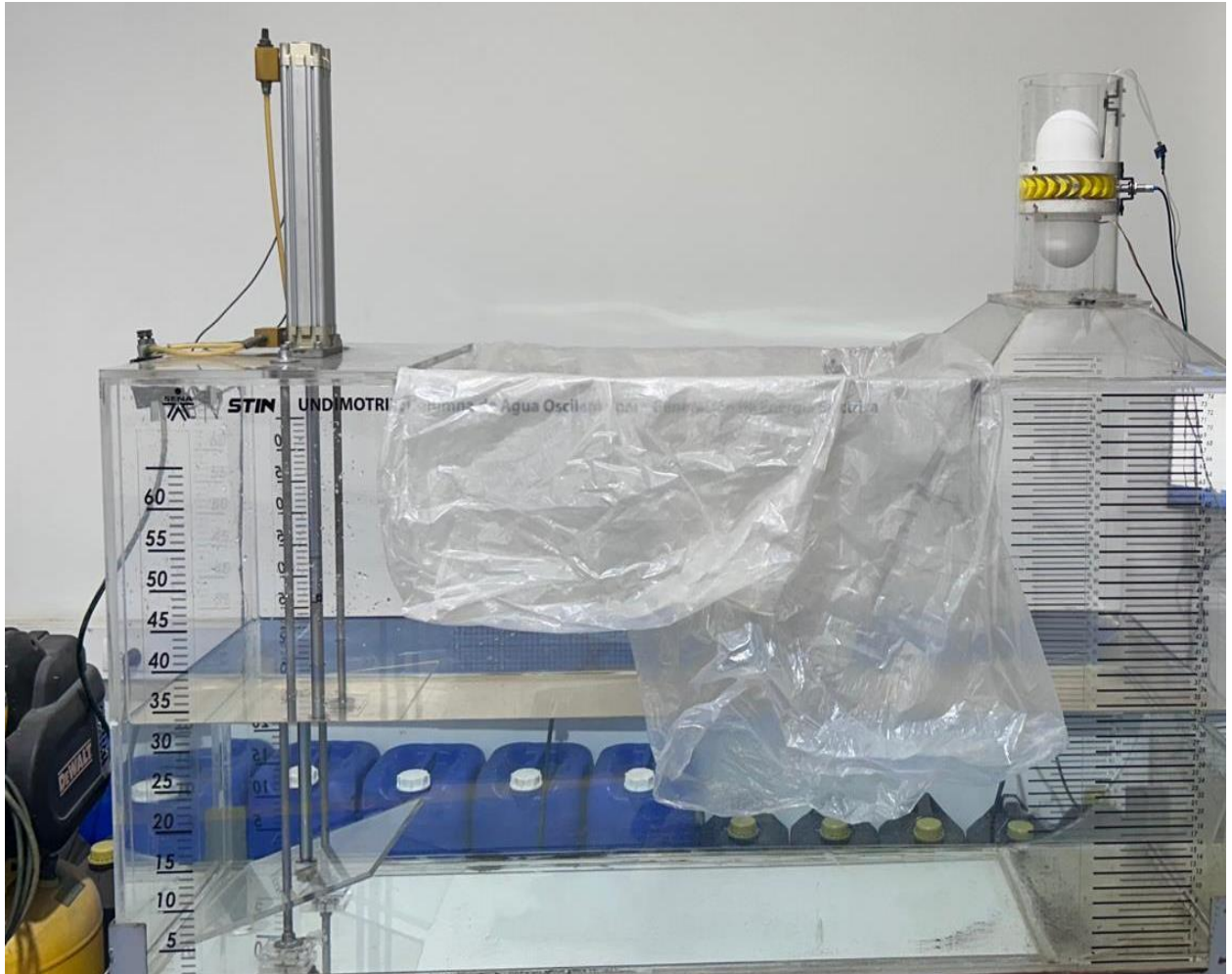
6.4. Estudio de la arquitectura del prototipo experimental OWC del SENA

El proyecto Undimotriz OWC (Oscillating Water Column) desarrollado por el SENA, en colaboración con entidades como la Universidad del Valle y el Consejo Comunitario Bazán – Bocana, representa una solución innovadora para la generación de energía eléctrica en zonas no interconectadas (ZNI) del litoral pacífico colombiano.

Su arquitectura experimental ha sido diseñada y construida con materiales

accesibles y de bajo impacto ambiental, incluyendo una cámara de aire fabricada en acrílico transparente con base en PVC y soporte de concreto, un rompeolas ajustable con escala angular impresa para modificar su inclinación entre 5° y 35° , turbinas impresas en 3D con PLA en configuraciones Wells, de acción y direccionadores de flujo en forma de conos ubicados en la entrada y salida de la turbina [20].

Figura 11. Prototipo experimental OWC del ASTIN – SENA.



Elaboración propia.

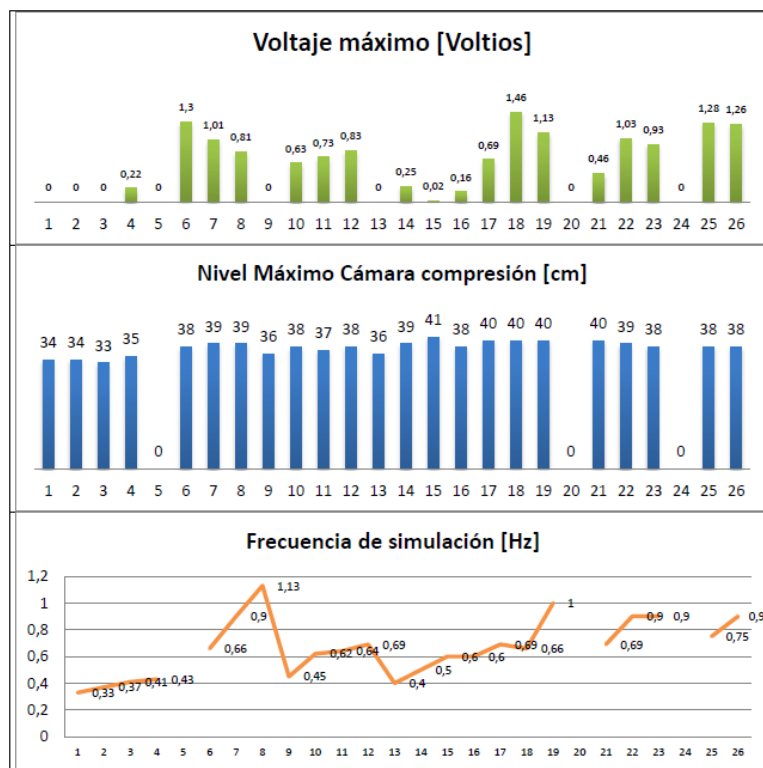
6.4.1. Validación del prototipo experimental

La validación del prototipo se realizó mediante tres experimentos principales de pruebas en laboratorio, orientadas a maximizar la eficiencia energética del sistema detallados en informes técnicos.

6.4.1.1. Experimento 1

Se evaluó el efecto del posicionamiento de válvulas VS/VB sobre la altura del oleaje en la cámara de compresión bajo presiones de 30, 40, 50 y 60 psi. Se empleó un diseño experimental de un factor con análisis estadístico (ANOVA) que concluyó que, aunque se observaron variaciones dentro de los grupos, no hubo diferencias estadísticamente significativas entre los distintos posicionamientos de válvulas [21].

Figura 12. Resultados experimento 1.



Tomada de [21].

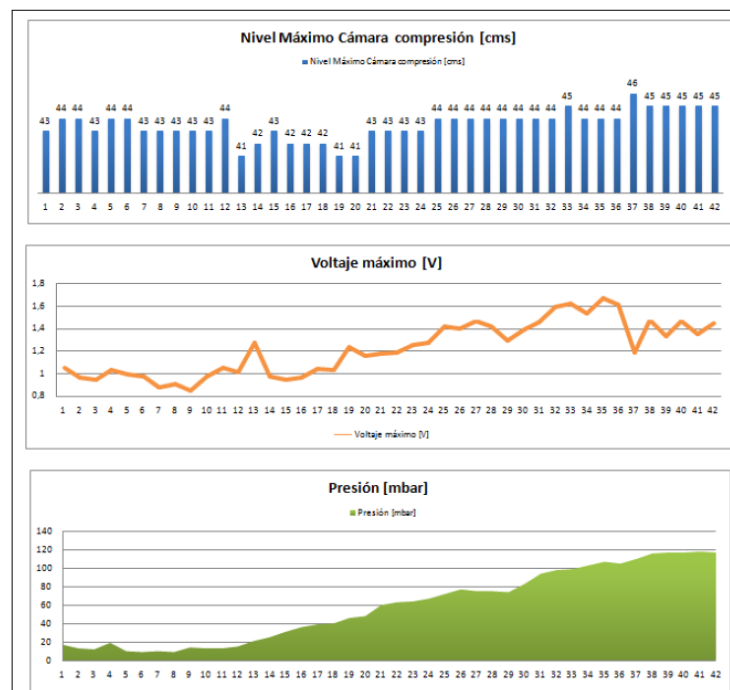
En la gráfica se observa que los valores más altos de voltaje generado no siempre coinciden con los niveles más altos del oleaje ni con las frecuencias más altas de simulación. Aunque se presentan picos de voltaje importantes (como en los registros 6, 18 y 25), estos no están directamente asociados a

máximos en las otras variables, lo que sugiere que el voltaje puede depender más de la estabilidad del flujo y la combinación de condiciones internas que de un único factor como la altura o la frecuencia.

6.4.1.2. Experimento 2

Se estudió el impacto del ángulo de inclinación de la pared rompeolas, variando entre 5° y 35°, sobre el voltaje generado por el sistema OWC. Se empleó un diseño experimental de un factor con análisis estadístico mediante ANOVA y prueba post-hoc de Tukey. Los resultados mostraron diferencias estadísticamente significativas entre varios de los tratamientos, se concluyó que el ángulo de 30° produjo el mayor valor promedio de voltaje (1,5825 V), siendo estadísticamente superior a la mayoría de las demás inclinaciones [22].

Figura 13. Resultados experimento 2.



Tomada de [22].

La gráfica muestra que a medida que la presión en la cámara de compresión aumenta, también lo hace el voltaje máximo generado, alcanzando su punto más alto cerca del registro 35. Sin embargo, al superar este punto, el voltaje disminuye, lo que sugiere una posible pérdida de eficiencia por exceso de presión. Lo que indica que el voltaje está más influenciado por la presión que por la altura del agua.

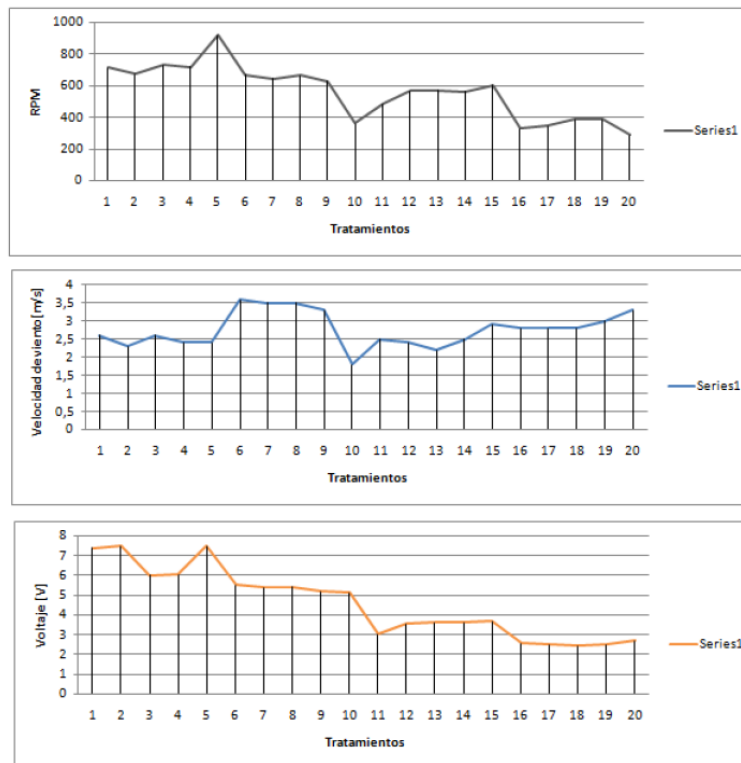
6.4.1.3. Experimento 3

Se evaluó el rendimiento del sistema OWC usando dos tipos de turbinas (Wells y de acción), con y sin direccionadores de flujo, bajo condiciones de carga eléctrica y sin carga. Cada combinación de estas variables se trató como un tratamiento experimental. Los resultados mostraron que la turbina de acción, sin carga eléctrica y con direccionador, generó el mayor voltaje (7,5 V), superando significativamente a las demás configuraciones.

Durante las pruebas, la altura promedio del oleaje en la cámara fue de 32,8 a 33,4 cm, para presiones entre 30 y 60 psi. Con base en estos datos, se estimó que el sistema podría alcanzar una potencia de 700 a 1000 W en condiciones reales de oleaje de 1,5 m y marea de 2 m.

Sin embargo, no se pudieron realizar pruebas en campo en la playa de Maguipi (Buenaventura) ya que la estructura del prototipo no resistió el fuerte oleaje del lugar.

Figura 14 Resultados experimento 3.



Tomada de [23].

Las gráficas muestran una relación directa entre la velocidad del viento, las RPM y el voltaje generado por el sistema OWC. En los primeros tratamientos (1 al 6), donde la velocidad del viento y las RPM son más altas, también se observa el mayor voltaje generado, alcanzando hasta 7,5 V. A medida que disminuyen la velocidad del viento y las RPM (tratamientos 10 en adelante), el voltaje también disminuye progresivamente, estabilizándose en valores cercanos a los 3 V. Esto sugiere que la eficiencia del sistema está fuertemente ligada al flujo de aire y al rendimiento mecánico de la turbina, siendo estos factores determinantes para la generación de energía eléctrica [23].

6.5. Estrategias para implementar un sistema de monitoreo por medio de IoT para sistemas de energías renovables

El monitoreo de sistemas de energías renovables mediante tecnologías IoT se ha convertido en una práctica común en sectores como la energía solar y eólica, permitiendo la supervisión en tiempo real y la recolección de datos históricos. En el caso de la energía undimotriz, estas aplicaciones aún son escasas, pero representan un campo con alto potencial para la innovación tecnológica y científica, especialmente en países donde esta fuente aún se encuentra en etapa de exploración como lo es Colombia.

En sistemas solares, por ejemplo, se han reportado arquitecturas similares con paneles instrumentados con sensores de irradiancia, voltaje y temperatura, gestionados por plataformas como ThingSpeak o Grafana [24]. En energía eólica, se han utilizado nodos inalámbricos y sensores de vibración para monitorear el desgaste de turbinas en tiempo real [25]. Estas prácticas sirven como base para adaptar una arquitectura de monitoreo al entorno marino del sistema OWC.

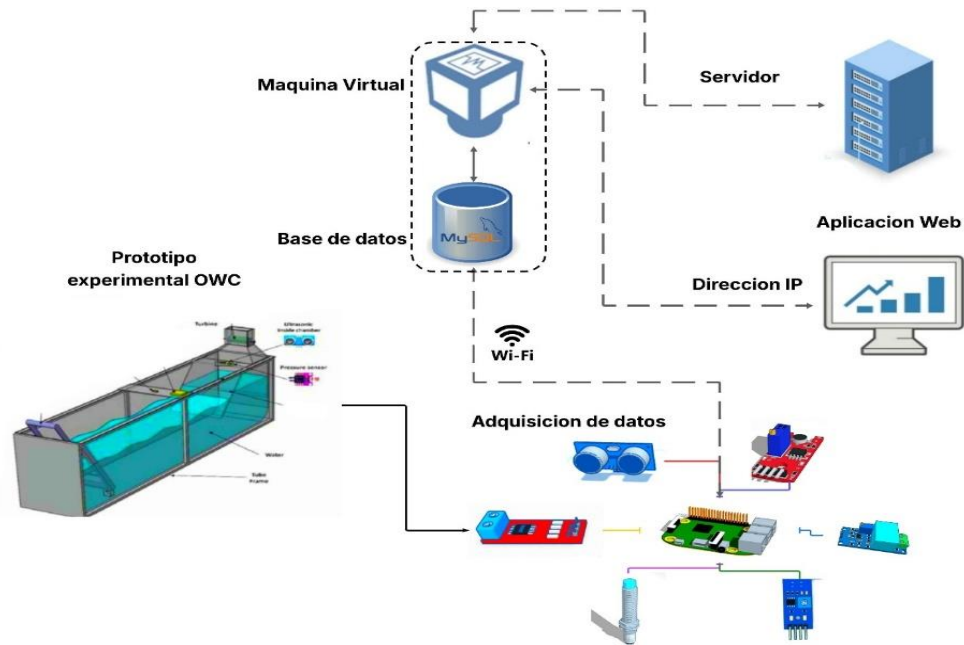
Tabla 3 Comparativa entre arquitecturas de monitoreo IoT aplicadas a energías solar, eólica y undimotriz

Aspecto	Solar	Eólica	Undimotriz (OWC)
Variable monitoreada	Irradiancia, voltaje, temperatura	Velocidad del viento, vibración, RPM	Presión, altura de ola, voltaje
Sensor típico	Fotodiodo, voltímetro, DHT11	Anemómetro, acelerómetro, encoder	Manómetro, flexómetro, voltímetro
Ubicación	Techo/planta solar	Torre o base de turbina	Cámara semi sumergida

Protocolo de comunicación	HTTP, MQTT	MQTT, LoRa	-----
Ambiente operativo	Exterior seco	Exterior ventoso	Ambiente marino (alta humedad y corrosión)
Plataforma de visualización	ThingSpeak	Node-RED	-----

El prototipo experimental OWC desarrollado por el SENA se encuentra en condiciones ideales para ser instrumentado con un sistema IoT que permita medir variables como voltaje, presión, altura del oleaje, velocidad del viento y corriente. Estas variables pueden ser adquiridas mediante sensores conectados a un sistema embebido, los cuales transmitirán la información usando protocolos de comunicación eficientes. Este esquema permitirá enviar los datos a un servidor local del SENA, donde se almacenarán en una base de datos y podrán ser visualizados en tiempo real desde una interfaz web.

