Estudio de la exactitud de una estación de bajo costo para la medición de hidrógeno

Luis Miguel Jacome Pérez
Richard Daniel Martínez Cárdenas

Universidad CESMAG
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica
San Juan de Pasto
2026

Estudio de la exactitud de una estación de bajo costo para la medición de hidrógeno

Luis Miguel Jacome Pérez
Richard Daniel Martínez Cárdenas

Proyecto de trabajo de grado presentado al Comité Curricular del Programa de Ingeniería Electrónica en la Modalidad de Estancia en Línea.

Asesor
Ing. John Barco Jiménez, PhD

Universidad CESMAG
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica
San Juan de Pasto
2026

Nota de aceptación

Aprobado por el Comité de
Investigación y Proyección Social en
Cumplimiento de los Requisitos
exigidos por la Universidad CESMAG
Para optar al título de Ingeniería
Electrónica.

Ing. John Barco Jiménez, PhD

_____

Asesor

_____

Jurado

_____

Jurado

San Juan de Pasto, abril 2026

Página de Nota de Exclusión de Responsabilidad Intelectual

"El pensamiento que se expresa en esta obra es exclusivamente responsabilidad de sus autores y no compromete la ideología de la Universidad CESMAG"

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas que nos han acompañado a lo largo de este proceso y que hicieron posible la realización de este proyecto de grado.

A nuestras familias, por su apoyo incondicional, su amor y comprensión, que fueron fundamentales en cada etapa de este camino. Sin su respaldo constante, no habría sido posible culminar este logro.

A nuestros profesores, por su compromiso con nuestra formación académica y por compartir con nosotros sus conocimientos y experiencia. De manera especial, agradecemos al profesor Ph.D Juan José Lozada Castro , Ing. John Barco Jiménez Ph.D, por su orientación, dedicación y paciencia, así como por el tiempo y apoyo brindados durante el desarrollo de este trabajo.

A nuestros amigos y compañeros, quienes nos acompañaron durante este proceso académico, compartiendo momentos tanto difíciles como felices, y brindándonos ánimo y motivación para seguir adelante.

Finalmente, agradecemos a todas aquellas personas que, de una u otra forma, contribuyeron al desarrollo y culminación de este proyecto. Cada consejo, cada palabra y cada gesto de apoyo fueron valiosos en este camino. Este logro también es de ustedes

Dedicatoria

Dedico este logro a la persona más importante en mi vida: mi madre, quien me ha brindado un apoyo incondicional y un amor infinito. Ella me enseñó que la educación es uno de los pilares fundamentales para crecer como persona. Sin su esfuerzo, confianza y acompañamiento, este sueño no habría sido posible. Espero seguir contando con su apoyo y que pueda verme alcanzar muchos más logros en mi vida.

A mis abuelos, quienes han estado a mi lado desde siempre. Sus consejos, llamados de atención y palabras de aliento han sido muestras de su amor y preocupación. Este logro también es de ustedes, pues han sido una parte esencial de mi formación personal.

A mis tíos, con quienes he compartido gran parte de mi vida, por sus enseñanzas, su cariño y su apoyo constante. Deseo que se sientan orgullosos de este momento y espero seguir contando con ustedes en los próximos pasos de mi camino.

Finalmente, a mis profesores, quienes me han brindado uno de los regalos más valiosos: el conocimiento. Gracias por sus enseñanzas, las cuales llevaré conmigo a lo largo de mi vida, con el compromiso de seguir aprendiendo y creciendo.

Richard Daniel Martínez Cárdenas

Dedicatoria

A mi familia, por su apoyo incondicional en cada etapa de mi proceso y estar siempre presentes con su ánimo y felicitación por cada logro animándome a seguir pese a todos los inconvenientes para lograr al final de la meta.

A mis padres y hermana quienes estuvieron a mi lado apoyándome y brindándome inspiración para continuar día a día, su amor incondicional e infinito apoyo. Sin su esfuerzo, y confianza, este sueño no habría sido posible. nunca se rindieron por ver este sueño cumplido y ese gran día llego al fin.

A mis profesores, por ser guía y orientación despertando mi curiosidad y amor a esta carrera a lo largo de estos años de formación.

A mis amigos, en especial a Jonathan, quien estuvo presente en mis momentos más difíciles y en mis mejores etapas durante la carrera, brindándome su apoyo sincero, sus consejos directos y su manera única de impulsarme a seguir adelante.

Finalmente, a mis compañeros de estudio y a todas las personas que formaron parte de este proceso académico, con quienes compartí experiencias, aprendizajes y momentos únicos e irrepetibles que quedarán para siempre.

Luis Miguel Jacome Pérez

Contenido

Introducción 15

1. El Problema de Investigación 17

1.1 Objeto o tema de investigación 17

1.2 Línea de Investigación 17

1.3 Sub-línea de Investigación 17

1.4 Planteamiento del Problema 17

1.5 Formulación del Problema 19

1.6 Objetivos 19

1.6.1 Objetivo General 19

1.6.2 Objetivos específicos 19

1.7 Justificación 19

1.8 Viabilidad 21

1.9 Delimitación 22

2. Tópicos del Marco Teórico 23

2.1 Antecedentes 23

2.1.1 Data acquisition and monitoring system framed in Industrial Internet of Things for PEM hydrogen generators 23

2.1.2 Low-Cost IoT-Based Sensor System: A Case Study on Harsh Environmental Monitoring 23

2.1.3 Diseño e implementación de un sistema de monitoreo de gas Hidrógeno para el grupo de investigación Estudio de sistemas contaminantes 24

2.1.4 Implementación de una Red IoT para la Caracterización y Monitoreo de un generador de hidrógeno 25

2.1.5 Development of a Real-Time Gas Concentration Measurement System Using Internet of Things-Based Monitoring 25

2.1.6 Electronic Monitoring System for Hydrogen Produced from the Oxidation of Human Urine (Mhydros) 26

2.2 Enunciado de los Supuestos Teóricos 26

3. Metodología 43

3.1 Diseño de Investigación 43

3.2 Secuencia metodológica 44

3.2.1 Requerimientos del sistema 44

3.2.2 Requerimientos de hardware 44

3.2.3 Requerimientos de software 45

3.2.4 Requerimientos del entorno de operación 45

3.2.5 Seleccionar y caracterizar el sensor de hidrógeno adecuado para el sistema de monitoreo 45

3.2.6 Integración de variables ambientales para garantizar repetitividad 46

3.2.7 Diseño de la estación remota 46

3.2.8 Configuración de la recepción y transmisión de datos 46

3.2.9 Diseño de software, almacenamiento y visualización en línea 47

3.2.10 Implementar el sistema de monitoreo local y remoto mediante arquitectura IoT 47

3.2.11 Análisis del comportamiento de la estación de medición de hidrógeno en comparación con el equipo patrón 47

3.3 Universo y muestra 48

3.3.1 Universo 48

3.3.2 Muestra 48

3.4 Técnicas de recolección de información 48

3.5 Instrumentos de recolección de información 49

4. Diseño de Software y Hardware 50

4.1 Diseño de ambiente monitoreado 50
4.2 Diseño de la estación de medición de hidrógeno 53
4.2.1 Equipo patrón 53
4.2.2 Selección del sensor 56
4.2.3 Sensor de Hidrógeno ZE07-H2 58
4.2.4 Sensor de variables ambientales BME680 61
4.2.5 Montaje del sensor BME680 y ZE-07-H2 62
4.3 Hardware de la unidad central 63
4.3.1 Diseño de hardware 64
4.3.2 Montaje del hardware de la unidad central 66
4.4 Diseño de firmware 68
4.5 Diseño de Software 70
4.5.1 Configuración del bróker MQTT 71
4.5.2 Configuración de InfluxDB 73
4.5.3 Configuración de Node-RED 77
4.5.4 Configuración del Dashboard Grafana 83
5. Resultados 88
5.1 Verificación del funcionamiento del sistema 89
5.1.1 Control de la generación de hidrógeno 89
5.1.2 Conexión con el servidor 91
5.1.3 Ambiente monitoreado de experimentación 94
5.1.4 Pruebas de consumo para implementación del panel solar 95
5.2 Prueba y calibración de los sensores 97
5.2.1 Pruebas del Sensor de hidrógeno ZE07-H2 97
5.2.2 Evaluación de variables ambientales en la prueba de laboratorio 102

5.2.3 Evaluación de los resultados 104
5.2.4 Modelamiento del sensor 109
5.2.5 Curva de calibración..... 111
5.2.6 Sensibilidad del sensor..... 113
5.2.7 Corrección de las lecturas mediante la curva de calibración 114
6. CONCLUSIONES 116
7. RECOMENDACIONES..... 118
Referencias..... 120

Lista de Figuras

Figura 1. Tomado de [21], Símbolo del elemento químico hidrógeno 26
Figura 2. Tomado de [24].Formas de producción de Hidrógeno 28
Figura 3. Tomado de[43]. Funcionamiento protocolo MQTT 38
Figura 4. Fuente propia Control y purificación del hidrógeno 50
Figura 5. Fuente propia. Conexión y mezcla de gases 51
Figura 6. Fuente propia. Esquema de ruta de gases para la estación de hidrógeno 52
Figura 7. Fuente propia. Diseño de la cámara de pruebas 53
Figura 8. Tomado de [46]. Sensor NEO986HT 54
Figura 9. Tomado de [46]. Ingreso del gas hidrógeno por el sensor NEO986HT 55
Figura 10. Fuente propia. Gráfica de valores del sistema MHYDROS. 56
Figura 11. Tomado de [47]. Partes del sensor ZE07-H2 58
Figura 12. Tomado de [48]. Sensor de variables ambientales BME680 61
Figura 13. Fuente propia. Montaje en físico de los sensores 62
Figura 14. Fuente propia. Estructura física 63
Figura 15. Fuente propia. Esquemático del diseño de componentes 65
Figura 16. Fuente propia. Diseño Físico Planteado de la estación 66
Figura 17. Fuente propia. Montaje físico de la unidad central 68
Figura 18. Fuente propia. Diagrama de código planteado del firmware 69
Figura 19. Fuente propia. Flujo de datos del firmware 70
Figura 20. Fuente propia. Configuración de Mosquitto. 72
Figura 21. Fuente propia. Configuración de nuevas reglas. 72
Figura 22.Fuente propia.. Documentación oficial de InfluxDB 73
Figura 23. Fuente propia. Buckets y creación de usuario 73
Figura 24. Fuente propia. creación de API token personalizado 74
Figura 25. Fuente propia. Visualización de datos en InfluxDB 75
Figura 26. Fuente propia. Configuración de almacenamiento. 76
Figura 27.Fuente propia Instalador de Node.js. 78
Figura 28. Tomado de Repositorio npm de Node-RED. 78
Figura 29. Fuente propia Arquitectura MQTT. 79

Figura 30. Fuente propia. Bloque adicional Node-RED 80
Figura 31. Fuente propia. Configuración de nodo MQTT. 80
Figura 32. Fuente propia. Configuración reconexión MQTT y Wifi. 81
Figura 33. Fuente propia. Configuración del nodo función. 82
Figura 34. Fuente propia. Configuración del nodo de salida en Node-RED 82
Figura 35.Fuente propia. Trama de datos total resultante enviada de Node-RED 83
Figura 36.Adaptado de la página oficial de Grafana 84
Figura 37. Tomado de Grafana. Inicio de la interfaz Gráfica Grafana 84
Figura 38.Tomado de Grafana. Conexión de Grafana y InfluxDB. 85
Figura 39. Fuente propia. Configuración de la conexión a InfluxDB 85
Figura 40.Adaptado de Grafana. Creación de la Dashboard 86
Figura 41. Fuente propia. Personalización de paneles para cada variable. 86
Figura 42. Fuente propia. Interfaz gráfica con datos recibidos de InfluxDB 87
Figura 43. Fuente: propia, Control de porcentaje de Hidrógeno 89
Figura 44. Fuente propia. Medidas de concentración del sensor NEO986HT 90
Figura 45. Fuente propia. Funcionamiento y mensajes de la estación de hidrógeno. 91
Figura 46. Fuente propia. Archivos CSV de la base de datos local y del servidor 92
Figura 47. Fuente propia. Envío de mensaje SMS al celular 92
Figura 48. Fuente propia. Inicio del servidor local 93
Figura 49. Fuente propia. Sonda de detección en el ambiente monitoreado. 94
Figura 50. Ruta de gases hacia la estación. 94
Figura 51. Fuente propia. Gráficas comparativas muestra 1 98
Figura 52. Fuente propia. Gráficas comparativas muestras 2 99
Figura 53. Fuente propia. Gráficas comparativas muestra 3 100
Figura 54. Fuente propia. Gráficas comparativas muestra 4 101
Figura 55. Fuente propia. Comportamiento de las variables ambientales. 103
Figura 56. Fuente propia. Curva característica del sensor ZE07-H2 111

Lista de Tablas

Tabla 1. Tomado de [22]. Propiedades físicas del Hidrógeno 27
Tabla 2. Tomada de [31]. Tipos de sensores de hidrógeno 30
Tabla 3. Fuente propia. Posibles sensores 56
Tabla 4. Tomado de [47]. Pines de conexión del sensor ZE07-H2 58
Tabla 5. Tomado de [47]. Características técnicas del sensor ZE07-H2 59
Tabla 6. Tomado de [47]. Características eléctricas del sensor ZE07-H2 59
Tabla 7. Tomado de [47].Trama de datos del sensor ZE07-H2 60
Tabla 8. Fuente propia. Consumo de la estación. 95
Tabla 9. Fuente propia. Muestra 1 entre 0.6% y 0.8% de concentración de hidrógeno. .. 97
Tabla 10. Fuente propia. Promedios y desviación estándar de la muestra 1 98
Tabla 11. Fuente propia. Muestra 2 entre 1.2% y 1.4 % de concentración de hidrógeno. 99
Tabla 12. Fuente propia. Promedios y desviación estándar de la muestra 2 99
Tabla 13. Fuente propia. Prueba 3 entre 1.55% y 1.6% de concentración de hidrógeno. 100
Tabla 14. Fuente propia. Promedios y desviación estándar de la muestra 3 100
Tabla 15. Fuente propia Prueba 4 con 2% de concentración de hidrógeno 101
Tabla 16.Fuente propia. Promedios y desviación estándar de la muestra 4 101
Tabla 17. Fuente propia. Parametrización del sensor ZE07-H2 106
Tabla 18. Fuente propia. Exactitud del sensor a concentraciones de hidrógeno 107
Tabla 19. Fuente propia. Coeficiente de variación del sensor ZE07-H2 107
Tabla 20. Fuente propia. Intervalos de confianza del 95% de los promedios e incertidumbre del equipo patrón 108
Tabla 21. Fuente propia. Coordenadas de los puntos experimentales 111
Tabla 22. Fuente propia. error relativo y exactitud del ZE07-H2 con lecturas corregidas 114

Introducción

El hidrógeno ha emergido como un componente clave en la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles, ganando protagonismo a nivel global por su versatilidad y potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En Colombia, los esfuerzos por diversificar la matriz energética en el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 han impulsado investigaciones sobre alternativas a los combustibles fósiles, siendo el hidrógeno blanco una de las más prometedoras. Este tipo de hidrógeno, que se encuentra de manera natural en el subsuelo, a diferencia de otros tipos de hidrógeno este no requiere un proceso de producción ya que sale de forma natural en zonas volcánicas[1], esto ha captado el interés debido a su abundancia y bajo impacto ambiental, convirtiéndose en un recurso estratégico para el desarrollo de una economía más sostenible.

Este trabajo de grado tiene como objetivo principal diseñar y desarrollar una estación de medición de bajo costo para la detección de concentraciones de hidrógeno en ambientes monitoreados. La estación utilizará un sensor accesible y tecnologías de Internet de las Cosas (IoT), permitiendo así el monitoreo en tiempo real. (IoT) es la tecnología que permite la interconexión de dispositivos y sensores a través de redes, facilitando la comunicación entre ellos y el envío de datos para un análisis remoto eficiente [2]. En este proyecto, IoT hará posible el seguimiento continuo de las concentraciones de hidrógeno, cuya precisión será evaluada en comparación con dispositivos comerciales como un analizador de gases H2, para valorar su viabilidad en la exploración y cuantificación de hidrógeno blanco.

La metodología empleada en este proyecto incluye diversas etapas clave. En primer lugar, se seleccionarán los sensores más adecuados para la medición de hidrógeno, considerando factores como el costo, la precisión y la disponibilidad en el mercado. Posteriormente, se procederá al diseño e implementación del prototipo de la estación, que incluirá un microcontrolador para procesar los datos y enviarlos a una plataforma de monitoreo remoto basada en IoT. Las pruebas se realizarán en un entorno monitoreado de laboratorio.

El sistema contará con un sensor ubicado estratégicamente para medir las concentraciones de hidrógeno en tiempo real. Estos datos serán procesados y almacenados en una base de datos centralizada y una local, lo que permitirá no solo el monitoreo constante. De

este modo, se busca maximizar la precisión de la estación y su eficiencia, proporcionando una herramienta útil para futuros estudios sobre el hidrógeno como fuente de energía.

El impacto de este proyecto es significativo, tanto a nivel académico como práctico. No solo contribuirá a la formación de estudiantes en áreas como las energías renovables y el IoT, sino que también proporcionará una plataforma experimental que podría ser aplicada en la exploración de yacimientos de hidrógeno blanco en Colombia. La implementación de esta estación de bajo costo y su capacidad de monitoreo continuo representa una oportunidad para avanzar hacia la explotación de nuevas fuentes energéticas, apoyando así los objetivos de sostenibilidad y reducción de emisiones en el país.

1. El Problema de Investigación

1.1 Objeto o tema de investigación

Una estación de medición de bajo costo que permita la detección de hidrógeno en un ambiente monitoreado.

1.2 Línea de Investigación

La línea de sistemas de automatización y control de la Universidad CESMAG desarrolla procesos investigativos orientados al modelamiento, simulación, diseño, desarrollo y evaluación de algoritmos de control, sistemas de control, sistemas inteligentes, control de procesos industriales, sistemas embebidos, acondicionamiento y procesamiento de señales, robótica, domótica e inteligencia artificial [3].

1.3 Sub-línea de Investigación

Estudia el diseño e implementación de controladores que permitan regular las variables de un sistema o proceso con el fin de lograr un funcionamiento deseado, buscando mejorar la productividad y la eficiencia de los procesos, como también la reducción de costos de implementación y el impacto ambiental del mismo. Entre las temáticas que aborda la línea se encuentran el control en procesos industriales, sistemas inteligentes y control visual [3].

1.4 Planteamiento del Problema

El consumo energético global depende en gran medida de los combustibles fósiles, con aproximadamente el 60% de la energía mundial proveniente del petróleo, el gas natural y el carbón[4]. Esta dependencia tiene graves impactos ambientales, debido a la emisión de gases de efecto invernadero que resultan de la combustión de estos combustibles [5]. Para mitigar estos efectos, se ha incrementado el interés en la búsqueda de fuentes alternativas de energía que puedan sustituir a los combustibles fósiles. Uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), propuestos por la Asamblea General de las Naciones Unidas en 2015, establece como

meta la provisión de energía asequible y no contaminante [6]. En Colombia, el gobierno actual ha incluido en el Plan Nacional de Desarrollo la promoción de una transición energética justa, la cual busca reducir la dependencia de los hidrocarburos [7].

Las fuentes de energía renovable, como la fotovoltaica y la eólica, han ganado relevancia en este contexto, pero presentan limitaciones debido a su intermitencia por factores medioambientales, lo que impide que sean candidatas adecuadas para garantizar el suministro de carga base. Por otro lado, aunque la energía hidroeléctrica tiene una presencia significativa en la matriz energética de muchos países, en Colombia representa el 70% de la generación total [4]; Se enfrenta problemas de estabilidad, especialmente durante periodos de sequía, como ocurre con el fenómeno de El Niño .

El hidrógeno se ha posicionado como un recurso clave en la transición hacia un sistema energético más sostenible, debido a su alto contenido energético y su capacidad para almacenar energía sin producir contaminantes durante su uso [5]. En particular, el hidrógeno blanco, una forma de hidrógeno natural que se encuentra en el subsuelo, representa una prometedora fuente de energía limpia [1]. Sin embargo, la exploración y cuantificación de reservas de hidrógeno blanco en el subsuelo requieren de tecnologías que permitan la detección y el monitoreo continuos de las emisiones de hidrógeno en tiempo real, tecnologías que existen por separado.

Actualmente, existen sensores comerciales capaces de medir concentraciones de hidrógeno, pero presentan varios desafíos al ser un campo con un desarrollo reciente. Primero, el costo de estos dispositivos es alto, lo que representa una barrera para proyectos de monitoreo de larga duración y de amplio alcance, especialmente en países en desarrollo [8]. Además, muchos de estos sensores requieren calibración y mantenimiento constantes, y en algunos casos, el uso de otros gases para mantener su precisión, lo cual incrementa los costos operativos [9]. Otro desafío importante es que la mayoría de estos sensores no están diseñados para integrarse con plataformas IoT siendo solo analizadores portátiles, lo que limita su capacidad de monitoreo remoto en tiempo real [2]. Esta falta de integración con IoT dificulta la recolección de datos continua y aumenta la dependencia de recursos humanos para la operación y el análisis de los datos.

Dado este contexto, surge la necesidad de desarrollar una estación de monitoreo de hidrógeno de bajo costo, que pueda proporcionar mediciones precisas y que además integre compatibilidad para tecnologías IoT, facilitando la transmisión de datos en tiempo real. La

creación de esta estación daría un primer paso en la viabilidad de estaciones remotas permitiendo conectividad y limitando el costo, contribuyendo a la investigación futura de proyectos de exploración y aprovechamiento de hidrógeno blanco en diversas regiones, brindando una alternativa accesible y confiable para la cuantificación de esta fuente de energía limpia.

1.5 Formulación del Problema

¿Cuál va a ser la exactitud con la que la estación de bajo costo para el hidrógeno mida las concentraciones en un ambiente monitoreado con integración en IoT?

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Estudiar la exactitud con la que la estación de hidrógeno mide las concentraciones en un ambiente monitoreado con integración en IoT.

1.6.2 Objetivos específicos

1. Diseñar una estación de medición de hidrógeno de bajo costo, considerando criterios técnicos, de confiabilidad y de adquisición de datos.
2. Implementar un prototipo funcional de la estación de medición de concentraciones de hidrógeno, asegurando su integración con la plataforma IoT.
3. Realizar pruebas y análisis del funcionamiento del prototipo en laboratorio para establecer su exactitud de acuerdo a los resultados obtenidos.

1.7 Justificación

El hidrógeno se ha posicionado como un elemento clave en la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles. Su versatilidad y capacidad de ser utilizado como vector energético en múltiples aplicaciones, desde la movilidad hasta la generación de energía, lo convierten en un recurso estratégico para la descarbonización de diversos sectores industriales y ampliar el sector energético.

El presente proyecto tiene como objetivo diseñar una estación que permita obtener lecturas precisas de concentraciones de hidrógeno con un bajo costo en zonas controladas,

abriendo la oportunidad para que a futuro se pueda tomar como base para implementaciones en detecciones de yacimientos de hidrógeno en áreas no controladas , con el fin de cuantificar los niveles de hidrógeno en el posible yacimiento, esto representa una oportunidad única para reducir la dependencia de fuentes de energía fósil, diversificando la matriz energética en fin de optar por opciones como energías renovables y avanzar hacia un modelo energético más sostenible.

El hidrógeno verde es una alternativa utilizada en los últimos años gracias a que es producido a partir de energías renovables, es visto como una solución viable para disminuir la huella de carbono, especialmente en sectores difíciles de electrificar, como la industria y el transporte marítimo y aéreo [10]. En este contexto, el desarrollo de estaciones que permitan obtener la concentración de hidrógeno natural en yacimientos, podría complementar la producción de hidrógeno verde, ofreciendo una fuente adicional que podría reducir los costos y facilitar la adopción masiva de este combustible limpio.

A nivel global, se están realizando esfuerzos significativos para impulsar el desarrollo de la industria del hidrógeno. Un ejemplo claro es la estrategia nacional de hidrógeno verde de Chile, que proyecta un crecimiento anual del 15% en la producción de hidrógeno hasta 2050 [11]. Chile, con su vasto potencial para generar energías renovables, se perfila como un líder en la producción y exportación de hidrógeno verde, lo que refuerza la necesidad de explorar yacimientos de hidrógeno natural como complemento estratégico a esta industria emergente.

El cálculo de concentración de hidrógeno en yacimientos también es crucial desde una perspectiva económica, analizadores como el GA 5000 son capaces de medir gases como CH4, CO2, O2, H2 entre otros gases con gran precisión y confiabilidad por este motivo su precio es altamente elevado y adicionales utiliza gases para mejorar su precisión dificultando expandir las investigaciones respecto a búsquedas de nuevas zonas con este recurso natural. La explotación de estos recursos podría generar importantes beneficios fiscales y de empleo, especialmente en regiones que actualmente dependen de la minería u otras industrias extractivas. Además, la infraestructura ya existente en regiones como Antofagasta, en Chile, donde se concentran importantes proyectos mineros, podría ser aprovechada para el desarrollo de la industria del hidrógeno, potenciando así las sinergias entre ambos sectores.

Por último, la exploración de energías alternativas es fundamental para diversificar la matriz energética y garantizar la seguridad energética a largo plazo [12]. La disponibilidad de

fuentes autóctonas de hidrógeno podría reducir la dependencia de importaciones y asegurar un suministro estable y sostenible de energía [13]. Este proyecto no solo contribuirá a dar un paso para buscar una implementación en la medición viable de hidrógeno como futura energía alternativa en el país, sino que también sentará las bases para el desarrollo de una nueva industria que podría transformar la economía de las regiones donde se encuentren estos recursos.

1.8 Viabilidad

El hidrógeno blanco es una fuente de energía alternativa, renovable y limpia. tiene un gran potencial para reducir la dependencia de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que lo convierte en una opción energética de bajo costo para el desarrollo sostenible diversificando las fuentes energéticas del país.

Este proyecto tiene como objetivo la creación de una estación de bajo costo para medir la concentración de hidrógeno natural, un recurso valioso que se obtendrá mediante procesos químicos ya sea usando una celda de hidrógeno u obtención por medios adicionales. Para el desarrollo de este proyecto se tendrá en cuenta el aspecto económico y técnico, buscando una alternativa segura y accesible para su implementación futura buscando que el proyecto sea escalable para futuras investigaciones.

Los materiales necesarios para desarrollar un prototipo de una estación de medición como sensores de variables, microcontroladores y módulos de comunicación inalámbrica, están disponibles en el mercado. Los ingenieros electrónicos son capaces de plantear, diseñar y probar circuitos electrónicos para que se ajusten a las necesidades solicitadas; gracias a los laboratorios de la universidad que cuentan con recursos necesarios para llevar a cabo pruebas y prototipos.

En términos financieros, el proyecto cuenta con recursos por parte de los investigadores y la universidad, además del uso de software como Proteus para los diseños de las placas para la estación, adicionalmente para la integración de IoT se utilizarán softwares que permitan la comunicación de datos del sensor por vía internet.

La Universidad CESMAG por su parte brinda espacios, instrumentos y asesorías con docentes especializados en desarrollo de circuitos y software, por estas razones el proyecto puede iniciar como un prototipo de laboratorio que contribuirá a futuras investigaciones que ayuden a diversificar la matriz energética, concluyendo que el proyecto es viable.

1.9 Delimitación

El presente proyecto se desarrollará utilizando softwares como Proteus, Arduino y otros softwares de uso libre los cuales permitan desarrollar el software, diseño y esquemáticos de la estación.

El diseño de la estación de medición de hidrógeno se llevará a cabo considerando los requisitos y validación del diseño con criterios de confiabilidad, exactitud y costo; se hará un estudio de sensores de medición para comparar sus valores como el tiempo de respuesta, costo, precisión, vida útil, preferiblemente que sea entre un año o año y medio, que sea de comunicación digital, su tipo de comunicación y fácil obtención de datos.

Este proyecto se centrará en la cuantificación de los niveles de hidrógeno blanco obtenido por medio de la obtención de gas hidrógeno ya sea usando una celda de hidrógeno, obteniéndolo mediante una pipeta de hidrógeno o por medio de los recursos de la universidad y sus convenios con otras universidades u entidades, en un espacio monitoreado de laboratorio donde se contará con condiciones favorables tanto de conectividad, energía y conocimiento de la concentración de hidrógeno para analizar.

Se implementarán algoritmos de código abierto con softwares Open Source (OS) que permitan la integración del prototipo con la plataforma IoT para su toma de datos, donde la conexión a internet es estable en todo momento.

El proyecto se llevará a cabo en un tiempo estimado de 10 meses abarcando desde las propuestas de diseño inicial hasta el montaje y prueba de la estación en laboratorio.

No se incluirá estudios sobre el impacto ambiental a gran escala o estudios económicos que determinen la viabilidad comercial del hidrógeno en el mercado global, tampoco se realizarán pruebas de campo fuera del ambiente monitoreado de laboratorio donde la conectividad de la red en sitios remotos puede fluctuar y las concentraciones de hidrógeno en un mismo yacimiento varían por factores externos.

2. Tópicos del Marco Teórico

2.1 Antecedentes

2.1.1 Data acquisition and monitoring system framed in Industrial Internet of Things for PEM hydrogen generators

El trabajo realizado por [14] presenta la construcción y desarrollo de un sistema de adquisición y monitoreo de datos orientado a generadores de hidrógeno de tipo PEM, estructurado bajo una arquitectura IoT. El sistema integra sensores industriales de precisión para medir magnitudes importantes en el proceso de electrolisis como corriente, voltaje, presión, temperatura y caudal del hidrógeno, las cuales son recolectadas mediante un controlador PLC encargado de adquirir y registrar los datos provenientes del electrolizador. Su integración a la base de datos se logra mediante Node-RED el cual gestiona la comunicación entre el PLC y la base de datos MariaDB para visualizar los valores procesados en tiempo real a través de una Dashboard web diseñada en Grafana para realizar un análisis orientado al diagnóstico y la operación del equipo. A diferencia del enfoque del trabajo existente, este proyecto se centrará exclusivamente en la detección y monitoreo remoto de concentraciones de hidrógeno, integrando sensores de bajo costo y un sistema IoT orientado a la supervisión dentro de un entorno de laboratorio monitoreado.

2.1.2 Low-Cost IoT-Based Sensor System: A Case Study on Harsh Environmental Monitoring

El trabajo realizado por [15] presenta el diseño y pruebas de un sistema de múltiples sensores orientado al monitoreo ambiental en entornos hostiles, tomando como escenario de estudio las instalaciones de almacenamiento de residuos nucleares. El sistema utiliza componentes comerciales para integrar sensores capaces de medir concentraciones de hidrógeno, temperatura, humedad y presión, todo ello dentro de una arquitectura IoT. En el proyecto se integraron además un sistema de gestión de energía por medio de paneles solares, baterías recargables para operar durante largos periodos.

El sistema propuesto se comunica mediante wifi hacia la plataforma thingSpeak, donde se almacenan y visualizan los datos en tiempo real, los sensores se calibran mediante modelos no lineales basados en la sensibilidad del sensor de hidrógeno MQ-8 para obtener estimaciones cualitativas de la concentración del hidrógeno considerando la influencia de parámetros ambientales en las lecturas. A diferencia de este trabajo, el proyecto propuesto se centra en transmitir información hacia una base de datos tanto local como remota para su aseguramiento asíncrono de datos conservando en ambos casos el muestreo de datos por medio de una pantalla LCD o por medio de una Dashboard.

2.1.3 **Diseño e implementación de un sistema de monitoreo de gas Hidrógeno para el grupo de investigación Estudio de sistemas contaminantes**

El trabajo presentado por [16] presenta el diseño e implementación de un sistema electrónico de monitoreo de hidrógeno orientado al análisis en una celda electrolítica. El sistema integra sensores especializados para medir variables como la concentración porcentual de hidrógeno, el flujo volumétrico y la corriente eléctrica producida durante la electrolisis. Las mediciones adquiridas se envían a una placa Arduino Uno que procesa las señales y las transmite mediante comunicación serial a una aplicación de software desarrollada para visualizar en tiempo real y registrar los datos para su análisis.

El sensor usado fue el HPS-100 de AMS, el cual usa el principio de conductividad térmica para determinar la concentración de hidrógeno en un rango de 0-100% integrando la comunicación CAN, implementando sensores de corriente y presión diferencia que permiten caracterizar el comportamiento del hidrógeno generado y las condiciones operativas de la celda.

El proyecto culmina en un sistema llamado MHYDROS, el cual da mediciones en tiempo real, visualización gráfica, almacenamiento de datos y una interfaz de uso sencillo. Este sistema se propone como una alternativa económica y adaptable frente a los equipos comerciales, los cuales presentan altos costos y limitaciones de disponibilidad en el contexto nacional. A diferencia del trabajo existente, el presente proyecto se centrará exclusivamente en la detección y monitoreo de hidrógeno junto con parámetros de ambiente monitoreados en un laboratorio mediante tecnologías IoT para la transmisión, visualización y almacenamiento de datos.

2.1.4 Implementación de una Red IoT para la Caracterización y Monitoreo de un generador de hidrógeno

El trabajo desarrollado por [17] aborda la implementación de una red de sensores basados en la arquitectura IoT desplegados sobre un generador de hidrógeno automotriz, con el objetivo de obtener mediciones en tiempo real de las variables físicas del dispositivo. El sistema utiliza sensores análogos para medir la concentración del hidrógeno, la densidad de corriente que ingresa al reactor y el cambio de temperatura desde el encendido hasta el apagado del generador.

