

Sistema piloto de monitorización en tiempo real de condiciones ambientales en puentes de
concreto reforzado

Daniel Andrés Cárdenas Pacheco, Cristiam David Vásquez Urbina

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Electrónico

Directora:

María Alejandra Mantilla Villalobos

Doctora en ingeniería

Codirectores:

Dr. Rodolfo Villamizar Mejía

Dr. Alvaro Viviescas Jaimes

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Dedico esta tesis a Dios, por ser mi guía y fuente de fortaleza a lo largo de este camino. A mis padres, por su amor incondicional, por creer en mí y brindarme su apoyo en cada etapa de mi vida. Sin su ejemplo de esfuerzo y perseverancia, este logro no habría sido posible. A mis amigos y seres queridos, que me acompañaron con su ánimo y apoyo en los momentos más difíciles, y cuyas palabras de aliento me impulsaron a seguir adelante. Finalmente, dedico este trabajo a Daniel Andrés Cárdenas Pacheco, por su constante compañerismo y por compartir conmigo este reto, aportando siempre lo mejor de sí en cada momento del proceso.

Cristiam David Vasquez Urbina

Dedico este proyecto a mis padres, quienes han sido mi ejemplo y mi mayor apoyo en este camino. A mi padre, quien un día recorrió estos mismos pasillos y compartió sueños similares en esta misma universidad; su perseverancia y dedicación me han inspirado profundamente a seguir sus pasos. A mi madre, cuya paciencia y apoyo incondicional han sido mi refugio en cada momento de dificultad, brindándome siempre la fortaleza para avanzar. Este logro es tan suyo como mío, porque sin ustedes nada de esto habría sido posible.

Daniel Andrés Cárdenas Pacheco

Agradecimientos

A lo largo de la realización de esta tesis, he recibido apoyo y colaboración de muchas personas, a quienes me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento. En primer lugar, agradezco a María Alejandra Mantilla Villalobos, mi directora de tesis, por su invaluable guía, paciencia y conocimiento a lo largo de este proceso. Sus consejos y experiencia han sido fundamentales para la realización de este trabajo. Quiero extender mi gratitud a la Universidad Industrial de Santander, por brindarme los recursos y el entorno adecuado para llevar a cabo esta investigación. Asimismo, agradezco a los profesores y compañeros que me ofrecieron su apoyo y retroalimentación durante momentos cruciales. A mi familia, por su amor, comprensión y por brindarme el soporte emocional que necesitaba para cumplir esta meta. A mis amigos y colegas, por su constante ánimo, motivación y por hacer de este camino una experiencia más llevadera. Sus palabras de aliento y compañía fueron esenciales en momentos de dificultad. De manera especial, quiero agradecer a Daniel Andrés Cárdenas Pacheco, compañero de tesis, por su colaboración, dedicación y esfuerzo compartido a lo largo de este proyecto. Su apoyo fue crucial en la culminación de este trabajo. Gracias a todos los que, de una u otra manera, contribuyeron a la realización de esta tesis.

Cristiam David Vasquez Urbina

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas aquellas personas que, con su apoyo incondicional y compañía, han sido fundamentales en la consecución de este logro. A mis padres, cuya paciencia, cariño y ejemplo han sido el pilar sobre el cual he construido cada paso de este camino. Sin su confianza y respaldo, esta meta no habría sido posible. A mis amigos, quienes han sido mi familia y mi refugio en los momentos de dificultad, aportando la fuerza necesaria para avanzar cuando me faltaba. A mi hermano Chevi, por su inspiración constante, pues aunque él no lo perciba, me ha motivado día a día a ser mejor y a esforzarme en todo momento por ser un ejemplo para él. A mi novia, Yuliana, mi mano derecha en la realización de este proyecto, quien me ha dado fortaleza y me ha encaminado de nuevo cuando me he sentido desfallecer. Su apoyo ha sido invaluable para el éxito de esta etapa. Gracias a todos por formar parte de mi vida y contribuir a que este sueño se haga realidad. Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