Figura 15 Esquema del sistema IoT propuesto para el prototipo OWC, con sensores conectados al sistema embebido y transmisión de datos hacia el servidor.



Elaboración propia.

6.6. Estudio de las variables a medir

Para comprender y controlar el proceso de generación de energía del sistema undimotriz de columna de agua oscilante (OWC), es fundamental la medición precisa de las variables físicas clave que caracterizan el comportamiento del sistema y su rendimiento energético [26].

A continuación, se realiza un análisis detallado de las variables seleccionadas para ser medidas en este prototipo y su relación directa con los componentes principales: la cámara semisumergida, la turbina y el generador eléctrico.

6.6.1. Altura de ola (distancia)

La altura del oleaje dentro de la cámara de compresión es una variable crítica, ya que define la cantidad de agua que ingresa y oscila en su interior. Esta oscilación determina directamente el volumen de aire desplazado y, por tanto, la intensidad del flujo de viento generado. A mayor altura de ola, mayor es el efecto de compresión y succión sobre la masa de aire, lo cual influye en la eficiencia de la turbina.

6.6.2. Presión del viento

La presión del viento generado dentro de la cámara como consecuencia del ascenso y descenso del agua es la fuerza impulsora del movimiento de la turbina. Esta presión debe ser lo suficientemente alta para superar la inercia de los álabes y permitir un flujo constante. Su variación se relaciona con el volumen de aire desplazado por la ola y el diseño geométrico de la cámara.

6.6.3. Velocidad del viento

A diferencia de la presión, la velocidad del viento representa el flujo dinámico del aire y es el parámetro que define cuánta energía cinética llega a los álabes de la turbina. Existe una relación cúbica entre la velocidad del viento y la potencia teórica disponible [27].

6.6.4. Velocidad de la turbina (RPM)

Las revoluciones por minuto (RPM) de la turbina son un indicador directo del rendimiento del sistema. Si bien una mayor presión o velocidad del viento tiende a incrementar las RPM, este parámetro también está influenciado por la geometría de los álabes, el tipo de turbina (Wells o de reacción), el uso de direccionadores y la carga aplicada en el eje.

6.6.5. Voltaje generado.

El voltaje es la variable más representativa del proceso de conversión energética. Es el resultado de la interacción entre la velocidad de la turbina, la fuerza electromotriz inducida en el generador y la carga conectada.

6.6.6. Corriente generada

La corriente producida refleja la demanda del sistema conectado, y junto con el voltaje, permite calcular la potencia eléctrica efectiva. Este valor es esencial para estimar el rendimiento del generador bajo condiciones específicas de oleaje.

Estas variables forman la base del sistema de monitoreo IoT. Su análisis conjunto no solo permitirá optimizar el comportamiento energético del prototipo, sino que además proporciona evidencia experimental para validar la tecnología en condiciones reales [28].

6.7. Definición de los sensores a emplear

Cada variable física del sistema altura de ola, presión, velocidad del viento, RPM de la turbina, voltaje y corriente fue asociada a un sensor específico. A continuación, se describen los sensores seleccionados y su justificación en el contexto del prototipo experimental.

6.7.1. Sensor de distancia: HC-SR04

Este sensor ultrasónico fue elegido para medir la altura del oleaje en la cámara de compresión, debido a su bajo costo, buena precisión (± 3 mm) y rango de detección adecuado (2 cm a 450 cm). Es ideal para ambientes semicerrados como el de la cámara OWC, donde la distancia aire-agua puede variar rápidamente por el efecto del oleaje.

Figura 16. Sensor ultrasónico HCSR04.



Tomado de [29].

6.7.2. Sensor de presión: MPX7002DP

Este sensor diferencial permite medir presiones muy bajas con buena sensibilidad, lo cual es esencial para captar las variaciones de presión generadas por la oscilación del aire en la cámara.

Figura 17. Sensor MPX7002DP.



Tomado de [30].

6.7.3. Sensor de velocidad de la turbina (RPM): LJ12A3-4-Z/BX

Este sensor inductivo detecta el paso de objetos metálicos cerca del eje de la turbina. Con una frecuencia de respuesta de hasta 100 Hz y detección estable de hasta 4 mm, permite contar pulsos por revolución, generando un cálculo de RPM con base en tiempo de muestreo.

Figura 18. Sensor inductivo LJ12A3-4-Z/BX.



Tomado de [31].

6.7.4. Sensor de corriente: ACS712 – 5A

Este sensor de efecto Hall permite medir corriente alterna o continua en un rango de ± 5 A con una sensibilidad de 185 mV/A, suficiente para el generador utilizado.

Figura 19. Sensor de corriente ACS712-5A.



Tomado de [32].

6.7.5. Sensor de voltaje: FZ0430

Este módulo actúa como divisor de tensión para la medición de voltajes de hasta 25 V DC. Tiene buena resolución en aplicaciones de baja tensión como las producidas por el generador del prototipo.

Figura 20. Sensor de voltaje FZ0430.



Tomado de [33].

6.7.6. Sensor de velocidad del viento: MPX7002DP con tubo Pitot

Se utilizó un tubo Pitot acoplado al sensor MPX7002DP para estimar la velocidad del viento a partir de la presión dinámica. Esta integración representa una ventaja al permitir la medición indirecta de velocidad mediante la ecuación de Bernoulli, sin necesidad de sensores adicionales.

Tabla 4. Especificaciones técnicas y criterios de selección de sensores para el sistema OWC

Variable	Sensor seleccionado	Rango / Características	Justificación técnica
Altura de ola	HC-SR04 (ultrasónico)	2 – 450 cm, ± 3 mm	Precisión suficiente, bajo costo, fácil integración
Presión del aire	MPX7002DP (presión diferencial)	± 2 kPa, analógico	Alta sensibilidad para presiones bajas en la cámara
Velocidad del viento	MPX7002DP	Indirecta vía presión (fórmula de Bernoulli)	Ahorro de hardware, lectura indirecta eficiente
Velocidad de turbina (RPM)	LJ12A3-4-Z/BX (inductivo)	Hasta 1000 RPM, detección 4 mm	Fiable para contar revoluciones en ejes metálicos
Corriente generada	ACS712 – 5 ^a	± 5 A, analógica, 185 mV/A	Compatible para cargas pequeñas
Voltaje generado	FZ0430 (divisor de tensión)	0 – 25 V DC, resolución ~ 5 mV	Suficiente para tensiones del sistema

Este conjunto de sensores satisface los requerimientos técnicos del prototipo, también permite una fácil implementación en arquitectura IoT de bajo consumo y costo.

6.8. Diseño de la arquitectura para la ubicación de los sensores

La estructura general del sistema parte de un enfoque centralizado, donde los sensores están conectados a una única unidad de procesamiento principal: una Raspberry Pi 4B+. Esta elección se fundamenta en sus ventajas particularmente en contextos industriales sobre otras alternativas que fueron tenidas en cuenta como el ESP32 y STM32. El análisis se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 5. Análisis comparativo de características clave entre ESP32, STM32 y Raspberry Pi 4B+

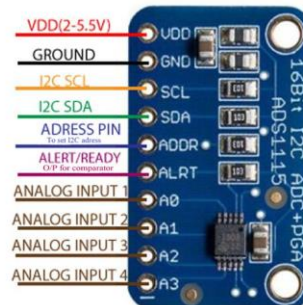
Característica	ESP32	STM32	Raspberry Pi 4B+
Wi-Fi integrado	Sí	No (requiere módulo externo)	Sí
N° de pines GPIO	34	Hasta 37	40
Memoria RAM	520 KB	Hasta 128 KB	1 GB
Sistema operativo	No	No	Linux (Raspbian, Ubuntu, etc.)
Soporte multilenguaje	C/C++, Python, MicroPython	C/C++, HAL/LL	Python, Java, Node.js, Bash
Soporte de servidores locales	Limitado	Limitado	Avanzado (Apache, Flask, Node.js)
Protección ante EMI	Media	Alta	Alta (dependiente del diseño)
Interfaz I2C	Sí	Sí	Sí
Nivel lógico de entrada	3.3V	3.3V	3.3V
Capacidad multitarea	Limitada	Limitada	Alta (procesador Quad-core)

Como se evidencia, la Raspberry Pi 4B+ permite implementar la lógica de adquisición, reduciendo costos y facilitando el mantenimiento [34]. Además, su compatibilidad con lenguajes de alto nivel y servidores web (Flask, Node-RED, Apache) posibilita una rápida integración con plataformas de almacenamiento en la nube o dashboards locales [35].

Dado que la Raspberry Pi 4B+ no posee entradas analógicas nativas, se incorpora el convertidor analógico-digital **ADS1115**, el cual ofrece cuatro canales de entrada analógica, ideales para los cuatro sensores de tipo analógico utilizados en este proyecto (voltaje, corriente, presión y velocidad de viento). Además, este módulo cuenta con un amplificador de ganancia programable (PGA) interno, que permite ajustar dinámicamente la sensibilidad de lectura según el sensor conectado, sin necesidad de circuitos externos adicionales. Su resolución de 16 bits proporciona una precisión de

hasta 0.1875 mV, lo que garantiza una adquisición confiable y detallada de señales débiles, siendo una solución compacta y totalmente compatible con la comunicación por bus I²C.

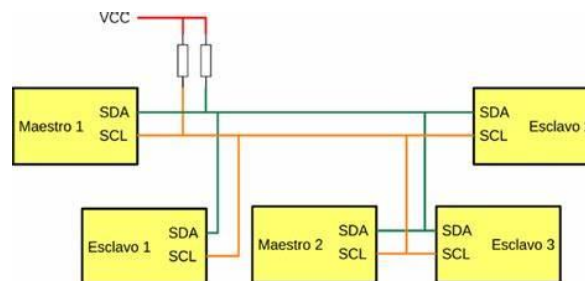
Figura 21. ADS1115.



Tomado de [36].

La elección del protocolo I²C como bus de comunicación para señales analógicas digitalizadas se justifica por los siguientes factores: Permite conectar múltiples sensores a través de dos únicos pines (SDA y SCL) lo que permite escalar el sistema a más de 4 canales analógicos que este caso son perfectos para el presente proyecto.

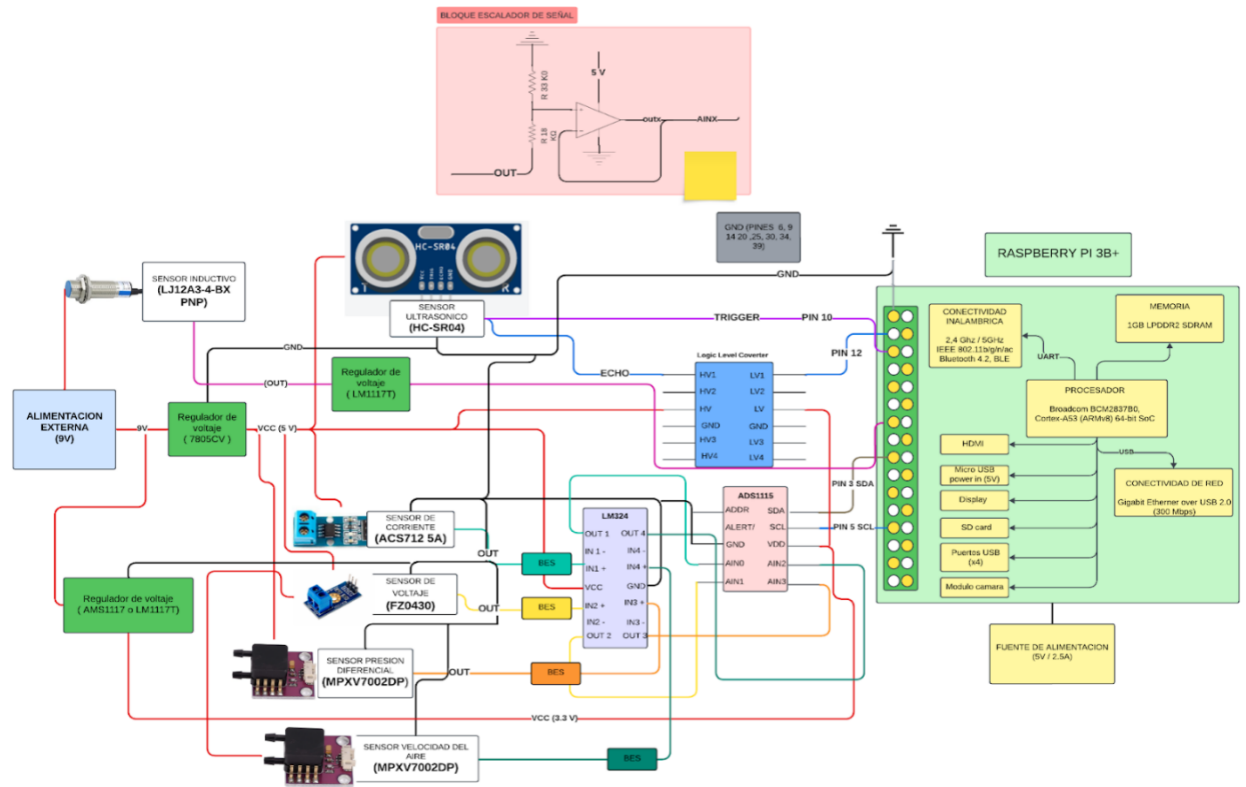
Figura 22. Protocolo I²C.



Tomado de [37].

La arquitectura completa del sistema se ilustra en la Figura 23, donde se evidencia el flujo lógico de adquisición y acondicionamiento de señales. Este diagrama de bloques integra los sensores analógicos y digitales escogidos anteriormente y muestra cómo la señal fluye desde el entorno inicial físico hasta su adquisición en la placa de desarrollo.

Figura 23. Diagrama de bloques general del sistema de adquisición.



Elaboración propia.

Para garantizar la operatividad de los sensores y de la Raspberry Pi, se ha diseñado una jerarquía de voltajes. Se parte de una fuente principal de 9 V DC, regulada mediante dos componentes clave: El regulador LM7805, encargado de entregar la alimentación de 5V estables a todos los sensores excluyendo al sensor inductivo que se alimenta en un rango de 6 a 36V.

El regulador AMS1117 convierte los 5 V a 3.3 V, necesarios para alimentar el ADS1115, las líneas de comunicación digital (I2C) y el LOW VOLTAGE del convertidor de nivel lógico.

Esta organización permite operar los diferentes sensores propuestos sin comprometer la integridad eléctrica del sistema, especialmente la de la Raspberry Pi lo cual es esencial dada la diferencia entre niveles lógicos de entrada y salida en los dispositivos.

Tabla 6. Esquema de voltajes en la arquitectura del sistema.

Tensión	Regulador usado	Elementos alimentados
9 V	Fuente externa	Entrada principal, reguladores y sensor inductivo
5 V	LM7805	Sensores (ultrasónico, voltaje, corriente, presión)
3.3 V	AMS1117	ADS1115, lógica I2C y convertidor de nivel lógico

6.9. Diseño de adecuación de las señales de los sensores

Dado que los sensores utilizados operan con diferentes niveles de salida (algunos en el rango de 0–5 V). El diseño del circuito de adecuación de señal fue desarrollado con el objetivo de garantizar que las salidas eléctricas de cada sensor fueran compatibles con los niveles de voltaje máximo que soportan los pines de propósito general del microordenador. Esta etapa adapta el rango de voltaje de los sensores analógicos y digitales de 0 a 3.3 V.

Para los sensores con salidas análogas se implementó un divisor de voltaje resistivo formado por dos resistencias de 33 K Ω y 18 K Ω , seguido de un amplificador operacional LM324 en configuración de seguidor de voltaje (buffer unitario).