Las pruebas se llevaron a cabo en dos escenarios: uno con variables ambientales controladas y sin factores externos de interferencia y otro real instalado dentro del capó de un vehículo, en conclusión, el estudio demuestra la viabilidad de integrar una solución de visualización de un generador de hidrógeno facilitando la caracterización de sus variables medidas. A diferencia del anterior proyecto este se orienta a obtener lecturas de hidrógeno en un ambiente monitoreado, con una estructura que podrá tener visualización avanzada tanto remoto como local.

2.1.5 Development of a Real-Time Gas Concentration Measurement System Using Internet of Things-Based Monitoring

El trabajo realizado por [18] aborda el desarrollo de un sistema de medición de concentración de gases contaminantes en el aire, implementando un sitio web para monitorear las mediciones de los sensores donde son observables en tiempo real presentados en forma de gráfica, además de contar con luces indicadoras de determinan si el gas del ambiente sobrepasa los límites establecidos. En conclusión, usando el microcontrolador ESP8266 desarrolla la integración del aspecto IoT conectando los datos obtenidos con el sitio web diseñado para establecer una conexión con el sistema de monitoreo y mostrar los resultados de manera eficiente. A diferencia del trabajo existente, este proyecto se centrará únicamente en la medición de concentración de hidrógeno que será controlada en un laboratorio.

2.1.6 Electronic Monitoring System for Hydrogen Produced from the Oxidation of Human Urine (Mhydros)

El trabajo realizado por Arturo Perdomo [19] aborda el desarrollo de un sistema electrónico que monitorea el porcentaje de hidrógeno producido por un reactor que oxida la orina humana donde los electrones resultantes se usan para producir hidrógeno en equilibrio químico en conclusión usando un reactor que por medio de los sensores AMS HPS-100, ACS712-20A, AWM42150VH Y BMP180 junto con la placa de desarrollo Arduino uno y Seeeduino se obtuvieron las concentraciones del hidrógeno donde se tuvo un tiempo de respuesta de los sensores después de 6 minutos detectando porcentajes de hasta 45% , para el presente proyecto se enfocara el uso de la placa Arduino para la obtención de los datos suministrados por los sensores.

2.2 Enunciado de los Supuestos Teóricos

- **Hidrógeno**

  El hidrógeno (H2) es el elemento químico más simple y pequeño, y está formado por un solo protón y un solo electrón ver Figura 1. Por su simplicidad estructural, es el elemento más abundante del universo, presente de forma masiva en las estrellas y los planetas gaseosos [20].



Figura 1. Tomado de [21], *Símbolo del elemento químico hidrógeno*

En condiciones normales, el hidrógeno se encuentra formado por moléculas de gas diatómica, H2. Tiene un elevado valor de energía por unidad de masa (densidad energética), mucho más que los combustibles tradicionales. Sin embargo es un gas ligero, lo que no permite almacenar una cantidad másica importante en un volumen razonable [21].

Es el elemento más abundante en nuestro planeta más abundante en el sistema solar pero solo se encuentra en su forma compuesta en la Tierra por lo

tanto debe producirse a partir de moléculas que lo contengan como el agua o los hidrocarburos [22]. En condiciones estándar suele presentarse como una sustancia gaseosa incolora, inodora, insípida e inflamable cuyos vapores son más ligeros que el aire, las condiciones en las que pueden ocurrir las fases gaseosa, líquida o sólida se describen mediante tres variables de estado: presión, temperatura y volumen.

Tabla 1. Tomado de [22]. *Propiedades físicas del Hidrógeno*

Propiedad	Hidrógeno
Energía de disociación (25°C)	104.19 Kcal/mol
Potencia de ionización	15.427 eV
Densidad del sólido	0.08671 g/cm^3
Calor de fusión	28 cal/mol
Densidad del líquido	0.007099 g/cm^3 (-252.78°C)
Punto de ebullición	-252.77°C
Punto de fusión	-259.20°C
Calor de vaporización	216 cal/mol
Densidad crítica	0.0310 g/cm^3
Coeficiente de difusión	0.61 cm^2/s
Calor de combustión al agua (g)	-57.796 Kcal/mol

Proporciona, al quemarse, una energía más alta que el resto de combustibles. Las emisiones nocivas en la combustión de hidrógeno con aire en motores y turbinas resultan insignificantes. El único producto de la combustión es el agua cuando el comburente es oxigeno puro [23].

Dada la amplia gama de aplicaciones que continuamente surgen al usar al hidrógeno como un precursor alterno de energía, actualmente surgen varias formas de producción, cada vía de producción de hidrógeno presenta distintos tipos de emisión los cuales se pueden representar por rutas electroquímicas, bioquímicas, termoquímicas y fotoquímicas partiendo de la biomasa y combustibles fósiles [24];cada una siendo asignada a un color distinto por las

diferentes cantidades de emisiones de efecto invernadero y da lugar a diferentes costes de producción.

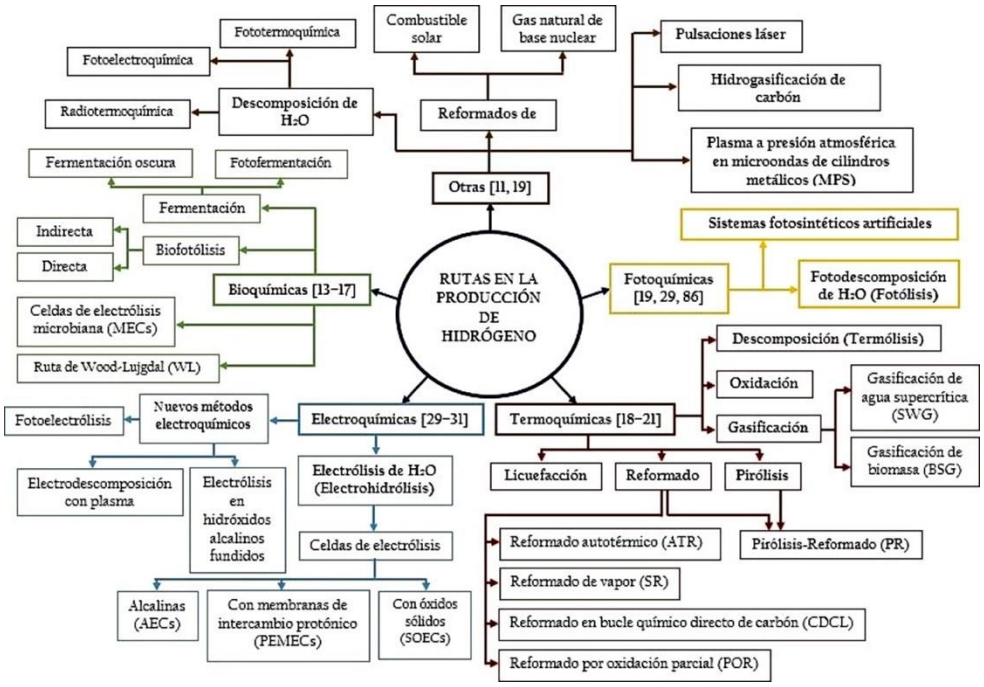


Figura 2. Tomado de [24].*Formas de producción de Hidrógeno*

Se podría accionar todo tipo de transporte, sustituyendo la gasolina del motor o con células de combustible para una propulsión eléctrica. En coches y autobuses tiene ventajas decisivas: el escape solo emite agua, funciona sin ruido ni vibraciones y ahorra energía. Las grandes compañías están experimentando automóviles con células de combustible. Pero el gran obstáculo es la falta de estaciones para repostar. En tranvías, ferrocarriles y barcos apenas están desarrolladas estas técnicas. En los barcos, las silenciosas células de combustible pueden satisfacer la energía eléctrica, permitiendo parar los generadores en puerto.

Hay una gran variedad de usos de hidrógeno en aparatos portátiles, con células de combustible recargables del tamaño de las baterías. Existen otros usos que requieren de mayor energía, como es el caso de la iluminación y señalización característica de zonas de obras.

El hidrógeno es inflamable, reacciona con el oxígeno produciendo agua. No presenta mayor peligro que otros combustibles como la gasolina. Existe el peligro de explosión si se pone en sitios cerrados sin ventilación y medidas de seguridad adicionales. Sin embargo la industria química ha utilizado el hidrógeno durante un siglo con experiencias de seguridad positivas [23].

- **Normativas de seguridad**

  Debido a que el hidrógeno este clasificado como un gas altamente inflamable, el manejo del hidrógeno para su lectura por sensores debe cumplir con los estándares de seguridad de la industria, tales como:

  - ATEX

    La normativa ATEX (ATmosphere EXplosive) está orientada a la prevención y protección frente a explosiones en ambientes donde puedan formarse mezclas en el aire de sustancias inflamables en forma de gases, vapores, niebla o polvo que tras una ignición puede propagar la combustión a la totalidad de la mezcla[25].

    El hidrógeno, un gas altamente inflamable con una elevada capacidad de penetración, se clasifica dentro del grupo IIC, el subgrupo más exigente dentro de la categoría de gases combustibles que agrupa a sustancias con el mayor riesgo de ignición, definiendo los estándares mínimos de protección para equipos instalados en zonas donde pueda generarse una atmósfera explosiva con presencia de este gas

  - IECEX

    La normativa IECEX es un sistema de certificación con el fin de garantizar la seguridad en equipos, sistemas y personal que trabajan en atmósferas explosiva. Para trabajar con hidrógeno la IECEX desarrolló una unidad de competencia denominada “Basic Knowledge of the safety of hydrogen system” [26]. la cual establece los requisitos mínimos de conocimientos para el personal que trabaja con equipos que producen, almacenan, transportan o utilizan hidrógeno en estado gaseoso o líquido dentro de áreas clasificadas como peligrosas.

  - **ISO 15916**

    Seguridad en sistemas de hidrógeno, proporciona directrices para identificar peligros, evaluar riesgos y aplicar medidas de mitigación, con enfoque especificó en componentes y configuraciones de sistemas [27].

- **ISO 19880**

  Estándar clave para infraestructura de hidrógeno[28]. Esta norma internacional establece los requisitos críticos para:

  - Diseño y seguridad de estaciones de repostaje de H2
  - Componentes de alta presión (válvulas, acoplamientos), exigiendo:
    – Pruebas de fugas ultra estrictas (<0.0001 ml/seg)
    – Resistencia a +500 ciclos de presión
    – Materiales certificados contra fragilización
  - Garantiza la seguridad en aplicaciones de movilidad (350-700 bar) y sistemas industriales.

- **Directiva de Compatibilidad Electromagnética (EMC) – 2014/30/UE**

  Aplica a equipos eléctricos y electrónicos que puedan generar o estar expuestos a perturbaciones electromagnéticas. En sistemas de hidrógeno, los sensores, PLC, actuadores eléctricos o sistemas de comunicación deben cumplir esta directiva para garantizar una operación segura e interoperabilidad [29].

- **Sensores de Gas hidrógeno**

  Los sensores de gas según definiciones de IUPAC para los sensores químicos, se describen como los dispositivos diseñados para transformar información química relacionada con la presencia y concentración del gas en una señal útil, generalmente eléctrica. En los sensores de hidrógeno esta conversión ocurre mediante un elemento receptor, que interactúa de forma específica con el gas, y un transductor, responsable de transformar esa interacción en un cambio medible[30].

  Los sensores de hidrógeno funcionan según su tipo de principio de funcionamiento que incluye sensores electroquímicos, catalíticos, semiconductores (óxido metálico), de conductividad térmica y ópticos[31].

Tabla 2. Tomada de [31]*. Tipos de sensores de hidrógeno*

Tipo de sensor	Subtipo	Mecanismo de detección	Limitaciones

Combustión catalítica	Sensores catalíticos, termoeléctricos, piroeléctricos.	La oxidación de H2 produce calor; se mide el cambio en la resistencia.	Requieren más consumo de energía, no son selectivos al hidrógeno
Electroquímico	Sensores amperométricos y potenciométricos	El H2 se oxida en un electrodo, generando una corriente medible.	Calibración periódica necesaria, desgaste con el tiempo, sensibilidad al CO.
Semiconductor de óxido metálico (MOS)	Sensores de óxido metálico, sensores de capa delgada.	El H2 reduce los óxidos metálicos, alterando la conductividad eléctrica.	Interferencia con la humedad y la temperatura, requiere de otros gases para operar
Conductividad Térmica	Sensores de conductividad térmica	La alta conductividad térmica del H2 afecta la disipación del calor	Sensibilidad al Helio
Sensores ópticos	Sensores tipo ópticos	La absorción o reflexión de la luz cambia en la presencia de H2	Interferencia con otros gases, requiere de un ambiente monitoreado, tiene un alto costo

- **Hidrógeno en una mezcla gaseosa**

El hidrógeno puede ocurrir como parte de una mezcla de gases, por ejemplo, cuando se libera en el aire. Puede mezclarse homogéneamente con los gases en cualquier cantidad, aunque al liberarse en inicio en una cámara o habitación cerrada, el hidrógeno se acumulara al principio en los puntos más altos del espacio antes de que se produzca una distribución uniforme mediante mezcla térmica. La cantidad de hidrógeno en una mezcla de gases se puede expresar en unidades como masa m, volumen V, presión p, o número de moles n.

Es común expresar la cantidad de un componente específico en una mezcla de gases como una fracción de la cantidad total de la mezcla. En los gases se expresa como fracción de volumen que es el componente de una mezcla dividido por la suma de los volúmenes de todos los componentes antes de la mezcla ya sea el caso de hidrógeno con oxígeno en un ambiente monitoreado. Esto equivale al número de moles del componente dividido por la suma del número de moles de cada componente en la mezcla. Esta fracción varia de 0 a 1, las fracciones de volumen se convierten generalmente en porcentajes de volumen multiplicando la fracción por 100 [32].

Para bajas concentraciones, donde la concentración de una sustancia es muy pequeña en comparación con la cantidad total de la mezcla la fracción volumétrica de un componente se expresa comúnmente en las unidades ppm (parte por millón) o ppbv (parte por billón).

Matemáticamente, los ppm se calculan con la siguiente fórmula:

$$ppm = \frac{cantidad\ de\ la\ sustancia(\ en\ unidades)}{cantidad\ total\ de\ la\ mezcla(en\ unidades)} * 10^6 \qquad (1)$$

Para convertir una concentración en ppm a porcentaje en volumen ($v\%$) dividiendo el volumen por 10000 (ppm)

$$10000\ ppm = 1\%$$

Haciendo este cálculo se puede entender que por cada porcentaje de volumen hay 10000 ppm, la cantidad de ppm se utiliza para evaluaciones de calidad y el monitoreo ambiental. Una ventaja de medir la concentración es que puede ser un indicador directo de seguridad [33].

Sin embargo, una medición de concentración de cualquier gas se realiza solo en un punto dentro de una pluma de gas por lo tanto aún puede haber concentraciones inseguras en otras partes de la pluma. La concentración a menudo se mide con sensores puntuales en unidades de ppm. Estos sensores deben entrar en contacto con el gas y medir la concentración en una sola ubicación[34].

- **Promedio**

  El promedio de una lista de datos es la expresión del valor central de un conjunto de datos. Matemáticamente, se define como la razón entre la suma de todos los datos y el número de elementos presentes en la lista [35].

$$promedio = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{2}$$

- **Error absoluto**

  se define como la diferencia positiva entre el valor real de una determinada magnitud y el valor estimado[36]

$$\varepsilon = |valor\ real - valor\ medido| \tag{3}$$

- **Exactitud**

  La exactitud indica que tan cerca está una medición del valor real o de referencia[36]**.**

$$Exactitud = \left(1 - \frac{|Xmedido - Xreal|}{Xreal}\right) * 100 \tag{4}$$

- **Varianza**

  Es una medida de dispersión que representa la variabilidad de una serie de datos respecto a su media, indicando qué tan alejados están los valores entre sí y del promedio[37].

$$S^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x}) \tag{5}$$

  Siendo

$$x_i = cada\ medición$$
$$\bar{x} = promedio$$
$$n = número\ de\ datos$$

- **Desviación estándar**

  Es una medida estadística de dispersión que indica cuánto se alejan de la media los datos respecto a su valor o promedio [37].

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

- **Corriente**

Es un rango de valores, calculado a partir de los datos de una muestra, dentro del cual se espera que se encuentre el valor verdadero de la media con un nivel de confianza determinado. Cuando la muestra es pequeña y se desconoce la desviación estándar de la población, el intervalo se calcula con la distribución t de Student, que depende del número de datos a través de sus grados de libertad (n − 1) [37].

$$IC = \bar{x} \pm t_{\alpha/2,n-1} * \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

Siendo

$$\bar{x} = promedio$$

$$S = desviación\ estándar$$

$$n = número\ de\ datos$$

$$t_{\alpha/2,n-1} = valor\ crítico\ de\ la\ distribución\ t\ de\ Student\ con\ n - 1\ grados\ de\ libertad$$

$$1 - \alpha = nivel\ de\ confianza$$

- **Corriente**

La intensidad de la corriente se basa en la potencia eléctrica resulta del producto del voltaje y la corriente

$$P = V * I \quad (8)$$

Para calcular la intensidad de la corriente la fórmula debe ser modificada en consecuencia[38].

$$I = \frac{P}{V} \quad (9)$$

- **Regresión lineal**

Se asume que la relación entre la variable independiente y la variable dependiente puede describirse mediante un modelo de regresión lineal, el cual establece una relación lineal entre dichas variables y permite predecir el valor de

una en función de la otra. Este modelo busca ajustar una línea recta que represente de la mejor manera los datos observados.

Se recoge la nube de puntos juntos con una línea teórica imaginaria de regresión. para estimar la línea teórica de regresión, debemos estimar el valor de la intersección de la línea con el eje vertical, y su pendiente[39]. Las estimaciones para estos parámetros se designan como a y b respectivamente. De este modo la línea de regresión estimada viene dada por

$$\hat{\mu}_{y|x} = a + bx \tag{10}$$

- **Coeficiente de determinación**

Tomaremos como índice de bondad de ajuste del modelo la proporción de variación explicada por el mismo; esto es, el cociente entre la suma de cuadrados explicada por el modelo y la suma de cuadrados total [39]. De esta forma, podemos hacernos una idea de cuánto explica el modelo de la realidad estudiada. Su expresión es:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^{N}(Y_i - \bar{Y})^2} \tag{11}$$

Este cociente se denomina como R^2 también denominado coeficiente de determinación.

- **Hidrógeno blanco**

También conocido como hidrógeno natural, es el hidrógeno molecular (H2) que se genera de manera espontánea en la naturaleza y que puede acumularse en el subsuelo en condiciones geológicas específicas [22]. Se produce a partir de procesos naturales como la serpentinización de rocas ultramáficas, la radiolisis del agua inducida por la desintegración radiactiva de minerales, las reacciones hidrotermales y volcánicas, la actividad biogénica y los mecanismos naturales en el interior del planeta que se dan en la corteza y el manto[40].

A diferencia de otras formas de hidrógeno clasificadas por colores, el hidrógeno blanco no requiere insumos energéticos externos para su generación, ya que se obtiene de reacciones naturales continuas.

Este hidrógeno puede encontrarse como gas libre en manantiales y emanaciones naturales, ocluido en minerales y rocas o disuelto en aguas

subterráneas dependiendo del tipo de formación geológica y de las condiciones físico-químicas de subsuelo. Además, puede presentarse en acumulaciones subterráneas asociadas a complejos ígneos, fallas profundas, volcanes o sedimentos ricos en materia orgánica[40].

- **Electrolisis**

  La electrolisis es un proceso por medio del cual se pueden separar los elementos que tiene un compuesto utilizando la electricidad. La conductividad eléctrica de las sustancias es un desplazamiento de la carga eléctrica a través de ellas. Este desplazamiento que se da en las cargas puede producirse de dos formas: por medio de un flujo de electrones y por medio de movimiento de los iones positivos y negativos llamada conductividad iónica. Algunas sustancias como sales y algunos óxidos metálicos son buenos conductores de electricidad y sufren descomposición cuando experimentan el paso de una corriente eléctrica. Es un proceso de oxidación y reducción que implican un aumento en la energía libre del sistema que requiere una fuerza externa de energía.

  La obtención de hidrógeno por este medio consiste en descomponer el agua en sus componentes básicos: hidrógeno y oxígeno. El cátodo realiza la reducción generando hidrógeno gaseoso, mientras que en el ánodo ocurre la oxidación, produciendo oxígeno, generando una reacción global:

  $$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2 2HO \rightarrow 2H_2 + O_2$$

  Resultando que por dos moles de agua resulten 2 moles de hidrógeno y un mol de oxígeno. Esta relación estequiométrica corresponde a que el volumen de hidrógeno producido sea de aproximadamente 66.6% del gas total y 33.3% de oxígeno siendo proporcional al número de moles generadas en las mismas condiciones de presión y temperatura[23].

  La electrolisis del agua resulta ineficiente por su conductividad en estado puro debe de tener algunas concentraciones de sales y algunos minerales; y se debe utilizar corriente directa durante el proceso. Permite obtener elementos químicos, se puede aplicar a agua dulce o salada obteniendo diferentes resultados. Del agua salada se obtiene cloro e hidrógeno en estado gaseoso mientras que del agua dulce se obtiene solo hidrógeno.

- **Base de datos de series temporales**

  Las series temporales son conjuntos de datos representados normalmente como una secuencia de valores de una variable, que se toman a lo largo de un periodo de tiempo determinado [41]. Estos conjuntos de datos son datos que van cambiando a lo largo del tiempo, y por ello se dispone de herramientas para guardar estos datos según ciclos de tiempo que nosotros indiquemos y así almacenarlos.

  Las bases de datos de series temporales (TSDB) se definen como sistemas específicamente para almacenar y gestionar datos organizados en función del tiempo [42]. Este tipo de bases de datos esta optimizadas para manejar series temporales cuya estructura se basa en pares de valor-marca temporal.
  Su propósito principal es gestionar grandes volúmenes de datos generados de manera continua, con grandes tasas de inserción, análisis de tendencias, detección de patrones temporales y necesidades de consultas temporales eficientes.
  Son comúnmente usadas frente a aplicaciones relacionadas con métricas de rendimiento, telemetría, sensores IoT, monitorización de infraestructura, análisis energético o seguimiento de variables ambientales donde los datos evolucionan con el tiempo.

  Dentro de las bases de datos especializadas en series temporales hay varios sistemas ampliamente usados entre ellos están:

  - InfluxDB

    Una de las TSDB más utilizadas, especialmente en aplicaciones de monitorización e IoT. Se caracteriza por su alta eficiencia en la inserción de datos, su lenguaje de consulta especializado y su capacidad para manejar grandes volúmenes de información temporal, contando con una interfaz de visualización y Dashboard integrada para visualizar en tiempo real la inserción de datos, además de contar con integración a varios softwares.

  - Prometheus

    Prometheus es una TSDB orientada principalmente a la monitorización de sistemas, métricas y servicios distribuidos. Su

arquitectura basada en la recopilación mediante Pull y su integración con entornos cloud-native permite realizar un análisis de rendimiento a de manera remota gracias a sus servidores dedicados.

- OpenTSDB

  Es una base de datos creada sobre Hbase y diseñada para gestionar cantidades masivas de series temporales. Destaca por ser escalable y por su capacidad de almacenar datos históricos en sistemas distribuidos sin comprometer la integridad ni el acceso eficiente a la información.

- **Protocolo MQTT**

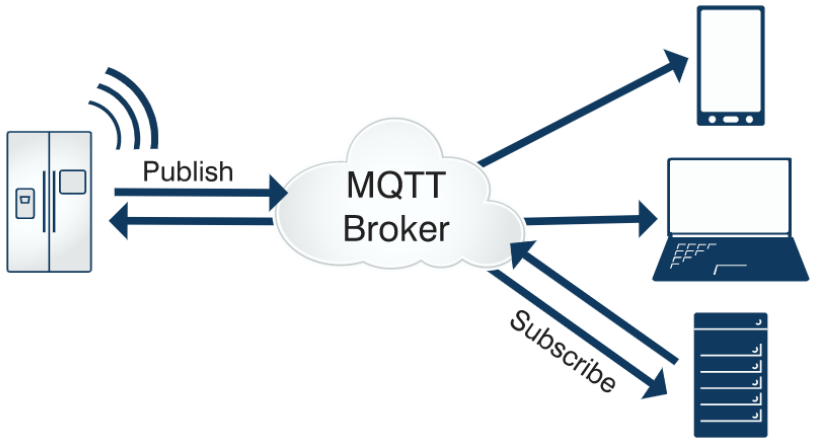


Figura 3. Tomado de[43]. *Funcionamiento protocolo MQTT*

El Message Queue Telemetry Transport (MQTT) es un protocolo de comunicación diseñado para entornos del internet de las cosas (IoT), caracterizado por ser ligero, eficiente y adecuado para dispositivos con recursos limitados. Desarrollado por IBM como un protocolo machine-to-machine y opera sobre TCP, utilizando un modelo basado en publicación-suscripción como se ve en la Figura 3.

En este modelo, los dispositivos no intercambian mensajes directamente entre sí, sino que emplean un servidor intermediario llamado bróker, encargado de recibir los mensajes publicados por los clientes y distribuirlos a todos aquellos que estén suscritos a un tema específico (topic). Estos temas se organizan en una estructura jerárquica, permitiendo un enrutamiento eficiente y flexible de la información. El protocolo está diseñado para comunicación asíncrona,

aprovechando que los clientes puedan publicar y recibir datos de manera paralela y sin dependencia continua del servidor [43].

Adiciona distintos niveles de calidad de servicio (QoS) que aseguran distintos grados de fiabilidad en la entrega de mensajes, adecuado en entornos con ancho de banda limitado o conexiones inestables. Frente a protocolos como HTTP, MQTT tiene un tamaño reducido, utilizado especialmente en sistemas con sensores y redes con restricción energética.

- **IoT**

El IoT se refiere a la interconexión de dispositivos físicos que están equipados con sensores, software y conectividad a Internet, lo que les permite comunicarse y compartir información a la nube [2], en el mercado existen diversas plataformas comerciales orientadas a la gestión de soluciones IoT, tales como Microsoft Azure IoT Hub, AWS IoT Core, Google Cloud IoT, IBM Watson IoT y Siemens MindSphere. Aunque estas soluciones ofrecen alta escalabilidad y análisis de datos remotos, suelen tener costos elevados para proyectos a baja escala y requieren de una conexión permanente a internet para su correcto funcionamiento.

En el desarrollo del proyecto se opta por sistemas locales basados en arquitectura de código abierto, esta decisión de diseño se justifica mediante:

- **Reducción de costos**

  El uso de software en su opción libre y de código abierto elimina los costos recurrentes de licencias y subscripciones en la nube que exigen las plataformas comerciales.

- **Adaptación al tamaño del proyecto**

  Al ser la primera versión del proyecto se necesita tener más libertades para experimentar con el manejo de datos garantizando comunicación con la estación, por lo que para optimizar gastos en plataformas IoT se opta por la versión gratuita y local de los programas.

- **Flexibilidad y escalabilidad**

La mayoría de herramientas IoT presentan su versión local gratuita y su versión de paga en la nube, permitiendo una visualización total del flujo de información, conectividad con más de una herramienta para el manejo de información y organización en bases de datos y adaptación a interfaces gráficas para ver la información en tiempo real, con la posibilidad de cambiar la estructura a la nube, sin realizar grandes cambios entre versiones.

- **Herramientas de visualización**

  Las herramientas de visualización o Dashboard, se definen como aplicaciones, plataformas o software diseñados para representar información de forma gráfica, con el objetivo de facilitar la comprensión, el análisis y la interpretación de grandes volúmenes de datos. Mediante el uso de gráficos comunes, como diagramas, gráficas, infografías e incluso animaciones. Estas pantallas visuales de información comunican relaciones de datos complejas a una manera más fácil de entender [44].

  Estas herramientas pueden clasificarse según su propósito como visualización exploratoria, explicativa o según su nivel tecnológico, abarcando desde bibliotecas de programación (como Matplotlib, D3.js o Plotly) hasta plataformas completas de análisis y creación de paneles (como Grafana, Power BI o Tableau). Usadas generalmente en aplicaciones donde se generan datos de forma continua, como sistemas de sensores, redes industriales o bases de datos de series temporales.

- **ESP32 Conectividad**

  El ESP32 es un microcontrolador versátil en conectividad soportando Wifi en 2.4Ghz en modos de estación, punto de acceso, incluyendo Bluetooth 4.2 compatible con Ethernet mediante módulos externos, soporta redes en malla (ESP-MESH), Protocolo MQTT, HTTP, HTTPS entre otros contando con interfaces UART, SPi y I2C para conectar sensores siendo ideal para Iot y redes de sensores [45].

  - **Capacidades de Conectividad.**

Wi-Fi: Opera en la frecuencia de 2.4 GHz, permitiendo una conexión estable a internet, ya sea en modo estación (cliente), punto de acceso (AP), o incluso configurado en redes en malla (ESP-MESH), lo que facilita la comunicación en áreas de cobertura amplia.

Bluetooth 4.2 y BLE (Bluetooth Low Energy): Su capacidad para comunicaciones de corto alcance y bajo consumo resulta útil para la sincronización rápida de datos o configuraciones locales de los sensores. MQTT, HTTP y HTTPS: Compatible con protocolos comunes de IoT, que permiten el envío seguro de datos hacia plataformas en la nube, asegurando la confiabilidad del monitoreo en tiempo real.

Interfaz Ethernet (con módulo adicional): Para aplicaciones que requieran una conexión cableada en lugar de Wi-Fi, el ESP32 permite el uso de un adaptador Ethernet, proporcionando flexibilidad de conexión.

Interfaces de Comunicación para Sensores

UART, SPI, e I²C: Estas interfaces permiten la conexión y comunicación de múltiples sensores, esencial para el procesamiento de los datos de concentración de hidrógeno.

- **Librerías de la comunidad.**

  El ecosistema del ESP32 cuenta con un amplio soporte brindado por parte de la comunidad de desarrolladores, facilita la adición de varios componentes y compatibilidad de los mismos sin necesidad de programar desde cero.

  En el entorno de Arduino IDE es posible acceder a librerías abiertas actualizadas por usuarios, estas librerías incluyen controladores definidos para sensores, comunicación, manejo de hardware

- **Entradas y salidas.**

El ESP32 cuenta con una variedad de entradas y salidas que lo hacen ideal para aplicaciones IoT. Sus pines GPIO (entrada/salida digital) permiten controlar y monitorear múltiples sensores y actuadores, mientras que los canales PWM posibilitan el ajuste actuador que necesiten control por frecuencia. En cuanto a señales analógicas, dispone de entradas ADC de 12

bits para captar datos precisos de sensores, como los de concentración de gases. También incluye salidas DAC, que convierten datos digitales a analógicos, útiles para actuadores. En comunicación, el ESP32 soporta UART, I²C y SPI, permitiendo la conexión de módulos de diversos tipos. Además, sus pines capacitivos facilitan la detección táctil, y algunos GPIO pueden permanecer activos en modo de bajo consumo, optimizando su uso en aplicaciones que requieran ahorro de energía.

3. Metodología

3.1 Diseño de Investigación

El diseño de esta investigación se clasifica como un estudio experimental de tipo comparativo y de validación instrumental frente a un patrón de referencia. Se busca evaluar la exactitud y el comportamiento de un prototipo de medición con un sensor de bajo costo al contrastarlo directamente contra un analizador industrial de alta precisión bajo las mismas condiciones de prueba.

El estudio se desarrolla en un ambiente monitoreado donde se manipula de forma intencional la concentración de la mezcla de gases suministrada, y donde las variables ambientales (temperatura, humedad, presión atmosférica y calidad del aire) se registran de forma continua para su posterior análisis. Al exponer simultáneamente ambos equipos (el prototipo y el equipo patrón) a las mismas concentraciones de hidrógeno y registrar sus respuestas, se puede establecer el error relativo, la sensibilidad y la curva de calibración del sensor de bajo costo, determinando así su viabilidad técnica.

Para el desarrollo de las pruebas, las variables de estudio se estructuran de la siguiente manera:

Variable independiente: La concentración de gas hidrógeno suministrada de forma controlada al ambiente de prueba.

Variables dependientes:

Lectura de concentración de hidrógeno registrada por el equipo analizador patrón (adoptada como valor verdadero o de referencia).

Lectura de concentración de hidrógeno registrada por la estación de medición de bajo costo (sensor ZE07-H2).

3.2 Secuencia metodológica

3.2.1 Requerimientos del sistema

La etapa inicial del proyecto se plantea el diseño de la estación, tomando en cuenta aspectos y requerimientos que se necesite en cada parte del sistema dividiéndose en hardware, software y entorno de operación, los cuales establecen las bases para obtener mediciones fiables, de fácil repetición y con potencial para que se pueda escalar el proyecto en futuras versiones.

3.2.2 Requerimientos de hardware

Los requerimientos de hardware se orientan a garantizar la operatividad, estabilidad entre módulos y precisión de los sensores y módulos. Para ello, se seleccionaron componentes de bajo consumo energético, con comunicación estándar preferiblemente digital, esto para una integración adecuada entre módulos. El hardware debe garantizar su funcionamiento estable en condiciones de laboratorio, operando en voltajes de entre 3,3V a 5V. Las lecturas de los sensores deben mantenerse entre variaciones moderadas de temperatura y humedad ambiental registradas para comparar con un equipo patrón que presente situaciones similares de variables ambientales.