Daniel Andrés Cárdenas Pacheco

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Justificación	14
2. Antecedentes	15
3. Objetivos	18
3.1 Objetivo General	18
3.2 Objetivos Específicos.....	18
4. Alcance	19
5. Marco teórico	20
5.1 Bases conceptuales.....	20
5.1.1 Conceptos civiles	20
5.1.1.1 Concepto de estructura.....	20
5.1.1.2 Monitoreo de condiciones ambientales - temperatura y humedad.....	21
5.1.1.2.1 Factores acelerantes.	22
5.1.2 Instrumentos.....	23
5.1.2.1 Sensores	24
5.1.2.1.1. Selección de un sensor de temperatura y humedad.	27
5.1.2.2 El microcontrolador o dispositivo de adquisición de datos.	28
5.1.2.2.1 SoC- System on Chip.....	30
5.1.2.3 Internet de las Cosas.	30
5.1.2.3.1 Arquitectura IoT.....	30

6. Marco metodológico	33
6.1 Identificación de requerimientos del sistema.....	33
6.2 Diseño del sistema	35
6.2.1 Instrumentación.....	36
6.2.1.1 Sensores	36
6.2.1.1.1 Selección de sensores.....	36
6.2.1.1.2 Comparativa AM2301 vs Wireless Vantage Pro2 Weather Station.	37
6.2.1.2 Microcontrolador	40
6.2.1.2.1 Selección de la tecnología de red LPWAN.....	40
6.2.1.2.2 Selección del microcontrolador.	41
6.2.1.2.3 Lógica de programación del microcontrolador.....	43
6.2.1.3 Diseño del dispositivo.....	47
6.2.1.3.1 Circuito de regulación.....	48
6.2.1.3.2 Conexiones entre microcontrolador, sensor y periféricos.....	50
6.2.1.3.2 Diseño de la placa de circuito impreso	51
6.2.2 Gateway	53
6.2.2.1 Librerías utilizadas.....	54
6.2.2.2 Lógica de programación del gateway	55
6.2.2.2.1 Inicialización de librerías.....	55
6.2.2.2.2 Bucle de eventos.	57
6.2.3 Broker	59
6.2.3.1 Selección del broker MQTT.	60
6.2.4 Servidor.....	61

6.2.4.1 Arquitectura del backend.	62
6.2.4.1.1 Base de datos.....	63
6.2.4.1.2 Rest API.	64
6.2.4.1.3 Servicio MQTT.....	67
6.2.5 Cliente web	68
6.2.5.1 Diseño del dashboard.....	68
6.2.5.2 Gestion de ingreso de usuarios.	69
6.2.6 Pruebas del sistema en laboratorio.....	70
7. Conclusiones.....	76
8. Recomendaciones	78
Referencias Bibliográficas	79

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Dispositivos de medición de temperatura.....	25
Tabla 2. Comparativa de las características de los sensores estudiados	36
Tabla 3. Comparativa de las tecnologías de transmisión de datos para largas distancias	40
Tabla 4. Comparativa de las principales características de las placas de desarrollo evaluadas para la selección de microcontroladores.....	43
Tabla 5. Resumen de constantes utilizadas para la inicialización de la librería heltec.h en la configuración del transceptor SX1276.....	45
Tabla 6. Librerías utilizadas para la programación del gateway y su intercomunicación con periféricos	54
Tabla 7. Tabla comparativa de brokers utilizados y sus características	61

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Tecnologías empleadas en las diferentes etapas del sistema de monitoreo.....	35
Figura 2. Gráfica comparativa de resultados obtenidos en las medición de temperatura.....	38
Figura 3. Gráfica de error en °C de temperatura medida por el sensor AM2301 con respecto a la estación meteorológica	38
Figura 4. Gráfica comparativa de resultados obtenidos en las medición de humedad	39
Figura 5. Gráfica de error en %HR de humedad medida por el sensor AM2301 con respecto a la estación meteorológica	39
Figura 6. Diagrama de flujo del proceso de adquisición de lecturas	47
Figura 7. Circuito de regulación	49
Figura 8. Conexiones entre microcontrolador, sensor y periféricos	51
Figura 9. Diseño de la PCB.....	52
Figura 10. Diseño de la PCB 3D.....	53
Figura 11. Diagrama de flujo del proceso de inicialización de librerías y secuencia de arranque del sistema.....	56
Figura 12. Estructura JSON detallando la disposición y formato de los datos en el mensaje	58
Figura 13. Diagrama de flujo del proceso en la función void loop(), desde la creación del payload hasta la publicación en el broker MQTT	59
Figura 14. Arquitectura del backend del sistema.....	63
Figura 15. Diagrama entidad-relación de la base de datos	64
Figura 16. Diseño del dashboard del sistema.....	69