El seguidor de voltaje tiene una ganancia unitaria ($V_{out} = V_{in}$) y su principal ventaja radica en su alta impedancia de entrada y baja impedancia de salida, lo que evita que el divisor resistivo se vea afectado por la carga del siguiente circuito (en este caso, la entrada del ADC). Esta técnica protege la señal de caídas por carga y mejora la respuesta frente a ruido o interferencia electromagnética.

La fórmula utilizada para calcular el voltaje escalado desde el divisor resistivo es:

Ecuación 1. Ganancia de amplificador operacional.

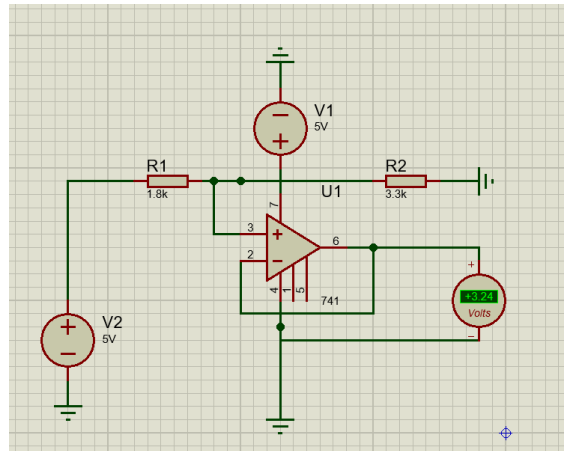
$$V_{in} = V_{sensor} * \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

$$V_{in} = V_{sensor} * \left(\frac{33K\Omega}{18K\Omega + 33K\Omega} \right)$$

$$V_{in} = V_{sensor} * \left(\frac{33K\Omega}{18K\Omega + 33K\Omega} \right) = 0.647$$

El uso del **LM324** como seguidor de voltaje garantiza que el divisor actúe de forma estable sin ser cargado por el ADC y al mismo tiempo, actúa como aislante entre el sensor y el convertidor.

Figura 24. Esquema de acondicionamiento de señal con divisor resistivo y seguidor de voltaje (LM324).

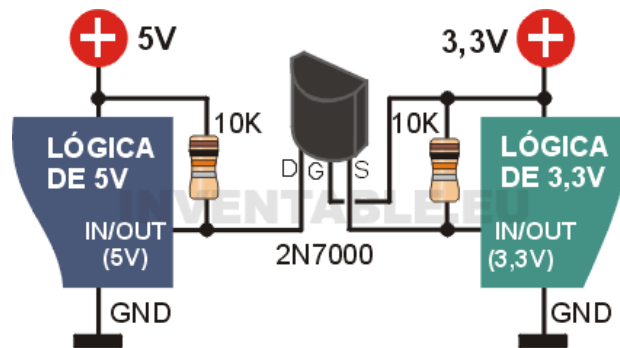


Elaboración propia.

Como parte integral de la etapa de acondicionamiento de señal, se incorporó un convertidor de nivel lógico bidireccional. Este módulo cumple la función de reducir las señales digitales de 5 V a 3.3 V de forma segura, evitando sobrecargas o daños permanentes en los circuitos internos de la Raspberry.

Su funcionamiento se basa en transistores MOSFET de canal N configurados como interruptores controlados por un pin de referencia de bajo voltaje (LV), el cual define el nivel lógico inferior. Cuando una señal de 5 V es introducida en el lado de alto voltaje (HV), el MOSFET regula su paso hacia el lado de bajo voltaje (LV), limitando la amplitud de la señal a 3.3 V. Esta conversión resulta efectiva para las señales lógicas ya que permite mantener el pulso sin comprometer la lectura por parte de la Raspberry Pi.

Figura 25. Esquemático convertidor lógico bidireccional.

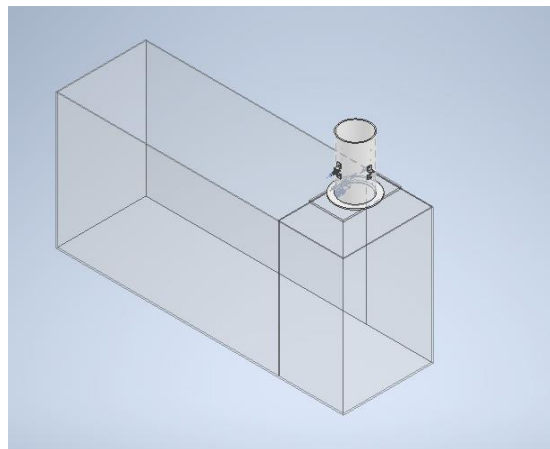


Tomada de [38].

6.10. Esquema de ubicación de los sensores

Para definir la ubicación de los sensores se realizó un modelado tridimensional del prototipo completo utilizando AutoCAD, lo cual permitió establecer con precisión la posición de cada componente sensorial.

Figura 26. Modelado prototipo experimental OWC.



Elaboración instructores ASTIN – SENA.

El sensor inductivo fue ubicado lateralmente al eje de la turbina, ya que se incorporó una placa metálica en una de sus alabes para detectar las revoluciones por minuto (RPM). Esta posición permite una lectura directa del paso del objeto metálico frente al sensor.

Por otro lado, el sensor ultrasónico fue instalado en la parte superior interna de la cámara, sobre una plataforma diseñada especialmente para medir la altura

de la ola dentro del sistema, asegurando una correcta orientación hacia el líquido.

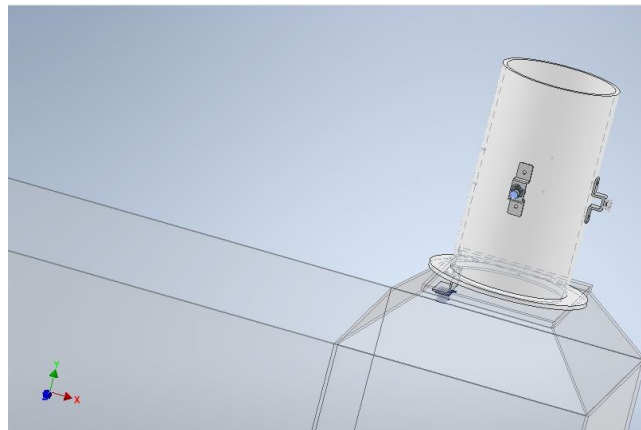
Figura 27. Ubicación sensores vista lateral.



Elaboración instructores ASTIN – SENA.

El sensor de velocidad del viento, basado en un tubo Pitot, fue montado en la parte superior del cilindro. Para ello se realizaron perforaciones específicas que permiten incrustar el tubo en la dirección del flujo de aire.

Figura 28. Ubicación sensores.



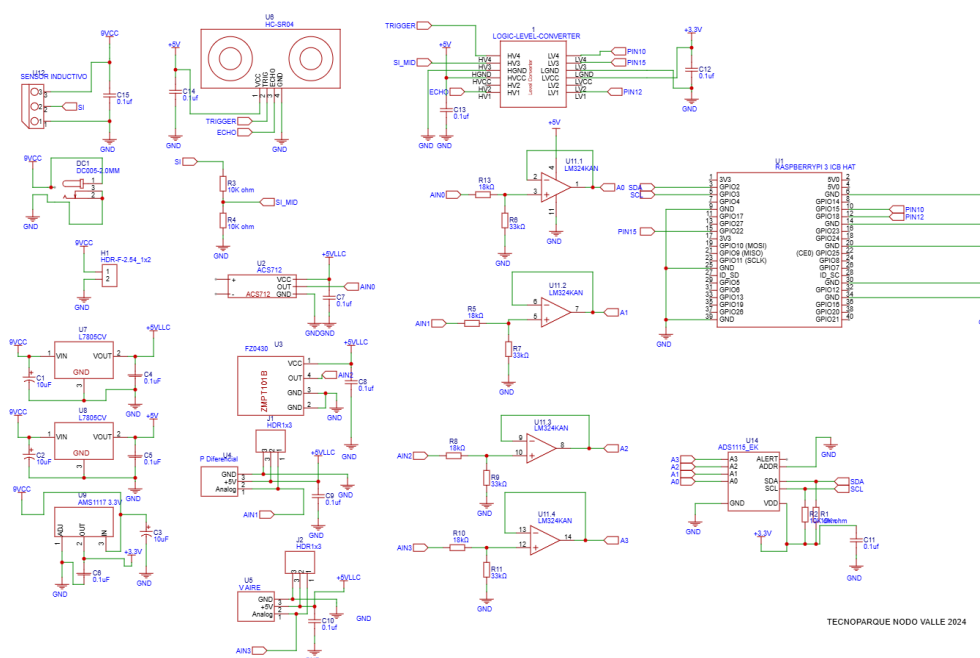
Elaboración instructores ASTIN – SENA.

Finalmente, los sensores de voltaje y corriente fueron ubicados junto a la tarjeta de acondicionamiento de señal y la Raspberry Pi, ya que miden únicamente parámetros eléctricos internos y no requieren exposición al entorno físico.

6.11. Diseño de los circuitos de adecuación de la señal

En la Figura 30 se muestra el desarrollo del diseño electrónico compatible con la arquitectura lógica planteada previamente. Para ello, se elaboró un esquemático completo en el entorno EasyEDA, que detalla cada una de las conexiones, componentes y bloques funcionales del sistema, seguido por el diseño de una tarjeta de circuito impreso (PCB) de doble cara para ser fabricada e integrada físicamente al prototipo.

Figura 29. Esquemático del circuito completo de adecuación de señal.



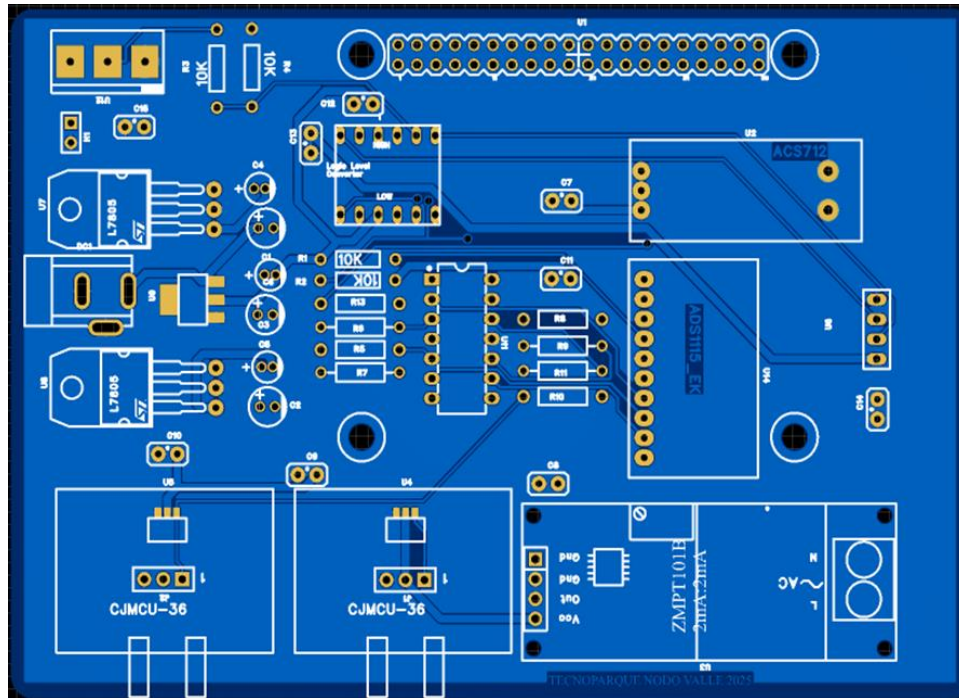
Fuente: Elaboración propia. en EasyEDA.

El esquemático representa gráficamente todos los bloques electrónicos involucrados: desde la etapa de alimentación y regulación de voltajes, hasta el acondicionamiento de señales y la interfaz digital con la Raspberry Pi 4B+.

6.12. Desarrollo de la tarjeta de circuito impreso para el bloque sensorial

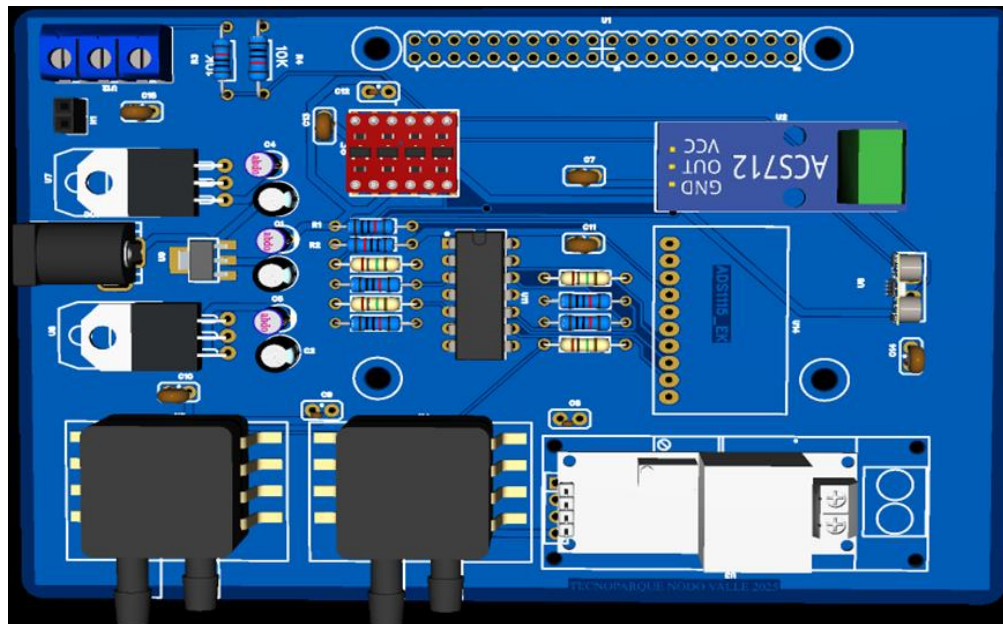
El diseño y fabricación de la tarjeta de circuito impreso (PCB) de doble cara utilizando el software EasyEDA fue realizado con el acompañamiento técnico del grupo de expertos del área de electrónica y telecomunicaciones de TecnoParque SENA Nodo Valle, cumpliendo con las regulaciones y buenas prácticas definidas por las normas IPC-A-610 e IPC-2221, orientadas al diseño y calidad de ensamblajes electrónicos.

Figura 30. Diseño 2D tarjeta acondicionamiento de señal para prototipo experimental OWC.



Elaboración propia.

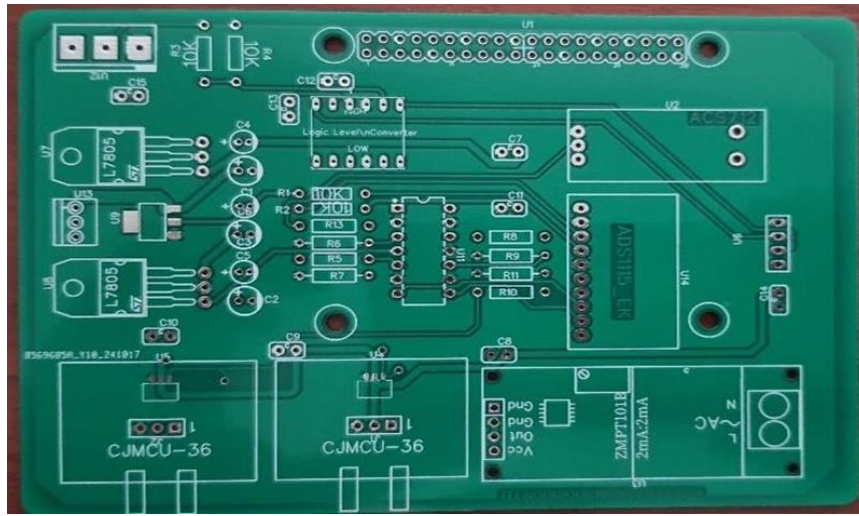
Figura 31. Vista 3D tarjeta acondicionamiento de señal para prototipo experimental OWC.



Elaboración propia.

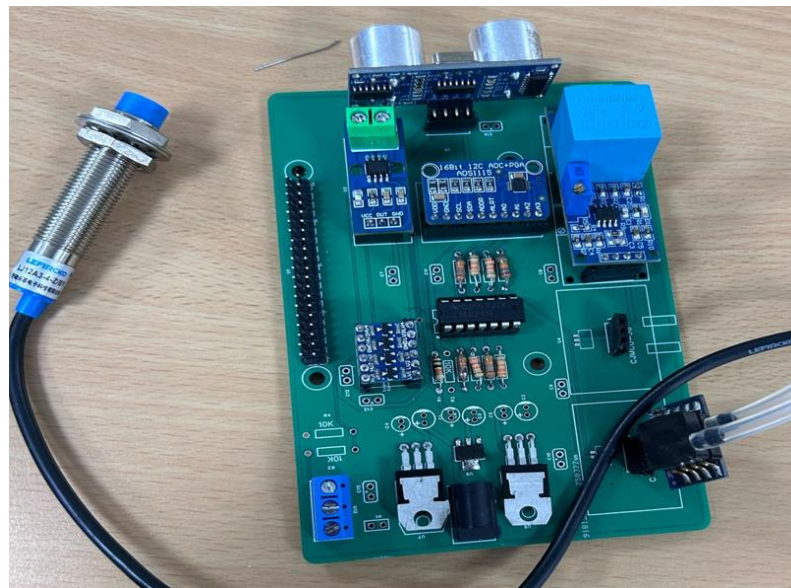
La tarjeta fue construida sobre sustrato FR4 con dimensiones de **70 mm x 58 mm**, utilizando enrutado de cobre con máscaras antisoldante (soldermask) y serigrafía (silkscreen) para identificación de pines y componentes. Cada sensor cuenta con su propio bloque de entrada, filtrado, escalamiento de señal, conexión hacia el ADC (ADS1115) y conexión hacia los pines de propósito general del sistema embebido.