La transmisión de los datos obtenidos mediante los sensores debe ser de manera estable, sin requerir de calibración constante por medio de buses de comunicación digital soportados por el ESP32 tales como el UART (Receptor-Transmisor Asíncrono Universal) y SPI (Interfaz de Periférico Serial). La estructura modular es fácilmente ampliable y con facilidad de reparación si alguna pieza se descompone.

Otro requerimiento importante es la inclusión de un medio de almacenamiento que funciona como una base de datos local, garantiza la conservación de los datos incluso ante fallos de la transmisión por Wifi o fallos de energía. El sistema debe estar adaptado para que sea portátil incorporando varias formas de tener el sistema bajo funcionamiento por medio de baterías internas que puedan recargarse, además de adicionar una pantalla de visualización que indique en todo momento valores que se estén recibiendo y enviando a la base de datos.

3.2.3 **Requerimientos de software**

El desarrollo de software se orientó a garantizar adquisición de datos, almacenamiento local, comunicación con el servidor y una visualización intuitiva de las variables. Para que la transmisión de datos sea rápida entre proyecto y servidor se usa un protocolo de mensajería ligero, preferiblemente en código abierto (Open Source), es necesario una base de datos especializada en series temporales para almacenamiento IoT, un sistema de visualización gráfica que permita analizar las mediciones remotamente tanto de la variable objetivo como es el hidrógeno y de las demás variables para determinar su estabilidad en un entorno monitoreado. Es necesario implementar rutinas de control y validación que permitan detectar el estado de los módulos conectados al ESP32 ante fallas o desconexión de estos, de la misma forma debe tener un sistema de reconexión para la conexión tanto wifi como al servidor en caso de pérdida de conexión. Además, se establece la compatibilidad, del servidor para que el sistema pueda ser escalable frente a futuras investigaciones.

3.2.4 **Requerimientos del entorno de operación**

Es necesario contar con un espacio monitoreado de laboratorio que asegure condiciones adecuadas para trabajar con el hidrógeno. Dado que el hidrógeno es un gas muy inflamable se deben establecer parámetros que permitan realizar pruebas garantizando su seguridad de uso y que los resultados obtenidos puedan ser reproducibles. El sistema debe estar en un espacio con ventilación para evitar acumulaciones del gas.

Se requiere de una red wifi estable que facilite la transmisión de datos entre el dispositivo de medición y el servidor, así como un suministro de energía confiable que evite presentar daños ante posibles sobrecargas de energía. Estas condiciones son esenciales para que el prototipo pueda ser evaluado en términos de exactitud y repetitividad de las mediciones.

3.2.5 **Seleccionar y caracterizar el sensor de hidrógeno adecuado para el sistema de monitoreo**

El diseño de la estación de medición comienza con la búsqueda y análisis comparativo de sensores de hidrógeno disponibles en el mercado priorizando aquellos con bajo costo, alta disponibilidad y compatibilidad con sistemas como el ESP32.

Para la selección se toma en cuenta aspectos como:

- Tipo de comunicación digital (UART, I2C, CAN)
- Rango de medición
- precisión
- Tiempo de respuesta
- Vida útil

Con el sensor seleccionado, se realiza una caracterización inicial comprobando su comportamiento frente a las curvas de operación especificadas dadas por el fabricante.

3.2.6 **Integración de variables ambientales para garantizar repetitividad**

Las variables ambientales pueden influir en la respuesta del sensor de hidrógeno. Por ello para tener un ambiente monitoreado se incorporan sensores de temperatura, humedad y presión, con el fin de analizar y compensar posibles desviaciones en la señal.

La temperatura puede modificar la actividad electroquímica del material sensible, la humedad afecta la difusión del gas y la presión influye en la relación ppm/volumen.

Se diseña un sistema de captación o absorción para dirigir el hidrógeno hacia el sensor principal, ajustando el flujo según las especificaciones del sensor para optimizar la detección mediante un entorno que permita el ingreso controlado de hidrógeno hacia el sensor.

3.2.7 **Diseño de la estación remota**

En esta parte se define la estructura física y electrónica de la estación remota, incluyendo su encapsulado, posición de los sensores, fuente de alimentación, otros módulos para poder realizar visualización de los datos de forma local. Paralelamente, se implementa un esquema de almacenamiento local y remoto donde cada registro queda marcado temporalmente para asegurar el seguimiento en la base de datos local.

3.2.8 **Configuración de la recepción y transmisión de datos**

En esta etapa se establece el desarrollo del firmware encargado de la comunicación entre la estación de medición y el servicio de comunicación MQTT para enviar los datos al servidor. Se configura el ESP32 para recibir las lecturas provenientes de los sensores de hidrógeno y de variables ambientales, procesarlas y transmitirlas eficientemente hacia el servidor MQTT

configurando la definición de tópico, tiempo de envío, estructura del payload y pruebas de conectividad.

Los módulos de recepción local se configuran para obtener una visualización en tiempo real en una pantalla LCD donde se mostrarán los valores de los datos obtenidos que posteriormente se guardarán en un archivo *.CSV en la memoria local.

3.2.9 Diseño de software, almacenamiento y visualización en línea

Se instala y configura el software en el servidor local encargado de recibir los datos provenientes de la estación por MQTT para que inicien de manera autónoma apenas inicie el equipo, donde los datos se procesara y dirigirán hacia otros softwares encargados de almacenar y mostrar de manera visual los datos recolectados para su análisis posterior.

3.2.10 Implementar el sistema de monitoreo local y remoto mediante arquitectura IoT

Se integra la arquitectura IoT del sistema asegurando la visualización de los datos tanto remota como local. Para la integración de datos, se utiliza un microcontrolador ESP32, que permite la transmisión de información en tiempo real a plataformas IoT por medio de conectividad Wifi. El sistema local incluye una interfaz que permite visualizar en tiempo real la concentración de hidrógeno junto con los otros parámetros ambientales directamente desde la estación mediante una pantalla LCD. Este microcontrolador procesará los datos recolectados y los enviará mediante una conexión con la plataforma IoT que permite tener el acceso remoto a las mediciones guardadas en una base de datos open Source junto con la visualización por medio de gráficas dinámicas para las variables.

3.2.11 Análisis del comportamiento de la estación de medición de hidrógeno en comparación con el equipo patrón

Antes de realizar las pruebas, es necesario preparar el prototipo asegurando que todos los componentes electrónicos, sensores, y el microcontrolador ESP32 estén correctamente conectados y funcionando, esto también incluye la conexión del sistema a la plataforma IoT para la transmisión de datos y el monitoreo en tiempo real.

Para evaluar el desempeño del sistema, se realizan pruebas experimentales variando los parámetros del entorno de laboratorio y las condiciones operativas. Se registran mediciones en

distintas concentraciones de hidrógeno, comparando las variaciones con respecto a los cambios en temperatura, humedad y presión.

Los datos capturados por la estación se analizarán en las bases de datos local y remota para evaluar la confiabilidad de la transmisión. Posteriormente, la información recolectada en la plataforma IoT se comparará en tiempo real frente al sensor patrón. Este análisis permitirá evaluar las diferencias en las gráficas de comportamiento durante lecturas normales y ante variaciones en el flujo de gas, sometiendo la estación a diversas condiciones adversas.

3.3 Universo y muestra

3.3.1 Universo

El universo del presente proyecto está constituido por la totalidad de las mediciones de concentración de hidrógeno que pueden ser registradas por la estación de medición de bajo costo y el equipo patrón.

3.3.2 Muestra

La muestra del presente proyecto es de tipo no probabilística e intencional, y está conformada por un total de 16 lecturas de concentración de hidrógeno. Esta cantidad corresponde a los registros obtenidos al evaluar 4 niveles diferentes de concentración de gas, realizando 4 pruebas experimentales para cada nivel. este tamaño muestral (n=16) es pequeño debido al número limitado de pruebas que se pueden realizar generalizando la estadística de datos, aunque resulta representativo para establecer la viabilidad inicial y el cálculo de la curva de calibración del prototipo frente al equipo patrón.

3.4 Técnicas de recolección de información

Las técnicas de recolección de información de esta investigación se basan en la detección de hidrógeno con sensores que nos permitan dar un enfoque entre la relación de precisión y coste a diferentes concentraciones de hidrógeno en un ambiente monitoreado. Con programas visuales como una Dashboard que permita ver y analizar los datos registrados por la base de datos, monitoreando el comportamiento de los datos y rendimiento de la estación de medición de hidrógeno.

3.5 Instrumentos de recolección de información

La presente investigación se basa en la observación directa, donde los datos recolectados se hacen por medio de una base de datos local del ESP32 en una micro SD y una base de datos remota, usando IoT para realizar el monitoreo en tiempo real por medio de una Dashboard, para el análisis de datos donde se realiza el procesamiento y representación gráfica de los mismos.

4. Diseño de Software y Hardware

4.1 Diseño de ambiente monitoreado

Para evaluar la exactitud del sensor de hidrógeno de bajo costo integrado en la estación, se diseñó un sistema cerrado capaz de controlar y reproducir las concentraciones conocidas de hidrógeno en condiciones ambientales estables.



Figura 4. Fuente propia Control y purificación del hidrógeno

El suministro de hidrógeno se realiza mediante un manómetro y una válvula reguladora de presión, la cual permite liberar cantidades en base a la presión marcada. El flujo resultante se conduce a través de un filtro de humedad como se ve en la Figura 4, con el fin de obtener hidrógeno de la mayor pureza posible antes de ingresar en la etapa de mezcla.

El control de la concentración de hidrógeno se logra diluyéndolo con otro gas como el nitrógeno, un gas inerte que no reacciona químicamente con el hidrógeno ni interfiere con las mediciones de los sensores. Esta dilución permite reducir que se tengan porcentajes controlados de la mezcla para evitar que el sensor de bajo coste se sature para la toma de datos de ambos sensores.



Figura 5. Fuente propia. Conexión y mezcla de gases

El hidrógeno se transporta mediante una manguera hasta un punto de mezcla, donde se une junto a una segunda línea con el suministro de nitrógeno. Ambas líneas se conectan a través de un acople tipo “T” donde el gas resultante será enviado a los sensores como se ve en la Figura 5.

La mezcla de gases se dirige inicialmente al sensor de hidrógeno utilizado como equipo patrón. Este sensor realiza las mediciones iniciales de concentración, estableciendo un valor confiable de referencia para cada ensayo evaluado. El rango de medición se limita a un máximo de 3% de hidrógeno, valor correspondiente al límite superior de operación del sensor de bajo costo.

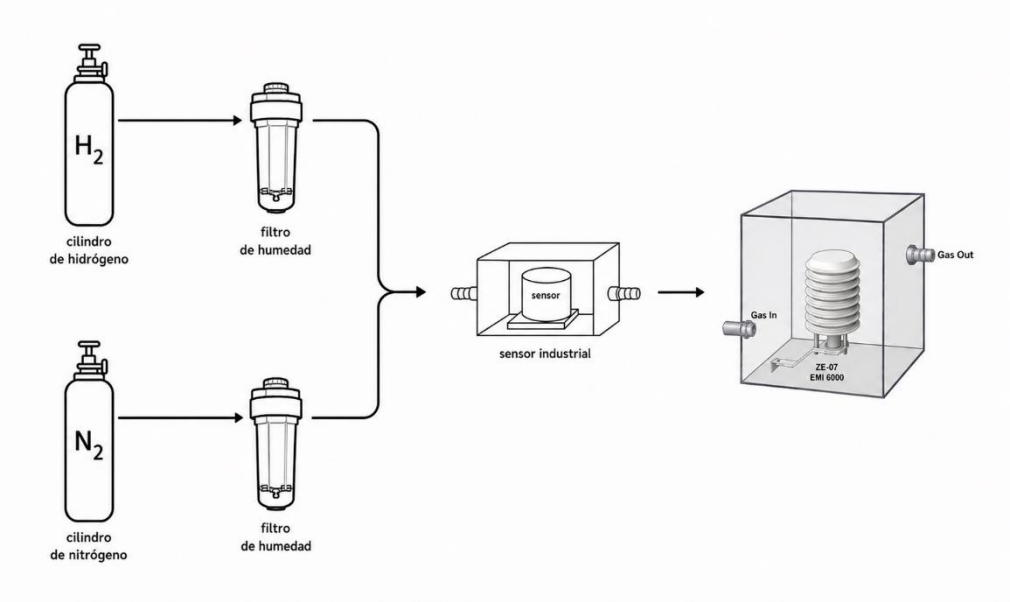


Figura 6. Fuente propia. Esquema de ruta de gases para la estación de hidrógeno

Una vez estabilizada la medición dentro del rango del rango de 0% a 3 % de hidrógeno, se procede a realizar un análisis comparativo entre los registros obtenidos por ambos sensores, expuestas de manera secuencial a la mezcla como se ve en la Figura 6.

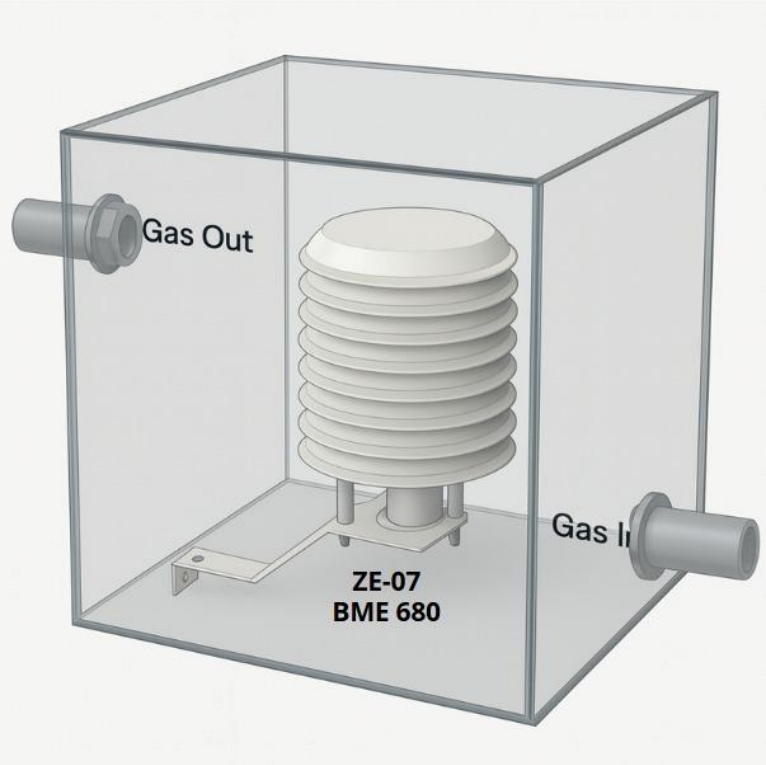


Figura 7. Fuente propia. Diseño de la cámara de pruebas

El diseño del ambiente monitoreado consideró la baja densidad del hidrógeno, característica que facilita su filtración a través de materiales permeables. Para monitorear las variables ambientales, el sistema se encapsuló en una cámara con una entrada y una salida que garantizan el flujo constante de gas y evitan su acumulación. En el interior de esta cámara se alojan el sensor de bajo costo y el sensor de variables ambientales como esta en la Figura 7. Finalmente, en este espacio se ejecutarán los ciclos repetitivos de llenado y purga necesarios para la evaluación comparativa.

4.2 Diseño de la estación de medición de hidrógeno

4.2.1 Equipo patrón

Para el desarrollo de la presente investigación y con el fin de comprobar la exactitud de un equipo de menor costo, se requiere de un equipo patrón que garantice confiabilidad en las mediciones y permita evaluar el margen de error entre ambos sensores.



Figura 8. Tomado de [46]. *Sensor NEO986HT*

Como equipo patrón se utilizó un sensor de detección de hidrógeno modelo NEO986HT-ATEX, facilitado por la universidad de Nariño (UDENAR). Este dispositivo funciona como referencia principal para la medición de la concentración de hidrógeno, dado que se trata de un sensor de uso industrial, fabricado bajo pedido, que ofrece alta precisión y estabilidad en sus mediciones utilizado en el proyecto MHYDROS para mediciones de hidrógeno.

El sensor NEO986HT-ATEX permite medir concentraciones de hidrógeno en un rango desde 0 hasta 100% vol. Su unidad de procesamiento interna convierte la señal del sensor en mensajes digitales mediante protocolos CAN 2.0 y Modbus RTU sobre RS485, ofreciendo también salidas analógicas (0-10V o 4-20 mA). Este equipo incluye compensación automática de temperatura, humedad y presión [46]. Además, destaca por su precisión de $\pm$ 0.3% vol. Y un tiempo de respuesta inferior a 5 segundos.

El sensor opera en un amplio rango de condiciones ambientales, soportando temperaturas desde -40°C hasta 120°C, presiones de entre 0.6 hasta 6 bar y niveles de humedad total en el ambiente sin condensación.

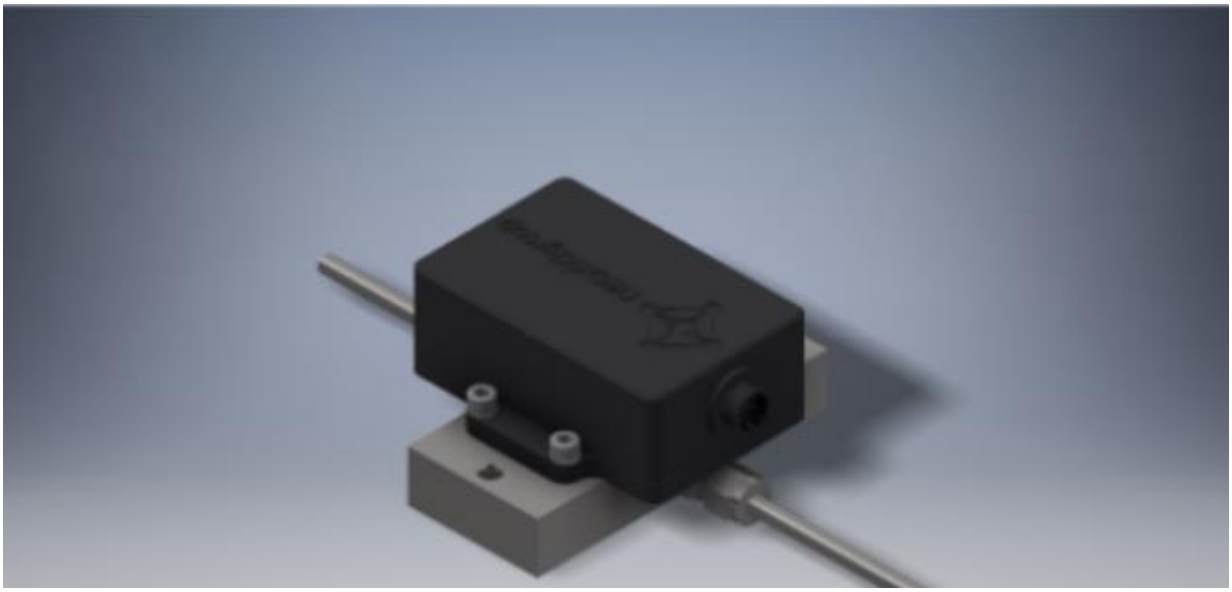


Figura 9. Tomado de [46]. *Ingreso del gas hidrógeno por el sensor NEO986HT*

El suministro de hidrógeno hacia el sensor se realiza mediante mangueras admitiendo diversas formas de colocar el sensor. En la implementación del sistema MHYDROS, este sensor fue integrado sobre una base de acrílico diseñada para conducir el flujo de hidrógeno a través del sensor. Junto con un software desarrollado en Python que incorpora una interfaz gráfica para la visualización de datos en tiempo real de la concentración.

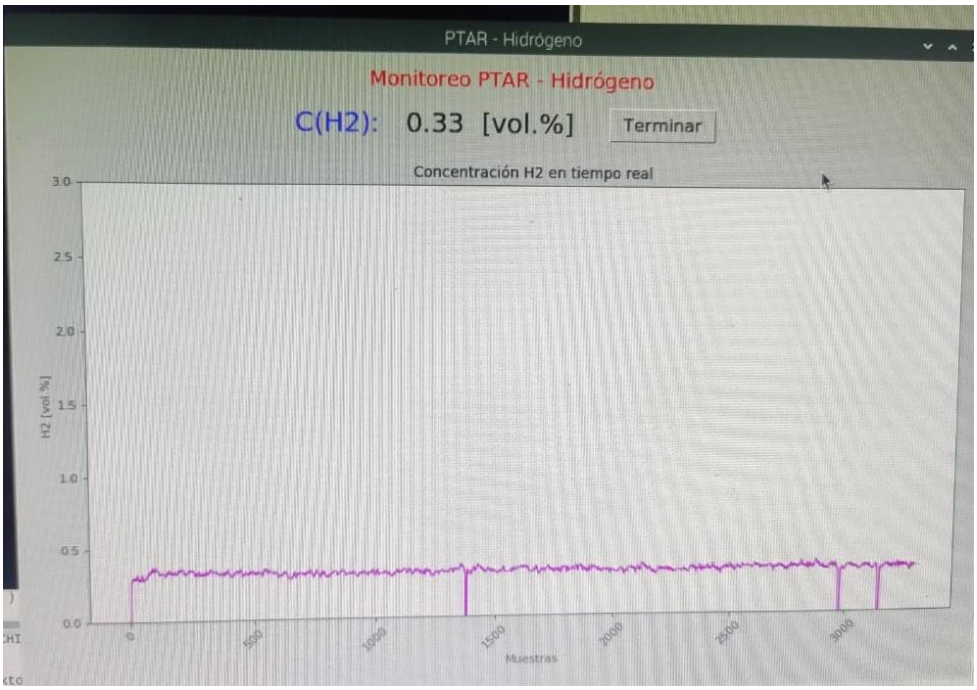


Figura 10. Fuente propia. Gráfica de valores del sistema MHYDROS.

Los datos obtenidos mediante este sensor se visualizan a través de un monitor conectado a la estación central, cuya interfaz se muestra en la Figura 10.

4.2.2 **Selección del sensor**

Se evaluaron distintas alternativas para la selección del sensor de hidrógeno, considerando aspectos como costo, disponibilidad en el mercado, vida útil, rango de medición, resolución, tiempo de respuesta y protocolo de comunicación, dando prioridad a aquellos sensores con comunicación digital, por su facilidad de integración y uso.

Tabla 3. Fuente propia. Posibles sensores

Sensor	Rango de medición	Resolución	Tiempo de vida medio	Tiempo de respuesta (T90)	Voltaje de alimentación	Protocolo de comunicación	Característica
ZE610-H2	0-5000 ppm	10 ppm	3-5 años	≤60s (T90)	5V-12V	UART/DAC (0.4V-2V)	alta precisión, pero baja

							disponibilidad en el mercado
ZE07-H2	0-30000 ppm	50 ppm	3-5 años	≤60s (T90)	5V-12V	DAC/UART (TTL nivel eléctrico 3V)	Mayor rango y tiempo de respuesta corto
ZE03-H2	0-1000 ppm	1 ppm	2 años	≤120s	5V±0.1V	UART (TTL nivel eléctrico 3V)	gran precisión, pero con rango limitado
H2 intellisense Slim	0-1000 ppm	10 ppm	4-5 años	T20 a T90	5V-24V	4-20mA, CAN (29-bit), RS485	Tiempo de respuesta más rápido

El ZE610-H2 es un sensor electroquímico que emplea el principio de detección electroquímica para identificar hidrógeno en el aire, característica que le confiere alta selectividad y estabilidad. Se trata de un sensor de bajo consumo, adecuado para las necesidades del proyecto, que además cuenta con compensación de temperatura y salida lineal integrada, aunque presentaba un rango de medición adecuado y una muy buena resolución, su limitada disponibilidad en el mercado impidió su adquisición.

Como segunda alternativa se consideró el sensor electroquímico ZE07-H2, el cual comparte características similares con el ZE610-H2, a excepción de su rango de medición de concentración, mayor en este caso, aunque con una resolución inferior de 50 ppm. Este sensor presenta un precio más accesible, buena disponibilidad en el mercado y una interfaz de comunicación UART, que permite la lectura digital sin necesidad de circuitos de acondicionamiento ni etapas de calibración externas. Debido a estas ventajas se decidió usar el ZE07-H2 como elemento principal para la detección de hidrógeno en la estación.

4.2.3 Sensor de Hidrógeno ZE07-H2

El sensor ZE07-H2 es un sensor electroquímico diseñado para la detección y medición de la concentración de hidrógeno (H_2) en el aire. El dispositivo integra internamente el sensor y una unidad de acondicionamiento de señal que permite entregar la información medida mediante salidas analógica y digital, facilitando su integración en sistemas de monitoreo y control [47].
A continuación, se describen las características físicas, funcionales, eléctricas y de comunicación del sensor, así como el principio de funcionamiento y el formato de datos entregados por el dispositivo.

4.2.3.1 Características físicas

El sensor está diseñado para intercambiar y remover el sensor electroquímico de la PCB conectada a través de pines de alimentación de 5-12V sin una carcasa exterior para su protección frente a condiciones ambientales que puedan afectar a la PCB o al sensor en la Figura 11.



Figura 11. Tomado de [47]. *Partes del sensor ZE07-H2*

El conector eléctrico del sensor posee 4 pines a usar para la conexión digital de datos como se observa en la Figura 11 que corresponden a la conexión UART marcada en la Tabla 4.

Tabla 4. Tomado de [47]. *Pines de conexión del sensor ZE07-H2*

Pin	Función	Pin	Función
15	Vin (Voltaje entrada 5V-12V)	7	UART (RXD) 0-3.0V ingreso datos
5, 14	GND	8	UART (TXD) 0-3.0V salida datos

4.2.3.2 Características típicas

En la Tabla 5, se muestran las características y rangos específicos de funcionamiento del sensor.

Tabla 5. Tomado de [47]. *Características técnicas del sensor ZE07-H2*

Descripción	Valor
Gas objetivo	Gas hidrógeno (H2)
Tipo de funcionamiento	Electroquímico (reacciona con oxígeno)
Gases de interferencia	Alcohol y otros gases
Salida de datos	DAC (0.4-2V)
	Salida UART (3V)
Tiempo de calentamiento	≤ 3 minutos
Tiempo de respuesta	≤ 60 segundos
Rango de detección	0~30000 ppm (3%)
Resolución	50 ppm
Temperatura de operación	-10°C~55°C
Humedad de operación	15% RH~90% RH (sin condensación)
Temperatura de almacenaje	-10°C~55°C
Tiempo de vida	3~5 años en aire

4.2.3.3 Características eléctricas

En la Tabla 6, se presentan las características eléctricas de funcionamiento del sensor ZE07-H2.

Tabla 6. Tomado de [47]. *Características eléctricas del sensor ZE07-H2*

Descripción	Valor
Voltaje de funcionamiento	5-12V (no tiene protección contra voltaje inverso)
Consumo de corriente	< 30 mA
Tipo de salida analógica	0.4-2V
Interfaz digital	UART(TTL)
Velocidad de comunicación	9600 bps

Nivel lógico	3.3V/5V compatible

4.2.3.4 Funcionamiento

El sensor ZE07-H2 opera bajo el principio electroquímico de 3 electrodos, electrodo de trabajo, contraelectrodo y electrodo de referencia, en contacto con un electrolito, donde una gran área superficial de metal actúa como catalizador, en donde al entrar en contacto el hidrógeno con el catalizador ocurre una oxidación electrocatalítica, liberando electrones que generan una corriente eléctrica proporcional a la concentración de hidrógeno. Esta señal es acondicionada internamente mediante circuitos de amplificación y filtrado.

La señal resultante se procesa en el módulo para entregar el valor de concentración tanto de forma analógica como en forma digital, mediante tramas de datos enviadas a través de la interfaz UART.

4.2.3.5 Trama de datos generada

Cuando se utiliza la interfaz digital, el sensor ZE07-H2 transmite los datos mediante comunicación UART, con una velocidad de 9600 bps, 8 bits de datos, sin paridad y 1 bit de parada (8N1) como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Tomado de [47].*Trama de datos del sensor ZE07-H2*

Byte 0	Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7	Byte 8
Byte de inicio	Tipo de gas	Unidad	N. de decimal	Concentración (High Byte)	Concentración (Low Byte)	Rango completo (High Byte)	Rango completo (Low Byte)	Verificar suma
0xFF	H2=0x06	Ppm=0x03	0x00	0x00	0x25	0x75	0x30	0x2d

La trama de datos está compuesta por varios bytes que incluyen el encabezado, el valor de concentración del gas y un byte de verificación. El valor de concentración se transmite generalmente en ppm, codificado en formato hexadecimal, el cual debe ser convertido a decimal para su interpretación.

4.2.3.6 Cálculo de concentración de hidrógeno

El valor recibido desde el sensor corresponde directamente a la concentración de hidrógeno expresada en ppm, por lo que no requiere escalamiento adicional como se ve en la fórmula tal.

$$concentracion\ de\ Gas = High\ Byte * 256 + Low\ Byte \quad (12)$$

En esta fórmula el valor de Byte 4 y Byte 5 significan el valor decimal obtenido a partir del hexadecimal. En caso de utilizar la salida analógica, la concentración se obtiene mediante una relación lineal entre el voltaje de salida y el rango de medición del sensor.

4.2.4 Sensor de variables ambientales BME680

El sensor de variables ambientales integra en un solo componente la medición de temperatura, humedad relativa, presión barométrica y compuestos orgánicos volátiles (VOC)

Internamente, el BME680 incorpora sensores microelectromecánicos (MEMS) para presión y humedad, un sensor de temperatura integrado y un elemento sensor de gas basado en óxido metálico (MOX), el cual responde a compuestos orgánicos volátiles (VOC)[48]. La información capturada es procesada internamente y entregada a través de una interfaz de comunicación digital I²C o SPI, facilitando su integración con microcontroladores. Es un sensor de bajo consumo con una exactitud de ± 1,0 °C, ±3% en humedad y ±1 hPa en presión.

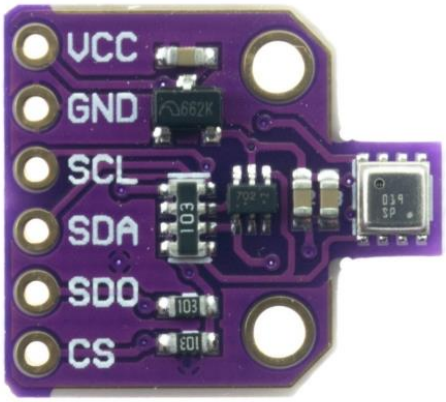


Figura 12. Tomado de [48]. *Sensor de variables ambientales BME680*

Como se ve en la Figura 12 sus pines de conexión permiten comunicación I2C. Su interfaz de comunicación I2C (Inter-Integrated Circuit) es soportada por el ESP32 gracias a la

librería existente, no presenta problemas de compatibilidad con otros componentes facilitando la conexión de varios dispositivos en el mismo bus de datos.

4.2.5 **Montaje del sensor BME680 y ZE-07-H2**

El modulo del sensor ZE07-H2 y BME680 deben estar juntos para medir en un mismo punto las variables a medir en un mismo punto, como se ve en la Figura 13.

La cápsula del sensor de hidrógeno se ubica en el punto de ingreso del hidrógeno, midiendo de forma paralela la temperatura aproximada de la zona de interés.

El conjunto está montado sobre PVC, material que protege a los sensores de la interferencia esperada, y cuenta con una carcasa meteorológica que lo cubre.

Esta sonda es portable, lo que permite cambiar su ubicación y acoplarla según las necesidades de medición, conectándose a la caja central para su funcionamiento y registro de datos.

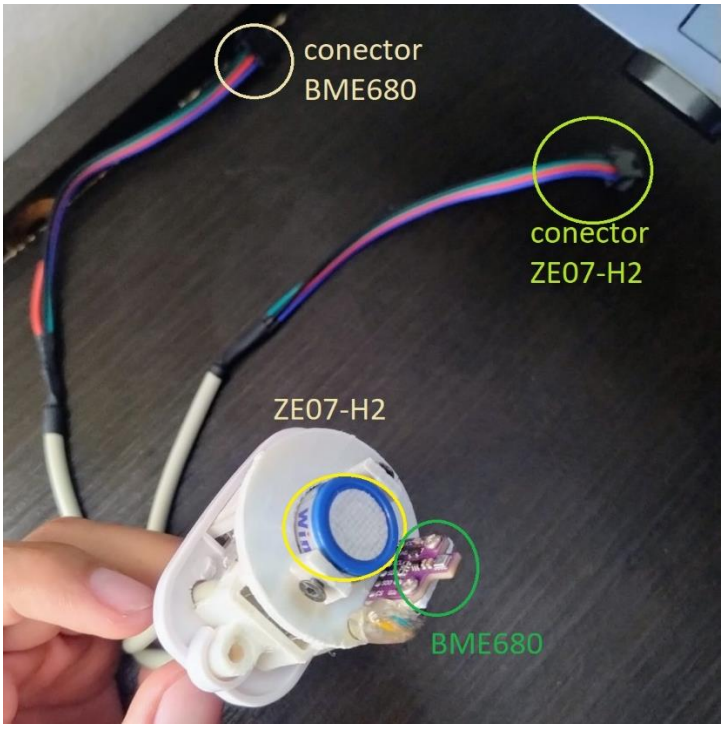


Figura 13. Fuente propia. Montaje en físico de los sensores

4.3 Hardware de la unidad central

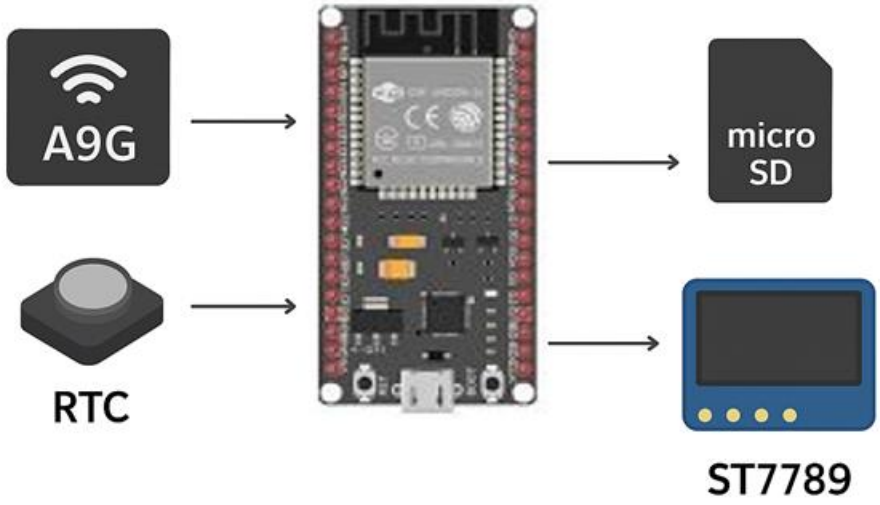


Figura 14. Fuente propia. Estructura física

Además de los sensores encargados de la detección de hidrógeno y de variables ambientales la estación integra una serie de componentes modulares que son complementarios para llevar a cabo el registro, sincronización temporal, visualización y almacenamiento de datos en tiempo real de manera local con el fin de que la estación proporciones valores en conjunto con la subida de datos al servidor.