Figura 17. Proceso de descarga de datos en un rango de fechas.....	69
Figura 18. Gestión de ingreso de usuarios al sistema	70
Figura 19. Estructura de concreto de tipo pórtico en la que se realizan las pruebas de funcionamiento del sistema	71
Figura 20. Instalación del dispositivo de medición en la estructura	72
Figura 21. Montaje mostrando ubicación de la batería.....	73
Figura 22. Instalación del gateway con su batería	74
Figura 23. Lecturas recopiladas por el sistema.....	74
Figura 24. Prueba de distancia realizada con el hardware diseñado.....	76

Resumen

Título: Sistema piloto e monitorización en tiempo real de condiciones ambientales en puentes de concreto reforzado*

Autor: Daniel Andrés Cárdenas Pacheco, Cristiam David Vásquez Urbina**

Palabras Clave: IoT, instrumentación, sistemas de monitoreo, puentes de concreto, LoRa, condiciones ambientales, temperatura, humedad, termohigrómetro.

Descripción:

El deterioro de las estructuras de concreto reforzado, como puentes, es una problemática común debido a su exposición constante a condiciones ambientales adversas. Factores como la temperatura, la humedad y la presencia de sustancias corrosivas pueden acelerar la corrosión de la armadura de acero, reduciendo la vida útil de estas infraestructuras. Ante este escenario, el monitoreo constante de las variables climáticas que afectan dichas estructuras es esencial para implementar estrategias de mantenimiento preventivo que aseguren su integridad. Este trabajo de investigación tiene como objetivo diseñar un sistema piloto basado en sensores de temperatura y humedad que permita monitorear, en tiempo real y de manera remota, las condiciones ambientales a las que se encuentra expuesto un puente de concreto reforzado. En primer lugar, se identifican los requerimientos técnicos necesarios para el diseño del sistema. Posteriormente, se desarrolla un dispositivo electrónico capaz de medir las variables mencionadas y enviar los datos a una plataforma virtual en tiempo real. Esta plataforma permite registrar y visualizar los datos mediante gráficos e históricos, proporcionando una herramienta eficiente para el análisis de las condiciones ambientales. Finalmente, se verifica el funcionamiento del sistema a través de pruebas en un prototipo de laboratorio aplicado a una estructura de concreto reforzado. Con este proyecto, se desarrolla una solución tecnológica de bajo costo que podrá emplearse para contribuir al monitoreo continuo y efectivo de infraestructuras civiles, mejorando su conservación y prolongando su vida útil.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: María Alejandra Mantilla Villalobos. Doctora en ingeniería Codirectores: Dr. Rodolfo Villamizar Mejía Dr. Alvaro Viviescas Jaimes

Abstract

Title: Pilot system for real-time monitoring of environmental conditions in reinforced concrete bridges*

Author(s): Daniel Andrés Cárdenas Pacheco, Cristiam David Vásquez Urbina**

Key Words: IoT, instrumentation, monitoring systems, concrete bridges, LoRa, environmental conditions, temperature, humidity, thermohygrometer.