Figura 32. Tarjeta acondicionamiento de señal construida.



Elaboración propia.

Figura 33. Tarjeta acondicionamiento de señal con componentes montados.



Elaboración propia.

Durante el diseño y fabricación del PCB se aplicaron los lineamientos de la norma IPC-A-610, garantizando buenas prácticas como la ausencia de ángulos rectos para minimizar EMI, la separación entre pistas analógicas y digitales, el dimensionamiento adecuado de pistas según la corriente, el uso de máscara antisoldante y la inspección visual de soldaduras THT y SMD. Además, se realizaron 6 *scripts* de python en el sistema embebido con el objetivo de evaluar la respuesta de los sensores con sus señales acondicionadas.

6.12.1 Cálculos de variables con los sensores implementados

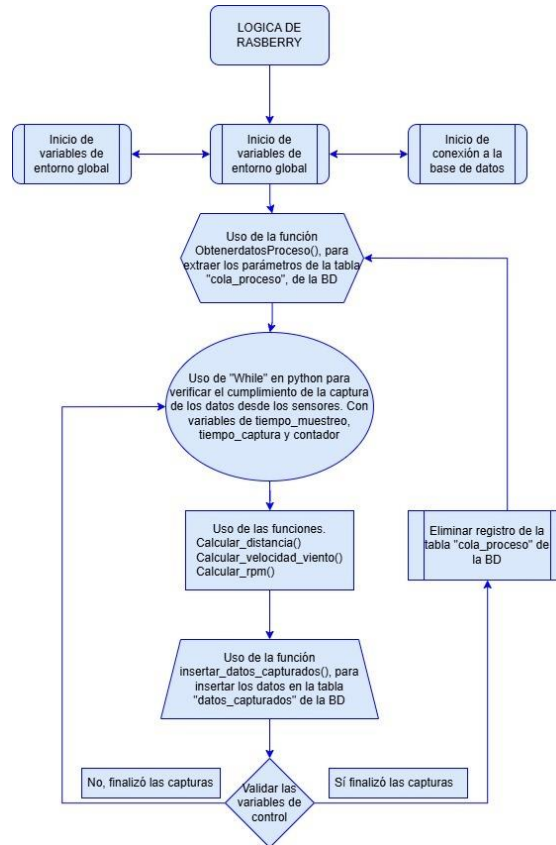
Esta sección presenta las fórmulas utilizadas para convertir las señales eléctricas entregadas por los sensores en variables físicas medibles. Cada sensor tiene una expresión matemática asociada que permite obtener valores como corriente, voltaje, presión, velocidad del viento, altura de ola o RPM. La Tabla 7 resume estas fórmulas junto con las unidades correspondientes.

Tabla 7. Formulas aplicadas para calcular variables.

Sensor / Variable	Fórmula aplicada	Unidad del resultado
Corriente (ACS712)	$I = \frac{(V_{sensor} - Offset)}{Sensibilidad}$	Amperios (A)
Voltaje (FZ0430)	$V_{sensor} = V_{out} * \frac{R2}{R2+R1}$ $V_{real} = V_{sensor} - Offset$	Voltios (V)
Presión diferencial (MPXV7002DP)	$P = \frac{(V_{sensor} - Offset)}{Sensibilidad}$	kPa
Velocidad del viento (MPX7002DP)	$V = \sqrt{\frac{2 * Presion}{densidad\ del\ aire}}$	m/s
Altura de ola (HC-SR04)	$D = \frac{(T_{eco} * V_{sonido})}{2}$	Centímetros (cm)
RPM (LJ12A3-4-Z/BX.)	$RPM = \frac{Eventos}{Tiempo_{muestreo}} * 60$	Revoluciones por minuto

Cada una de estas pruebas fue ejecutada en el laboratorio de TecnoParque nodo Valle y está documentada en el informe técnico del proyecto [39].

Figura 34. Pseudocódigo Raspberry pi



Elaboración propia

6.13. DESARROLLO PAGINA WEB

6.13.1. Tecnologías de desarrollo web analizadas

El desarrollo de aplicaciones web modernas requiere la integración de múltiples tecnologías. Estas tecnologías se dividen en diferentes capas o categorías según su función: *frontend* (interfaz cliente), *backend* (servidor), base de datos, servicios de despliegue y comunicación en tiempo real.

A continuación, se presenta una tabla comparativa con las principales tecnologías exploradas para cada capa del desarrollo web:

Tabla 8. Comparación de tecnologías virtuales.

Categoría	Tecnología s/Frameworks	Ventajas principales	Limitaciones
Frontend (cliente)	HTML, CSS, JavaScript	Estándar universal, compatible con todos los navegadores, curva de aprendizaje baja.	Puede requerir librerías externas para dinamismo avanzado.
	React, Angular, Vue.js	Interfaces reactivas, componentes reutilizables, gran comunidad.	Mayor complejidad inicial, requiere configuración adicional.
Backend (servidor)	Node.js + Express.js	Eficiente para manejar muchas conexiones, usa JavaScript en ambas capas.	Requiere conocimientos en asincronía y manejo de eventos.
	Python (Flask, Django)	Sintaxis clara, ideal para desarrollo rápido, alto soporte académico.	Menor rendimiento en tiempo real respecto a Node.js.
	PHP + Laravel	Amplia documentación, gran base instalada, hosting económico.	Curva de aprendizaje si se integra con frontend moderno.
Base de datos	MySQL, PostgreSQL	Potentes, seguras, ampliamente utilizadas, integradas fácilmente con backend.	Requieren estructura de datos bien definida (SQL).
	MongoDB, Firebase	Flexibles, ideales para datos no estructurados, tiempo real.	No garantizan integridad referencial como SQL.
Despliegue (hosting)	Railway, Vercel, Netlify	Fáciles de usar, despliegue rápido, integración con Git.	Algunas con límites de uso gratuito.

	AWS, GCP, Azure	Altamente escalables, integración con otros servicios de nube.	Mayor complejidad de configuración y costo inicial.
Comunicación tiempo real	WebSocket, Socket.IO	Ideal para datos en tiempo real como sensores, bajo retardo.	Requiere estructura robusta en backend para manejar múltiples conexiones.
Otros útiles	Docker, Nginx, Apache	Permiten contenedores y servidores optimizados.	Requieren conocimientos en administración de servidores.

6.13.2. Frontend: HTML, CSS y JavaScript

Para el desarrollo del frontend del sistema de monitoreo se seleccionaron las tecnologías HTML, CSS y JavaScript. Estas tecnologías conforman la base del desarrollo web moderno: HTML permite estructurar el contenido de la interfaz, CSS define su estilo visual y JavaScript habilita la interacción dinámica del usuario con los elementos mostrados. Esta elección asegura compatibilidad con todos los navegadores y la posibilidad de mantener el sistema liviano, sin depender de frameworks complejos. Adicionalmente, al tratarse de una interfaz centrada en la visualización de datos técnicos, no se requería la incorporación de librerías avanzadas, lo cual hizo de esta combinación la opción más adecuada para el contexto del proyecto.

6.13.3. Backend: Node.js y Express.js

Se utilizó Node.js junto con el framework Express.js como medio de desarrollo para el backend del sistema, su eficiencia en la gestión de múltiples conexiones simultáneas y su integración directa con JavaScript, permitió mantener un lenguaje unificado. Node.js, en conjunto con Express.js, ofrece un entorno que facilita la creación de servidores REST y la implementación de comunicación en tiempo real mediante WebSockets, cumpliendo así con los requerimientos del prototipo experimental.

6.13.4. Base de datos: MySQL

La base de datos elegida fue MySQL, una tecnología ampliamente utilizada en aplicaciones web industriales y académicas. Su estructura relacional permite organizar eficientemente los datos de monitoreo. MySQL es esencial al almacenar registros históricos de las múltiples variables censadas en tiempo real. Además, su integración con Node.js mediante bibliotecas como mysql2 permite un acceso a los datos desde el backend.

6.13.5. Despliegue en la nube: Railway

Para el despliegue del sistema web se optó por la plataforma Railway, dado que proporciona una solución sencilla y potente para alojar tanto la aplicación como la base de datos. Railway permite desplegar rápidamente aplicaciones Node.js y conectar servicios de MySQL con facilidad. Gracias a su soporte para despliegue continuo desde GitHub facilita la realización de cambios en los códigos y la estructura. Su mayor virtud es el acceso remoto a los datos desde cualquier ubicación con conexión a Internet.

6.13.6. Comunicación en tiempo real: WebSocket

La comunicación en tiempo real entre el sistema de monitoreo y la interfaz web se implementó mediante la tecnología WebSocket, la cual permite una conexión bidireccional persistente entre cliente y servidor. Esta tecnología es ideal para aplicaciones donde la inmediatez de los datos es crucial. A diferencia de métodos tradicionales como el *polling*, WebSocket permite actualizaciones instantáneas en la interfaz sin recargas de página.

6.14. Diseño estructura de la base de datos

Con el objetivo de permitir una gestión estructurada de los datos adquiridos por el sistema de monitoreo IoT del prototipo OWC, se diseñó una base de datos relacional implementada en MySQL.

La estructura de la base de datos se compone de cuatro tablas principales: **usuarios**, **usuarios_privilegios**, **datos_capturados**, **cola_proceso**.

La tabla usuarios es el punto de partida del modelo, ya que almacena la información personal y de autenticación de cada usuario, incluyendo su nombre, apellido, correo electrónico y una clave cifrada. Cada usuario está asociado a un rol a través del campo **id_usuario_rol**, lo cual permite extender fácilmente las funciones asignadas en función de distintos perfiles administrativos o técnicos.

Figura 35. Tabla Usuarios BD.

Result Grid						
		Filter Rows:		Edit: Export/1		
	id	id_usuario_rol	Nombre	Apellido	Correo	Clave
▶	1	3	Michael	Castrillon	prueba.sena@sena.co	1234
	2	2	Lewis	Orobio	prueba2.sena@sena.co	1234
	3	1	Admin	Sena	prueba3.sena@sena.co	1234
	4	3	Michael	lopez	stvn.prz2002@gmail.com	123456
*	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL

Elaboración propia.

La tabla **usuarios_privilegios** contiene los permisos específicos asignados a cada usuario dentro del sistema. A través del campo **id**, que actúa como clave primaria y a la vez clave foránea hacia la tabla usuarios, se controla si un usuario puede capturar datos, eliminarlos, consultarlos o modificar configuraciones del sistema.

Figura 36. Tabla Usuarios_privilegiados BD.

Result Grid					
		Filter Rows:		Edit:	
	id	Capturar	Borrar	Consultar	Configurar
▶	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	0
	3	1	0	1	0
*	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL

Elaboración propia.

Por su parte, la tabla **datos_capturados** fue diseñada para almacenar la información generada por los sensores del sistema OWC. Cada registro contiene el identificador del usuario que inició la captura (**id_usuario**), el tipo de sensor del cual se obtuvo el dato (**Tipo_sensor**), el valor registrado (**Dato**), el tiempo de duración de la muestra (**Tiempo**) y un campo de marca temporal (**fecha**) que permite ordenar cronológicamente los registros y facilitar el análisis histórico. Esta tabla está directamente relacionada con la tabla usuarios. A través de la clave foránea **id_usuario**, lo que garantiza la trazabilidad completa de cada muestra.

Figura 37. Tabla **datos_capturados** BD.

id	id_usuario	Tipo_sensor	Dato	Tiempo	fecha
18	2	1	4.500	0.100	2025-03-04 08:45:00
19	2	2	3.400	0.100	2025-03-04 08:45:00
20	2	3	3.400	0.100	2025-03-04 08:45:00
21	2	1	3.400	0.100	2025-03-04 08:45:00
22	2	4	3.400	0.100	2025-03-04 08:45:00
23	2	5	3.400	0.100	2025-03-04 08:45:00
24	2	6	3.400	0.100	2025-03-04 08:45:00
25	2	5	3.400	0.100	2025-03-04 08:45:00
26	2	4	3.400	0.100	2025-03-04 08:45:00
27	2	2	3.400	0.100	2025-03-04 08:45:00
28	2	1	3.400	0.100	2025-03-04 08:45:00
29	2	5	3.400	0.100	2025-03-04 08:45:00
30	2	4	3.400	0.100	2025-03-04 08:45:00
31	2	5	3.400	0.100	2025-03-04 08:45:00
32	2	1	3.400	0.100	2025-03-04 08:45:00
33	2	2	3.400	0.100	2025-03-04 08:45:00
34	2	2	5.400	0.100	2025-03-04 08:45:00
35	2	2	100.000	0.100	2025-03-04 08:45:00
36	2	6	1.400	0.100	2025-03-04 08:45:00

Elaboración propia.

La tabla **cola_proceso** permite gestionar los procesos activos de adquisición de datos. Esta tabla está asociada también a los usuarios mediante el campo **id_usuario**, e incluye parámetros como el **Tiempo_muestreo**, que representa el intervalo entre cada captura, el **Tiempo_captura**, que indica la duración total del proceso de adquisición y un campo llamado **Proceso_activo** que determina si el proceso se encuentra en ejecución. Esta lógica permite que los sensores funcionen en modo autónomo, dependiendo del estado de dicha cola.

Figura 38. Tabla **cola_proceso** BD.

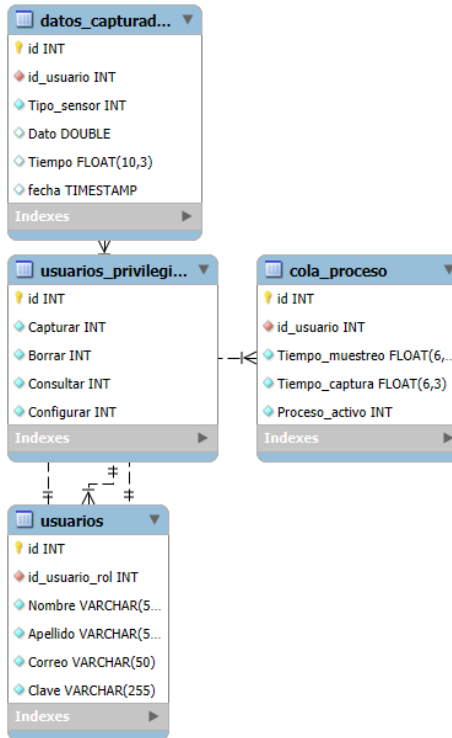
id	id_usuario	Tiempo_muestreo	Tiempo_captura	Proceso_activo
1	2	1.000	10.000	0
NULL	NULL	NULL	NULL	NULL

Elaboración propia.

Las relaciones de estas tablas garantizan un buen funcionamiento. La tabla **usuarios** se relaciona uno a uno con la tabla **usuarios_privilegios**, permitiendo que cada usuario tenga un conjunto de permisos definidos. De igual forma, **usuarios** se relaciona uno a muchos con las tablas **datos_capturados** y **cola_proceso**, de manera que un mismo usuario

puede ser responsable de múltiples registros de datos y de múltiples sesiones de adquisición.

Figura 39. Relación entre tablas en base de datos.