- **Módulo GPRS A9G**

  El módulo GPRS permite establecer conexión móvil por medio de una tarjeta sim en caso de no tener una red wifi estable. Su integración permite llevarlo a entornos donde el hidrógeno se obtiene de forma natural como son las zonas volcánicas y no se dispone de una conexión a una red estable. El A9G integra capacidades de transmisión de datos, mensajes de alarma por SMS y llamadas, mediante redes GSM/GPRS a través de conexión 2G por una SimCard, lo que lo convierte en un módulo que será valioso en futuras versiones de la estación donde se busque llevar el proyecto a campo abierto.

- **Módulo microSD**

El módulo microSD permite almacenar información en una tarjeta microSD para el respaldo local de los datos, este garantiza la preservación de los datos suministrados por los sensores incluso cuando se presenten fallos en la conexión a la base de datos por internet, dando redundancia en el sistema de registro ante fallas externas.

- **Módulo RTC**

  El módulo **RTC DS3231** se utiliza para tener una referencia temporal precisa en cada registro de medición brindado por los sensores, sin importar la conexión a internet o si el sistema se apaga. Esto asegura que, aunque el sistema se apague se desconecte el módulo o se reinicie, la marca de fecha y tiempo se mantendrá para seguir mandando información consistente a la base de dato local para un seguimiento preciso de información manteniendo sincronización temporal con los registros temporales enviados a la base de datos en el servidor.

- **Pantalla LCD**

  Para la visualización local e inmediata de las variables medidas, se integra una pantalla **TFT ST7789** de 1,3 pulgadas que mostrara el inicio del sistema con la marca temporal configurada en el RTC, se indicara si está conectado al servidor, los valores de concentración de hidrógeno y parámetros ambientales junto con notificación ante un módulo dañado o mal conectado, su visualización permite que la estación sea portable sin la necesidad de utilizar algún computador para visualizar los datos de la Dashboard.

4.3.1 **Diseño de hardware**

El diseño de la estación de medición de hidrógeno se planteó como un sistema modular de fácil ensamble, mediante la integración de distintos módulos, tal como se observa en la Figura 15. El sensor de hidrógeno ZE07-H2 se conecta al ESP32 mediante comunicación UART, a través de los pines RX2 y TX2. Por su parte, el sensor de variables ambientales BME680 se conecta mediante comunicación I2C, de modo que ambos sensores emplean protocolos de comunicación digital.

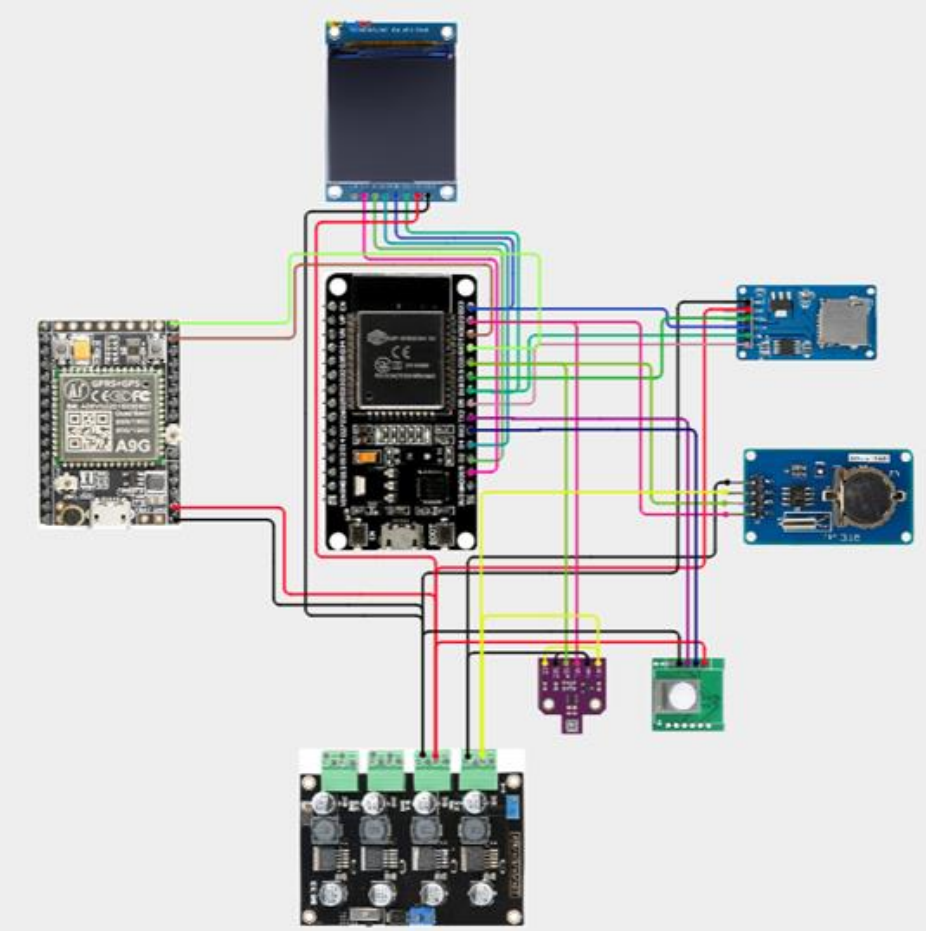


Figura 15. Fuente propia. Esquemático del diseño de componentes

El módulo RTC comparte el bus I2C con el sensor de variables ambientales, dado que cada módulo cuenta con una dirección distinta, lo que permite su operación en paralelo sin conflictos de comunicación. La memoria microSD, por su parte, utiliza comunicación SPI (Serial Peripheral Interface) a través de los pines MISO, MOSI, SCK y CS. La pantalla LCD también se conecta mediante comunicación SPI, compartiendo los pines SCK y MOSI con el módulo microSD; siendo posible debido a que cada módulo cuenta con su propio pin CS, lo que les permite compartir el mismo bus SPI sin interferencias. Finalmente, el módulo A9G se conecta mediante comunicación UART a través de los pines RX0 y TX0 del ESP32.

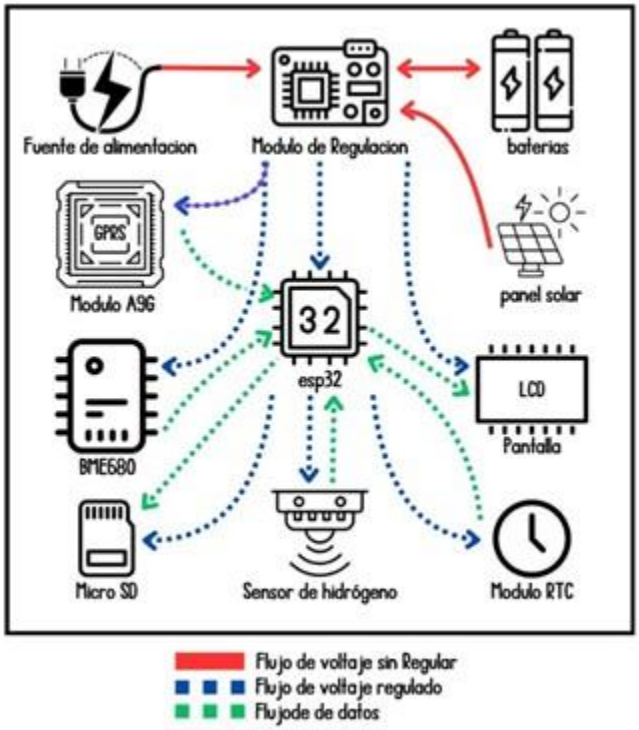


Figura 16. Fuente propia. Diseño Físico Planteado de la estación

Dado que los módulos integrados no presentan compatibilidad total de voltaje entre si, se incorporó un regulador de voltaje encargado de proporcionar los distintos niveles de salida requeridos por cada módulo, incluido el propio ESP32 como se muestra en la Figura 16.

El ESP32 constituye el punto central del sistema, encargado de la recepción de los datos provenientes de los sensores y de su transmisión al servidor. Contando con amplia compatibilidad con distintos módulos mediante el uso de librerías, así como a su capacidad de procesamiento suficiente para la integración simultanea de las distintas funciones del sistema.

4.3.2 **Montaje del hardware de la unidad central**

La unidad central del sistema está constituida por una tarjeta de desarrollo ESP32, una pantalla LCD, una fuente de alimentación de múltiples voltajes, y una placa de circuito impreso (PCB) que integra el módulo de comunicación A9G, el módulo de reloj en tiempo real (RTC) y el módulo para almacenamiento en tarjeta microSD. Todos estos componentes se encuentran montados e interconectados dentro de una carcasa impresa en 3D, la cual proporciona organización, protección mecánica y accesibilidad a los elementos del sistema.

La tarjeta ESP32 actúa como la unidad principal de procesamiento, encargándose de la adquisición de datos provenientes de los diferentes módulos, así como del control de la comunicación con el servidor. Esta se encuentra montada sobre una breakboard, lo que facilita la distribución de señales, la conexión de periféricos y la realización de futuras modificaciones del sistema sin necesidad de rediseñar el hardware.

La pantalla LCD se integra en la tapa de la carcasa, funcionando como interfaz de usuario que permite la visualización en tiempo real de las variables medidas, el estado del sistema, incluyendo posibles fallos de conexión o de comunicación de los sensores y demás información relevante durante el funcionamiento de la estación, tal como la fecha y la hora. Su conexión se realiza desde la PCB mediante un bus de comunicación por borneras hasta los pines correspondientes del ESP32, lo que permite desmontarla o reubicarla fácilmente en caso de fallo.

La alimentación del sistema se realiza mediante una fuente de voltajes múltiples, conectada a corriente alterna, la cual emplea un conversor AC-DC para entregar un voltaje estable de 12V. A partir de este voltaje, y en función de las borneras utilizadas, la fuente distribuye los niveles requeridos por el sistema a través de dos pares de borneras identificadas como 5V y 3.3V; desde la PCB se suministra posteriormente el voltaje correspondiente a cada uno de los módulos.

La PCB diseñada integra el módulo A9G, encargado de las comunicaciones inalámbricas para el envío de señales satelitales, junto con sus respectivas antenas; el módulo RTC, empleado para el registro temporal preciso de los datos; y el módulo microSD, destinado al almacenamiento local de la información generada por el sistema.

En la Figura 17 se muestra el montaje físico del hardware de la unidad central, donde se observa la disposición de los diferentes módulos dentro de la carcasa impresa en 3D, así como las conexiones eléctricas entre la ESP32, la pantalla LCD, la fuente de alimentación y la PCB de comunicación y almacenamiento.

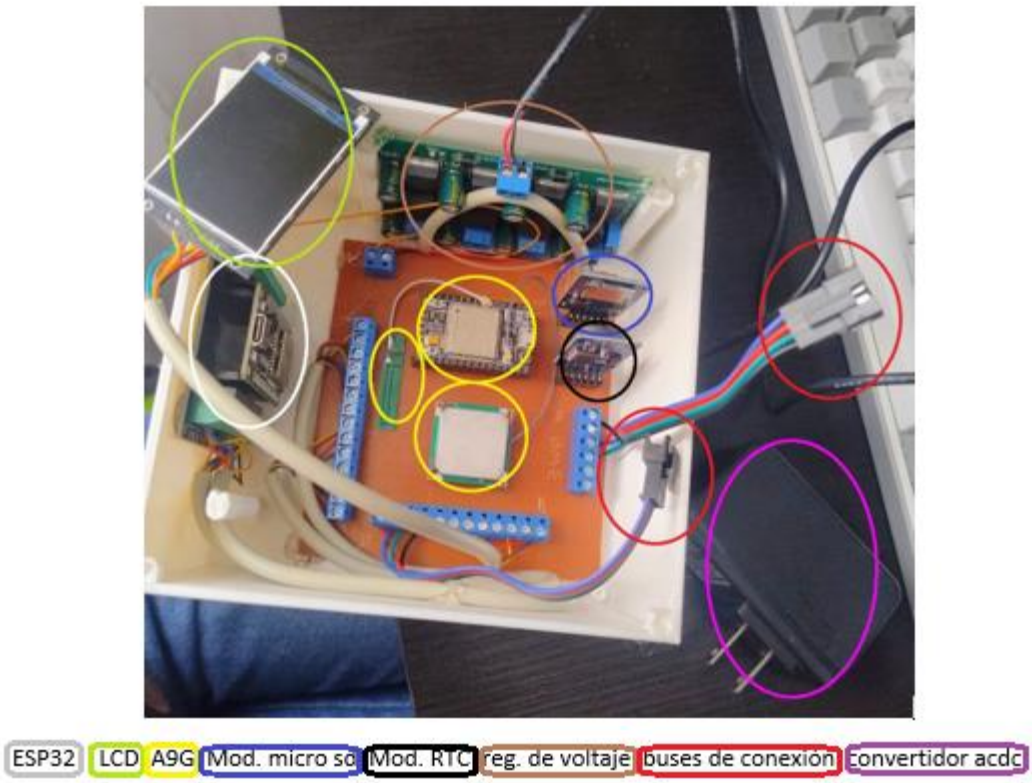


Figura 17. Fuente propia. Montaje físico de la unidad central

Para la implementación de la unidad central se llevó a cabo un montaje modular, en el cual se interconectan todos los componentes del sistema dentro de una estructura externa impresa en 3D. Dicha estructura protege los componentes electrónicos y facilita el acceso a los conectores empleados por el sistema, incluyendo la conexión de la sonda detectora de hidrógeno.

4.4 Diseño de firmware

El firmware desarrollado en el ESP32 permite inicializar la lectura y obtención de datos de los sensores, tener una marca temporal, mostrar la información mediante la pantalla LCD y transmitirla hacia el servidor local. El programa se desarrolló en el IDE de Arduino, empleando librerías existentes para la comunicación digital con los sensores y módulos que requieren los protocolos UART, SPI y I2C.

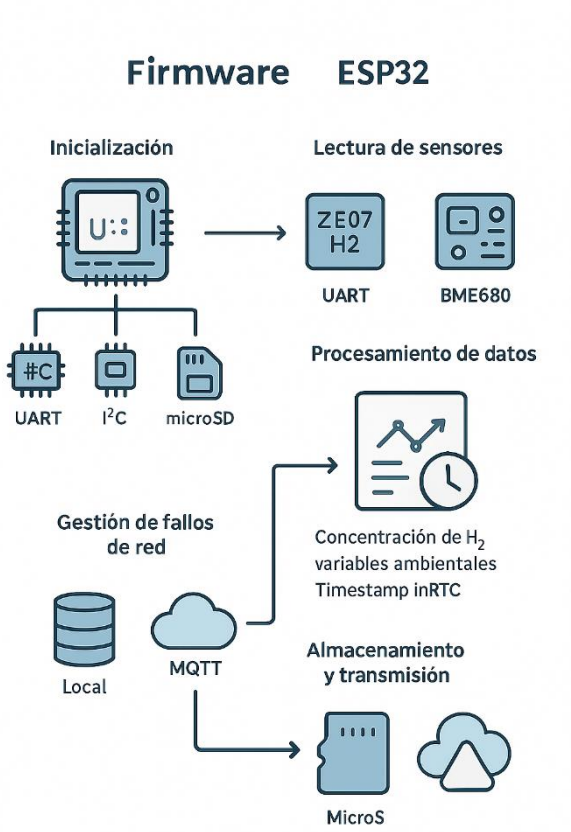


Figura 18. Fuente propia. Diagrama de código planteado del firmware

El firmware, cuyo diagrama de flujo se muestra en la Figura 18, inicia con la configuración de las comunicaciones digitales y el establecimiento de las conexiones a la red Wi-Fi y al servidor MQTT. Posteriormente, se inicializan los distintos módulos y se configura la fecha y hora del sistema, dando paso a la toma de datos de los sensores. Durante este proceso se verifica de forma continua el nivel de hidrógeno detectado: si la concentración se mantiene dentro de los rangos normales, el sistema continuo con su operación habitual; en caso de detectarse un nivel elevado, se envía automáticamente un mensaje de alerta vía SMS al número configurado por defecto, incluyendo los valores registrados en la muestra correspondiente. Los datos obtenidos se muestran en la pantalla LCD y se transmiten tanto a la base de datos remota alojada en el servidor como al almacenamiento local, junto con sus respectivas marcas temporales.

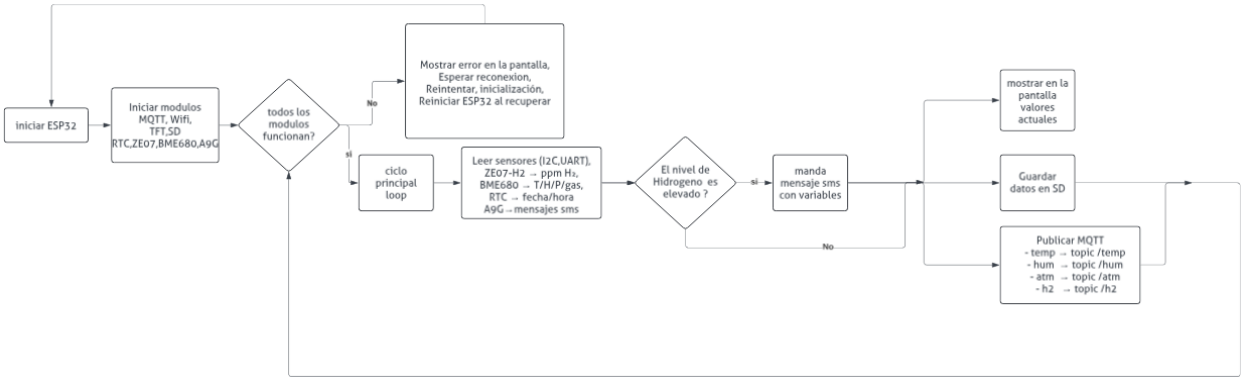


Figura 19. Fuente propia. Flujo de datos del firmware

Una vez enviados los datos, el sistema verifica que todos los componentes se mantengan en correcto funcionamiento, tal como se ve en la Figura 19, si alguno de los módulos presenta una falla o no ha sido conectado correctamente, el flujo del programa se redirige para mostrar en la pantalla un mensaje indicando el componente afectado. La obtención y envío de información a la base de datos se detiene hasta que se restablezca el correcto funcionamiento de la totalidad del hardware del sistema.

4.5 Diseño de Software

El software se plantea pensando en un desarrollo de laboratorio, su primera versión se diseña bajo un esquema local con distintos softwares Open source compatibles entre sí de los cuales estarán instalados en el computador. Previo al uso de los softwares se requiere de determinadas configuraciones iniciales en el computador que este destinado a funcionar como servidor local ejecutando los procesos en segundo plano, donde se almacenaran los datos de manera periódica recibidos por el ESP32 a través del protocolo MQTT para una comunicación ligera y eficiente. Por medio de su modelo publicación-suscripción los publicadores de datos no necesitan conocer a quienes los reciben puede haber uno o varios subscritos a los temas de interés donde se redirigen datos por variable de manera separada por tópicos a la base de datos, tomados por intervalos de tiempo regulares y ordenados cronológicamente a lo largo del tiempo, de la misma manera se muestran en intervalos regulares los datos de forma intuitiva por medio de una Dashboard.

4.5.1 **Configuración del bróker MQTT**

Se utilizo el broker MQTT Mosquitto, el cual es de código abierto y permite su instalación de manera local, actuando como servidor central e intermediario entre los dispositivos que se comunican mediante el protocolo MQTT. En este caso, los dispositivos deben estar conectados a la misma red Wi-Fi, dado que el servidor opera bajo la modalidad localhost, buscando la dirección ip de los dispositivos en esa red.

La instalación del bróker se realiza descargando el archivo instalable desde la página oficial de Eclipse Mosquitto, el cual se configura para ejecutarse como un servicio de inicio automático al encender el computador.

para que el bróker funcione correctamente se añaden las siguientes líneas de código en su archivo de configuración:

$$listener\ 1883$$

$$allow_anonymous\ true$$

Estas líneas permiten que el bróker opere a través del puerto 1883, o de cualquier otro puerto disponible que no esté siendo utilizado por otro servicio, y que cualquier dispositivo pueda conectarse y suscribirse a los tópicos publicados a través del bróker.

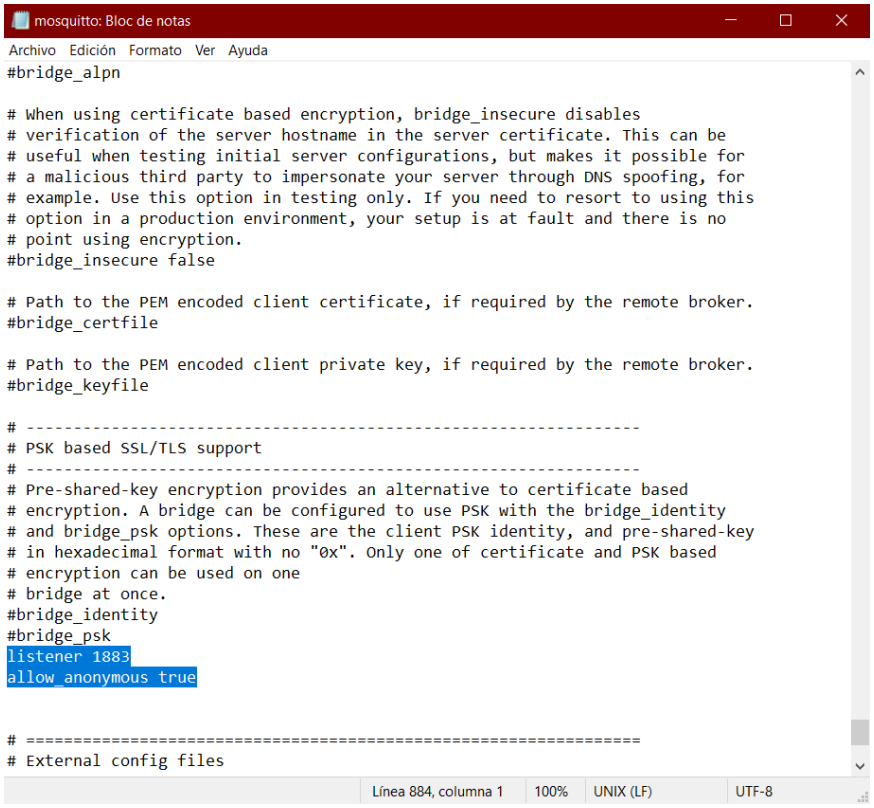


Figura 20. Fuente propia. Configuración de Mosquitto.

estas líneas de código se añaden, como se ve en la Figura 20, dentro del archivo de configuración ubicado en la carpeta de instalación del bróker. Adicionalmente en Windows Defender se agregan dos nuevas reglas: una de entrada y una de salida.

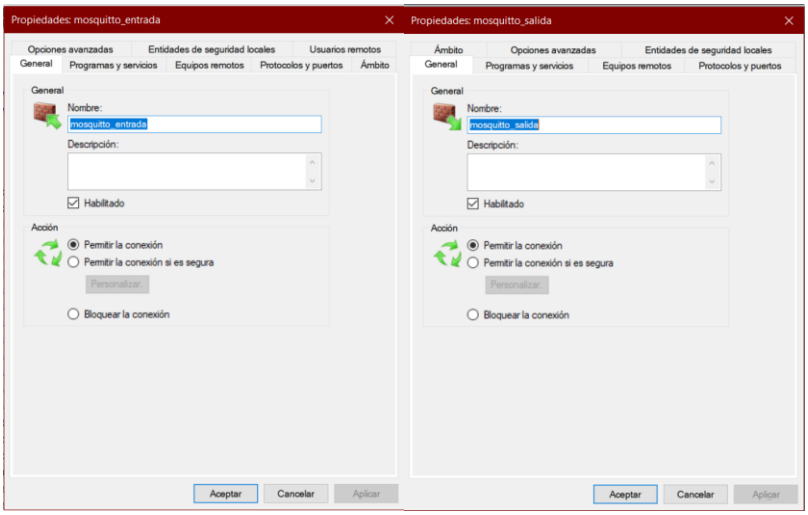


Figura 21. Fuente propia. Configuración de nuevas reglas.

En Windows Defender se configuran una regla de entrada y una regla de salida correspondientes al puerto seleccionado para el bróker, como se observa en la Figura 21. Estas

reglas permiten la conexión de otros dispositivos que requieran publicar o recibir los datos enviados al puerto y a la dirección IP asignada al computador.

4.5.2 **Configuración de InfluxDB**

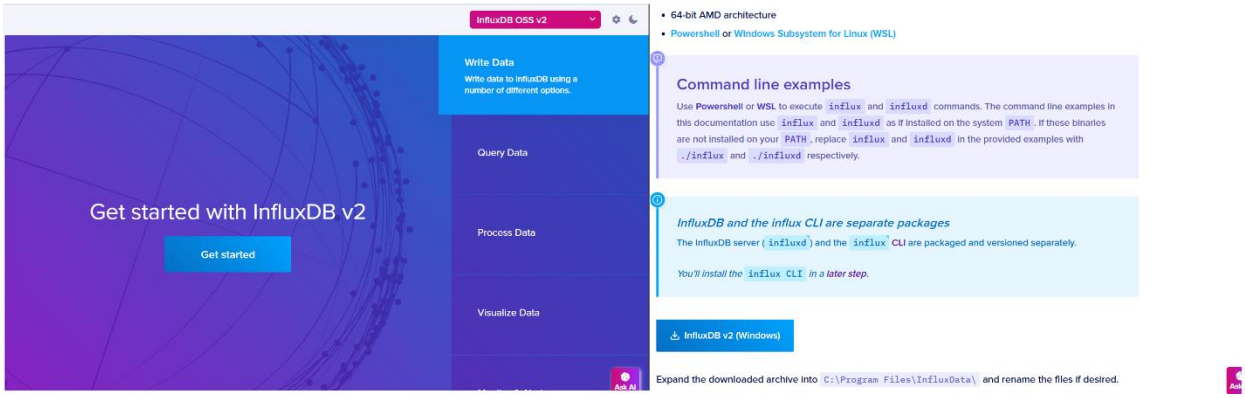


Figura 22.Fuente propia.. Documentación oficial de InfluxDB

La instalación de InfluxDB se realiza desde el sitio oficial de InfluxData, donde se selecciona la versión OSS v2, la cual funciona como un servicio local activado mediante comandos ejecutados desde la CMD (Símbolo de sistema) de Windows.

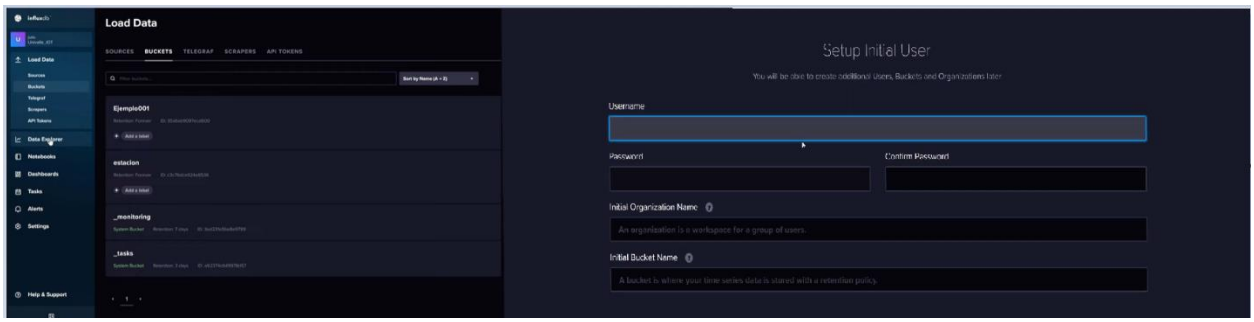


Figura 23. Fuente propia. Buckets y creación de usuario

La configuración de la base de datos se realiza desde el navegador Web, accediendo al localhost en el que se instaló el servicio, por defecto en el 8086. Al ingresar, se crea un superusuario, el cual genera un ‘workspace’ definido como un espacio de trabajo privado destinado a un grupo de usuarios, donde se gestionan todos los datos recibidos por parte de una organización determinada; en este caso se llama UNICESMAG.

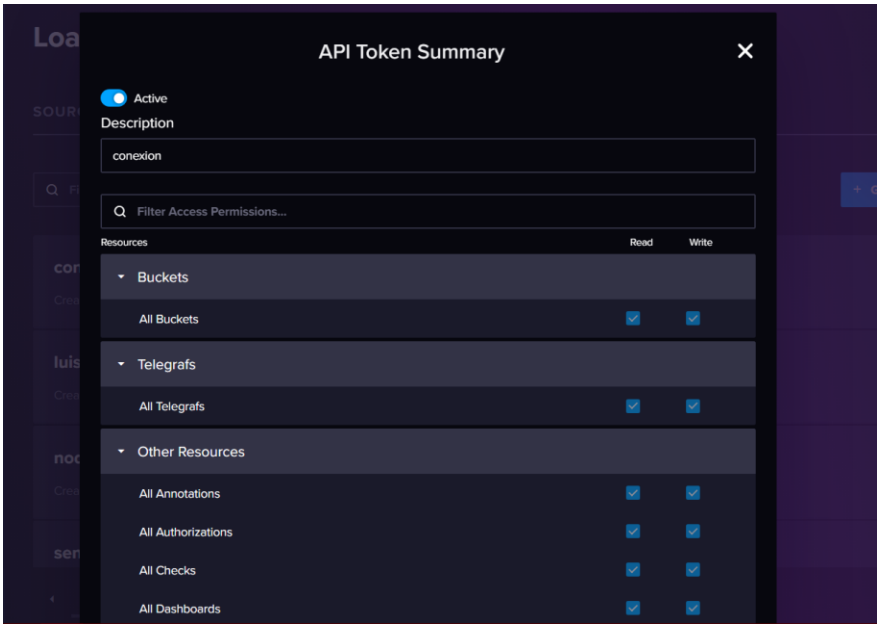


Figura 24. Fuente propia. creación de API token personalizado

Junto con la creación de la organización, se genera adicionalmente un API Token (Token de Interfaz de Programación de Aplicaciones), el cual permite establecer conexión con otros servicios de software, habilitando la modificación u obtención de datos según los permisos asignados, como se observa en la Figura 24. En este proyecto dicho token se emplea tanto para el almacenamiento de datos en el ‘Bucket’, espacio destinado al registro de los datos organizados por variable, como para su posterior consulta.

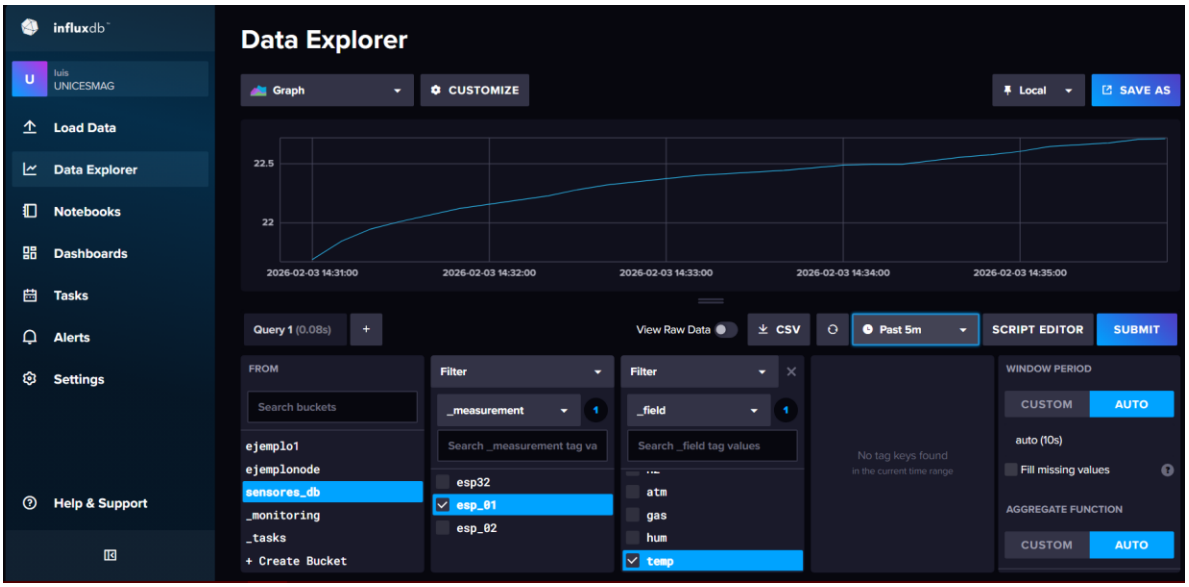


Figura 25. Fuente propia. Visualización de datos en InfluxDB

Los datos almacenados pueden visualizarse mediante el explorador gráfico de InfluxDB. Al seleccionar la variable de interés, la plataforma dependiendo lo que se seleccione mostrara los datos de manera visual, con la opción de gráficas se puede observar a través del tiempo la

variable de interés como se muestra en la Figura 25 los datos se organizan en subcarpetas dentro del bucket principal, correspondientes a cada una de las variables almacenadas.

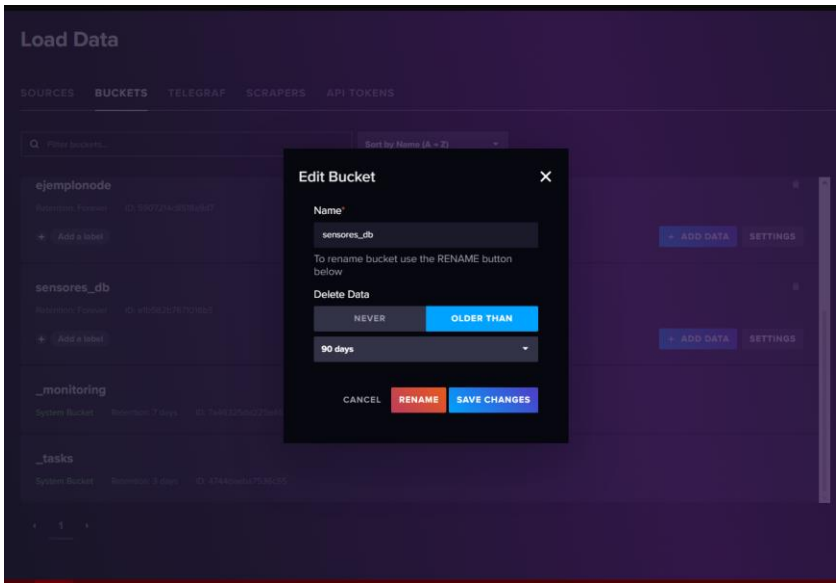


Figura 26. Fuente propia. Configuración de almacenamiento.

La cantidad de datos almacenados depende de dos factores, principales: la capacidad de almacenamiento del servidor utilizado, considerando que InfluxDB elimina automáticamente los datos más antiguos para dar espacio a los nuevos registros; y la configuración de política de retención definida en el bucket, la cual determina si los datos se conservaran durante un periodo especifico o si no se eliminaran en ningún momento como se observa en la Figura 26, siendo importante señalar que esto puede llegar a afectar el rendimiento, debido a la saturación de memoria generada por grandes volúmenes de información.

El servicio de InfluxDB no se inicia de manera automática por defecto; su ejecución se realiza mediante CMD, ubicándose en la ruta de la carpeta donde se encuentra el ejecutable y ejecutando el comando:

$$start\ influxd$$

Para que el servicio se ejecute automáticamente al iniciar el equipo, es necesario crear un archivo de texto con los siguientes comandos:

$$@echo\ off$$

$$cd\ /d\ "C:\Users\luis\Desktop\influxdb2"$$

$$start\ influxd$$

La línea $@echo\ off$ permite que la ventana de CMD muestre únicamente mensajes generados por el servicio omitiendo las tramas de datos que se transmiten a través de este.

Este archivo se guarda con el nombre “influxdb” y la extensión “.bat”, y se ubica en la carpeta de inicio del sistema, accesible mediante el comando “WIN+R”, escribiendo:

$$shell{:}\ startup$$

De esta manera, al guardar el archivo .bat en la carpeta de inicio, InfluxDB se ejecutará de forma automática cada vez que se inicie el equipo.

4.5.3 **Configuración de Node-RED**

La recepción de los datos MQTT provenientes del ESP32 se realiza mediante Node-RED. Esta herramienta de código abierto permite programar a través de nodos con funciones específicas, facilitando el tratamiento y enrutamiento de los mensajes hacia distintos destinos.

Su configuración inicia con la instalación del entorno de ejecución Node.js, el cual permite ejecutar aplicaciones de JavaScript directamente en el sistema operativo, sin necesidad de un navegador. Su instalación se realiza descargando el instalador desde la página oficial de

Node.js.

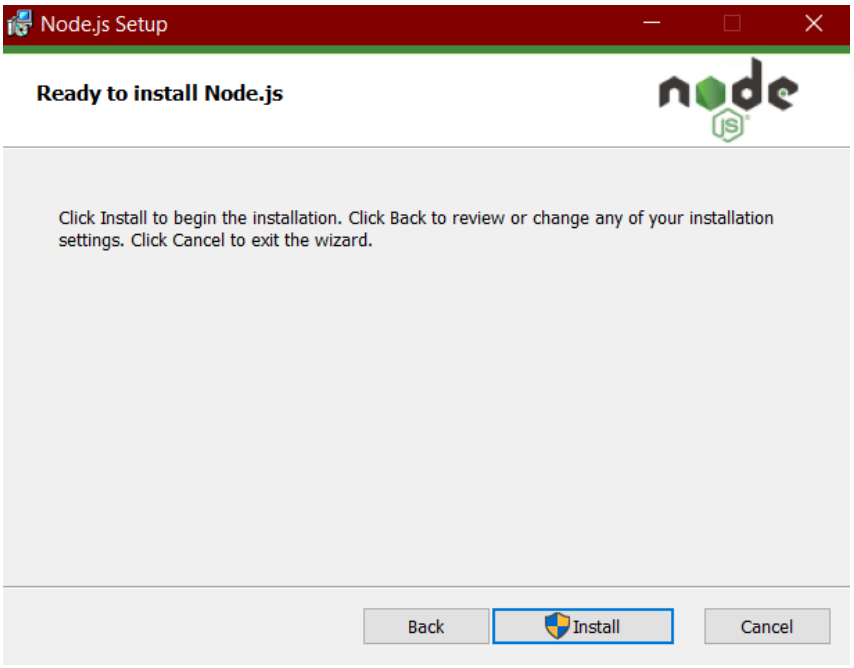


Figura 27.Fuente propia Instalador de Node.js.

Mediante el asistente de instalación se mantiene la configuración por defecto hasta finalizar el proceso, como se muestra en la Figura 27, otorgando los permisos de administrador requeridos. Este proceso instala adicionalmente el gestor de paquetes “npm”.

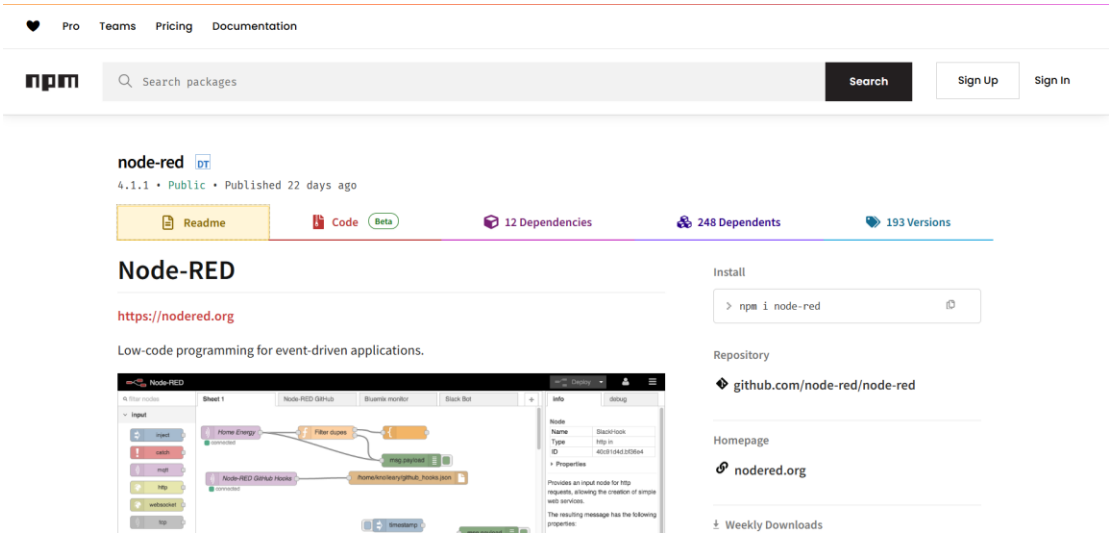


Figura 28. Tomado de Repositorio npm de Node-RED.

Desde el repositorio de npm se busca la herramienta Node-RED, donde se dispone de la documentación, las versiones disponibles y el comando de instalación. Dicha instalación se realiza mediante CMD, ejecutando el comando:

$$\text{npm i node} - \text{red}$$

Esto instala Node-RED en el puerto por defecto 1880, para iniciar la herramienta de forma manual, se ejecuta el comando desde CMD:

$$Node - red$$

Para que el programa se ejecute de manera automática al iniciar el equipo, se sigue un procedimiento similar al utilizado con InfluxDB, creando un archivo de texto con los comandos:

$$@echo\ off$$

$$node - red$$

Este archivo se guarda con el nombre "node-red" y la extensión ".bat", ubicándolo en la carpeta de inicio del sistema, accediendo desde el comando:

$$Shell{:}\ startup$$

La configuración de los valores recibidos y enviados por Node-RED se realiza accediendo a la URL: "http://localhost:1880" donde se configuran los bloques de comandos denominados nodos, interconectados entre sí para dirigir el flujo de datos.

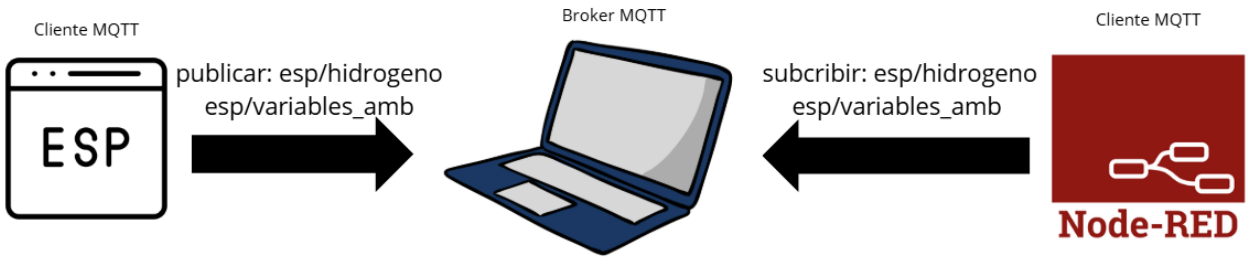


Figura 29. Fuente propia Arquitectura MQTT.

El flujo de datos inicia a través del bróker MQTT, encargado de recibir la información clasificada por tópicos desde el ESP32 (publicador). Posteriormente, el bróker distribuye estos datos a los servicios suscriptores. Como se observa en la Figura 29, Node-RED recibe esta información suscribiéndose a los tópicos, para luego interpretarla y redirigirla a otros servicios.

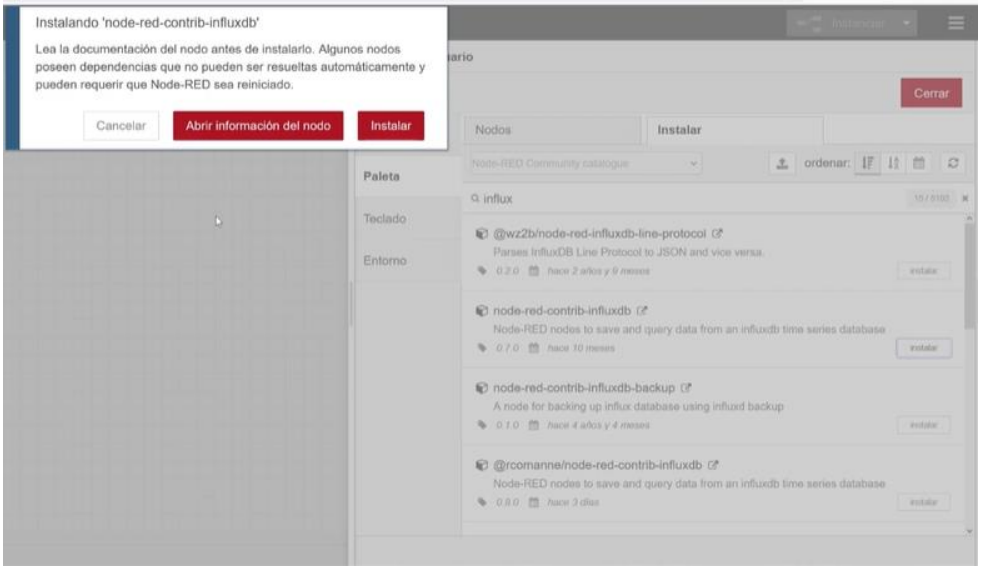


Figura 30. Fuente propia. Bloque adicional Node-RED

Para integrar InfluxDB con Node-RED es necesario descargar nodos adicionales que permitan la comunicación de los datos que transitan a través de Node-RED hacia InfluxDB.

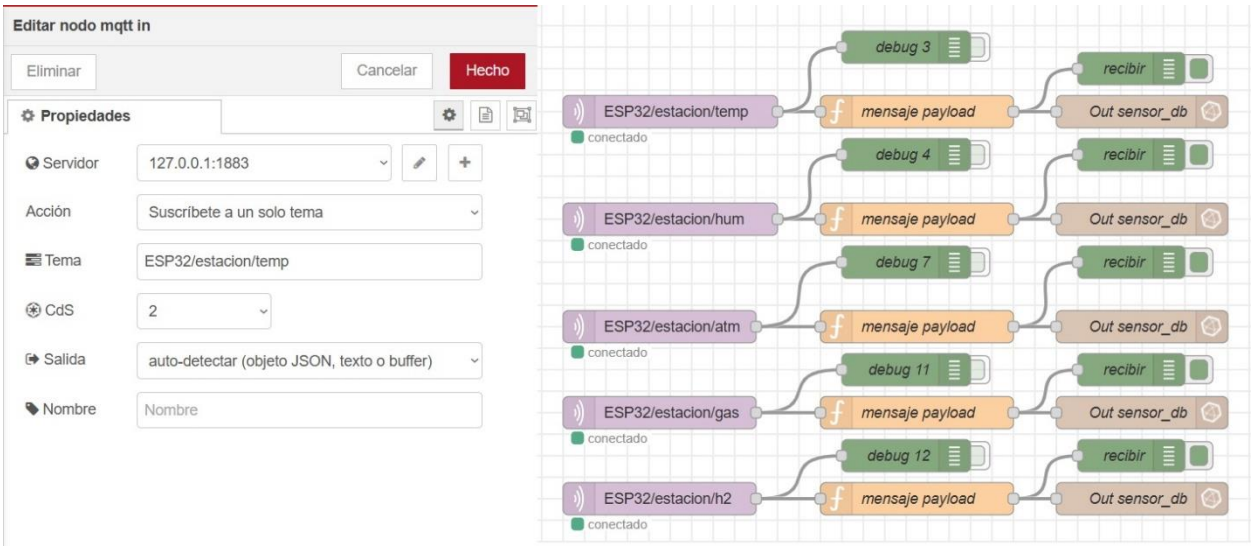


Figura 31. Fuente propia. Configuración de nodo MQTT.

El nodo MQTT se definiendo un servidor con la URL utilizada para la conexión al bróker MQTT, como se observa en la Figura 31,empleando la dirección local junto con el puerto en el que ser instalo el servicio en el computador. Se establece la suscripción bajo un tópico especifico, determinando así la recepción de datos según la variable que se desea obtener, correspondiente a cada variable enviada por el ESP32. Adicionalmente se configura la confirmación de conexión con el bróker MQTT, con el fin de evitar perdida de datos.

```
void conectarWiFi() {
  Serial.println("Conectando a la red WiFi...");
  WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASSWORD);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    Serial.print(".");
    delay(500);
  }
  Serial.println("\n  WiFi conectada");
  Serial.print("IP asignada: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());
}

void reconnectMQTT() {
  while (!client.connected()) {
    Serial.print("Intentando conexión al Broker MQTT...");
    if (client.connect("ClienteESP32")) {
      Serial.println("\n  Conectado al Broker MQTT!");
      client.subscribe(MQTT_TOPIC_SUBSCRIBIR_CMD);
    } else {
      Serial.print("\n Fallida, rc=");
      Serial.print(client.state());
      Serial.println(" — Reintentando en 5s");
      delay(5000);
    }
  }
}
```

Figura 32. Fuente propia. Configuración reconexión MQTT y Wifi.

La conexión con Wifi debe mantenerse estable para garantizar una transmisión constante de datos hacia el bróker MQTT, asegurando así la consistencia de la información almacenada en la memoria SD. Para ello, se configura una rutina que, ante una desconexión de Wi-Fi o del bróker MQTT, detiene la transmisión y la lectura de los sensores, como se muestra en la Figura 32, manteniendo una revisión constante del estado de la conexión inalámbrica para garantizar el correcto funcionamiento del sistema.

Debido a la separación por tópicos empleada en MQTT, es necesario configurar una ruta específica para cada variable que se espera recibir. El contenido de salida del nodo se estructura en formato JSON (JavaScript Object Notation), un formato de texto sencillo para el intercambio de datos, el cual es procesado posteriormente a través de un nodo de función encargado de adecuar el mensaje.

```
// --- Tópicos MQTT (uno por variable) ---
#define MQTT_TOPIC_PUBLICAR_TEMP   "ESP32/estacion/temp"
#define MQTT_TOPIC_PUBLICAR_HUM    "ESP32/estacion/hum"
#define MQTT_TOPIC_PUBLICAR_PRES   "ESP32/estacion/atm"
#define MQTT_TOPIC_PUBLICAR_GAS    "ESP32/estacion/gas"
#define MQTT_TOPIC_PUBLICAR_H2     "ESP32/estacion/h2"
#define MQTT_TOPIC_PUBLICAR_FECHA  "ESP32/estacion/fecha"
#define MQTT_TOPIC_PUBLICAR_HORA   "ESP32/estacion/hora"
```

Figura 33. Fuente propia. Configuración del nodo función.

En el nodo función se define una variable que almacena el valor proveniente del nodo anterior. La estructura del mensaje saliente queda determinada por el nombre de la variable y el valor almacenado en esta, el cual se envía al nodo siguiente, encargado de establecer la comunicación con InfluxDB.

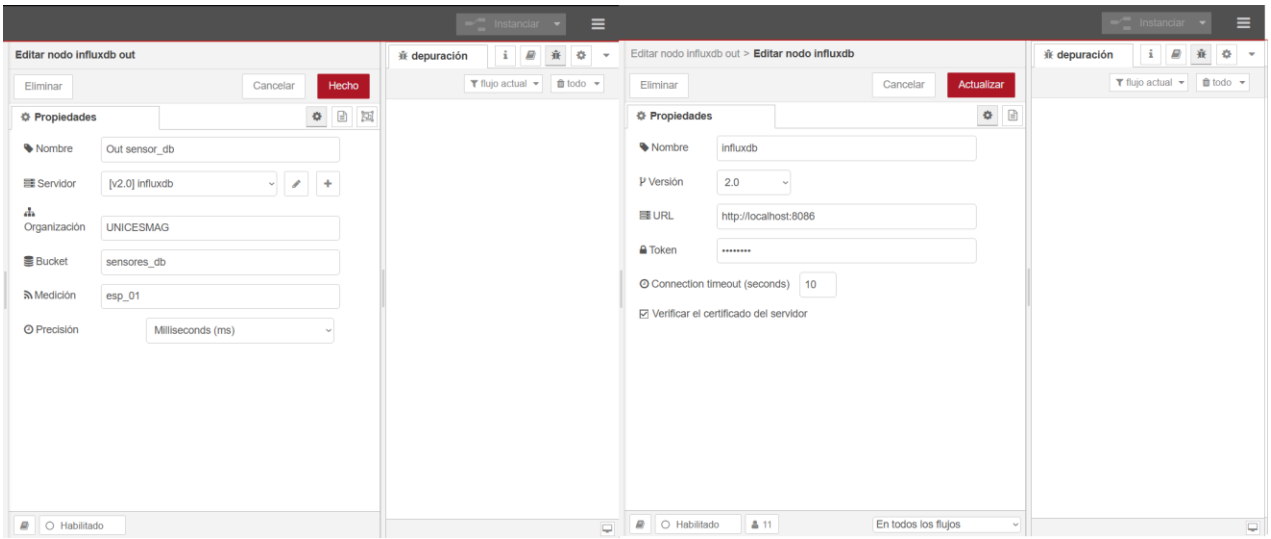


Figura 34. Fuente propia. Configuración del nodo de salida en Node-RED

En la Figura 34 se muestra la configuración correspondiente, en la cual se selecciona la versión de la base de datos y el lenguaje de consulta utilizando, así como el puerto en uso y el API Key necesario para permitir la interacción entre ambas aplicaciones.

Adicionalmente, se especifica la organización a la que pertenecen los datos, el bucket donde serán almacenados y la medición correspondiente, la cual constituye una subcarpeta dentro de InfluxDB que agrupa el conjunto de variables asociadas.

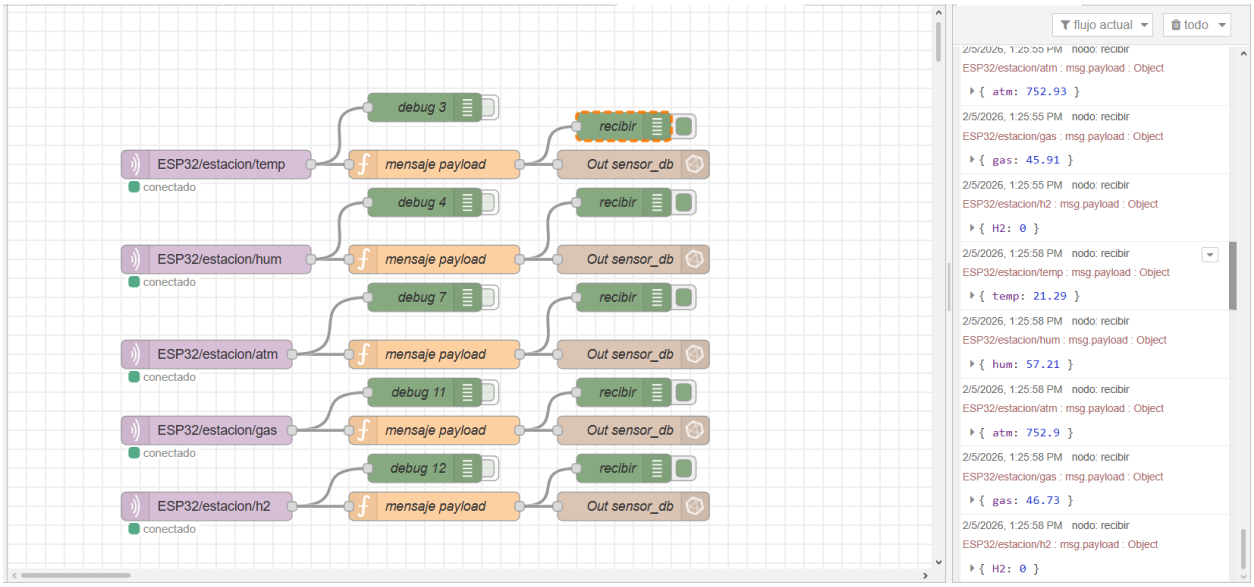


Figura 35.Fuente propia. Trama de datos total resultante enviada de Node-RED

La trama total de datos se transmite mediante cinco bloques de flujo personalizados, uno por cada variable. La Figura 35 muestra los datos obtenidos del ESP32 a través de MQTT, procesados y transformados mediante el payload correspondiente, para su envío final hacia la base de datos InfluxDB.

4.5.4 **Configuración del Dashboard Grafana**

Para la visualización dinámica de los datos obtenidos y almacenados en InfluxDB se utiliza Grafana, una plataforma open source orientada a la creación de dashboards personalizables en tiempo real, disponible en línea o mediante su versión OSS gratuita para uso local. Grafana permite conectarse a diversas bases de datos, incluyendo InfluxDB, para representar la información mediante objetos gráficos de fácil visualización.

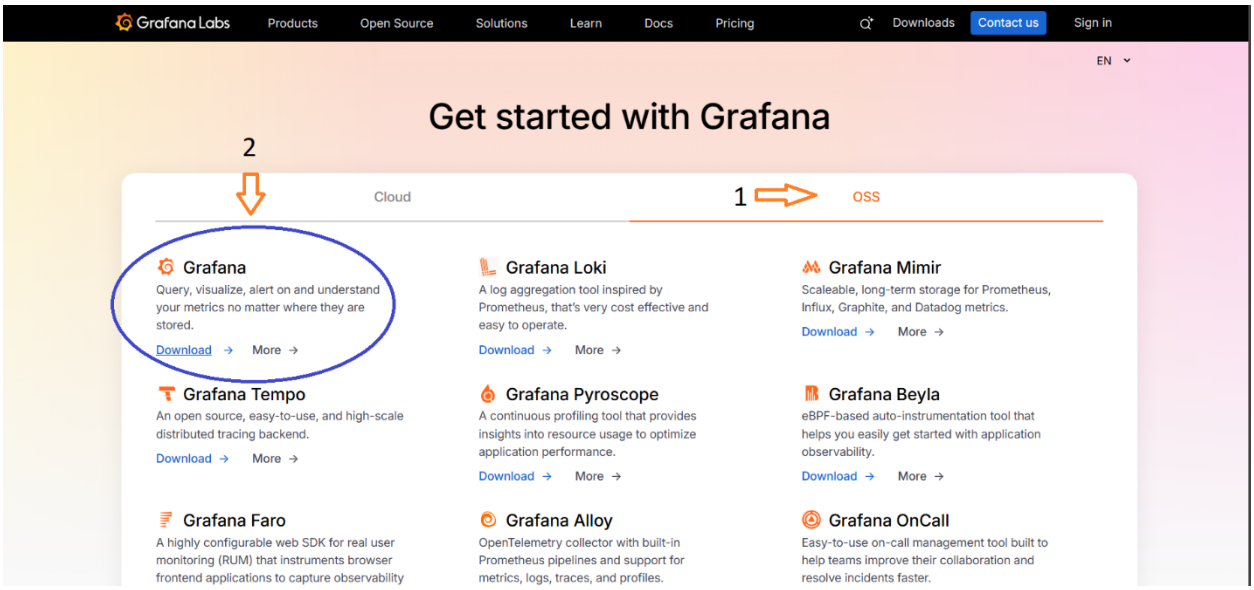


Figura 36.Adaptado de la página oficial de Grafana

La instalación de Grafana se realiza desde su página web oficial, donde se selecciona la versión OSS de la interfaz gráfica para su descarga, tal como se muestra en la Figura 36. El sitio proporciona instaladores para distintos sistemas operativos, de los cuales se selecciona la versión de Windows, completando la instalación con la configuración predeterminada del asistente. Grafana se instala como un servicio de inicio automático, activándose junto con el equipo y operando por defecto en el puerto 3000.

El acceso a la configuración y visualización de la interfaz gráfica se realiza desde cualquier navegador web, ingresando a la URL: http://localhost:3000

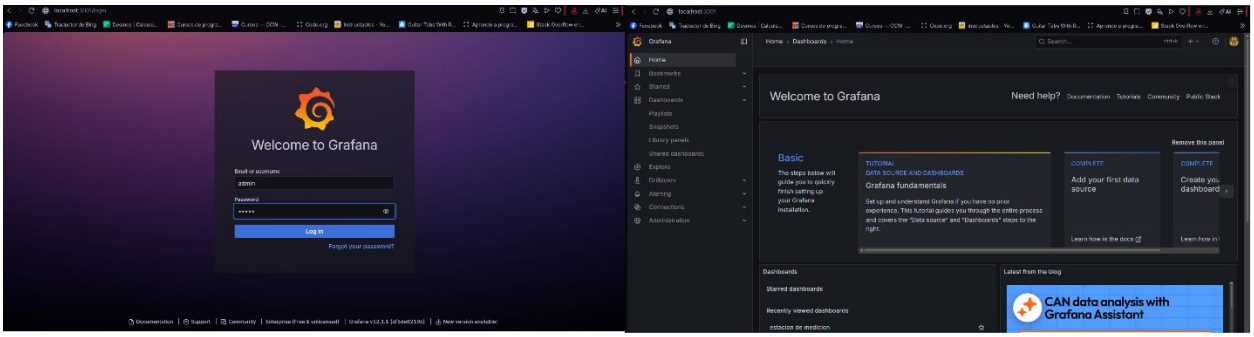


Figura 37. Tomado de Grafana. Inicio de la interfaz Gráfica Grafana

Al ingresar por primera vez, Grafana solicita las credenciales de acceso, siendo **admin** tanto el usuario como la contraseña predeterminados. Tras el primer inicio de sesión, el sistema solicita el cambio de contraseña por una de carácter personalizado.

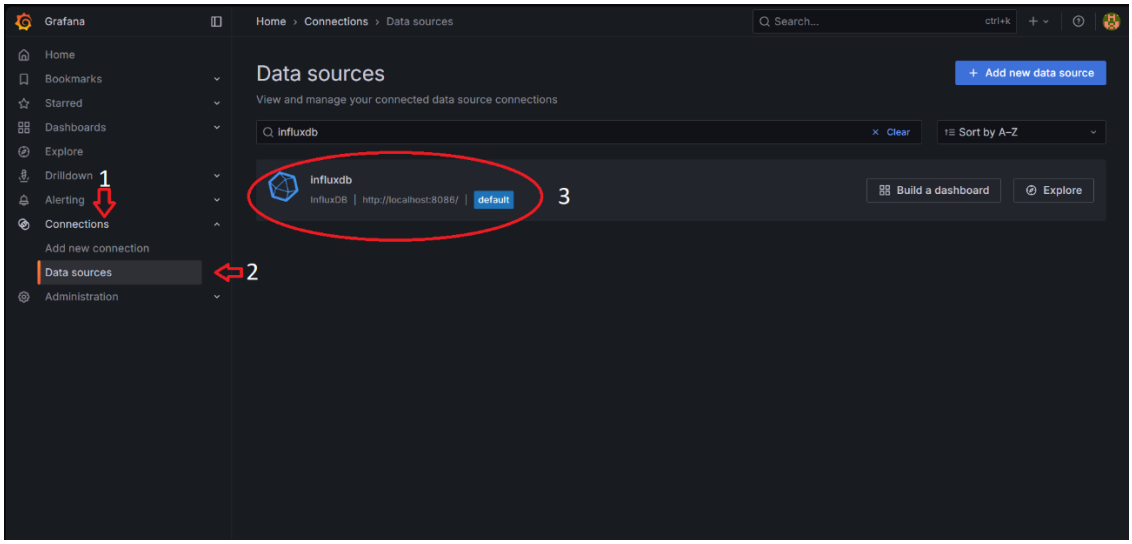


Figura 38.Tomado de Grafana. Conexión de Grafana y InfluxDB.

Una vez dentro de la interfaz gráfica, se procede a configurar InfluxDB como fuente de datos entrante. Para ello, en el menú de configuración se accede a la opción Connections y Data Sources, donde se añade una nueva fuente de datos seleccionando InfluxDB, como se muestra en la Figura 38, procediendo posteriormente a su configuración de acuerdo con los parámetros establecidos previamente en InfluxDB.

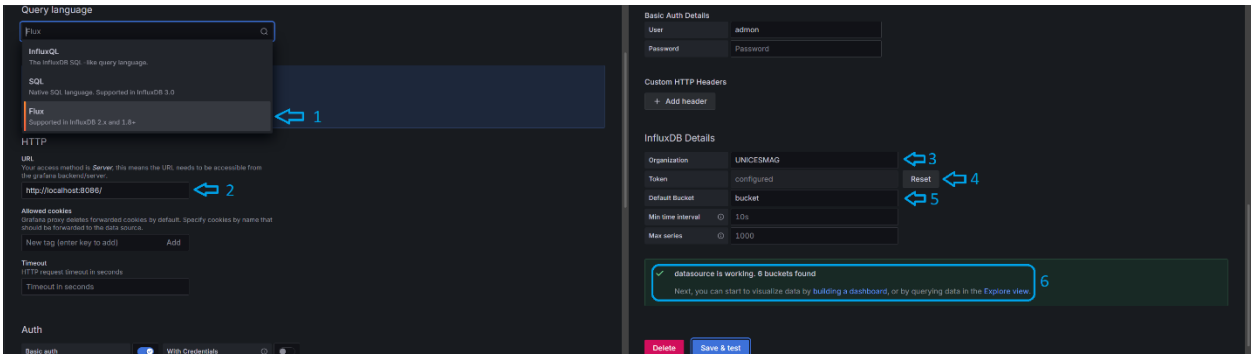


Figura 39. Fuente propia. Configuración de la conexión a InfluxDB

Al seleccionar InfluxDB como fuente de datos, es posible personalizar la conexión de acuerdo con la configuración especifica utilizada, como se observa en la Figura 39. Dado que se emplea la versión gratuita y local de InfluxDB (OSS v2), el lenguaje de consulta compatible con esta versión es Flux. Se configura la dirección URL correspondiente al localhost junto con el puerto utilizado, en este caso el 8086, la organización a la que pertenecen los datos almacenados en InfluxDB, en este caso UNICESMAG, el API Token generado con los permisos necesarios para la obtención de datos, y el bucket por defecto donde se encuentra almacenada la

información. Una vez completada la configuración, se verifica la conexión guardando y probando los parámetros ingresados, lo cual, en caso de ser exitoso, mostrara los buckets pertenecientes a la organización configurada.