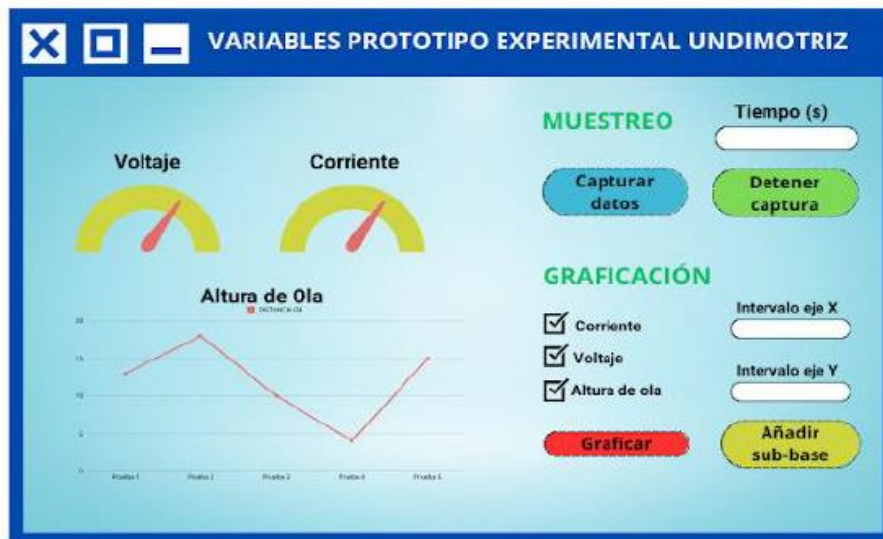
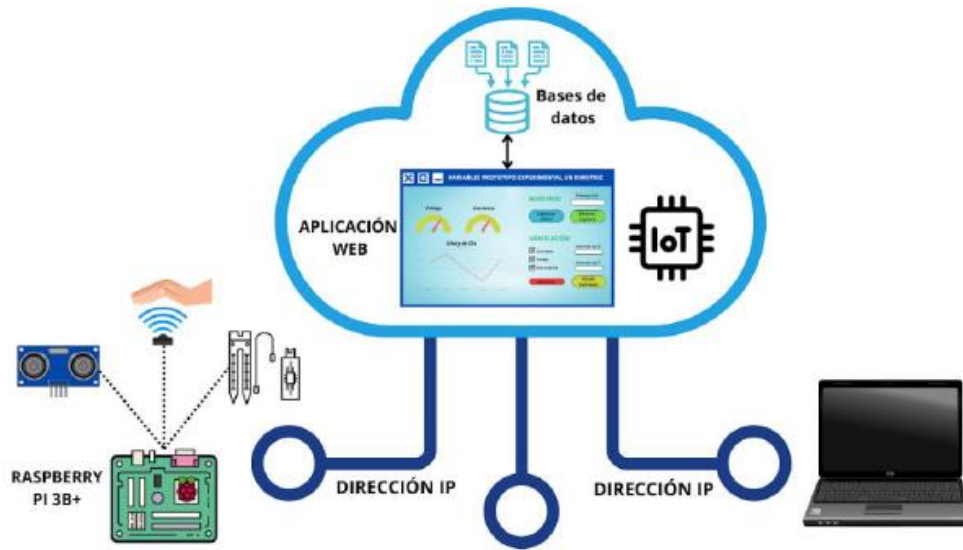


Elaboración propia.

6.15. Creación de la interfaz

Una de las partes más importantes del proyecto fue diseñar una interfaz gráfica que permitiera a cualquier usuario interactuar con el sistema de monitoreo del prototipo OWC. Para esto, se optó por construir una aplicación web utilizando las tecnologías seleccionadas compatibles con todos los navegadores: HTML, CSS y JavaScript. Logrando una plataforma que fuera accesible desde cualquier computador conectado a la red del SENA.

Figura 40. Diseño para la interfaz.



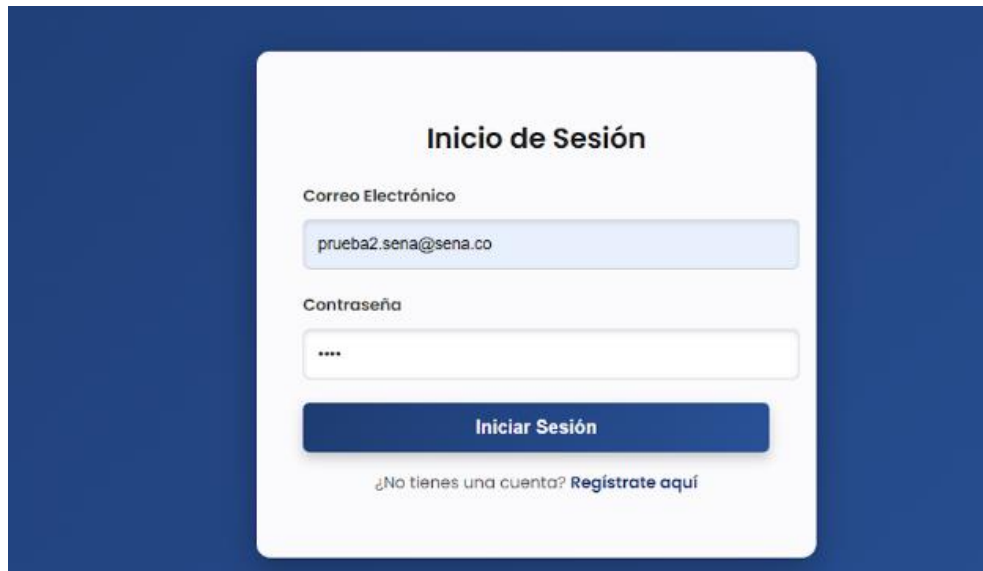
Elaboración propia.

Se desarrollaron cuatro páginas principales: la de inicio de sesión, la principal o panel de navegación, la de consulta de datos y la de inicio de registros. Cada una cumple una función específica dentro del sistema.

La primera página que ve el usuario es la del inicio de sesión (**login.html**). Aquí simplemente se pide el correo electrónico y la contraseña del usuario. Si los datos coinciden con los registrados en la base de datos, el sistema redirige al usuario a la página principal. Este formulario está validado en

JavaScript para evitar que se envíen campos vacíos y los datos se envían al backend usando el método POST.

Figura 41. Página **Login.html**.

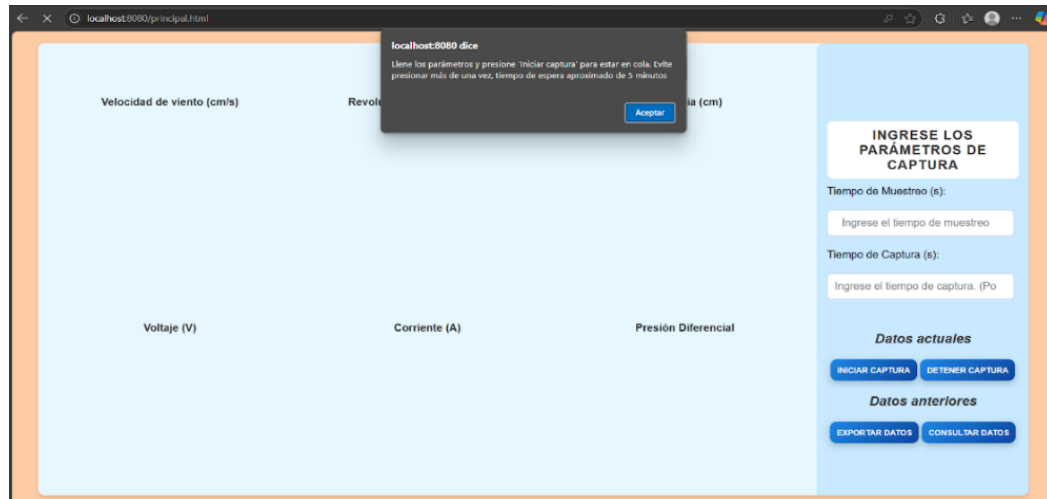


The image shows a login form titled "Inicio de Sesión" (Login) centered on a dark blue background. The form is a white rounded rectangle. It contains two input fields: "Correo Electrónico" (Email) with the value "prueba2.sena@sena.co" and "Contraseña" (Password) with masked characters "****". Below the fields is a dark blue button labeled "Iniciar Sesión" (Login). At the bottom of the form, there is a link that says "¿No tienes una cuenta? Regístrate aquí" (Don't you have an account? Register here).

Elaboración propia.

Una vez el usuario accede, se le muestra la página principal (**principal.html**). Esta página actúa como un panel de control básico desde donde el usuario puede decidir si quiere consultar los datos que ya se han capturado, iniciar una nueva sesión de adquisición o exportar los datos capturados.

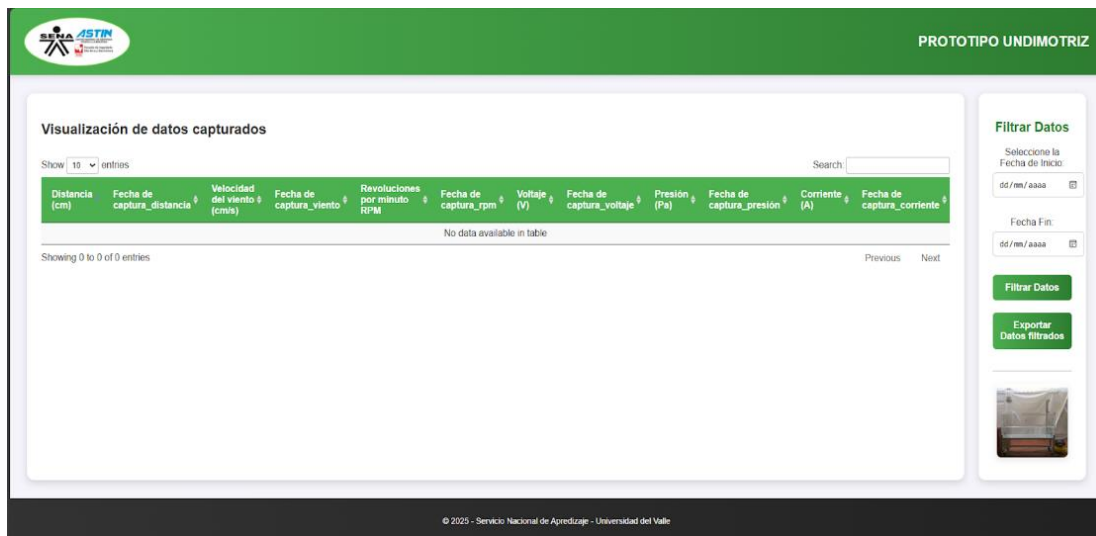
Figura 42. Página **principal.html**.



Elaboración propia.

Desde la página principal se puede acceder a la sección de consulta de datos (**consulta.html**). Esta parte fue diseñada para mostrar en formato de tabla los datos que los sensores han ido registrando. Usando JavaScript, se realiza una solicitud al servidor para recuperar los registros y se van agregando dinámicamente. La tabla incluye campos como el tipo de sensor, el dato medido y la fecha.

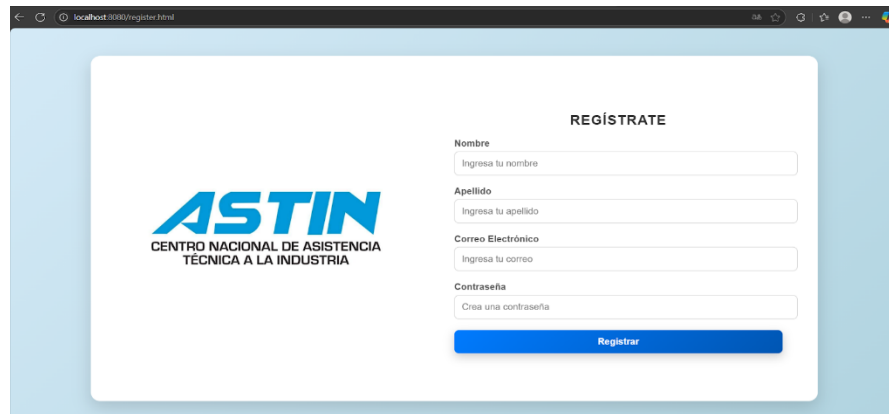
Figura 43. Página **consultar.html**.



Elaboración propia.

La última página es la de inicio de registros (**registro.html**). Esta interfaz permite al usuario ingresar sus datos como el nombre, apellido, correo y la contraseña que va a habilitar para iniciar sesión. Estos datos se van a guardar en la tabla de usuarios para validar sus credenciales y permitirle el acceso a la página **principal.html**.

Figura 44. Página **registrar.html**.



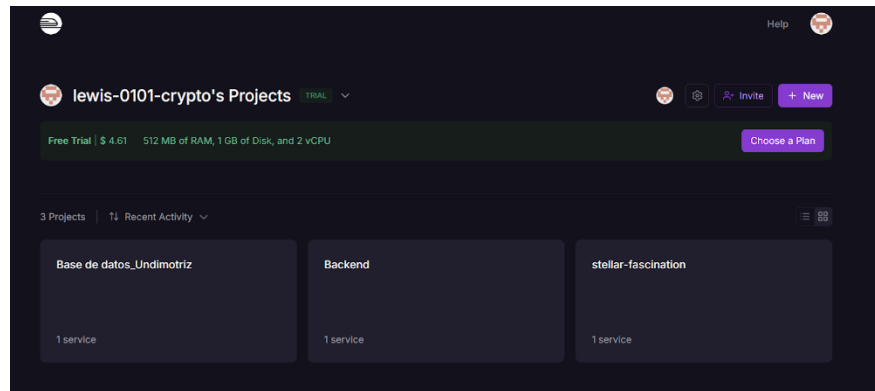
Elaboración propia.

6.16. Integración de servicios de almacenamiento en la nube para gestionar y almacenar la información de monitoreo

Una vez estructurada la base de datos y desarrollada la interfaz web de usuario, se integró al sistema el servicio de almacenamiento en la nube, lo que permite el acceso desde cualquier parte del mundo, no solo desde un entorno local. Para lograr esto, se decidió usar Railway para el despliegue en la nube que permite alojar la base de datos y la aplicación backend.

El proceso de integración con Railway comenzó por la creación de un proyecto en la plataforma, donde se definió el entorno de trabajo general. En esta etapa inicial se crearon dos servicios principales: uno correspondiente a la base de datos MySQL y otro para el backend desarrollado en Node.js

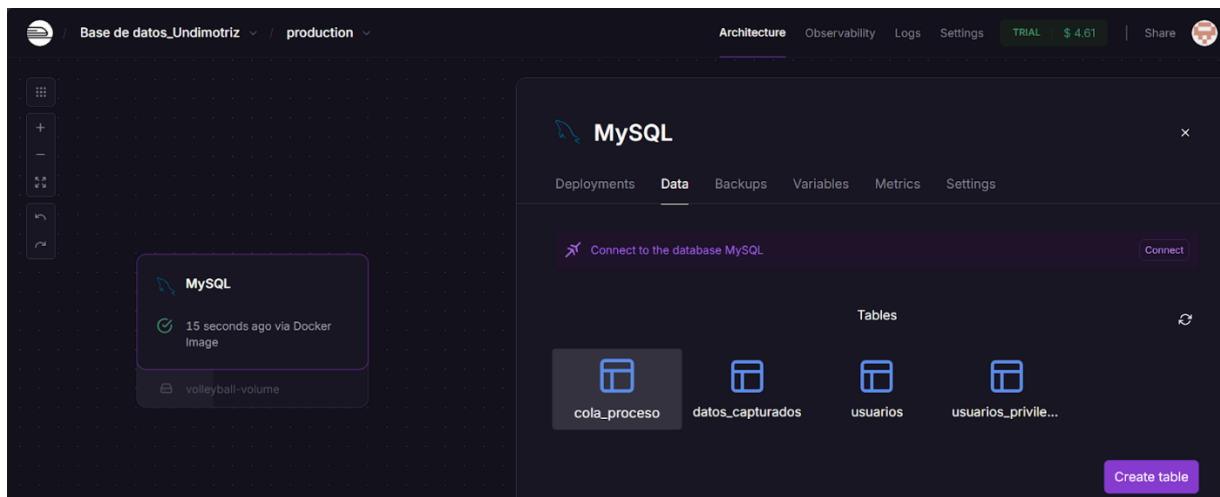
Figura 45. Despliegue de contenedores en Railway.



Elaboración propia.

La base de datos fue migrada a Railway desde el entorno local, asegurando que la estructura fuera exactamente la misma: tablas como **usuarios**, **usuarios_privilegiados**, **datos_capturados** y **cola_proceso** fueron importadas desde el panel web de Railway.

Figura 46. Despliegue de base de datos en la nube.

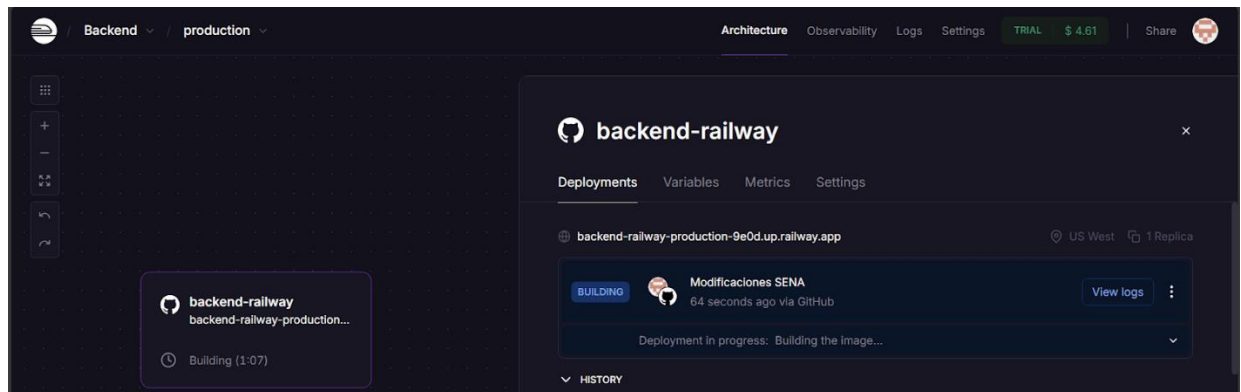


Elaboración propia.