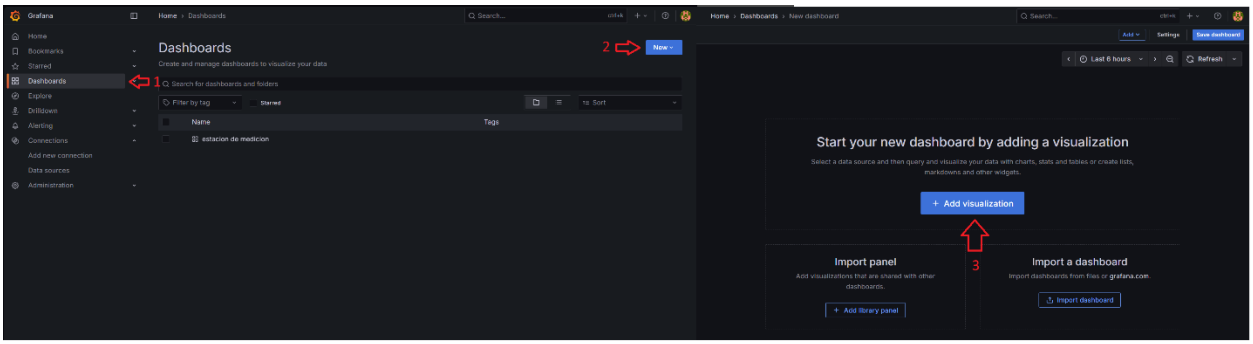


Figura 40.Adaptado de Grafana. Creación de la Dashboard

Con la base de datos configurada, se procede a la creación del dashboard. Desde el menú principal se selecciona la opción Dashboard, como se ve en la Figura 40, y se crea un nuevo tablero en el cual se incorporan los distintos paneles.

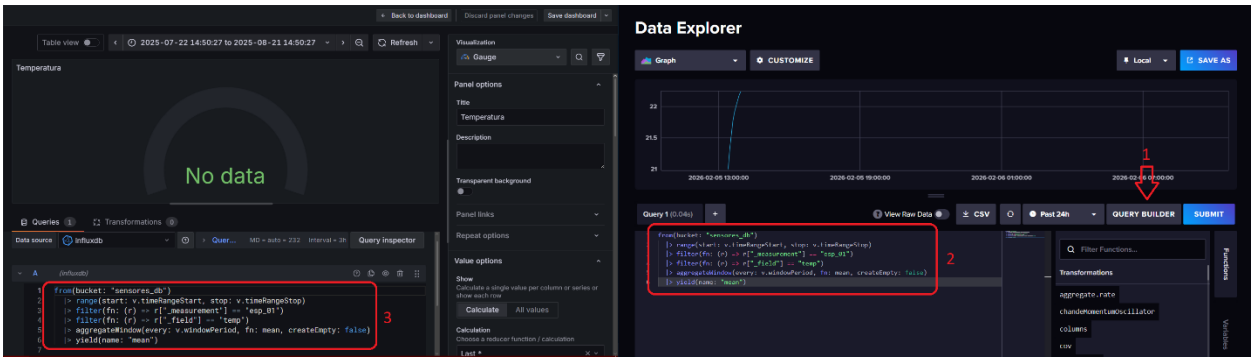


Figura 41. Fuente propia. Personalización de paneles para cada variable.

En cada panel se define la consulta correspondiente a la variable de interés utilizando el lenguaje Flux, seleccionando el script asociado a dicha variable en InfluxDB e incorporándolo en el panel correspondiente. Esta consulta puede corresponder a una única variable o a varias, dependiendo del tipo de panel utilizado. Adicionalmente, se ajustan los parámetros del panel según la variable representada, incluyendo el intervalo de tiempo, las unidades de medida, los colores, los títulos y los límites de visualización.



Figura 42. Fuente propia. Interfaz gráfica con datos recibidos de InfluxDB

Con la integración completa de los distintos componentes de software, los datos enviados a Grafana permiten visualizar en tiempo real las variaciones que ocurren en el ambiente monitoreado como se ve en la Figura 42, en conjunto con la información mostrada en la unidad central física, presentando además un registro histórico de los datos a lo largo del tiempo.

5. Resultados

El presente capítulo expone los resultados obtenidos a partir de la implementación y las pruebas experimentales realizadas sobre la estación de bajo costo para la medición de hidrógeno con integración IoT. En él se compara el desempeño de dos sensores: uno de tipo comercial (ZE0

7-H2) y otro de alto costo y precisión, utilizando como equipo patrón (NEO986HT). Asimismo, se describen las características del sistema de monitoreo implementado, el comportamiento del hardware durante las pruebas realizadas, y el desempeño de la interfaz de software diseñada para la adquisición, visualización y almacenamiento de los datos.

Los resultados se obtuvieron bajo un entorno monitoreado de laboratorio, mediante el suministro de hidrógeno a través de una válvula reguladora, manteniendo un porcentaje de concentración estimado y controlado. Dicho porcentaje se ajustó mediante la dilución con una cantidad determinada de nitrógeno, lo que permitió reducir progresivamente el valor de lectura y evaluar el desempeño de los sensores frente a distintas concentraciones de hidrógeno.

5.1 Verificación del funcionamiento del sistema

5.1.1 Control de la generación de hidrógeno

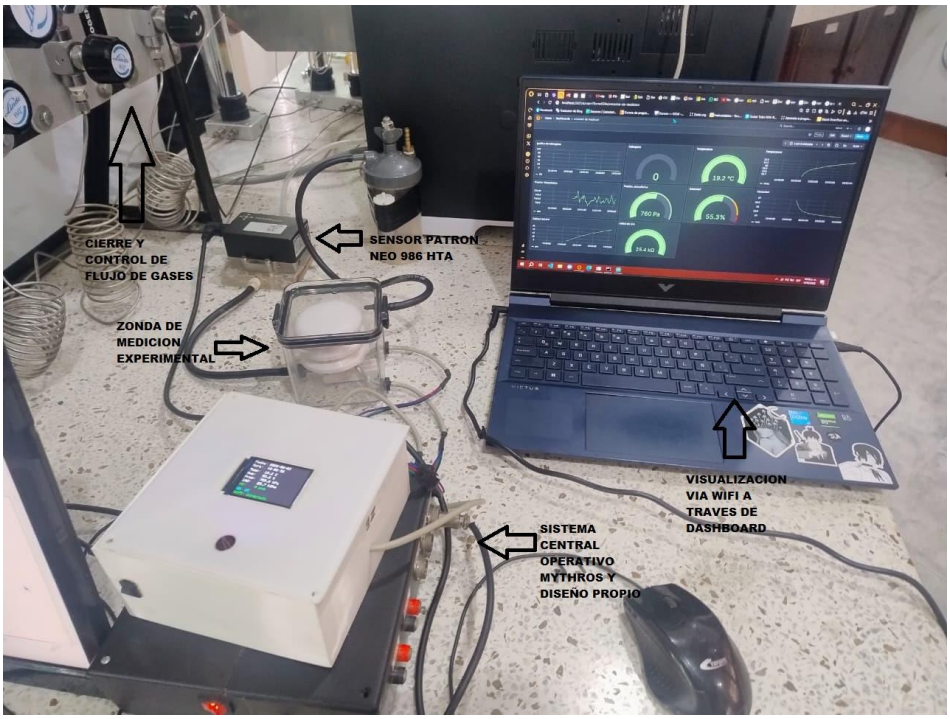


Figura 43. Fuente: propia, Control de porcentaje de Hidrógeno

El hidrógeno sale del suministro, cuya presión es indicada por el manómetro, hacia un apagallamas, y continúa posteriormente hacia el filtro de humedad. Este último se encuentra conectado, mediante un acople tipo “T”, a un suministro de nitrógeno, un gas inerte que no afecta la medición de los sensores mediante procesos químicos, el cual cuenta igualmente con su propio filtro de humedad. La combinación de ambos flujos genera una mezcla hidrógeno-nitrógeno, empleada para mantener controlado el nivel porcentual de hidrógeno en la salida del sistema. El hidrógeno resultante se conduce finalmente, mediante una manguera, hacia el sensor patrón facilitado por la UDENAR.

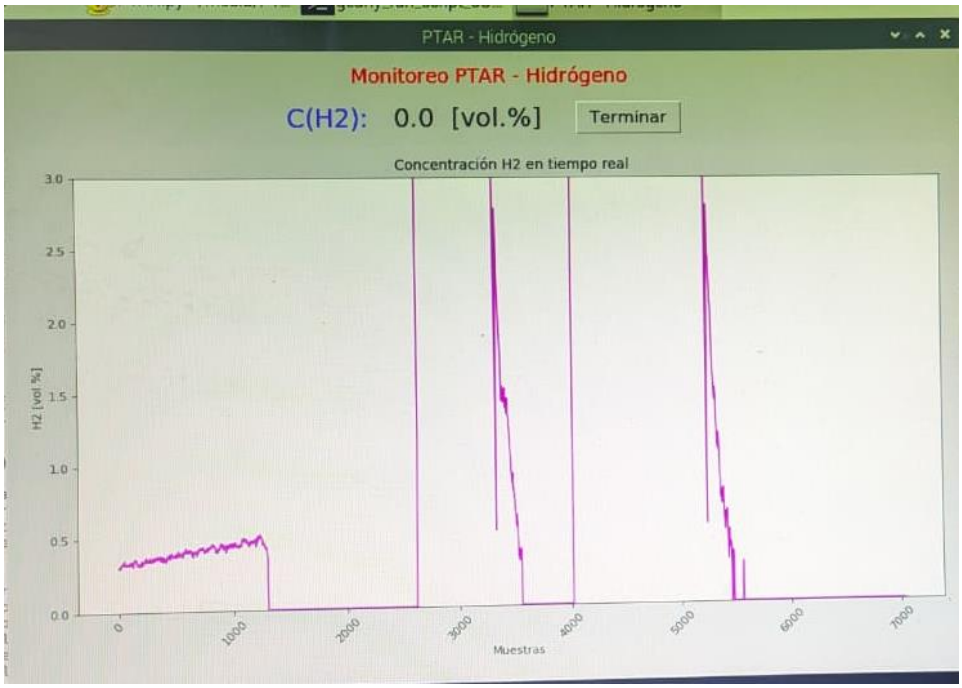


Figura 44. Fuente propia. Medidas de concentración del sensor NEO986HT

El sensor patrón indican en términos porcentuales, la concentración resultante de la mezcla de gases, permitiendo determinar con precisión el nivel de pureza del hidrógeno suministrado.

Para controlar la concentración resultante de hidrógeno, se ajusta el flujo de entrada de ambos gases mediante el regulador de presión: con el fin de reducir el porcentaje de hidrógeno que llega a los sensores, se incrementa el flujo de nitrógeno, disminuyendo así proporcionalmente la concentración de hidrógeno en la mezcla.

Mediante el sensor patrón se monitorea la concentración aproximada de la mezcla hidrógeno-nitrógeno resultante, buscando estabilizar un porcentaje comprendido entre 0% y 3%, con el fin de evitar la saturación del sensor comercial evaluado. Como se observa en la Figura 44, este rango constituye el punto de referencia establecido para la realización de las pruebas con la estación de medición de hidrógeno de bajo costo.

5.1.2 **Conexión con el servidor**



Figura 45. Fuente propia. Funcionamiento y mensajes de la estación de hidrógeno.

El funcionamiento de la estación de hidrógeno inicia mediante el interruptor de encendido, el cual activa la alimentación del sistema e inicializa la pantalla, mostrando el estado del sistema y el proceso de conexión a la red Wi-Fi y al bróker MQTT. Durante esta etapa se realizan intentos continuos de conexión hasta lograr establecer la comunicación correspondiente.

Una vez establecida la conexión con el servidor, se evalúa el estado de funcionamiento de los módulos instalados. Para dar inicio a la transmisión de datos, tanto hacia la base de datos en la nube como hacia la memoria microSD, es necesario que la totalidad del hardware se encuentre operativo. Como se observa en la Figura 45, en caso de detectarse una falla o desconexión en alguno de los módulos, el sistema entra en un bucle de espera que detiene la ejecución del programa hasta que se corrija el error de hardware correspondiente.

Column3	Column4	Column5	Column6	Column7	Column8	Column9	Fecha	Hora	H2_ppm	Temp_C	Hum_perc	Pres_mmH	Gas_kOhm
false	true	true	false	false	true	true	19/10/2025	4:18:54 p. m.	0	2400	5665	75287	2891
long	dateTime:RFC3339	dateTime:RFC3339	dateTime:RFC3339	double	string	string	19/10/2025	4:18:57 p. m.	0	2398	5646	75285	3044
							19/10/2025	4:19:00 p. m.	0	2399	5637	75287	3301
table	_start	_stop	_time	_value	_field	_measurement	19/10/2025	4:19:03 p. m.	0	2401	5629	75287	3570
0	2025-10-19T20:51:57.0162797Z	2025-10-19T20:56:57.0162797Z	2025-10-19T20:52:30Z	10.28	Gas_kOhm	esp_01	19/10/2025	4:19:06 p. m.	0	2402	5628	75289	3853
0	2025-10-19T20:51:57.0162797Z	2025-10-19T20:56:57.0162797Z	2025-10-19T20:52:40Z	12.693333333333333	Gas_kOhm	esp_01	19/10/2025	4:29:47 p. m.	0	2389	5703	75304	2658
0	2025-10-19T20:51:57.0162797Z	2025-10-19T20:56:57.0162797Z	2025-10-19T20:52:50Z	14.676666666666668	Gas_kOhm	esp_01	19/10/2025	4:29:50 p. m.	0	2390	5691	75303	2889
0	2025-10-19T20:51:57.0162797Z	2025-10-19T20:56:57.0162797Z	2025-10-19T20:53:00Z	16.7725	Gas_kOhm	esp_01	19/10/2025	4:29:53 p. m.	0	2389	5683	75303	3144
0	2025-10-19T20:51:57.0162797Z	2025-10-19T20:56:57.0162797Z	2025-10-19T20:53:10Z	18.790000000000003	Gas_kOhm	esp_01	19/10/2025	4:29:56 p. m.	0	2391	5678	75301	3383
0	2025-10-19T20:51:57.0162797Z	2025-10-19T20:56:57.0162797Z	2025-10-19T20:53:20Z	20.346666666666668	Gas_kOhm	esp_01	19/10/2025	4:29:59 p. m.	0	2391	5670	75302	3617
0	2025-10-19T20:51:57.0162797Z	2025-10-19T20:56:57.0162797Z	2025-10-19T20:53:30Z	22.2125	Gas_kOhm	esp_01	19/10/2025	4:30:02 p. m.	0	2393	5661	75302	3814
0	2025-10-19T20:51:57.0162797Z	2025-10-19T20:56:57.0162797Z	2025-10-19T20:53:40Z	24.086666666666662	Gas_kOhm	esp_01	19/10/2025	4:30:05 p. m.	0	2392	5657	75303	4046
0	2025-10-19T20:51:57.0162797Z	2025-10-19T20:56:57.0162797Z	2025-10-19T20:53:50Z	25.459999999999997	Gas_kOhm	esp_01	19/10/2025	4:30:08 p. m.	0	2393	5651	75302	4238
0	2025-10-19T20:51:57.0162797Z	2025-10-19T20:56:57.0162797Z	2025-10-19T20:54:00Z	27.009999999999998	Gas_kOhm	esp_01	19/10/2025	4:30:11 p. m.	0	2394	5649	75304	4408
0	2025-10-19T20:51:57.0162797Z	2025-10-19T20:56:57.0162797Z	2025-10-19T20:54:10Z	28.580000000000002	Gas_kOhm	esp_01	19/10/2025	4:30:14 p. m.	0	2394	5643	75303	4591
0	2025-10-19T20:51:57.0162797Z	2025-10-19T20:56:57.0162797Z	2025-10-19T20:54:20Z	29.883333333333336	Gas_kOhm	esp_01	19/10/2025	4:30:17 p. m.	0	2395	5640	75302	4726
0	2025-10-19T20:51:57.0162797Z	2025-10-19T20:56:57.0162797Z	2025-10-19T20:54:30Z	31.3125	Gas_kOhm	esp_01	19/10/2025	4:30:20 p. m.	0	2396	5640	75304	4868
0	2025-10-19T20:51:57.0162797Z	2025-10-19T20:56:57.0162797Z	2025-10-19T20:54:40Z	32.800000000000004	Gas_kOhm	esp_01	19/10/2025	4:30:23 p. m.	0	2396	5640	75304	4996
0	2025-10-19T20:51:57.0162797Z	2025-10-19T20:56:57.0162797Z	2025-10-19T20:54:50Z	33.949999999999996	Gas_kOhm	esp_01	19/10/2025	4:30:26 p. m.	0	2397	5641	75305	5159
0	2025-10-19T20:51:57.0162797Z	2025-10-19T20:56:57.0162797Z	2025-10-19T20:55:00Z	35.3475	Gas_kOhm	esp_01	19/10/2025	4:30:29 p. m.	0	2397	5636	75302	5256
0	2025-10-19T20:51:57.0162797Z	2025-10-19T20:56:57.0162797Z	2025-10-19T20:55:10Z	36.59	Gas_kOhm	esp_01	19/10/2025	4:30:32 p. m.	0	2398	5637	75305	5374
0	2025-10-19T20:51:57.0162797Z	2025-10-19T20:56:57.0162797Z	2025-10-19T20:55:20Z	37.833333333333336	Gas_kOhm	esp_01	19/10/2025	4:30:35 p. m.	0	2398	5635	75302	5462
0	2025-10-19T20:51:57.0162797Z	2025-10-19T20:56:57.0162797Z	2025-10-19T20:55:30Z	39.005	Gas_kOhm	esp_01	19/10/2025	4:30:38 p. m.	0	2398	5630	75304	5612
0	2025-10-19T20:51:57.0162797Z	2025-10-19T20:56:57.0162797Z	2025-10-19T20:55:40Z	39.96	Gas_kOhm	esp_01	19/10/2025	4:30:41 p. m.	0	2399	5627	75303	5688
0	2025-10-19T20:51:57.0162797Z	2025-10-19T20:56:57.0162797Z	2025-10-19T20:55:50Z	40.723333333333336	Gas_kOhm	esp_01	19/10/2025	4:30:44 p. m.	0	2399	5622	75304	5795
0	2025-10-19T20:51:57.0162797Z	2025-10-19T20:56:57.0162797Z	2025-10-19T20:56:00Z	41.8325	Gas_kOhm	esp_01	19/10/2025	4:30:47 p. m.	0	2399	5617	75302	5880
							19/10/2025	4:30:50 p. m.	0	2400	5617	75304	5981

Figura 46. Fuente propia. Archivos CSV de la base de datos local y del servidor

Una vez verificadas todas las condiciones de hardware, la estación inicia el registro de datos, tanto en la memoria microSD como en el servidor remoto. El almacenamiento de datos en la memoria microSD se realiza en conjunto con la marca temporal proporcionada por el módulo RTC, como se muestra en la Figura 46, generando un archivo CSV que contiene las variables medidas por los sensores. De manera análoga, los datos almacenados en la base de datos de InfluxDB pueden descargarse en formato CSV, especificando el bucket y la variable correspondiente. Esta descarga puede realizarse de forma individual, variable por variable, para la generación de gráficas de validación, o de manera conjunta, obteniendo una tabla que agrupa la totalidad de las variables registradas.

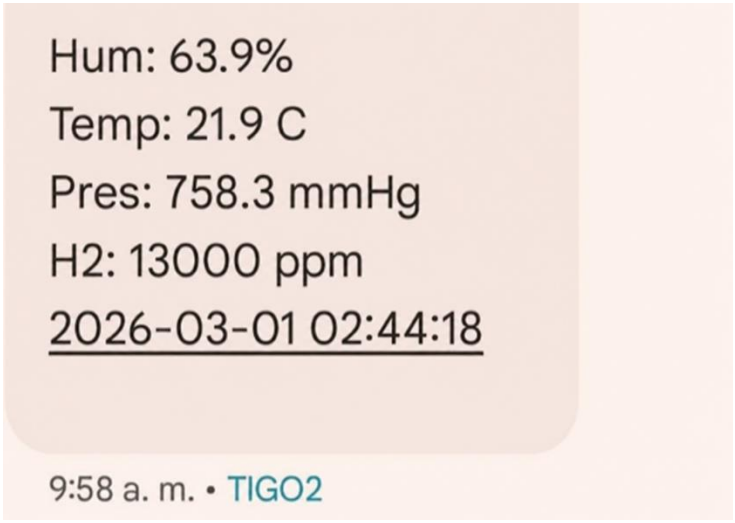


Figura 47. Fuente propia. Envío de mensaje SMS al celular

Cuando la lectura de los datos supera un porcentaje de hidrógeno predefinido, el sistema genera y envía, mediante el módulo A9G, un mensaje de alerta a uno o más números telefónicos

previamente configurados. Dicho mensaje incluye la concentración de hidrógeno detectada en el momento de la alerta, las variables ambientales registradas en la zona de medición, así como la fecha y hora correspondientes al instante en que se generó la señal, tal como se observa en la Figura 47.

El envío de estos mensajes requiere cobertura de red 2G, debido a las especificaciones de compatibilidad del módulo A9G. Dado que la mayoría de operadores telefónicos han reducido progresivamente su cobertura 2G, actualmente Claro es el único operador que aún mantiene disponible la red. Adicionalmente, una vez alcanzado el límite de concentración de hidrógeno por primera vez, el sistema no enviara mensajes adicionales hasta que la concentración disminuya por debajo del umbral establecido, evitando así el envío repetido de alertas correspondientes a una misma lectura.

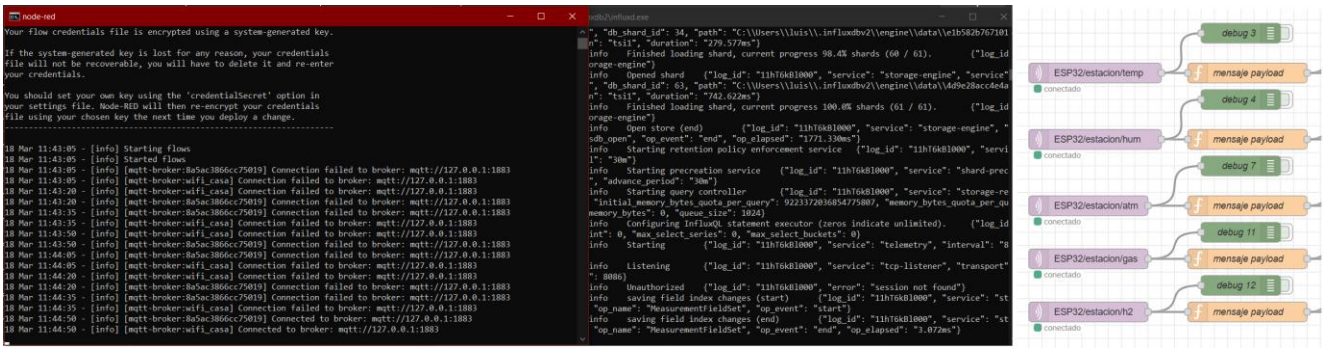


Figura 48. Fuente propia. Inicio del servidor local

El inicio del servidor local se realiza encendiendo el computador y permitiendo que los distintos servicios (Mosquitto, InfluxDB y Node-RED) se ejecuten de forma automática como se muestra en la Figura 48. Una vez establecida la conexión MQTT con la estación, se inicia el proceso de almacenamiento y transmisión de datos, los cuales pueden verse en tiempo real a través del Dashboard de Grafana mediante el navegador web.

5.1.3 **Ambiente monitoreado de experimentación**



Figura 49. Fuente propia. Sonda de detección en el ambiente monitoreado.

La sonda de medición requiere de un espacio propio dentro del cual el ingreso de la mezcla de gases pueda controlarse, garantizando la repetibilidad de las lecturas. Para ello se buscó minimizar el volumen del espacio de prueba y emplear materiales no porosos. El uso de plástico, junto con empaques de caucho, asegura la contención del gas tanto en los puntos de salida de los cables de conexión como en las mangueras de entrada y salida evitando micro fugas en dichas zonas.

Para facilitar una purga rápida del gas dentro del ambiente, este cuenta con una tapa que permite tanto la salida acelerada del gas como el acceso para el retiro de los sensores instalados en su interior. La tapa esta sellada con empaques de caucho y agarraderas, evitando la fuga del



Figura 50. Ruta de gases hacia la estación.

gas a través de esta. En el interior del ambiente monitoreado se aloja la sonda de detección, contenida en una carcasa de tipo meteorológica, mediante la cual se obtienen los valores de hidrógeno y de las variables ambientales, permitiendo evaluar los cambios que se presentan durante las pruebas de ingreso de la mezcla hidrógeno-nitrógeno.

La conexión hacia el ambiente monitoreado se realiza en serie, redirigiendo inicialmente la salida de la mezcla gaseosa hacia el sensor patrón NEO986HT. Una vez que la salida de hidrógeno alcanza un nivel estable de concentración estimada, se procede a conectar el ambiente monitoreado, como se muestra en la Figura 50. En esta etapa se registra el valor medido por ambos sensores durante un periodo de prueba, considerando intervalos de descanso para el sensor evaluado, establecidos en 5 y 10 minutos, con el fin de analizar su comportamiento frente a distintas concentraciones de hidrógeno.

5.1.4 **Pruebas de consumo para implementación del panel solar**

Para la selección del sistema fotovoltaico se tiene en cuenta el consumo energético diario de la estación, considerando la potencia total demandada por el sistema. Este parámetro se calcula a partir de los siguientes valores, evaluados en un lapso de una hora:

Tabla 8. Fuente propia. Consumo de la estación.

Tiempo	Voltaje (V)	Amperio promedio (A)	Amperio mínimo (A)	Amperio pico (A)	Consumo mínimo (W)	Consumo medio (W)	Consumo máximo (W)
0-10 min	12.34	0.17	0.15	0.22	1.851	2.097	2.714
10-20 min	12.34	0.167	0.15	0.191	1.851	2.060	2.356
20-30 min	12.35	0.155	0.15	0.202	1.852	1.914	2.494
30-40 min	12.36	0.168	0.145	0.213	1.792	2.076	2.632
40-50 min	12.36	0.166	0.142	0.213	1.755	2.051	2.632

50-60 min	12.35	0.178	0.15	0.212	1.852	2.198	2.618

El consumo energético de la estación se determina utilizando el consumo promedio horario, obtenido a partir del promedio del consumo máximo registrado en la Tabla 8, resultando en un valor aproximado de 2.57 Watts. Al proyectar este consumo a lo largo de un día completo se obtiene:

$$E_{dia} = 2.57\ W * 24h = 61.8\ Wh \approx 62\ Wh \quad (13)$$

De lo cual resulta un consumo diario aproximado de 62 Wh. Con el fin de garantizar confiabilidad frente a variaciones operativas y condiciones ambientales adversas, se incorpora un margen de seguridad del 50% obteniendo así un consumo total de diseño de:

$$E_{diseño} = 62Wh * 1.5 = 93\ Wh \quad (14)$$

A partir de este valor, se dimensiono el panel solar, considerando las horas solares pico disponibles. Para condiciones de alta nubosidad, se estima 3 horas solares pico diarias. Por tanto, la potencia mínima requerida del panel solar se calcula como:

$$P_{panel} = \frac{E_{diseño}}{horas\ sol\ pico} = \frac{93\ Wh}{3} = 31\ W \quad (15)$$

Dado que no existen paneles solares comerciales con dicha potencia exacta, y considerando las perdidas adicionales asociadas a la eficiencia del controlador de carga, la temperatura de operación y la acumulación de suciedad sobre la superficie del panel, un panel de 50 W proporciona un margen adecuado que garantiza la generación de energía incluso en condiciones de baja.

Para el almacenamiento de energía, considerando la autonomía requerida para un día completo de operación sin luz solar, se estableció una energía a almacenar de 93 WH. Considerando una batería de plomo- ácido, cuya profundidad de descarga recomendada es del 50% con el fin de preservar su vida útil, la capacidad de carga requerida se obtiene mediante:

$$capacidad\ bateria = \frac{E_{diseño}}{V*DOD} = \frac{93}{12*0.5} \approx 15.5\ Ah \quad (16)$$

Considerando los valores comerciales disponibles, hay baterías de 12 V y 20 Ah, la cual satisface ambos requerimientos de funcionamiento, proporcionando además un margen adicional de seguridad y una mayor vida útil al operar por debajo de su capacidad máxima.

Para la selección del controlador de carga se consideró la corriente máxima que puede entregar el panel solar:

$$I_{max} = \frac{P_{panel}}{V} = \frac{50\ W}{12\ V} = 4.16\ A \quad (17)$$

Donde un controlador de carga de 10 A resulta suficiente para operar de manera segura, superando ampliamente la corriente máxima esperada del sistema.

5.2 Prueba y calibración de los sensores

Con el fin de ajustar los valores medidos de las variables obtenidas y garantizar la entrega de resultados confiable, se realizó un proceso de calibración comparativo entre el equipo patrón y el sensor empleado en la estación de medición.

5.2.1 Pruebas del Sensor de hidrógeno ZE07-H2

Para realizar la parametrización del sensor de hidrógeno se llevaron a cabo distintas pruebas, con el fin de conocer su comportamiento frente a un equipo especializado (NEO986HT), utilizando las instalaciones de los laboratorios especializados de la Universidad de Nariño. con este propósito, el sensor fue sometido a diferentes condiciones de ensayo, orientadas a caracterizar su desempeño.

Durante las pruebas realizadas se registraron de manera continua las variables de concentración de hidrógeno, humedad, temperatura, presión atmosférica y calidad del aire. Estas variables que permiten comprender el comportamiento de los gases dentro de un ambiente monitoreado, manteniendo condiciones de laboratorio estándar a lo largo de cada ensayo, con el fin de garantizar pruebas consistentes y repetibles.

Tabla 9. Fuente propia. Muestra 1 entre 0.6% y 0.8% de concentración de hidrógeno.

Prueba	Medición del sensor NEO986HT (% Hidrógeno)	Medición del sensor ZE07-H2 (% Hidrógeno)	Tiempo de calentamiento	Temperatura	Humedad	Presión atmósfera (mmHg)	Calidad del aire (Kohm)
1	0.7	1.5	5 min	20.4°C	8.87 %	765	0.2
2	0.8	1.9	5 min	20.6°C	7.14 %	765	0.2

3	0.7	1.79	5 min	20.9°C	7.75 %	770	0.2
4	0.6	1.3	5 min	22.2°C	8.65 %	759	0.21

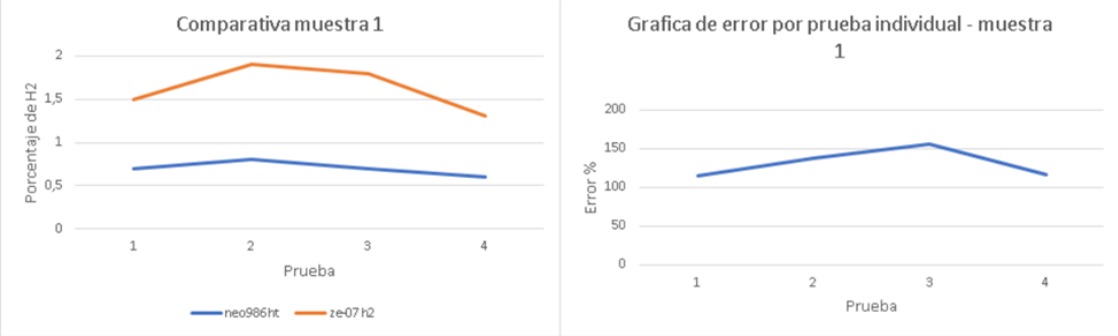


Figura 51. Fuente propia. Gráficas comparativas muestra 1

Tabla 10. Fuente propia. Promedios y desviación estándar de la muestra 1

Sensor	Promedio lectura H2	Desv. Estándar
NEO986HT	0.7	0.0816
ZE07-H2	1.6225	0.273

Para la primera muestra, presentada en la Tabla 9, se registraron valores de concentración de hidrógeno comprendidos entre 0.6% y 0.8%, evaluando la respuesta del sensor ZE07-H2 frente al valor de referencia entregado por el NEO986HT. Con este propósito se realizaron cuatro pruebas dentro de dicho rango de concentración, manteniendo las variables ambientales relativamente estables entre mediciones, con variaciones asociadas principalmente al ingreso de hidrógeno hacia el ambiente monitoreado.

Como se observa en la Figura 51, la lectura del sensor ZE07-H2 se mantuvo notoriamente por encima de la referencia entregada por el NEO986HT a lo largo de las cuatro pruebas realizadas, evidenciando una separación considerable entre ambas curvas dentro de este rango de concentración. Los resultados de esta caracterización se muestran en la Tabla 10, mediante el promedio y la desviación estándar obtenidos para cada sensor.

Tabla 11. Fuente propia. Muestra 2 entre 1.2% y 1.4 % de concentración de hidrógeno.

Prueba	Medición del sensor NEO986HT (% Hidrógeno)	Medición del sensor ZE07-H2 (% Hidrógeno)	Tiempo de calentamiento	Temperatura	Humedad	Presión atmósfera (mmHg)	Calidad del aire (Kohm)
1	1.4	2.7	5 min	22.1°C	8.54 %	763	0.18
2	1.3	2.6	5 min	22.6°C	8.37 %	763	0.19
3	1.2	2.4	5 min	22.8°C	7.63 %	763	0.19
4	1.3	2.4	5 min	22.2°C	8.65 %	759	0.21

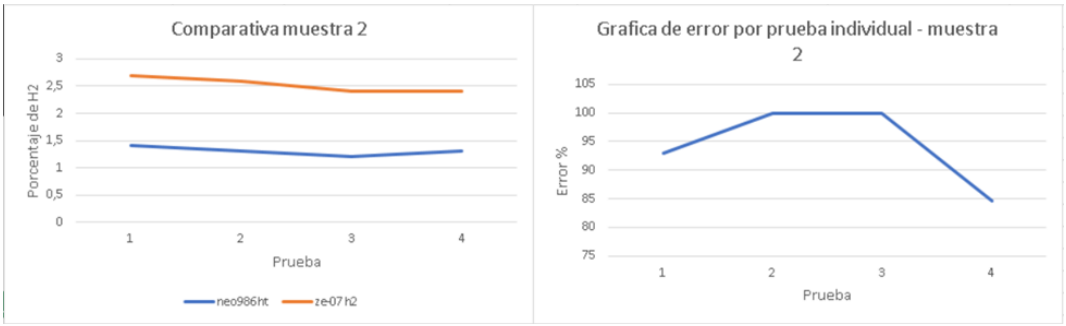


Figura 52. Fuente propia. Gráficas comparativas muestras 2

Tabla 12. Fuente propia. Promedios y desviación estándar de la muestra 2

Sensor	Promedio lectura H2	Desv. Estándar
NEO986HT	1.3	0.0816
ZE07-H2	2.525	0.15

Para la segunda muestra, presentada en la Tabla 11, se registraron valores de concentración de hidrógeno comprendidos entre 1.2% y 1.4%, aumentando un poco la concentración a la que se someten los sensores. La respuesta del sensor ZE07-H2 frente al valor de referencia entregado por el NEO986HT se registró bajo condiciones ambientales similares a las de la primera muestra, sin variaciones significativas entre las cuatro pruebas realizadas.

Como se observa en la Figura 52, la lectura del sensor ZE07-H2 se mantuvo notoriamente por encima de la referencia entregada por el NEO986HT a lo largo de las cuatro

pruebas, con una separación entre ambas curvas comparable a la registrada en la muestra anterior. Los resultados de esta caracterización se ven en la Tabla 12, mediante el promedio y la desviación estándar obtenidos para cada sensor.

Tabla 13. Fuente propia. Prueba 3 entre 1.55% y 1.6% de concentración de hidrógeno.

Prueba	Medición del sensor NEO986HT (% Hidrógeno)	Medición del sensor ZE07-H2 (% hidrógeno)	Tiempo de calentamiento	Temperatura	Humedad	Presión atmósfera (mmHg)	Calidad del aire (Kohm)
1	1.6	2.96	5 min	23.3°C	4.13 %	763	0.2
2	1.6	2.93	5 min	23°C	2.55 %	763	0.2
3	1.6	3	5 min	23.1°C	5.39 %	763	0.2
4	1.55	2.92	5 min	23.1°C	4.5 %	763	0.2

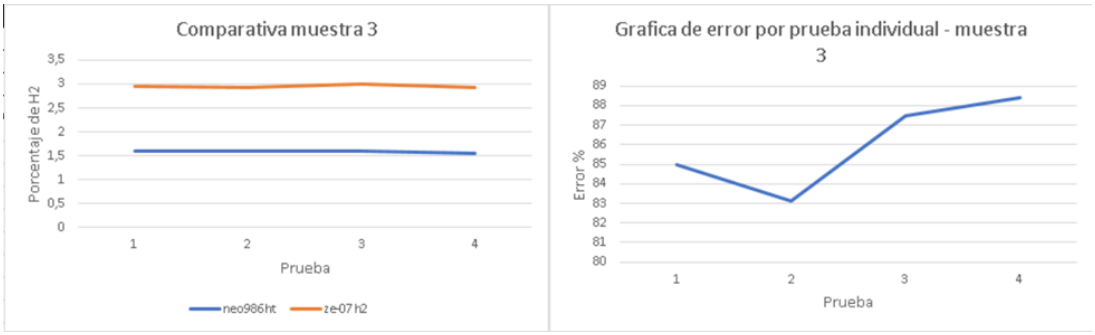


Figura 53. Fuente propia. Gráficas comparativas muestra 3

Tabla 14. Fuente propia. Promedios y desviación estándar de la muestra 3

Sensor	Promedio lectura H2	Desv. Estándar
NEO986HT	1.5875	0.025
ZE07-H2	2.9525	0.035

Para la tercera muestra, presentada en la Tabla 13, se registraron valores de concentración de hidrógeno comprendidos entre 1.5% y 1.6%, aumentando un poco más la concentración a la que se someten los sensores. La respuesta del sensor ZE07-H2 frente al valor de referencia

entregado por el NEO986HT se registró con condiciones ambientales similares a las muestras previas, con variaciones mínimas entre las cuatro pruebas realizadas.

Como se observa en la Figura 53, la lectura del sensor ZE07-H2 se mantiene por encima de la referencia entregada por el NEO986HT a lo largo de las cuatro pruebas con una separación de alrededor del doble entre mediciones como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 15. Fuente propia Prueba 4 con 2% de concentración de hidrógeno

Prueba	Medición del sensor NEO986HT (% Hidrógeno)	Medición del sensor ZE07-H2 (% hidrógeno)	Tiempo de calentamiento	Temperatura	Humedad	Presión atmósfera (mmHg)	Calidad del aire (Kohm)	Tiempo de lectura
1	2	3	5 min	23.4°C	7.59 %	763	0.19	7 min 2 segundos
2	2	3	5 min	23.5°C	9.29 %	763	0.2	6 min 39 segundos
3	2	3	5 min	23.5°C	8.07 %	763	0.19	6 min 57segundos
4	2	3	5 min	23.5°C	7.27 %	763	0.19	6 min 20 segundos

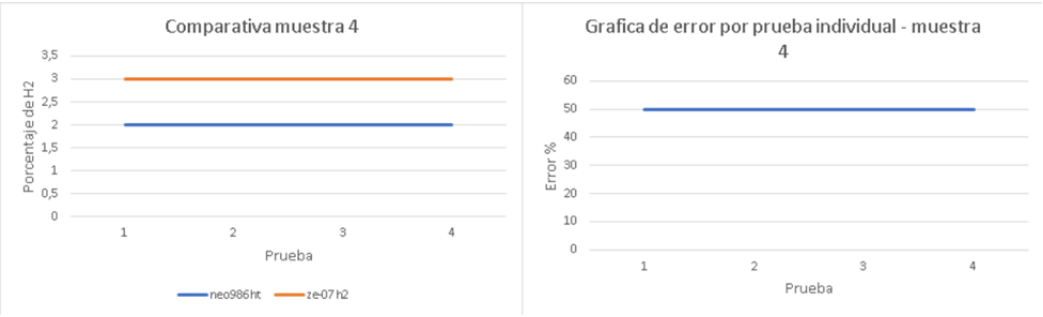


Figura 54. Fuente propia. Gráficas comparativas muestra 4

Tabla 16.Fuente propia. Promedios y desviación estándar de la muestra 4

Sensor	Promedio	Desv. Estándar

NEO986HT	2	0
ZE07-H2	3	0

En las mediciones anteriores se evidenció que el sensor de bajo costo ZE07-H2 alcanzaba un valor pico para posteriormente descender en su lectura, sin que existiera una reducción real en la concentración de hidrógeno suministrada desde el regulador de presión. Por este motivo además de las pruebas realizadas con las demás variables, se midió el tiempo requerido para que la lectura del sensor descendiera a cero, tal como se ve en la Tabla 15, el tiempo promedio registrado para que el sensor alcance una lectura de cero, aun en presencia de hidrógeno, fue de aproximadamente 6 minutos 45 segundos.

Para este ensayo se mantuvo una concentración constante de 2% de hidrógeno a lo largo de las cuatro pruebas realizadas. A diferencia de los ensayos anteriores, en este caso la respuesta del sensor ZE07-H2 se mantuvo su máximo del 3%, alcanzando así el límite superior de su capacidad de medición y entrando en saturación. Ambos sensores presentaron lecturas coherentes con las obtenidas en las muestras previas, evidenciándose nuevamente una separación entre las curvas de ambos sensores tal como se observa en la Figura 54.

Aunque en este ensayo las lecturas comparativas se muestran más cercanas entre sí, dicha aproximación se debe a que el sensor ZE07-H2 se encontraba saturado en su límite superior de medición (3%), mientras que el sensor patrón NEO986HT registraba un valor constante de 2%, reduciendo así artificialmente el margen de error relativo calculado entre ambos sensores. Los resultados de esta caracterización se presentan en la Tabla 16, mediante el promedio y la desviación estándar obtenidos para cada sensor. En este caso, al no existir variación entre los datos registrados, la desviación estándar resultante es igual a cero.

5.2.2 **Evaluación de variables ambientales en la prueba de laboratorio**

Con las muestras obtenidas en cada prueba, realizadas a distintos niveles de concentración, se registraron adicionalmente los valores de las variables ambientales con el fin de analizar su relación con el ingreso de hidrógeno al ambiente monitoreado.



Figura 55. Fuente propia. Comportamiento de las variables ambientales.

En la Figura 55 se muestra una de las muestras evaluadas, con varias pruebas registradas a lo largo del tiempo, diferenciando los intervalos previos y posteriores al ingreso de hidrógeno. Durante los intervalos en los que se incrementa la concentración de hidrógeno hasta el punto establecido por el sensor patrón, se evidencian variaciones ambientales que siguen un patrón recurrente en la totalidad de las muestras realizadas.

La temperatura, al momento de ingresar la mezcla de gases, presenta una reducción de apenas décimas de grado en cada ensayo; este descenso se marca de manera más evidente a medida que se realizan pruebas de forma continua.

La humedad presenta igualmente un comportamiento descendente: al ingresar la mezcla de gases se observa una reducción notoria, debido a los filtros de humedad del sistema, los cuales desplazan la humedad contenida en el aire, manteniendo en el ambiente únicamente la mezcla hidrógeno-nitrógeno con un porcentaje mínimo de humedad relativa.

En cuanto a la presión atmosférica registrada dentro de la sonda de medición, se observan ligeros incrementos, expresados en mmHg (milímetros de mercurio), cuya conversión a atmósferas se determina mediante:

$$P_{atm} = \frac{P_{mmHg}}{760} \tag{18}$$

Estos cambios de presión pueden explicarse por el ingreso de la mezcla de gases hacia la sonda, la cual, al ocupar progresivamente el volumen disponible dentro del ambiente cerrado,

genera un ligero incremento en la presión interna. Dicha presión retorna a sus valores normales una vez que la sonda se abre para purgarla de la mezcla.

Respecto a la calidad del aire, se observa que, al momento de ingresar hidrógeno, la resistencia detectada por el sensor disminuye, lo cual indica que el aire en dicha zona presenta una mayor conductividad. Dado que este sensor no es selectivo para un gas en particular, dicha disminución de resistencia evidencia la presencia de uno o más gases en el área, lo cual se traduce en una menor calidad del aire mientras se mantenga una baja resistencia detectada indicando que el aire no es apto para respirar.

Estos patrones se han presentado de manera consistente en cada muestra y pruebas realizadas, evidenciando una relación directa entre el ingreso de hidrógeno al ambiente monitoreado y la variación consecuente de las distintas variables ambientales monitoreadas.

Este comportamiento es coherente con el enfoque de [15], en el cual también se midieron temperatura, humedad y presión de forma simultánea con la concentración de hidrógeno, precisamente porque los parámetros ambientales influyen en la lectura de los sensores de gas de bajo costo y deben tenerse en cuenta al estimar la concentración. En su caso se empleó el sensor MQ-8, de tipo semiconductor (SnO2), mientras que el ZE07-H2 es de tipo electroquímico; aun con tecnologías distintas, en ambos trabajos se evidencia que la lectura de hidrógeno no puede interpretarse de forma aislada de las condiciones del ambiente, lo que justifica que la estación registre estas variables junto con cada medición

5.2.3 **Evaluación de los resultados**

Las pruebas de caracterización de los sensores, incluidas las variables ambientales analizadas, se realizaron con el montaje final del ambiente monitoreado, el cual es distinto de la versión inicial propuesta con una celda electroquímica, cambiando la forma de obtención del hidrógeno para una más controlada y medible suministrada a través de un manómetro y una válvula reguladora de presión, y pasa por un apagallamas y un filtro de humedad luego se diluye con nitrógeno, que cuenta con su propio filtro de humedad, para formar una mezcla hidrógeno-nitrógeno cuya concentración, ajustada variando el flujo de ambos gases, se mantiene entre 0 % y 3 % y se monitorea con el sensor patrón NEO986HT, como se muestra en la Figura 43.

En la versión anterior, el hidrógeno se obtenía mediante una celda electroquímica y su porcentaje se estabilizaba por medio de una bomba de aire. Esto generaba que en el ambiente

ingresaran además del hidrógeno, vapor de agua y gases del ambiente haciendo que la medición sea poco confiable, esta configuración se descartó y se reemplazó por el suministro regulado de hidrógeno con dilución en nitrógeno y filtros de humedad. El montaje final permite fijar y reproducir concentraciones conocidas de hidrógeno dentro del límite de medición del ZE07-H2, emplea un gas diluyente inerte que no reacciona con el hidrógeno ni interfiere con los sensores, y reduce la humedad presente en el ambiente de medición, de modo que este queda expuesto a la mezcla hidrógeno-nitrógeno con un porcentaje mínimo de humedad relativa.

En el antecedente [16] donde el hidrogeno también se obtenía de una celda electrolítica. Para caracterizar el gas en esas condiciones, en [16] no se utilizó un sensor de bajo costo, sino el HPS-100, un sensor de conductividad térmica con un rango de 0 % a 100 %, acompañado de sensores de flujo volumétrico y de corriente que permitían relacionar la producción de hidrógeno con las condiciones de operación de la celda. Esto refuerza la decisión tomada en el presente proyecto: cuando la fuente es una celda electroquímica, la mezcla que llega a la cámara no está bien definida (vapor de agua y aire arrastrado por la bomba), y un sensor económico de rango estrecho como el ZE07-H2, con límite de 3 %, no permite separar esos efectos de la concentración real de hidrógeno; por ello se optó por un suministro regulado con dilución en nitrógeno, que entrega concentraciones conocidas y repetibles.

Con el nuevo montaje varió, además, el comportamiento observado del sensor de bajo costo: con la configuración anterior, el ZE07-H2 subestimaba la concentración de hidrógeno, es decir, registraba lecturas por debajo de la referencia, mientras que con el montaje final la sobreestima, con promedios superiores a los del sensor patrón en las cuatro muestras y errores relativos entre 50 % y 131.78 %, tal como se muestra en la Tabla 17.

Con las muestras obtenidas se realiza la parametrización del sensor, para lo cual se elabora una comparativa estadística de rendimiento entre ambos sensores. Para cada una de las cuatro muestras se calculan los parámetros: promedio de medición de cada sensor, el error relativo porcentual y la exactitud del ZE07-H2 respecto al NEO986HT, la varianza y la desviación estándar de cada sensor con el fin de evaluar la dispersión de sus mediciones, y la razón entre ambas desviaciones estándar, empleada como indicador comparativo de precisión. Esta última métrica permite identificar que sensor presenta mayor estabilidad en sus mediciones: valores cercanos a 1 indican un comportamiento similar entre los dos sensores, mientras que los valores mayores a 1 evidencian menor precisión del sensor ZE07-H2 evaluado frente al sensor

NEO986HT. Las métricas de dispersión (razón entre desviaciones estándar, coeficiente de variación e intervalo de confianza) se interpretan como indicadores de precisión únicamente en las muestras en las que el ZE07-H2 opera sin saturación, puesto que una salida saturada presenta dispersión nula que no corresponde a la repetibilidad real del sensor

Tabla 17. Fuente propia. Parametrización del sensor ZE07-H2

Promedio NEO986 HT	Promedio ZE07-H2	Error Promedio %ZE07	Exactitud ZE07	Varianza NEO986HT	Varianza ZE07-H2	Desv. estándar NEO986HT	Desv. Estándar ZE07	CV-Precisión
0.7	1.6225	131.78 %	-32 % N.A.	0.006666667	0.074691	0.081649658	0.273297	3.34720032
1.3	2.525	94.23 %	6 %	0.006666667	0.0225	0.081649658	0.15	1.83711730
1.58752	2.95253	85.98 % 50 %	14 % 50 %	0.000625 0	0.001291 0	0.025 0	0.035939 0	1.43759057 0

El promedio registrado por el ZE07-H2 se aleja del valor entregado por el equipo patrón en las cuatro muestras. En la muestra 1 el error relativo supera el 100%, por lo que la ecuación da un valor negativo sin interpretación como exactitud; en esa muestra se reporta únicamente el error relativo, como se muestra en la Tabla 17, con un error relativo que varía entre 50 % y 131.78 %, y una exactitud que oscila entre 6 % y 50 % en las muestras 2 a 4. En la primera muestra, el error relativo (131.78 %) supera el 100 %, por lo que se observa que tanto el error como la exactitud a partir de la muestra 2 mejoran progresivamente conforme aumenta la concentración de hidrógeno evaluada, siendo la primera muestra (0.6 % - 0.8 %) la de peor desempeño, y la cuarta muestra (2 %) la de mejor exactitud registrada, aunque esta última se explica por la saturación del sensor más que por una mejora real en su desempeño. En cuanto a la dispersión de las mediciones, la varianza y la desviación estándar del NEO986HT se mantienen bajas y consistentes en todas las muestras, confirmando su estabilidad como equipo de referencia. La comparativa entre desviaciones estándar refleja que el ZE07-H2 pasa de presentar una dispersión de alrededor de 3.35 veces mayor que el patrón en la primera muestra, a 1.84 veces en la segunda y 1.44 veces en la tercera, acercándose de manera constante a un comportamiento similar al del NEO986HT. La cuarta muestra se excluye de esta comparativa: la desviación estándar nula del ZE07-H2 es consecuencia de la saturación de su salida en el límite superior de escala (3 %) y no de una mayor repetibilidad; además, al ser también nula la desviación estándar del patrón, la razón entre ambas resulta indeterminada.

Tabla 18. Fuente propia. Exactitud del sensor a concentraciones de hidrógeno

Bajas concentraciones 0%-1% de hidrógeno	Medias y altas concentraciones 1%-2% de hidrógeno
Exactitud no aplica (error relativo de 131.78%)	Exactitud entre 6% y 50%

Al agrupar los resultados de exactitud por rango de concentración, se observa en la Tabla 18, en las concentraciones bajas (0%-1% de hidrógeno) el indicador de exactitud no aplica, porque el error relativo del ZE07-H2 (131.78%) supera el 100%, lo que de por sí evidencia su bajo desempeño en ese rango, mientras que en concentraciones mientras que en concentraciones medias y altas (1 % - 2 %) la exactitud aparente del sensor es mayor, con valores entre 6 % y 50 %. Sin embargo, esta mejora no corresponde a un mejor desempeño: el ZE07-H2 se aproxima a su límite superior de medición (3 %) y en la cuarta muestra queda saturado, mientras la concentración de referencia sigue aumentando, lo que reduce artificialmente el error relativo.

Tabla 19. Fuente propia. Coeficiente de variación del sensor ZE07-H2

Muestra	Coeficiente de variación en %
1	16.84423802
2	5.940594059
3	1.217265518

Con el fin de complementar el análisis de dispersión, se calcula adicionalmente el coeficiente de variación del ZE07-H2 para cada muestra, como se observa en la Tabla 19. A diferencia de la desviación estándar, que expresa la dispersión en las unidades originales de medición, el CV la normaliza respecto al promedio de cada muestra, lo que permite comparar la precisión del sensor entre concentraciones de magnitudes distintas de forma más equitativa que la desviación estándar por sí sola. El análisis de precisión se restringe a las muestras 1 a 3, en las que las lecturas del ZE07-H2 se encuentran dentro de su rango de medición. La muestra 4 se excluye de este análisis, dado que en ella la salida del sensor permanece fija en su límite superior de escala (3 %); en condición de saturación el sensor entrega siempre el mismo valor, con independencia de la concentración real y de sus fluctuaciones. Por tanto, el CV de 0 % obtenido en esa muestra no expresa una alta repetibilidad, sino la pérdida de resolución de la señal por saturación, y carece de validez como indicador de precisión. Considerando únicamente las muestras válidas, el CV del ZE07-H2 disminuye de 16.84 % en la primera muestra a 5.94 % en la segunda y a 1.22 % en la tercera, La cuarta muestra se excluye de este análisis, dado que en ella el sensor se encuentra saturado en su límite superior de medición (3%); el CV de 0% que allí se obtiene no refleja una mejora en la precisión, sino la ausencia de variación propia de una lectura saturada. Esta

tendencia es coherente con la comparativa de desviaciones estándar como se observan en la Tabla 17: ambas métricas coinciden en que la precisión del ZE07-H2 mejora conforme aumenta la concentración de hidrógeno evaluada.

Para complementar el análisis, se calcula el intervalo de confianza (IC) del 95% del promedio de cada sensor en cada muestra. Dado que cada promedio se obtiene a partir de solo cuatro datos (n = 4), se emplea la distribución t de Student con n − 1 = 3 grados de libertad, para la cual t = 3.182, de modo que el intervalo se calcula con la ecuación (7) donde S es la desviación estándar muestral presentada en la Tabla 17. Este intervalo cuantifica únicamente la variabilidad entre repeticiones; por ello se considera de forma independiente la incertidumbre del equipo patrón NEO986HT-ATEX, que es de ±0.3 % vol, valor indicado en la sección 4.2.1 como precisión del equipo. Los resultados se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20. Fuente propia. Intervalos de confianza del 95% de los promedios e incertidumbre del equipo patrón

Muestra	NEO986HT: promedio ± IC 95 % (% H2)	Incertidumbre del patrón (±0.3 % vol) respecto al promedio	ZE07-H2: promedio ± IC 95 % (% H2)	Error relativo del ZE07-H2: valor nominal (rango con ±0.3 % vol)
1	0.70 ± 0.13	42.9 %	1.62 ± 0.43	131.78 % (62.3 % – 305.6 %)
2	1.30 ± 0.13	23.1 %	2.53 ± 0.24	94.23 % (57.8 % – 152.5 %)
3	1.59 ± 0.04	18.9 %	2.95 ± 0.06	85.98 % (56.4 % – 129.3 %)
4	2.00 ± 0.00	15.0 %	3.00 ± 0.00	50 % (30.4 % – 76.5 %)

Como se observa en la Tabla 20, el intervalo de confianza del ZE07-H2 es más amplio en la primera muestra (±0.43 % de H2) y se reduce progresivamente hasta ±0.06 % en la tercera, en concordancia con la disminución de la dispersión relativa observada en la Tabla 19. En la cuarta muestra el intervalo tiene amplitud cero porque las cuatro lecturas de cada sensor son idénticas; este resultado no indica una medición exacta, ya que el ZE07-H2 se encuentra saturado en su límite superior (3 %); por ello, esta muestra no se considera en la evaluación de la precisión, y la incertidumbre determinante en ella es la del equipo patrón.

Para el NEO986HT, el intervalo de confianza de los promedios es estrecho (entre ±0.13 % y ±0.04 % en las muestras 1 a 3), pero su incertidumbre de ±0.3 % vol es mayor en todas las muestras y tiene un peso relativo considerable a bajas concentraciones: equivale al 42.9 % del promedio medido en la muestra 1 (0.7 %), es decir, casi la mitad del valor, y disminuye a 23.1%,

18.9% y 15.0% en las muestras 2, 3 y 4. Esta incertidumbre afecta la interpretación del error relativo de la Tabla 17, calculado tomando el promedio del NEO986HT como valor verdadero. Al considerar el margen de ±0.3 % vol, la concentración de referencia de la muestra 1 estaría comprendida entre 0.4 % y 1.0 %, y el error relativo del ZE07-H2 entre 62.3 % y 305.6 %, en lugar del valor puntual de 131.78 %; en las muestras 2, 3 y 4 el error se ubicaría entre 57.8 % y 152.5 %, 56.4 % y 129.3 %, y 30.4 % y 76.5 %, respectivamente. Por tanto, los errores relativos deben entenderse como valores nominales, cuya magnitud es especialmente incierta a bajas concentraciones.

Sin embargo, la sobreestimación del ZE07-H2 no puede atribuirse a la incertidumbre del patrón: en las cuatro muestras, el límite inferior del intervalo de confianza del ZE07-H2 (1.19 %, 2.29 %, 2.90 % y 3.00 %) supera el límite superior del rango de referencia, es decir, el promedio del NEO986HT más 0.3 % vol (1.0 %, 1.6 %, 1.89 % y 2.3 %), incluso al sumar el intervalo de confianza del propio NEO986HT. En consecuencia, el sensor de bajo costo registra valores superiores a la referencia con un margen mayor que las incertidumbres consideradas, aunque la magnitud exacta de esa desviación, en particular en la muestra 1, está limitada por la incertidumbre del equipo patrón.

Este hallazgo concuerda con lo reportado en los antecedentes. En [15] calibraron el sensor de bajo costo MQ-8 únicamente a partir de la curva de sensibilidad del fabricante, mediante un modelo no lineal de tipo potencial, y los mismos autores aclaran que el resultado obtenido es solo una estimación cualitativa de la concentración de hidrógeno, sin contrastarla con un equipo de referencia ni reportar márgenes de error. Aunque la tecnología de medición es distinta (semiconductor en [15] y electroquímico en este trabajo), ambos resultados apuntan en la misma dirección: un sensor de hidrógeno de bajo costo, usado con la calibración de fábrica, no entrega por sí solo un valor confiable de concentración. La diferencia es que en el presente estudio esa limitación se cuantifica frente al equipo patrón NEO986HT, con errores relativos entre 50 % y 131.78 %, lo que aporta evidencia numérica a lo que en [15] se planteó de forma cualitativa. Por su parte, en [16] se lograron mediciones en tiempo real de la concentración de hidrógeno en la celda electrolítica, pero empleando un sensor especializado de conductividad térmica (HPS-100) con rango de 0 % a 100 %, y no uno de bajo costo; en ese caso, además, el problema de saturación observado con el ZE07-H2 en la muestra 4 no se presentaría. Esto sugiere que, cuando se requiere un valor cuantitativo de concentración, la selección y calibración del sensor pesan más en la exactitud final que el resto del sistema de adquisición y comunicación.

5.2.4 **Modelamiento del sensor**

Para modelar el comportamiento entre la concentración de hidrógeno de referencia entregada por el NEO986HT y la respuesta del sensor ZE07-H2, se realiza un análisis de regresión lineal a partir de los valores promedio obtenidos experimentalmente en las muestras 1, 2 y 3, es decir, en los puntos donde el sensor todavía responde a los cambios de concentración.

La variable independiente corresponde a la concentración de hidrógeno de referencia (eje X), y la variable dependiente a la concentración detectada por el sensor ZE07-H2 (eje Y), donde la relación se expresa mediante la fórmula de la ecuación lineal.

La muestra 4 (2 % de hidrógeno de referencia) no se incluye en el ajuste. En esa prueba el ZE07-H2 marcó 3 % en las cuatro repeticiones, que es el límite superior de su rango de medición, por lo que esa lectura no es una respuesta del sensor a la concentración de hidrógeno, sino el valor en el que se queda fijo al saturarse. Si se incluye ese punto en la regresión, la recta se aplana en la zona alta: la pendiente baja a 1.1137, la intersección sube a 0.9692 y el coeficiente de determinación cae a 0.9079. Por eso el modelo se construye solo con las muestras 1 a 3, donde la lectura del sensor sí cambia con la concentración; al hacerlo, la pendiente pasa a 1.4994 y el ajuste mejora de forma notable, como se muestra a continuación

A partir de los datos experimentales de las muestras 1 a 3 (n = 3):

$$\sum x = 3.5875, \sum y = 7.1, \sum xy = 9.10534375, \sum x^2 = 4.70015625$$

Donde los valores de los parámetros se obtienen de esta forma:

$$m = \frac{n\sum xy - \sum x \sum y}{n\sum x^2 - (\sum x)^2} \approx 1.4994 \quad (19)$$

$$b = \frac{\sum y - m\sum x}{n} \approx 0.5736 \quad (20)$$

Por lo que la ecuación de regresión que describe el comportamiento del sensor a partir de la concentración de referencia es:

$$y = 1.4994x + 0.5736 \quad (21)$$

La intersección con el eje Y presenta un valor positivo de 0.5736. Este valor corresponde al término independiente obtenido mediante el ajuste de regresión lineal por mínimos cuadrados a partir de los datos experimentales de las tres muestras en las que el sensor no se encuentra saturado. Debido a que el modelo se construye únicamente con los puntos experimentales correspondientes a concentraciones de hidrógeno diferentes de cero, la intersección con el eje Y no representa una medición experimental realizada en ausencia de hidrógeno, sino el valor que matemáticamente adopta la recta cuando la variable independiente toma el valor de cero. Por tanto, el valor de 0.5736 debe interpretarse como un parámetro propio del modelo de regresión y no como una lectura real del sensor ZE07-H2 en ausencia de hidrógeno. Cabe aclarar que la disminución en la tasa de crecimiento que se observaba al incluir la muestra 4 no corresponde a

una no linealidad propia del sensor, sino a su saturación en el límite de 3 %, razón por la cual dicho punto se excluye del ajuste.

5.2.5 **Curva de calibración**

La curva característica del sistema se obtiene a partir de la regresión lineal calculada, empleando los puntos experimentales de la Tabla 21. El punto de la muestra 4 (2 %; 3 %) se conserva en la tabla y en la Figura 56 solo como referencia de la saturación del sensor, pero no hace parte del ajuste:

Tabla 21. Fuente propia. Coordenadas de los puntos experimentales

Eje x (concentración de H2% NEO986HT)	Eje y (concentración de H2 % ZE07-H2)
0.7	1.6225
1.3	2.525
1.5875	2.9525
2	3

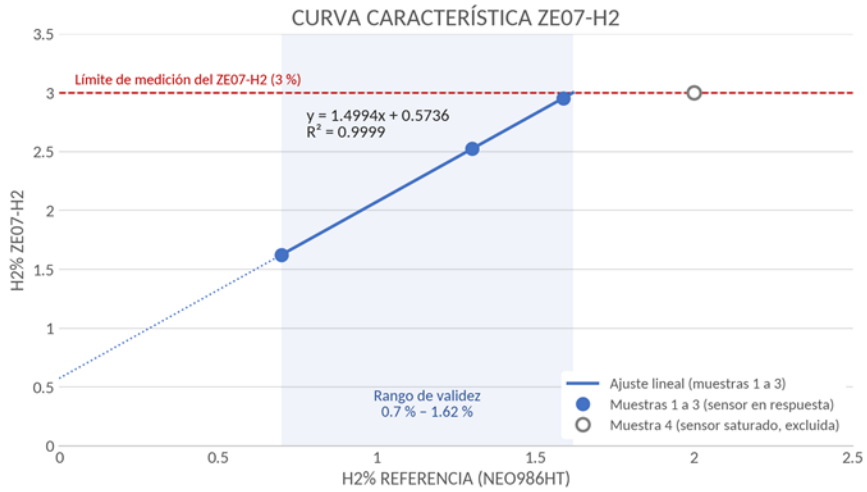


Figura 56. Fuente propia. Curva característica del sensor ZE07-H2

La curva resultante, representada en la Figura 56, muestra una tendencia creciente entre la concentración de hidrógeno de referencia y la respuesta del sensor ZE07-H2. Los tres puntos usados en el ajuste quedan prácticamente sobre la recta, mientras que el punto de la muestra 4 se sale de la tendencia y queda sobre la línea de 3 %, que corresponde al límite de medición del

ZE07-H2. En la figura también se marca el rango en el que el modelo es válido, el cual se explica más adelante.

Para evaluar la calidad del ajuste de la curva se calcula el coeficiente de determinación R^2, definido como:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - y_{pred})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \approx 0.9999 \quad (22)$$

La linealidad del sistema se evalúa a partir de este coeficiente, el cual indica el grado de ajuste de los datos a un modelo lineal. Para la presente investigación, el resultado obtenido fue:

$$Linealidad = R^2 = 99.99\%$$

Este valor indica que, en el rango donde el sensor responde, los promedios del ZE07-H2 quedan prácticamente sobre la recta, con residuos menores a 0.003 % de hidrógeno. Sin embargo, este resultado debe tomarse con cautela: el ajuste se hace con solo tres puntos (un grado de libertad), cada uno correspondiente al promedio de cuatro lecturas, por lo que un R^2 tan cercano a 1 muestra que los promedios están bien alineados, pero no reemplaza una calibración con más niveles de concentración. Aun así, la comparación con el ajuste de cuatro puntos (R^2 = 0.9079) confirma que la desviación respecto a la recta que se tenía antes se debía al punto saturado y no al comportamiento del sensor dentro de su rango.