Una vez subida la base de datos, Railway proporcionó un enlace de conexión exitosa, el cual fue utilizado por el backend para interactuar con la base de datos remota. Esto permitió mantener el mismo comportamiento del sistema, pero ahora con la gran ventaja de estar funcionando desde la nube. En este punto fue fundamental revisar que todos los *endpoints* de la API funcionaran correctamente, en especial los encargados de insertar registros, consultar datos y validar credenciales.

Al subir el backend a Railway, la plataforma genera automáticamente una URL pública, que sirve como punto de acceso para el sistema desde cualquier navegador con conexión a internet.

Figura 47. Despliegue de backend en Railway.



Elaboración propia.

Gracias a esto, ya no era necesario estar conectado a una red local del SENA o tener la base de datos instalada en un computador físico. Cualquier usuario autorizado podía iniciar sesión, registrar datos o hacer consultas desde cualquier lugar del mundo, simplemente accediendo a la URL pública del sistema.

Además, Railway facilitó mucho el proceso de despliegue continuo. Con solo hacer un commit en el repositorio de GitHub vinculado, los cambios realizados en el backend se actualizaban automáticamente. En otras palabras, cada modificación en el código se reflejaba casi de inmediato en la nube y se podía verificar en el historial de despliegues.

6.17. Desplegar la aplicación en los servidores del SENA

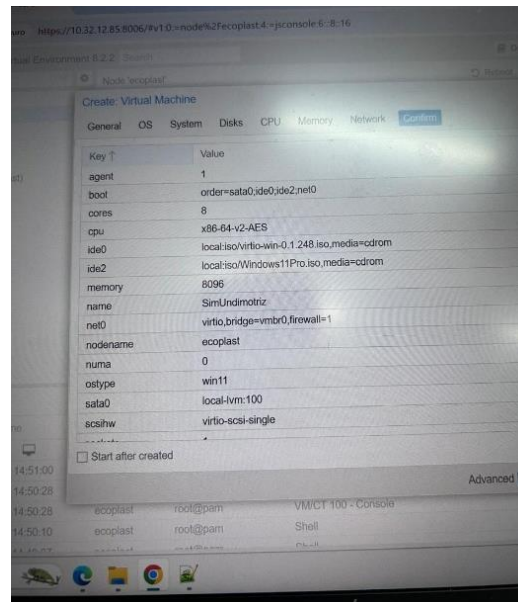
Para garantizar la operatividad del sistema IoT de monitoreo del prototipo experimental OWC, se procedió al despliegue de la aplicación web en una máquina virtual (VM) gestionada mediante la plataforma Proxmox.

La máquina virtual fue creada con el nombre **SimUndimotriz**, empleando el sistema operativo Windows 11 Pro, instalado a partir de las imágenes virtio-win-0.1.248.iso y Windows11Pro.iso. Esta VM fue desplegada sobre el nodo físico ecoplast, perteneciente a la infraestructura de servidores del SENA.

Tabla 9. Características máquina virtual SimUndimotriz.

Parámetro	Valor
CPU	8 núcleos (x86-64 v2-AES)
Memoria RAM	8 GB
Disco principal	Almacenamiento en local-lvm
Sistema operativo	Windows 11 (versión Pro)
Red virtual	Bridge vmbr0, firewall activado
Imagen de instalación	virtio-win-0.1.248.iso + Windows11Pro.iso
Nodo físico	ecoplast

Figura 48. Configuración máquina virtual de Windows 11.



Elaboración propia.

Una vez desplegada la máquina virtual **SimUndimotriz** con Windows 11 Pro, se procedió a la instalación del entorno necesario para ejecutar la aplicación web de monitoreo. Se instalaron Node.js, Python 3 y MySQL Workbench. Además, se instalaron todas las dependencias requeridas por los módulos del sistema, npm para Node.js y pip para Python, asegurando así que cada componente tuviera su entorno correctamente configurado.

Se creó una nueva base de datos con la misma estructura de tablas y relaciones que la versión anterior. Esta base de datos fue configurada para aceptar conexiones externas mediante la asignación de permisos específicos al usuario root. La dirección IP asignada a la VM es 10.32.12.87, la cual es fija y se encuentra dentro del rango de subredes internas del SENA.

Para habilitar la conexión desde otras subredes dentro del SENA (que abarca múltiples rangos de IP como 10.32.x.x), se otorgaron privilegios de conexión externa al usuario root@'10.32.%', permitiendo así el acceso seguro y controlado desde cualquier dispositivo conectado a la red institucional.

En la Raspberry Pi, se actualizaron las credenciales de conexión a base de datos en los scripts de los sensores. El nuevo host para la conexión es la IP fija de la VM (10.32.12.87). Gracias a la configuración de permisos mencionada anteriormente, la Raspberry Pi pudo establecer conexión de forma exitosa con la base de datos remota.

Se ejecutó el script `webSock_server.js` en la VM, configurado para escuchar conexiones entrantes en el puerto 8080. Este servidor se enlazó directamente con la nueva base de datos y comenzó a recibir y almacenar datos provenientes de los sensores conectados a la Raspberry Pi, habilitando la transmisión en tiempo real a la aplicación web de monitoreo.

La prueba de despliegue demostró que la infraestructura virtualizada del SENA es completamente compatible con los requerimientos técnicos del proyecto. La disponibilidad de red permite una operación eficiente del sistema IoT. Asimismo, cualquier dispositivo conectado a la red institucional del SENA puede acceder a la aplicación web de monitoreo, gracias a la apertura del puerto 8080 en el *firewall* de la VM y la configuración de permisos de conexión.

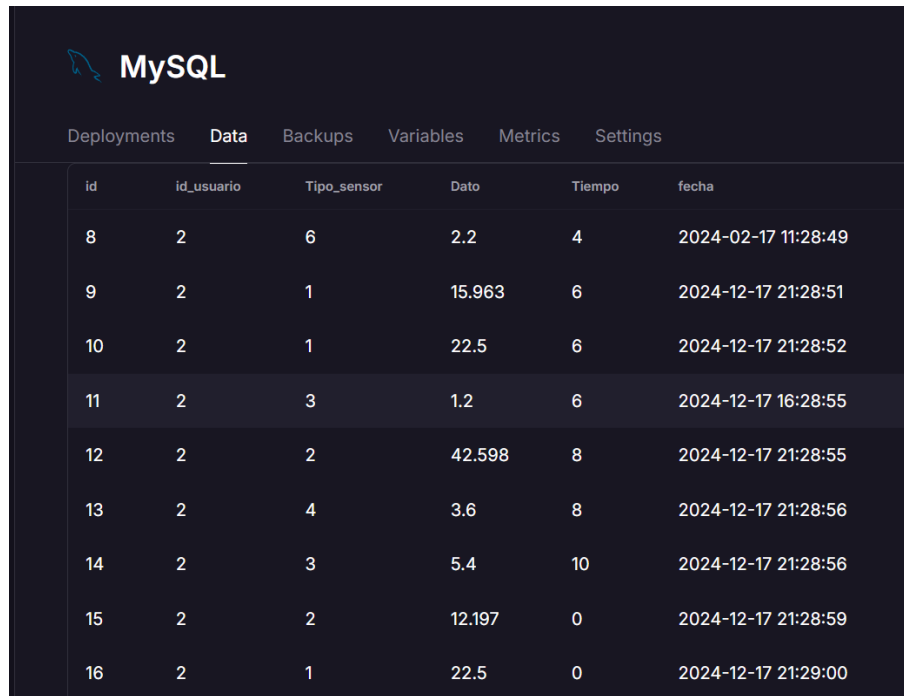
7. RESULTADOS

7.1. Prueba envío de datos a la nube

El objetivo de esta prueba fue verificar que cada sensor logrará transmitir correctamente los datos hacia la base de datos alojada en Railway. Para ello, se realizó la conexión de todos los sensores al sistema central y se activó una sesión de adquisición de datos.

Durante la ejecución, se monitorean los registros generados en la tabla `datos_capturados` de MySQL. Como resultado, se confirmó que los datos fueron transmitidos en tiempo real de manera exitosa, con su respectiva marca temporal y tipo de sensor. Lo que valida el enlace entre el sistema físico de adquisición y la infraestructura digital en la nube.

Figura 49. Datos capturados registrados en Railway.



The image shows a screenshot of the MySQL database interface. At the top, there is a navigation bar with tabs for 'Deployments', 'Data', 'Backups', 'Variables', 'Metrics', and 'Settings'. The 'Data' tab is selected. Below the navigation bar, a table is displayed with the following columns: 'id', 'id_usuario', 'Tipo_sensor', 'Dato', 'Tiempo', and 'fecha'. The table contains 9 rows of data, with IDs ranging from 8 to 16. The 'Dato' column contains numerical values, and the 'fecha' column shows timestamps from 2024-02-17 to 2024-12-17.

id	id_usuario	Tipo_sensor	Dato	Tiempo	fecha
8	2	6	2.2	4	2024-02-17 11:28:49
9	2	1	15.963	6	2024-12-17 21:28:51
10	2	1	22.5	6	2024-12-17 21:28:52
11	2	3	1.2	6	2024-12-17 16:28:55
12	2	2	42.598	8	2024-12-17 21:28:55
13	2	4	3.6	8	2024-12-17 21:28:56
14	2	3	5.4	10	2024-12-17 21:28:56
15	2	2	12.197	0	2024-12-17 21:28:59
16	2	1	22.5	0	2024-12-17 21:29:00

Elaboración propia.

7.4. Instalación física de los sensores en la planta experimental del SENA

Esta prueba tuvo como finalidad evaluar la correcta ubicación y fijación de los sensores dentro del prototipo OWC, así como su respuesta en condiciones operativas controladas. El sensor ultrasónico HC-SR04 fue fijado en la parte superior de la cámara de aire para medir la altura de ola.

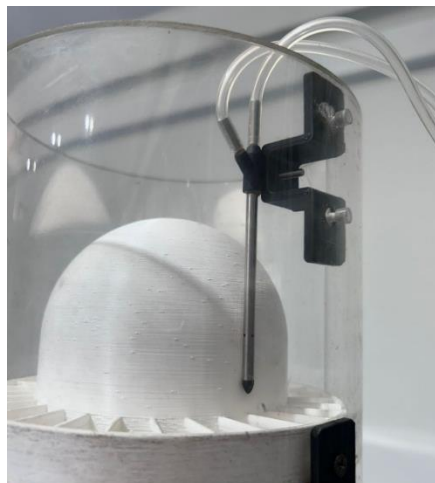
Figura 50. Ubicación física sensor ultrasónico en el prototipo.



Elaboración propia.

El sensor de presión MPX7002DP con el tubo de pitot integrado destinado a medir velocidad de viento fue instalado en la parte superior de la turbina para medir el flujo de aire de salida.

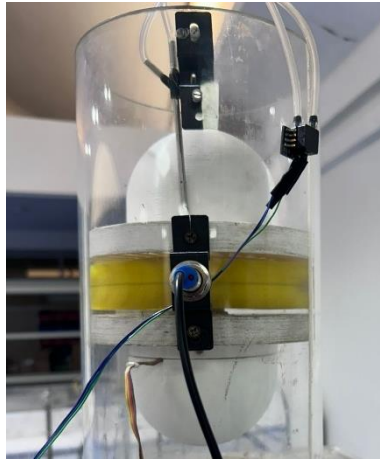
Figura 51. Ubicación física sensor velocidad de viento en el prototipo.



Elaboración propia.

El sensor inductivo LJ12A3-4-Z/BX se posicionó junto al eje de la turbina y los sensores de voltaje y corriente se ubicaron en una caja segura. Se comprobó que todos los sensores responden ante estímulos físicos reales de manera precisa y estable.

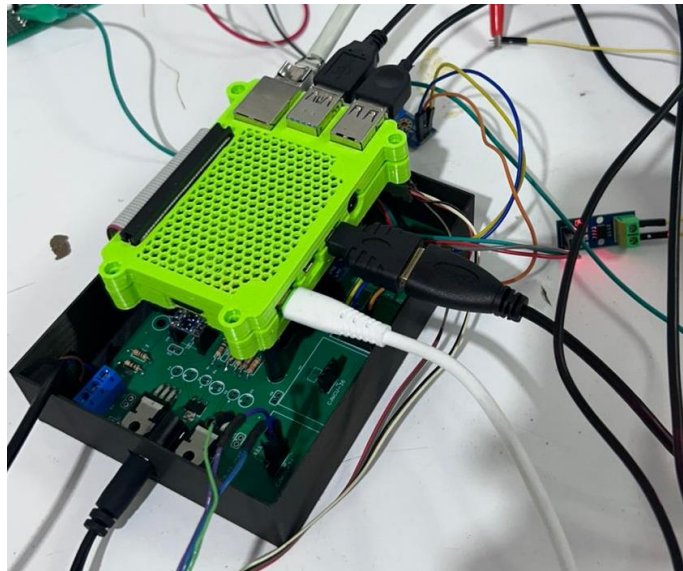
Figura 52. Ubicación física sensor inductivo.



Elaboración propia.

Los sensores de voltaje y corriente fueron ubicados en una caja donde se almacena la Raspberry Pi y la tarjeta de acondicionamiento de señal.

Figura 53. Ubicación sistema central con sensores de voltaje y corriente.



Elaboración propia.

7.5. Realizar pruebas de la interfaz

Esta prueba consistió en evaluar la funcionalidad de las principales páginas

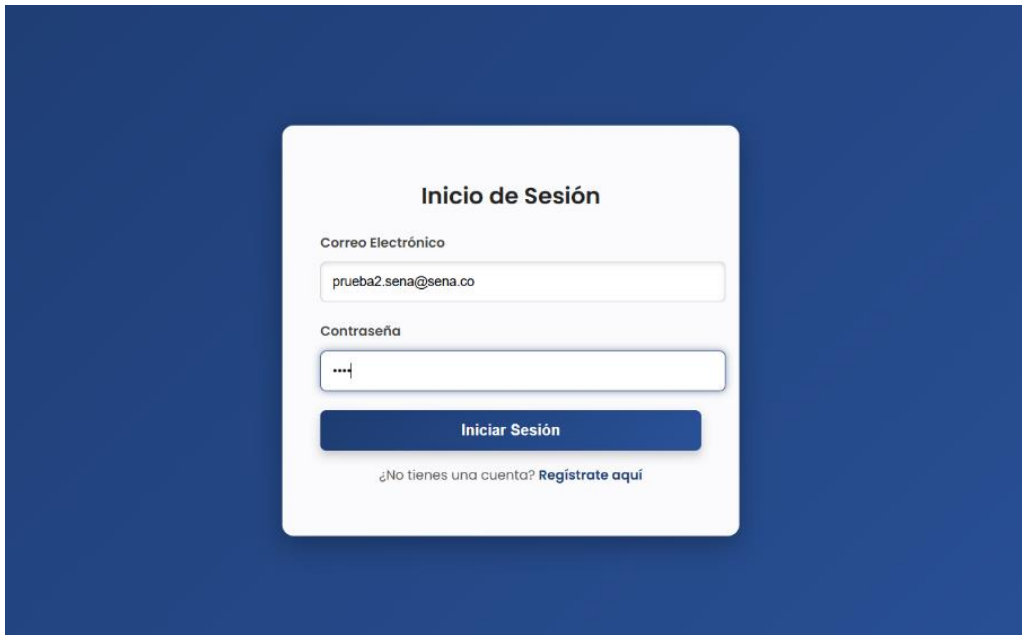
del sistema: **login.html**, **principal.html**, **consulta.html** y **registro.html** y la efectividad del envío de datos mediante WebSocket.

Se llevó a cabo la verificación funcional de la interfaz de acceso **login.html**, comprobando que los campos de entrada correspondientes al correo electrónico y la contraseña transmitieran correctamente los datos hacia el servidor mediante el canal WebSocket. Una vez recibidos, estos datos fueron validados frente a los registros almacenados en la base de datos MySQL.

Durante las pruebas iniciales, se confirmó que, en ausencia de usuarios registrados, el sistema impide el acceso, mostrando un mensaje de error adecuado hasta que el usuario realice un proceso de registro válido a través de la página **register.html**.

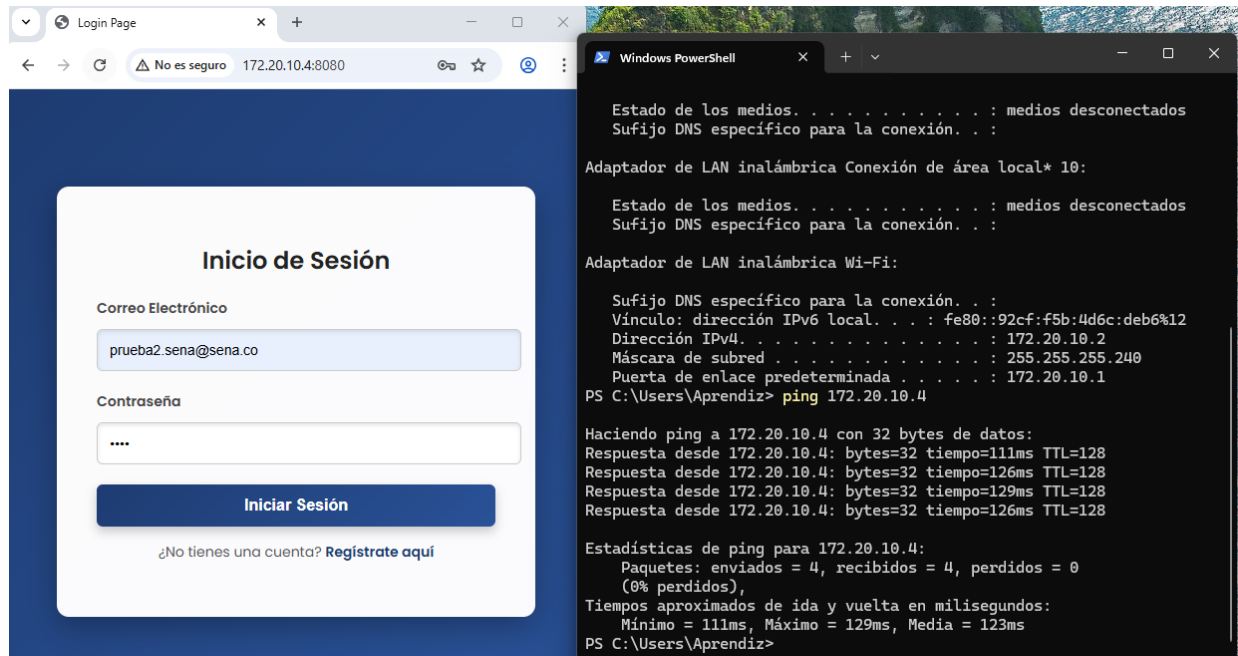
Asimismo, se verificó el correcto funcionamiento de los botones de navegación y acción dentro de la interfaz de login, garantizando que las interacciones del usuario se tradujeran adecuadamente en solicitudes hacia el backend, conforme a la lógica definida para autenticación y control de sesión.

Figura 54. Conexión abierta a la página Web.



Elaboración propia.

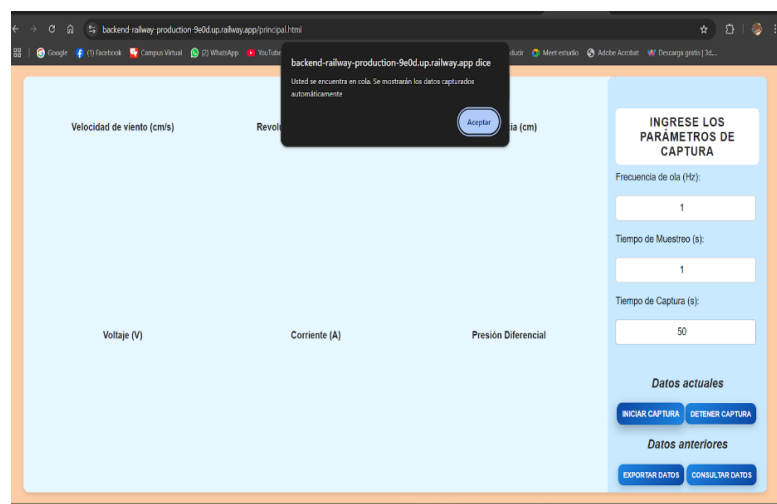
Figura 55. Verificación de comunicación y acceso mediante dirección ip.



Elaboración propia.

Una vez validadas correctamente las credenciales del usuario, se comprobó que el sistema redirige automáticamente a la interfaz **principal.html**. En esta sección, se definieron los parámetros de captura (el tiempo de captura y el tiempo de muestreo).

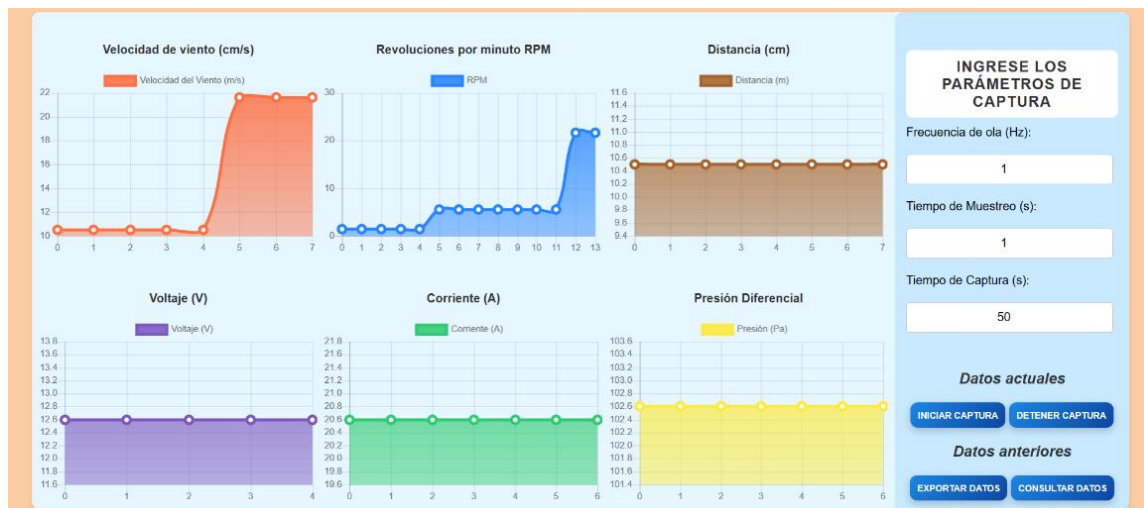
Figura 56. Ingreso de parámetros de captura en página **principal.html**.



Elaboración propia.

Se verificó que los valores ingresados fueran transmitidos exitosamente al servidor mediante el canal WebSocket, activando el proceso de adquisición de datos. Adicionalmente, se evaluó el funcionamiento del botón de **detener**, confirmando que su acción interrumpe correctamente la captura y graficación de datos en curso.

Figura 57. Captura de datos de prueba en página **principal.html**.



Elaboración propia.

Finalizado el proceso de captura, el sistema permite acceder al registro histórico de. Esta funcionalidad se encuentra implementada en la interfaz **consultar.html**, donde el usuario puede visualizar las variables registradas, junto con sus respectivos valores, tiempos de adquisición y fechas asociadas.

Adicionalmente, se dispone de un mecanismo de filtrado por rango de fechas, que permite al usuario seleccionar un período específico (fecha inicial y fecha final) para consultar únicamente los datos correspondientes a ese intervalo.

Figura 58. Consulta de datos en página **consultar.html**.

Visualización de datos capturados

Show 10 entries Search

Distancia (cm)	Tiempo de captura_distancia (s)	Velocidad del viento (cm/s)	Tiempo de captura_viento	Revoluciones por minuto RPM	Tiempo de captura_rpm	Voltaje (V)	Tiempo de captura_voltaje	Presión (Pa)	Tiempo de captura_presión	Corriente (A)	Tiempo de captura_corriente
0.00	0.00	4.30	0.10	4.30	0.10	0.00	0.00	4.30	0.10	2.30	0.10
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.30	0.10	1.30	0.10
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.30	0.10
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.30	0.10
2.30	0.10	4.30	0.10	4.30	0.10	4.30	0.10	4.30	0.10	4.30	0.10
2.30	0.10	2.30	0.10	2.30	0.10	2.30	0.10	2.30	0.10	5.30	0.10
2.30	0.10	2.30	0.10	2.30	0.10	2.30	0.10	2.30	0.10	2.30	0.10
2.30	0.10	2.30	0.10	2.30	0.10	2.30	0.10	2.30	0.10	2.30	0.10
4.30	0.10	2.30	0.10	2.30	0.10	2.30	0.10	2.30	0.10	2.30	0.10
4.30	0.10	4.30	0.10	4.30	0.10	4.30	0.10	2.30	0.10	2.30	0.10

Showing 1 to 10 of 13 entries Previous 1 2 Next

Filtrar Datos
Seleccione la Fecha:
28/02/2025
Filtrar Datos
Exportar Datos filtrados

© 2025 - Servicio Nacional de Aprendizaje - Universidad del Valle

Elaboración propia.

7.6. Recolectar los datos obtenidos de todas las pruebas

Durante la ejecución del protocolo de pruebas se recolectaron más de 50 registros de variables como voltaje, corriente, presión, altura de ola, velocidad de viento y RPM. Los datos fueron exportados en formato .csv con la opción del botón de **exportar datos**.

Posteriormente, se realizó un análisis exploratorio para evaluar la consistencia de cada variable, considerando sus rangos esperados y la identificación de posibles valores atípicos o errores de adquisición.

Además, se generaron gráficas temporales que permitieron visualizar el comportamiento dinámico de las señales y detectar la presencia de ruido o eventos anómalos. Este análisis visual facilitó la identificación de zonas de operación estables y la aparición de patrones repetitivos bajo diferentes condiciones experimentales, lo que aportó información relevante sobre la fiabilidad y estabilidad del sistema de monitoreo.

Figura 59. Datos exportados de la captura.

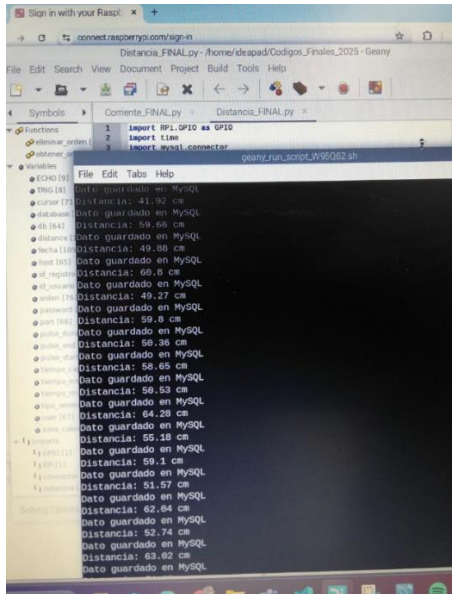
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Altura (cm)	Tiempo_altura RPM		Tiempo_RPM(	Velocidad del	Tiempo_Veloc	Voltaje(V)		Tiempo_voltaj	Presion(Pa)	Tiempo_presi	Corriente(A)
2	2.300	0.000	2.300	0.000	2.300	0.000	2.300	0.000	2.300	0.000	2.300	0.000
3	2.300	1.000	2.300	1.000	4.300	1.000	2.300	0.000	2.300	1.000	2.300	1.000
4	2.300	2.000	4.300	2.000	4.300	2.000	2.300	0.000	2.300	1.000	2.300	2.000
5	2.300	3.000	4.300	3.000	4.300	3.000	2.300	0.000	2.300	1.000	2.300	3.000
6	2.300	4.000	4.300	3.000	4.300	3.000	2.300	0.000	2.300	1.000	1.300	4.000
7	2.300	5.000	4.300	3.000	4.300	3.000	2.300	0.000	2.300	1.000	1.300	5.000
8	4.300	6.000	4.300	3.000	4.300	3.000	2.300	0.000	2.300	1.000	4.300	6.000
9	4.300	6.000	4.300	3.000	4.300	3.000	2.300	0.000	2.300	1.000	4.300	7.000
10	4.300	6.000	4.300	3.000	4.300	3.000	2.300	0.000	2.300	1.000	4.300	8.000
11	4.300	6.000	4.300	3.000	4.300	3.000	2.300	0.000	2.300	1.000	4.300	9.000
12	4.300	6.000	4.300	3.000	4.300	3.000	2.300	0.000	2.300	1.000	4.300	10.000
13												

Elaboración propia.

7.7. Verificación de la efectividad de la interfaz de comunicación entre los sensores y la plataforma de monitoreo

Durante la prueba, se ejecutaron procesos de adquisición controlada en los que se activaron los sensores para generar datos bajo condiciones de prueba. Cada señal analógica fue enviada mediante scripts programados en Python. Posteriormente, los datos eran almacenados en la base de datos MySQL y visualizados en tiempo real a través de la plataforma web.

Figura 60. Envío de variables a la base de datos.



Elaboración propia.

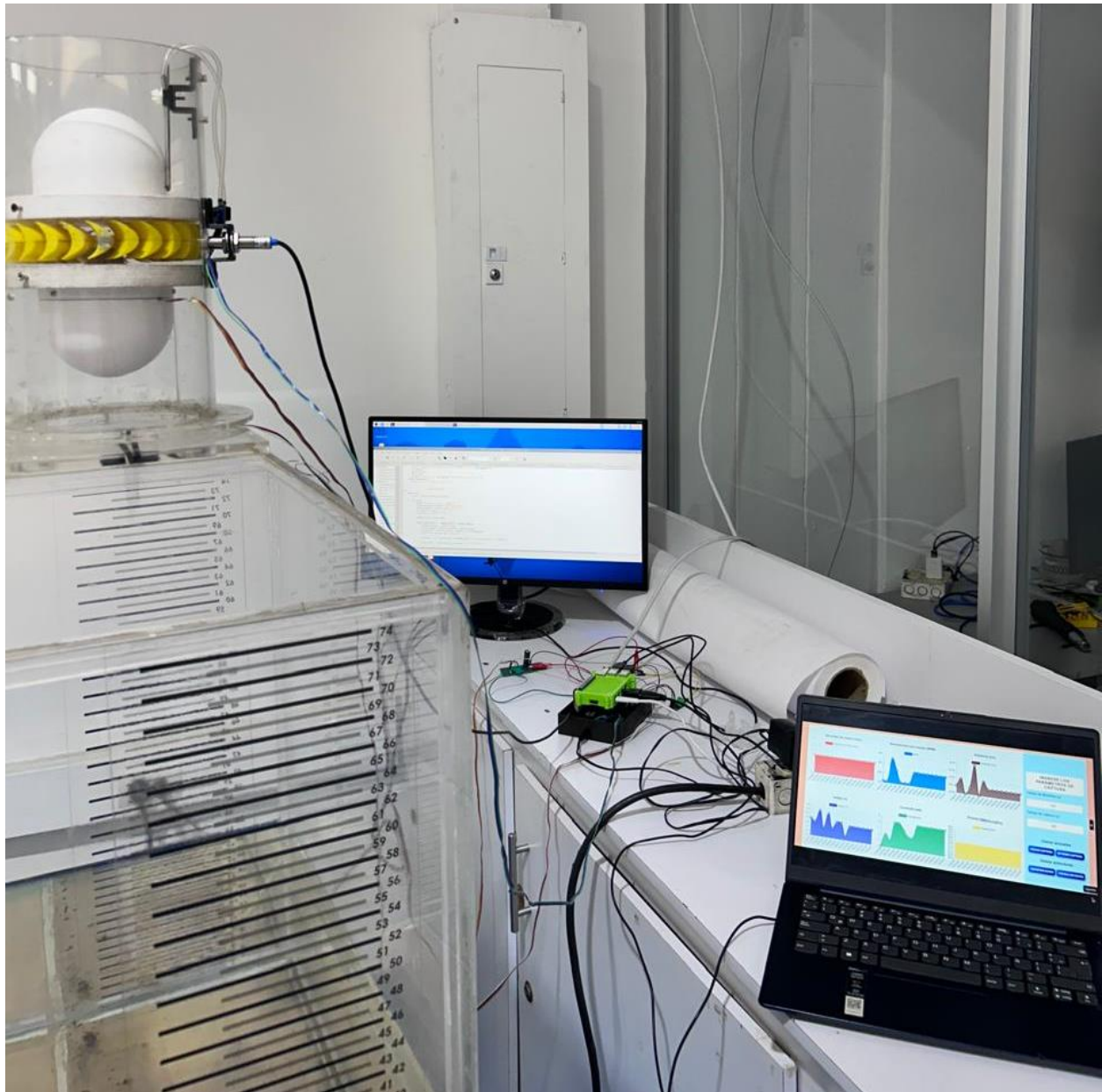
Esto confirma que la arquitectura de comunicación entre sensores, procesamiento embebido, red y base de datos fueron correctamente visualizados en la página web.

Figura 61. Captura de datos con los sensores implementados en el prototipo experimental.



Elaboración propia.

Figura 62. Integración completa del sistema de monitoreo al prototipo experimental OWC.



Elaboración propia.