En cuanto al rango de validez del modelo, como el ZE07-H2 no puede entregar lecturas por encima de 3 %, la ecuación (21) solo tiene sentido mientras la salida del sensor esté por debajo de ese límite. Igualando la ecuación (21) a 3 % se obtiene la concentración de referencia a partir de la cual el sensor se satura:

$$x = (3 - 0.5736) / 1.4994 \approx 1.62\ \%\ de\ hidrógeno \quad (23)$$

Esto coincide con lo observado en las pruebas: en la muestra 3 (1.59 % de referencia) el sensor marcó 2.95 %, muy cerca de su tope, y en la muestra 4 (2 %) ya se encontraba saturado. Por el lado bajo, la menor concentración evaluada fue 0.7 %, de modo que por debajo de ese valor la recta es solo una extrapolación y no está validada experimentalmente. En consecuencia, el modelo es válido para concentraciones de hidrógeno de referencia entre 0.7 % y 1.62 % aproximadamente, lo que corresponde a lecturas del ZE07-H2 entre 1.62 % y 3 %. Dentro de ese rango, la lectura del sensor puede corregirse despejando la concentración real como

$$x = (y - 0.5736) / 1.4994 \quad (24)$$

Por encima de 1.62 % la corrección no es posible, porque para cualquier concentración mayor el sensor entrega el mismo valor de 3 %.

Respecto a la forma de la curva, en [15] la relación entre la resistencia del MQ-8 y la concentración de hidrógeno se modeló con una función potencial, es decir, no lineal, lo cual es característico de los sensores semiconductores. En el caso del ZE07-H2, una vez excluido el punto saturado, el comportamiento en el rango de 0.7 % a 1.62 % es prácticamente lineal (R^2 = 0.9999); la curvatura que aparentaba la curva con cuatro puntos se debía a la saturación y no a una no linealidad propia del sensor. Aun así, como el ajuste se basa en solo tres puntos, de forma similar a lo realizado en [15] sería recomendable aumentar el número de puntos de calibración, incluyendo concentraciones por debajo de 0.7 %, antes de emplear la ecuación (21) para corregir las lecturas del sensor.

5.2.6 **Sensibilidad del sensor**

La sensibilidad del sensor se determina con el fin de evaluar su capacidad de respuesta ante los cambios en la concentración de hidrógeno de entrada. Asumiendo la relación lineal establecida para el estudio, la sensibilidad corresponde directamente a la pendiente de la recta de regresión:

$$Sens = m_{pendiente}$$

A partir de la ecuación de calibración obtenida, se tiene que la sensibilidad del sensor es:

$$Sens = m = 1.4994$$

Esto indica que, por cada incremento de 1% en la concentración de hidrógeno de referencia entregada por el NEO986HT, la señal de salida del sensor ZE07-H2 aumenta en aproximadamente 1.4994 % de hidrógeno, bajo las condiciones de prueba establecidas en este estudio y dentro del rango de validez del modelo (0.7 % a 1.62 % de hidrógeno de referencia).

Este valor es mayor que el obtenido inicialmente (Sens = 1.1137), cuando el ajuste incluía la muestra 4. Esa sensibilidad quedaba subestimada porque el punto saturado, en el que la lectura del sensor ya no aumenta, aunque la concentración sí lo haga, arrastraba la pendiente hacia abajo. En el tramo donde el ZE07-H2 sí responde, la sensibilidad es de aproximadamente 1.50, es decir, el sensor registra una vez y media el cambio real de concentración: si el hidrógeno aumenta 0.1 %, la lectura del sensor sube cerca de 0.15 %. Un sensor ideal tendría una sensibilidad igual a 1, por lo que este resultado confirma que la sobreestimación del ZE07-H2 no es solo un desplazamiento fijo, sino que también crece con la concentración. A este factor se suma el término independiente de 0.5736 de la ecuación (21), razón por la cual las lecturas absolutas del sensor llegan a ser entre 1.86 y 2.32 veces la concentración de referencia en las

muestras 1 a 3 (por ejemplo, 1.62 % frente a 0.70 % en la muestra 1). Ambos efectos, la ganancia de 1.5 y el desplazamiento, son los que se corrigen con la ecuación (25) a continuación.

5.2.7 **Corrección de las lecturas mediante la curva de calibración**

Una vez obtenida la curva de calibración, se aplica sobre las lecturas del ZE07-H2 para corregir la sobreestimación observada en la sección de evaluación de los resultados. Para ello se despeja la concentración de referencia de la ecuación (21), obteniendo la función inversa que convierte la lectura del sensor (y) en la concentración estimada de hidrógeno (x):

$$x = \frac{y - 0.5736}{1.4994} \tag{25}$$

Donde y es la lectura entregada por el ZE07-H2 en % de hidrógeno y x es la concentración corregida. Esta ecuación se aplica únicamente dentro del rango de validez del modelo, es decir, para lecturas del sensor entre 1.62 % y 3 %, que corresponden a concentraciones de referencia entre 0.7 % y 1.62 %. En la práctica, esta corrección puede implementarse directamente en el firmware del ESP32, aplicándola a cada lectura antes de enviarla al servidor y a la memoria microSD. Con los valores corregidos se recalculan el error relativo y la exactitud respecto al NEO986HT, empleando las mismas ecuaciones utilizadas en la Tabla 17.

Tabla 22. Fuente propia. error relativo y exactitud del ZE07-H2 con lecturas corregidas

Muestra	NEO986HT promedio (% H2)	ZE07-H2 sin corregir (% H2)	Error relativo sin corregir	ZE07-H2 corregido (% H2)	Error relativo corregido	Exactitud corregida
1	0.70	1.6225	131.78 %	0.6995	0.07 %	99.93 %
2	1.30	2.525	94.23 %	1.3015	0.11 %	99.89 %
3	1.5875	2.9525	85.98 %	1.5866	0.06 %	99.94 %
(saturado)	2.00	3.00	50 %	1.6182	19.09 %	No aplica (fuera del rango de validez)

Como se observa en la Tabla 22, al aplicar la corrección el error relativo del promedio del ZE07-H2 baja de 131.78 %, 94.23 % y 85.98 % a 0.07 %, 0.11 % y 0.06 % en las muestras 1, 2 y 3, respectivamente, y la exactitud pasa a valores superiores al 99.8 %. En la muestra 1, donde antes la exactitud no podía calcularse por tener un error relativo mayor al 100 %, ahora se obtiene una exactitud de 99.93 %. La muestra 4 no mejora de la misma forma: como el sensor está saturado en 3 %, la ecuación (23) siempre devuelve 1.62 % sin importar la concentración real, por lo que el error corregido es de 19.09 % y la exactitud no se reporta, ya que este punto se encuentra fuera del rango de validez del modelo.

Es importante aclarar el alcance de este resultado. Los errores tan bajos se obtienen porque la curva de calibración se construyó con los mismos promedios que ahora se corrigen, de

modo que lo que se comprueba es que el modelo reproduce bien los datos con los que fue ajustado, y no que se haya validado con mediciones nuevas. Además, al corregir cada lectura individual en lugar del promedio, el error relativo es mayor: entre 10.6 % y 19.3 % en la muestra 1, entre 1.3 % y 6.3 % en la muestra 2, y entre 0.5 % y 1.8 % en la muestra 3. Esto se debe a que la corrección elimina el error sistemático del sensor (la sobreestimación), pero no la dispersión propia de sus lecturas, que es mayor a bajas concentraciones como se observó en la Tabla 19. A esto se suma la incertidumbre del equipo patrón (±0.3 % vol), que sigue siendo el factor que más limita la exactitud que se puede verificar. Por lo anterior, se recomienda confirmar este resultado con pruebas adicionales a concentraciones distintas de las usadas en la calibración, comparando las lecturas corregidas frente al NEO986HT.

Aun con estas limitaciones, el resultado muestra que la sobreestimación del ZE07-H2 es un error sistemático y repetible, y que al aplicar la curva de calibración el sensor puede entregar valores cercanos a la referencia dentro del rango de 0.7 % a 1.62 % de hidrógeno

6. CONCLUSIONES

Se desarrolló un sistema de bajo costo para la medición de la concentración de hidrógeno, capaz de adquirir datos en un entorno monitoreado e integrar tecnologías IoT para la transmisión, el almacenamiento y la visualización de la información en tiempo real. El sistema fue diseñado conforme a los requerimientos planteados de funcionalidad, conectividad y accesibilidad, con el propósito de ofrecer una alternativa económica frente a los equipos de alto costo disponibles en el mercado, basada en hardware de código abierto.

Con base en las pruebas de laboratorio realizadas, el sensor ZE07-H2 presenta una sobreestimación sistemática de la concentración de hidrógeno en el rango de 0.7 % a 1.6 %, con errores relativos entre 50% y 131,78% según la concentración de prueba, la cual resulta consistente entre muestras y, por tanto, corregible mediante una curva de calibración: al aplicar la ecuación inversa de calibración, el error relativo de los promedios baja a menos del 0.2 % en el rango de 0.7 % a 1.62 % de hidrógeno, aunque este resultado debe confirmarse con mediciones independientes a las usadas en el ajuste. Sin embargo, el sensor no resulta adecuado para el monitoreo continuo de hidrógeno en yacimientos, debido principalmente a que alcanza su límite técnico de medición (3%) cuando la concentración real apenas llega al 2%, muy por debajo de su rango nominal, y a que su lectura desciende de forma progresiva hasta cero en un lapso aproximado de 6 a 7 minutos, incluso si la concentración real de hidrógeno se mantiene constante. Estas características, evidenciadas de manera consistente en las cuatro muestras analizadas, indican que el ZE07-H2 está orientado a la detección puntual de fugas y no a la medición continua de concentraciones, siendo necesario recurrir a un equipo de mayor exactitud, como el NEO986HT, o a un sensor con especificaciones técnicas más adecuadas para este propósito.

Se realizó la selección y caracterización del sensor de hidrógeno ZE07-H2 considerando criterios como el costo, la disponibilidad en el mercado, el rango de medición y facilidad de integración. Este proceso evidenció que, si bien el sensor presenta una desviación sistemática frente al equipo patrón, corregible mediante una curva de calibración, su limitación real para el monitoreo continuo de yacimientos radica en su naturaleza y estructura de reacción: el sensor alcanza rápidamente su límite técnico de medición y, tras registrar un valor pico de lectura, esta desciende de forma progresiva hasta llegar a cero en cuestión de minutos, sin sostenerse en el tiempo, recuperándose únicamente cuando es alejado del área con presencia de hidrógeno. Lo

anterior confirma que se trata de un sensor orientado a la detección puntual de fugas, y no a la medición continua de concentraciones de hidrógeno.

La integración del sensor de variables ambientales (temperatura, humedad, presión atmosférica y calidad del aire) permitió ejercer un control adecuado sobre la sonda de detección, identificándose un patrón recurrente en el comportamiento de dichas variables durante el ingreso y la liberación de la mezcla de gases. Este fenómeno se encuentra asociado principalmente al comportamiento físico de los gases al ingresar a un nuevo espacio de contención, más que a una respuesta específica del sensor de hidrógeno evaluado.

Se implementó una arquitectura IoT basada en el microcontrolador ESP32, el protocolo MQTT y herramientas como InfluxDB, Node-RED y Grafana, logrando una transmisión constante de datos, su almacenamiento en bases de datos de series temporales y su visualización remota, con potencial de escalabilidad hacia soluciones en la nube en futuras versiones de la estación.

Se comprobó que la estación es capaz de enviar mensajes de alerta a un equipo especializado ante la detección de un nivel crítico de hidrógeno, así como de conservar los datos registrados mediante archivos en formato *.CSV, compatibles con Excel, los cuales contiene la fecha, hora de la muestra, la concentración de hidrógeno en ppm y las variables ambientales correspondientes. En el caso de los datos almacenados en el servidor, dichos archivos incluyen además el bucket o contenedor de almacenamiento correspondiente, siendo estos registros descargables tanto desde la base de datos del servidor como desde la memoria microSD integrada en la estación.

El sistema demuestra ser modular, escalable y adaptable, permitiendo futuras mejoras tanto a nivel de programación como de componentes, gracias al uso de buses de comunicación compatibles con diversos módulos disponibles en el mercado. Esta característica facilita la incorporación de nuevas versiones de módulos, sensores de hidrógeno de mejor desempeño, o su implementación en entornos de prueba reales.

Aunque no se lograron los resultados esperados en cuanto al desempeño del sensor evaluado, el desarrollo de este proyecto constituye un aporte relevante para futuras investigaciones, mediante la propuesta de una tecnología de bajo costo diseñada a partir de las necesidades y limitaciones identificadas durante la investigación, contribuyendo así al fortalecimiento de la investigación en el campo de las energías alternativas.

7. RECOMENDACIONES

- Optimizar el código de funcionamiento de la estación, la cual actualmente constituye una herramienta de apoyo para futuras investigaciones, mediante mejoras adicionales en su programación, tales como la configuración en la nube del bróker MQTT, el Dashboard y la base de datos, de manera que el sistema pueda operar sin depender de un computador como servidor local.
- Verificar periódicamente la política de retención de datos configurada en InfluxDB, con el fin de evitar pérdidas de información por vencimiento del periodo de almacenamiento establecido. Asimismo, en caso de emplear la versión local del servidor, se recomienda monitorear el espacio de almacenamiento disponible, ya que, al agotarse la capacidad del disco duro, los datos más antiguos serán sobrescritos por los nuevos registros ingresados.
- Retirar el microcontrolador ESP32 del sistema al momento de realizar su programación, con el fin de evitar que la energía suministrada se distribuya simultáneamente entre los demás componentes conectados, lo cual podría generar una caída de voltaje que impida completar el proceso de programación correctamente.
- Emplear materiales resistentes en la construcción de la unidad central de la estación de hidrógeno, especialmente si se planea su exposición prolongada en campo, garantizando al menos un grado de protección IP65, el cual asegura resistencia frente al polvo y a la lluvia intensa.
- Considerar la implementación de un sensor de tecnología distinta a la electroquímica, dado que este tipo de sensores, al basarse en reacciones de oxidación con el aire, pueden detectar iones de hidronio provenientes de diversas mezclas gaseosas, y no exclusivamente de hidrógeno puro. La arquitectura modular del sistema permite adaptar sensores alternativos a través de los pines disponibles en la estación, representando una ventaja significativa al evitar el rediseño completo del sistema.
- Aprovechar la arquitectura modular del sistema para reemplazar el sensor de hidrógeno actual por otras alternativas compatibles con el protocolo UART.

- Buscar opciones alternativas de transmisión de datos mediante tecnología GPRS, considerando que el módulo A9G opera únicamente sobre red 2G, cuya cobertura es cada vez más limitada en Colombia y actualmente solo se encuentra disponible a través del operador Claro.
- Para futuros procesos de escalamiento de la estación, se recomienda calcular la potencia máxima requerida por el nuevo sistema, con el fin de prevenir fallos en el suministro eléctrico y garantizar una autonomía adecuada tanto del panel solar como del banco de baterías.

Referencias

[1] Q. ning Tian, S. qing Yao, M. juan Shao, W. Zhang, and H. hua Wang, “Origin, discovery, exploration and development status and prospect of global natural hydrogen under the background of ‘carbon neutrality,’” *China Geol.*, vol. 5, no. 4, pp. 722–733, Oct. 2022, doi: 10.31035/CG2022046.

[2] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, “Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions,” *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, Sep. 2013, doi: 10.1016/J.FUTURE.2013.01.010.

[3] Universidad CESMAG, “LÍNEAS Y SUBLÍNEAS DE INVESTIGACIÓN INGENIERÍA ELECTRÓNICA LÍNEA 1: POTENCIA Y ENERGÍA”.

[4] E. Institute, “In collaboration with Statistical Review of World Energy,” p. 76, 2024.

[5] Z. Zhong *et al.*, “Power-to-Hydrogen by Electrolysis in Carbon Neutrality: Technology Overview and Future Development,” *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 9, no. 4, pp. 1266–1283, Jul. 2023, doi: 10.17775/CSEEJPES.2022.08850.

[6] E. Palmer, “Introduction: The 2030 Agenda,” *J. Glob. Ethics*, vol. 11, no. 3, pp. 262–269, Sep. 2015, doi: 10.1080/17449626.2015.1119928.

[7] G. N. de Colombia, “COLOMBIA, POTENCIA MUNDIAL DE LA VIDA,” 2023.

[8] M. Mainson, C. Heath, B. Pejcic, and E. Frery, “Sensing Hydrogen Seeps in the Subsurface for Natural Hydrogen Exploration,” *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 13, 2022, doi: 10.3390/app12136383.

[9] A. Carrillo Ramirez, F. Gonzalez Penagos, G. Rodriguez, and I. Moretti, “Natural H2 Emissions in Colombian Ophiolites: First Findings,” *Geosci. 2023, Vol. 13, Page 358*, vol. 13, no. 12, p. 358, Nov. 2023, doi: 10.3390/GEOSCIENCES13120358.

[10] T. Mo, Y. Li, and Y. Luo, “Advantages and Technological Progress of Hydrogen Fuel Cell Vehicles,” *World Electr. Veh. J. 2023, Vol. 14, Page 162*, vol. 14, no. 6, p. 162, Jun. 2023, doi: 10.3390/WEVJ14060162.

[11] S. Scholvin, “Green hydrogen and linkage-based development in Antofagasta, Chile,” *Local Econ.*, vol. 38, no. 5, pp. 506–517, Aug. 2023, doi: 10.1177/02690942241230450/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_02690942241230450-FIG2.JPEG.

[12] M. D. Mesa *et al.*, “REPÚBLICA DE COLOMBIA Ministerio de Minas y Energía”.

[13] E. Southall and L. Lukashuk, “Hydrogen Storage and Transportation Technologies to Enable the Hydrogen Economy: Liquid Organic Hydrogen Carriers: Overview and perspectives on liquid organic hydrogen carriers technology,” *Johnson Matthey Technol. Rev.*, vol. 66, no. 3, pp. 246–258, Jul. 2022, doi: 10.1595/205651322X16415717819428.

[14] F. J. Folgado, I. González, and A. J. Calderón, “Data acquisition and monitoring system framed in Industrial Internet of Things for PEM hydrogen generators,” *Internet of Things*, vol. 22, p. 100795, Jul. 2023, doi: 10.1016/J.IOT.2023.100795.

[15] A. I. Sunny, A. Zhao, L. Li, and S. Kanteh Sakiliba, “Low-Cost IoT-Based Sensor System: A Case Study on Harsh Environmental Monitoring,” *Sensors 2021, Vol. 21, Page 214*, vol. 21, no. 1, p. 214, Dec. 2020, doi: 10.3390/S21010214.

[16] C. D. Casanova Vasco, “Diseño e implementación de un sistema de monitoreo de gas hidrógeno para el grupo de investigación estudio de sistemas contaminantes,” 2016.

[17] J. R. Cedeño Pinto, M. S. Soriano Arteaga, and E. FIEC, “Implementación de una red IoT basada en sensores para caracterizar y monitorear las variables físicas de un generador de hidrógeno,” 2022, Accessed: Nov. 17, 2025. [Online]. Available: http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/57593

[18] J. F. J. Fisika *et al.*, “Development of a Real-Time Gas Concentration Measurement System Using Internet of Things-Based Monitoring,” *Spektra J. Fis. dan Apl.*, vol. 9, no. 1, pp. 27–38, Apr. 2024, doi: 10.21009/SPEKTRA.091.03.

[19] J. J. Lozada, C. D. Casanova, and A. Perdomo, “Electronic Monitoring System for Hydrogen Produced from the Oxidation of Human Urine (Mhydros),” *J. Sci. Eng. Res.*, vol. 4, no. 2, pp. 52–57, 2017, Accessed: Sep. 22, 2024. [Online]. Available: www.jsaer.com

[20] J. Morante, T. Andreu, G. García, … J. G.-V. energético, and U. 2020, “Hidrógeno,” *a-h2.org*, Accessed: Nov. 19, 2025. [Online]. Available: https://a-h2.org/wp-content/uploads/2022/12/HIDROGENO-VECTOR-ENERGETICO-DE-UNA-ECONOMIA-DESCARBONIZADA.pdf

[21] J. Ramón, M. Teresa, A. Gotzon, G. J. Guilera, A. Tarancón, and M. Torrell, “Hidrógeno Vector energético de una economía descarbonizada”.

[22] N. De Blasio, “The Colors of Hydrogen | The Belfer Center for Science and International Affairs.” Accessed: Nov. 04, 2024. [Online]. Available:

https://www.belfercenter.org/research-analysis/colors-hydrogen

[23] M. A. Hortal and Á. L. M. Barreras, “El hidrógeno : fundamento de un futuro equilibrado / Mario Aguer Hortal, Ángel L. Miranda Barreras.,” 2012.

[24] M. H. Brijaldo, C. Castillo, G. Pérez, M. H. Brijaldo, C. Castillo, and G. Pérez, “Principales Rutas en la Producción de Hidrógeno,” *Ing. y Compet.*, vol. 23, no. 2, p. e30111155, May 2021, doi: 10.25100/IYC.V23I2.11155.

[25] “NORMATIVA ATEX NOMENCLATURA Y CODIFICACIÓN DEFINICIÓN DE ATMÓSFERA EXPLOSIVA QUÉ ES ATEX?”, Accessed: Nov. 20, 2025. [Online]. Available: www.tecnical.cat

[26] P. Dasgupta, “Safety for hydrogen | IEC e-tech.” Accessed: Nov. 20, 2025. [Online]. Available: https://etech.iec.ch/issue/2023-06/safety-for-hydrogen

[27] ISO, “ISO/TR 15916:2015 - Basic considerations for the safety of hydrogen systems.” Accessed: Nov. 20, 2025. [Online]. Available: https://www.iso.org/es/contents/data/standard/05/65/56546.html

[28] “ISO 19880-2:2025 - Gaseous hydrogen — Fuelling stations — Part 2: Dispensers and dispensing systems.” Accessed: Nov. 20, 2025. [Online]. Available: https://www.iso.org/es/contents/data/standard/08/58/85839.html

[29] Yolanda Lopez, “Normativa del Hidrógeno: Marco Regulatorio Europeo e Internacional.” Accessed: Nov. 20, 2025. [Online]. Available: https://lexierweb.com/tecnologia-hidrogeno/normativa-del-hidrogeno/

[30] H. M. N. H. IRVING, H. FREISER, and T. S. WEST, “Compendium of Analytical Nomenclature,” *Compend. Anal. Nomencl.*, 1978, doi: 10.1016/C2013-0-02923-4.

[31] Winsen Sensor, “Sensor de hidrógeno (H_2): tipos, aplicaciones y perspectivas tecnológicas,” s.f. Accessed: Apr. 17, 2026. [Online]. Available: https://es.winsen-sensor.com/knowledge/hydrogen-sensor.html?s

[32] T. J. Hübert Lois Boon-Brett William Buttner, H. Boon-Brett Buttner, -Vladimir Molkov, S. Editors, B. E. Jones, and H. Huang, “Sensors for Safety and Process Control in Hydrogen Technologies,” Oct. 2018, doi: 10.1201/B19141.

[33] H. Instruments, “¿Qué significa ppm? | HANNA Instruments Colombia.” Accessed: Nov. 19, 2025. [Online]. Available: https://www.hannacolombia.com/blog/post/1085/que-significa-

ppm?srsltid=AfmBOorhRJFpCz4E0tlcAouu6rafd7PrIpuXbIv4mgRXqebBiLAmu63x

[34] Bridger Photonics, “Understanding PPM and PPM-M as Gas Concentration Units.” Accessed: Apr. 17, 2026. [Online]. Available: https://www.bridgerphotonics.com/blog/understanding-ppm-and-ppm-m-gas-concentration-units

[35] C. Martínez Bencardino, “Estadística básica aplicada,” 2019, Accessed: Apr. 17, 2026. [Online]. Available: https://books.google.com/books/about/Estadística_básica_aplicada_5ta_edici.html?hl=es&id=WlckEAAAQBAJ

[36] A. Escamilla Esquivel, “Metrología y sus aplicaciones,” 2014, Accessed: Mar. 20, 2026. [Online]. Available: https://books.google.com/books/about/Metrología_y_sus_Aplicaciones.html?hl=es&id=P-ThBAAAQBAJ

[37] I. Jimmy *et al.*, “PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA PARA INGENIERÍA Y CIENCIAS,” 2019, Accessed: Apr. 17, 2026. [Online]. Available: https://hal.science/hal-03569757v1

[38] R. A. . Serway, *Electricidad y magnetismo*. Thomson, 2005. Accessed: Apr. 17, 2026. [Online]. Available: https://www.casadellibro.com.co/libro-electricidad-y-magnetismo/9789706865380/1081975

[39] L. A. . Pat Fernández, A. H. . Martínez Menchaca, and J. M. . Pat Fernández, “Introducción a los modelos de regresión,” p. 260, 2013.

[40] V. J. Aimikhe and O. E. Eyankware, “Recent Advances in White Hydrogen Exploration and Production: A Mini Review,” *J. Energy Res. Rev.*, vol. 13, no. 4, pp. 64–79, Apr. 2023, doi: 10.9734/JENRR/2023/V13I4272.

[41] M. Viñals, “Series temporales,” 2009, Accessed: Nov. 20, 2025. [Online]. Available: https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=zEmCOBABiQ4C&oi=fnd&pg=PA8&dq=series+temporales&ots=fkq4oCoTUl&sig=FEuI4m0NtZbQdR-Gzm94SjuJGj4

[42] E. Garzo Jiménez and A. Moratilla Ocaña, “Bases de datos para series temporales: estudio,” 2023, Accessed: Nov. 20, 2025. [Online]. Available: https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/58730

[43] D. Dinculeană and X. Cheng, “Vulnerabilities and Limitations of MQTT Protocol Used

between IoT Devices," *Appl. Sci. 2019, Vol. 9, Page 848*, vol. 9, no. 5, p. 848, Feb. 2019, doi: 10.3390/APP9050848.

[44] IBM, "¿Qué es la visualización de datos? | IBM." Accessed: Nov. 20, 2025. [Online]. Available: https://www.ibm.com/mx-es/think/topics/data-visualization

[45] D. Hercog, T. Lerher, M. Truntič, and O. Težak, "Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices," *Sensors 2023, Vol. 23, Page 6739*, vol. 23, no. 15, p. 6739, Jul. 2023, doi: 10.3390/S23156739.

[46] Nurturewing Company Ltd, "彦遠科技 Nurturewing -NEO986HT up to 120°C," s.f. Accessed: Apr. 17, 2026. [Online]. Available: https://www.nurturewing.com/en/product_1619279.html

[47] L. Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., "Leading gas sensing solutions supplier in China！ Electrochemical H2 Module User's Manual", Accessed: Oct. 25, 2025. [Online]. Available: www.winsen-sensor.com

[48] Naylamp Mechatronics, "Sensor BME680 Presión, Temperatura, Humedad y Gas," s.f. Accessed: Apr. 17, 2026. [Online]. Available: https://naylampmechatronics.com/sensores-posicion-inerciales-gps/650-sensor-bme680-presion-temperatura-humedad-y-gas.html

ANEXOS

(En medios digitales)

ANEXO A.	Datasheet sensor NEO986HT
ANEXO B.	Plano de conexiones del hardware de la estación
ANEXO C.	Instalador de Node.js
ANEXO D.	Instalador de Broker Mosquitto
ANEXO E.	Instalador de la base de datos InfluxDB
ANEXO F.	Instalador de dashboard Grafana
ANEXO G.	Datasheet sensor ZE07-H2
ANEXO H.	Datasheet sensor BME680
ANEXO I.	Datasheet modulo GPRS A9G
ANEXO J.	Código de programación de la estación
ANEXO K.	Manual de usuario de la estación de medición de hidrógeno

Toda la documentación es de uso libre y puede descargarse mediante el siguiente link: https://drive.google.com/drive/folders/1a1FBKsA89sCAl9KqPiyBb40-iMBsJlL7?usp=sharing

Fecha de Entrega	Dia: 20	Mes: octubre	Año:2026

DATOS PRINCIPALES DEL DOCUMENTO
Título del Trabajo de Grado / Tesis: **Estudio de la exactitud de una estación de bajo costo para la medición de hidrógeno**
Facultad y Programa Académico: **Facultad de Ingeniería, Ingeniería Electrónica**
Elija el tipo de documento: **Trabajo de Grado (Pregrado, Tecnología)**

INFORMACIÓN DE AUTORIA	
Autor ①	
Nombres y apellidos: Luis Miguel Jacome Pérez	**Documento de identidad:** 1004192457
Correo electrónico: Luismigu48@gmail.com	**Número de contacto:** 3114101907
Firma: 	
Autor ②	
Nombres y apellidos del autor: Richard Daniel Martínez Cárdenas	**Documento de identidad:** 1193473012
Correo electrónico: Richar124731@gmail.com	**Número de contacto:** 3157127008
Firma: 	
Autor ③	
Nombres y apellidos del autor:	**Documento de identidad:**
Correo electrónico: @	**Número de contacto:**
Se permite firma digital escaneada (borre esta nota) **Firma:** _____	
Autor ④	
Nombres y apellidos del autor:	**Documento de identidad:**

Correo electrónico: @	**Número de contacto:**
Firma: _____ Se permite firma digital escaneada (borre esta nota)	
Autorización de publicación. (elija solo uno)	**SÍ** ☒ **NO** ☐

En mi calidad de autor(es) y/o titular (es) del derecho de autor del trabajo de grado / tesis señalada en el encabezado, se confiere a la Universidad CESMAG una licencia no exclusiva, limitada y gratuita, para la inclusión del trabajo de grado / tesis en el repositorio institucional y buscadores de biblioteca. Por consiguiente, el alcance de la licencia que se otorga a través del presente documento abarca las siguientes características:

a) Se otorga desde la fecha de suscripción y durante todo el término en el que los firmantes del presente documento conserven la titularidad de los derechos patrimoniales de autor. En el evento en el que se deje de tener la titularidad de los derechos patrimoniales sobre el trabajo de grado, nos comprometemos a informar de manera inmediata sobre dicha situación a la Universidad CESMAG. Por consiguiente, hasta que no exista comunicación escrita de nuestra parte informando sobre dicha situación, la Universidad CESMAG se encontrará debidamente habilitada para continuar con la publicación del trabajo de grado dentro del repositorio institucional. Conocemos que esta autorización podrá revocarse en cualquier momento, siempre y cuando se eleve la solicitud por escrito para dicho fin ante la Universidad CESMAG. En estos eventos, la Universidad CESMAG cuenta con el plazo de un mes después de recibida la petición, para desmarcar la visualización y difusión del documento en el repositorio institucional.

b) Se autoriza a la Universidad CESMAG para publicar el trabajo de grado en texto completo y en formato digital, teniendo en cuenta que uno de los medios de publicación del repositorio institucional es el internet, se acepta la circulación con alcance mundial, por lo tanto, podrá ser consultado, descargado y compartido.

c) La autorización que se acepta a través del presente documento se realiza a título gratuito, por lo tanto, se renuncia a recibir emolumento alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y/o cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente autorización y de la licencia o programa a través del cual sea publicado el trabajo de grado.

d) Al aceptar se manifiesta que el trabajo de grado es original realizado sin violar o usurpar derechos de autor de terceros y que se ostenta los derechos patrimoniales de autor sobre la misma. Por consiguiente, se asume toda la responsabilidad sobre su contenido ante la Universidad CESMAG y frente a terceros, manteniéndose indemne de cualquier reclamación que surja en virtud de esta. En todo caso, la Universidad CESMAG se compromete a indicar siempre la autoría del escrito incluyendo nombre los autores y la fecha de publicación.

e) Se autoriza a la Universidad CESMAG para incluir el trabajo de grado en los índices y buscadores que se estimen necesarios para promover su difusión. Así mismo para que pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

f) En los eventos en los que el trabajo de grado haya sido trabajado con el apoyo o patrocinio de una agencia, organización o cualquier otra entidad diferente a la Universidad CESMAG. Como autor(es) garantizo(amos) que he(hemos) cumplido con los derechos y obligaciones asumidos con dicha entidad y como consecuencia de ello dejo(dejamos) constancia que la autorización que se concede a través del presente escrito no interfiere ni transgrede derechos de terceros.

Notas: en el caso de no aceptar la publicación, el trabajo de grado podrá ser clasificado, catalogado, codificado y subido al repositorio institucional y buscadores de biblioteca como control de inventario y custodia manteniendo el enlace de visualización oculto; por lo tanto, no contará con el proceso de difusión abierto al usuario.

Si se marco **SI** y en un futuro se desea solicitar el retiro de visualización y difusión del repositorio institucional, todos los autores deberán diligenciar el formato marcando el **NO** se autoriza (se omite firma de asesor)
Si se marcó **NO** y en un futuro se desea solicitar visualización y difusión en el repositorio institucional, todos los autores deberán diligenciar el formato marcando el **SI** se autoriza (se omite firma de asesor)

Espacio exclusivo del Asesor		
Nombres y apellidos del asesor: John Evert Barco Jiménez	**Documento de identidad:** 87067512	
Correo electrónico: johnbarco@gmail.com	**Número de contacto:** 3158222096	
Firma: 		
En mi calidad de asesor manifiesto que he leído y evaluado el trabajo de grado y de acuerdo con mi conocimiento profesional académico y científico, garantizo que su contenido cumple con las especificaciones de orden académico e investigativo, de confiabilidad de autoridad y de calidad en su presentación de acuerdo con lo establecido por la universidad, por lo tanto, avalo su publicación y difusión en el repositorio institucional de la Universidad CESMAG.		
Autorización de publicación	**SÍ** ☒	**NO** ☐
Observaciones:		