7.8. Realización de las pruebas del sistema para garantizar la precisión y confiabilidad de los datos recopilados.

Con el objetivo de validar el desempeño metrológico de los sensores, se compararon sus lecturas con instrumentos de medición de referencia. La tabla siguiente resume los resultados obtenidos:

Tabla 10. Desempeño metrológico de sensores

Sensor	Variable	Instrumento patrón	Error promedio
HC-SR04	Altura de ola	Flexómetro	± 0.7 cm
MPX7002DP	Presión / viento	Manómetro digital	$\pm 2\%$ del fondo escala
LJ12A3-4-Z/BX	RPM	Tacómetro láser	$\pm 1\%$
ACS712	Corriente	Multímetro Fluke	$\pm 0.2\%$
FZ0430	Voltaje	Multímetro Fluke	$\pm 0.5\%$

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La implementación del sistema de monitoreo IoT para el prototipo experimental OWC del SENA fue evaluada a través de un conjunto exhaustivo de pruebas que permitieron validar su desempeño técnico en términos de adquisición de datos, visualización, comunicación y precisión sensorial.

Uno de los aspectos más destacados fue la correcta ubicación de los sensores dentro de la planta experimental. Cada dispositivo fue instalado considerando la estructura del prototipo y el funcionamiento de los sensores. Esta distribución garantizó lecturas estables, precisas.

En cuanto a la infraestructura digital, se logró de forma exitosa el despliegue de la aplicación web tanto en la nube, como en la máquina virtual alojada en los servidores institucionales del SENA, bajo el entorno Proxmox. La máquina virtual fue configurada y permitió ejecutar el servidor backend, la base de datos y el sistema de visualización en tiempo real. Esta implementación demostró que el sistema puede operar de forma estable.

Un resultado especialmente importante fue que cualquier usuario conectado a la red del SENA puede acceder a la interfaz web de monitoreo, lo cual representa una ventaja en términos de accesibilidad. Investigadores, instructores y aprendices pueden interactuar con el sistema, consultar registros históricos, visualizar gráficas o activar la adquisición de datos en vivo desde cualquier equipo institucional.

Adicionalmente, se comprobó que el sistema transmite los datos en tiempo real desde los sensores hacia la base de datos MySQL en el entorno local, validando la comunicación mediante el protocolo WebSocket. Aunque la arquitectura del sistema permite su funcionamiento en entornos remotos (por ejemplo, bases de datos alojadas en Railway o servidores externos).

Ventajas:

El sistema de monitoreo IoT desarrollado para el prototipo experimental OWC del SENA presenta múltiples ventajas que fortalecen su aplicabilidad y confiabilidad. Entre ellas destaca la capacidad de adquisición de datos en tiempo real, que facilita la toma de decisiones rápidas y precisas sobre el comportamiento del prototipo.

La accesibilidad remota a través de la aplicación web permite a diferentes usuarios investigadores, instructores y aprendices interactuar con el sistema desde cualquier ubicación dentro de la red institucional, potenciando la colaboración y el análisis conjunto. Además, la integración de diversos sensores y el diseño de acondicionamiento de señales aseguran mediciones estables y representativas, minimizando errores e interferencias eléctricas que podrían comprometer la calidad de los datos.

Desventajas:

El sistema también presenta algunas limitaciones que deben ser consideradas para futuras mejoras. La dependencia de la red institucional para el acceso remoto puede limitar la operatividad en caso de fallas de conectividad o mantenimiento de la infraestructura, afectando la disponibilidad continua del sistema. Asimismo, la complejidad en la integración y calibración de múltiples sensores requiere una intervención técnica, lo que puede dificultar la replicación del sistema en otros entornos sin soporte adecuado.

9. CONCLUSIONES

- Se logró implementar con éxito un sistema de monitoreo basado en una red de sensores IoT que permitió la adquisición simultánea y confiable de al menos tres variables de interés del prototipo experimental OWC del SENA. La selección adecuada y correcta instalación de sensores, junto con el acondicionamiento de señales, garantizó la obtención de datos estables y precisos para el análisis del comportamiento dinámico del prototipo.
- Se desarrolló una aplicación web, alojada en la nube mediante Railway y respaldada por un entorno virtual en los servidores institucionales del SENA. Esta plataforma permite la consulta en tiempo real y el acceso a registros históricos del sistema de monitoreo desde cualquier dispositivo conectado a la red del SENA.
- Se ejecutó un protocolo exhaustivo de pruebas metrológicas y funcionales que validaron el desempeño del sistema. Se evaluaron aspectos clave como la precisión de los sensores, la integridad en la transmisión de datos vía WebSocket y la estabilidad de la interfaz web. Los resultados demostraron que el sistema cumple con los parámetros aceptables para aplicaciones experimentales y académicas, confirmando su viabilidad para su uso y réplica en escenarios similares.
- Desde la perspectiva metrológica, las pruebas realizadas con instrumentos patrón demostraron que el sistema tiene un margen de error aceptable para aplicaciones experimentales.

10. TRABAJOS FUTUROS

Si bien el sistema de monitoreo IoT desarrollado para el prototipo experimental OWC ha demostrado ser funcional, preciso y accesible, existen múltiples oportunidades de mejora en futuras fases del proyecto. A continuación, se presentan las principales líneas de trabajo propuestas:

1. **Diseño de una interfaz web completamente *responsive*:** Aunque la aplicación web cumple con los objetivos funcionales propuestos, actualmente está optimizada para su visualización desde computadores de escritorio o portátiles. Se plantea como trabajo futuro el rediseño de la interfaz utilizando frameworks como Flexbox CSS Grid, que permitan adaptar automáticamente los elementos gráficos y formularios a distintos tamaños de pantalla, como tablets y teléfonos móviles. Esto facilitará la consulta y el monitoreo en campo o en contextos donde el acceso a PC sea limitado.
2. **Fortalecimiento de la seguridad web y de bases de datos:** Con el objetivo de garantizar la confidencialidad y disponibilidad de los datos capturados, se propone una mejora estructural en los esquemas de autenticación, encriptación y protección contra ataques informáticos. Esto incluye la implementación de cifrado de contraseñas con algoritmos como bcrypt, uso de tokens con expiración y la configuración de reglas estrictas de firewall tanto en Railway como en los servidores del SENA.
3. **Aislamiento eléctrico y protección entre alimentaciones:** Dado que el sistema opera con múltiples fuentes de alimentación (reguladores 5 V y 3.3 V), es necesario fortalecer la protección entre etapas. Para ello, se propone colocar un Diodo Schottky entre las alimentaciones o el diseño de un bloque de aislamiento galvánico entre la fuente principal y las señales sensibles, mediante optoacopladores o convertidores DC-DC, con el fin de proteger los sensores y la Raspberry Pi frente a picos de voltaje o interferencias electromagnéticas.
4. **Diseño de compatibilidad con múltiples tipos de alimentación:** La arquitectura actual del sistema considera una fuente primaria de 9 V DC. Sin embargo, en escenarios reales, podría ser necesario alimentar el sistema desde baterías de 12 V o bancos de energía. Por tanto, se recomienda rediseñar el módulo de alimentación para admitir un rango más amplio de entradas (12 V – 24 V).
5. **Migración a una arquitectura de microservicios:** Para escalar el sistema a múltiples prototipos o nodos distribuidos, se sugiere estudiar la posibilidad de reestructurar el backend hacia una arquitectura de microservicios. Esto

permitiría dividir la lógica de adquisición, procesamiento y visualización en servicios independientes, cada uno desplegable en contenedores Docker.

6. **Integración de módulos de comunicación alternativos:** Si bien actualmente la conexión se realiza vía Ethernet institucional o Wi-Fi, en futuras versiones del sistema podría incorporarse comunicación vía LoRaWAN, 4G o NB-IoT para operación remota en campo. Estas tecnologías permitirían llevar el sistema a zonas donde no existe infraestructura de red, como comunidades costeras o plataformas flotantes.
7. **Ampliación del sistema a otros prototipos energéticos:** Finalmente, se plantea como trabajo futuro la replicación e integración del sistema IoT en otros proyectos del SENA relacionados con energías renovables (solar, eólica, híbridos), estableciendo una plataforma única de monitoreo que permita comparar desempeños, realizar simulaciones y evaluar nuevas tecnologías bajo un entorno digital unificado.

11. REFERENCIAS

- [1] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, *Zonas no interconectadas – ZNI: Informe sectorial de la prestación del servicio de energía eléctrica 2021*, 2021.
- [2] F. Jarabo y N. Elórtogui, *Energías Renovables*. Madrid, España: Era Solar Ediciones, 2000.
- [3] Ambientum, "Principales problemas del uso de combustibles fósiles," Ambientum: Portal Medioambiental, 2021. [Online]. Available: Principales problemas del uso de combustibles fósiles - Ambientum. Accessed: Sep 2, 2024.
- [4] J. F. Bustos, A. L. Sepúlveda y K. Triviño, "Zonas no interconectadas eléctricamente en Colombia: problemas y perspectiva," *Econógrafos*, vol. 65, pp. 13–17, 2014.
- [5] WWF Colombia, *El potencial de las energías renovables*, Informe, WWF Colombia, 2016. [Online]. Available: El potencial de la energía renovable | WWF. Accessed: Sep 2, 2024.
- [6] A. Osorio, "Colombia, con alto potencial para aprovechar energías marinas," Agronet, 2022. [Online]. Available: Colombia, con alto potencial para aprovechar energías marinas. Accessed: Sep 5, 2024.
- [7] A. Iturrioz Eceiza, *Modelado numérico de sistemas de extracción de energía del oleaje basados en la tecnología de columna de agua oscilante*, Universidad del País Vasco, 2014.
- [8] Ministerio de Energía de Chile, "¿Qué es la energía undimotriz?" [Online]. Available: ¿Qué es la energía undimotriz? | educarchile. Accessed: Sep 5, 2024.
- [9] N. Hiron, I. A. D. Giriantari, L. Jasa y I. N. S. Kumara, "Development of Laboratory-Scale OWC Test Rig with Real-Time Data Monitoring System," *Proc. IEEE*, 2021.
- [10] P. Qian, B. Feng, D. Zhang, X. Tian y Y. Si, "IoT-based approach for condition monitoring of wave energy generation system," *IET Renewable Power Generation*, 2019.
- [11] International Renewable Energy Agency (IRENA), *Innovation Landscape Brief: Internet of Things*, 2019.
- [12] Telefónica, "Internet de las Cosas, clave en el impulso de la energía renovable," Blog Telefónica España, 2021. [Online]. Available: 'Internet de las Cosas', clave en el impulso de la energía renovable - Telefónica. Accessed: Sep 12, 2024.
- [13] D. C. Herrera, K. Triana y W. Mesa, "Importancia de los laboratorios remotos y virtuales en la educación superior," *Revista UNAD*, vol. 12, no. 2, pp. 59–72, 2021.
- [14] M. Kavre, A. Gaddekar y Y. Gadhadre, "Internet of Things (IoT): A Survey," en *Proc. 2019 IEEE Pune Sect. Int. Conf. (PuneCon)*, Pune, India, 2019, pp. 1–6, doi:

10.1109/PuneCon46936.2019.9105831.

- [15] R. Kenaza, A. Khemane, H. Bendjenna, A. Meraoumia y L. Laimeche, "Internet of Things (IoT): Architecture, Applications, and Security Challenges," en **Proc. 2022 4th Int. Conf. Pattern Anal. Intell. Syst. (PAIS)**, Oum El Bouaghi, Algeria, 2022, pp. 1–5, doi: 10.1109/PAIS56586.2022.9946918.
- [16] R. A. Nadaf, M. Rubina, P. Sujata y V. M. Bonal, "Smart Mirror Using Raspberry Pi for Human Monitoring and Intrusion Detection," en **2019 Int. Conf. Adv. Inf. Technol. (ICAIT)**, 2019, pp. 1–4.
- [17] P. Galkin, L. Golovkina y I. Klyuchnyk, "Analysis of Single-Board Computers for IoT and IIoT Solutions in Embedded Control Systems," en **2018 Int. Conf. Problems Infocommunications. Sci. Technol. (PIC S&T)**, 2018, pp. 297–302.
- [18] A. Saleem, S. Shah, H. Iftikhar, J. Zywiłek y O. Albalawi, "A Comprehensive Systematic Survey of IoT Protocols: Implications for Data Quality and Performance," **IEEE Access**, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3486927.
- [19] P. Pierleoni, R. Concetti, A. Belli y L. Palma, "Amazon, Google and Microsoft Solutions for IoT: Architectures and a Performance Comparison," **IEEE Access**, vol. 7, 2019, Art. no. 2961511, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2961511.
- [20] G. Osorio Correa et al, **Informe de diseño e ingeniería de prototipo de columna de agua oscilante v.1**, Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Regional Valle, 2016.
- [21] K. Holguín y R. Martínez, "Informe de desarrollo del experimento: Comportamiento en el nivel del oleaje en la cámara de compresión de un prototipo de laboratorio OWC (Oscillating Water Column)," Centro de Asistencia Técnica a la Industria (ASTIN) – SENA, Cali, Colombia, 2017.
- [22] K. Holguín y R. Martínez, "Informe del experimento: Estudio del comportamiento del rompeolas en el prototipo de laboratorio OWC (Oscillating Water Column)," Centro de Asistencia Técnica a la Industria (ASTIN) – SENA, Cali, Colombia, 2017.
- [23] K. Holguín y R. Martínez, "Estudio del comportamiento de dos turbinas unidireccionales (Reacción y Wells) en el prototipo de laboratorio OWC (Oscillating Water Column)," Centro de Asistencia Técnica a la Industria (ASTIN) – SENA, Cali, Colombia, 2017.
- [24] D. Jana, S. Adhya, D. Saha, A. Das y H. Saha, "An IoT based smart solar photovoltaic remote monitoring and control unit," en **2016 2nd Conf. Control, Instrumentation, Energy & Commun. (CIEC)**, 2016, doi: 10.1109/CIEC.2016.7513793.
- [25] M. M. Bhuiyan y M. Billah, "Wind turbine monitoring system using wireless sensor networks," **J. Bangladesh Agric. Univ.**, vol. 11, no. 2, 2014, doi: 10.3329/jbau.v11i2.19936.
- [26] A. Falcao y J. Henriques, "Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review," **Renewable Energy**, vol. 85, pp. 1391–1424, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.07.086.
- [27] H. Fang, Y. Tao, S. Zhang y Z. Xiao, "Design and analysis of bidirectional driven float-type

- wave power generation system," *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 6, no. 1, pp. 1–11, 2017, doi: 10.1007/s40565-017-0289-9.
- [28] S. Laha, B. Pattanayak y S. Pattnaik, "Advancement of environmental monitoring system using IoT and sensor: A comprehensive analysis," *AIMS Environ. Sci.*, vol. 9, no. 9, pp. 771–800, 2022, doi: 10.3934/environsci.2022044.
- [29] Mercado Livre Brasil, "3 x Sensor Ultrassônico De Distância Hc-sr04 Módulo," 2025. [Online]. Available: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1405730030-3-x-sensor-ultrassonico-de-distancia-hc-sr04-modulo-_JM. Accessed: Jan 10, 2025.
- [30] AliExpress, "Sensor de presión diferencial con salida analógica," 2025. [Online]. Available: <https://es.aliexpress.com/item/1005008756827025.html>. Accessed: Jan 14, 2025.
- [31] Instituto Digital, "Sensor de proximidade indutivo NPN 6–36V," 2025. [Online]. Available: <https://www.institutodigital.com.br/produto/sensor-de-proximidade-indutivo-npn-6-36v/>. Accessed: Jan 14, 2025.
- [32] AliExpress, "Sensor de corriente para Arduino," 2025. [Online]. Available: <https://es.aliexpress.com/item/1005005939151519.html>. Accessed: Jan 14, 2025.
- [33] Tienda Sawers, "Sensor voltaje DC 25V," 2025. [Online]. Available: <https://tienda.sawers.com.bo/sensor-voltaje-dc-25v->. Accessed: Jan 14, 2025.
- [34] A. Maier, A. Sharp y Y. Vagapov, "Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things," en *2017 Internet Technol. Appl. (ITA)*, 2017, pp. 143–148, doi: 10.1109/ITECHA.2017.8101926.
- [35] Y. Natchon, "9 reasons why industry started to adopt Raspberry Pi," Cytron, 2023. [Online]. Available: <https://www.cytron.io/tutorial/9-reasons-why-industry-started-to-adopt-raspberry-pi>. Accessed: Oct 25, 2024.
- [36] Mecsu.vn, "Tìm hiểu module ADS1115," 2025. [Online]. Available: <https://mecsu.vn/ho-tro-ky-thuat/tim-hieu-module-ads1115.j0P>. Accessed: Feb 9, 2025.
- [37] ProgramarFácil, "Comunicación I2C con Arduino," 2025. [Online]. Available: <https://programarfácil.com/blog/arduino-blog/comunicacion-i2c-con-arduino/>. Accessed: Feb 24, 2025.
- [38] Inventable, "Adaptadores de nivel 5V a 3.3V," 2017. [Online]. Available: <https://www.inventable.eu/2017/05/03/adaptadores-nivel-5v-3-3v/>. Accessed: Oct 30, 2024.
- [39] J. L. Orobio Lerma y H. Jimenez Rosero, "Informe de pruebas documentadas: Modelado del firmware para la adecuación del sistema de monitoreo del prototipo experimental undimotriz del centro ASTIN (Código P2025-032327-16842)," SENA – Tecnoparque Nodo Cali, 2025.