Description:

The deterioration of reinforced concrete structures, such as bridges, is a common problem due to their constant exposure to adverse environmental conditions. Factors such as temperature, humidity and the presence of corrosive substances can accelerate the corrosion of the steel reinforcement, reducing the useful life of these infrastructures. Given this scenario, constant monitoring of the climatic variables that affect these structures is essential to implement preventive maintenance strategies that ensure their integrity. This research work aims to design a pilot system based on temperature and humidity sensors that allows monitoring, in real time and remotely, the environmental conditions to which a reinforced concrete bridge is exposed. First, the technical requirements necessary for the design of the system are identified. Subsequently, an electronic device capable of measuring the aforementioned variables and sending the data to a virtual platform in real time is developed. This platform allows recording and visualizing the data through graphs and historical data, providing an efficient tool for the analysis of environmental conditions. Finally, the operation of the system is verified through tests in a laboratory prototype applied to a reinforced concrete structure. This project develops a low-cost technological solution that can be used to contribute to the continuous and effective monitoring of civil infrastructure, improving its conservation and prolonging its useful life.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: María Alejandra Mantilla Villalobos. Doctora en ingeniería Codirectores: Dr. Rodolfo Villamizar Mejía Dr. Alvaro Viviescas Jaimes

Introducción

La preservación de infraestructuras civiles, como los puentes de concreto reforzado, es un desafío crítico en el ámbito de la ingeniería. La exposición constante de estas estructuras a condiciones ambientales adversas, tales como variaciones en temperatura, humedad y la presencia de agentes corrosivos, puede acelerar su deterioro, comprometiendo su seguridad y funcionalidad a largo plazo. En este contexto, la ingeniería electrónica ofrece soluciones innovadoras a través del diseño de sistemas de monitoreo que permitan evaluar en tiempo real las condiciones que influyen en la integridad estructural de estas construcciones.

El presente proyecto tiene como objetivo desarrollar un sistema piloto de monitoreo remoto, basado en sensores de temperatura y humedad, que permita evaluar las condiciones ambientales a las que está expuesta una estructura de concreto reforzado. Mediante el uso de tecnologías electrónicas de bajo costo, se busca proporcionar una herramienta eficaz y accesible para la supervisión de estas variables en tiempo real, contribuyendo al mantenimiento predictivo de infraestructuras civiles.

Este proyecto representa una aplicación interdisciplinaria entre la ingeniería electrónica y la ingeniería civil, demostrando cómo la integración de tecnologías de sensado y comunicación puede ofrecer soluciones prácticas a problemas complejos en el ámbito de la infraestructura. Además, sienta las bases para futuras implementaciones en estructuras más grandes y complejas, como puentes de grandes luces, donde la detección temprana de factores de riesgo puede marcar la diferencia en su durabilidad.

1. Justificación

Los programas nacionales de desarrollo a cargo de la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI), han venido implementando puentes de concreto reforzado de grandes luces dada la necesidad de salvar grandes distancias en línea recta sobre el complejo territorio nacional para aumentar la competitividad del país. Sin embargo, estos puentes son propensos a manifestar deformaciones a lo largo de su tablero a través de los años, ya que al estar expuestos a condiciones ambientales poco favorables para el concreto que compone su estructura, poseen una alta probabilidad de experimentar un deterioro prematuro de su armadura de acero.

El concreto reforzado, o también llamado hormigón armado, puede deteriorarse con el ingreso de sustancias agresivas a su interior. En construcciones civiles, las sustancias que comúnmente pueden producir la corrosión de las armaduras son los cloruros y el anhídrido carbónico (CO_2). El cloruro es capaz de ingresar a la estructura hasta alcanzar la armadura y provocar una ruptura en la capa pasivante del acero; este proceso se presenta principalmente en ambientes marinos. No obstante, en ambientes no marinos (como en la ubicación en la que se harán las pruebas del sistema), es el anhídrido carbónico el que reacciona con las sustancias alcalinas del hormigón y, con ello, disminuye su nivel de pH, lo que trae como consecuencia la desaparición de la capa pasivante que recubre la armadura de acero de la estructura a través del proceso conocido como carbonatación.

También existen otro tipo de factores que, por sí mismos, no modifican la vida útil de las estructuras de hormigón armado, pero actúan como acelerantes cuando el proceso de corrosión ha iniciado, tales como: la temperatura, humedad y el acceso de oxígeno a la armadura. Esta última

depende principalmente del contenido de oxígeno en el aire en el lugar donde se encuentra la estructura y la porosidad del hormigón. Por otra parte, las dos restantes son variables que están íntimamente relacionadas con las condiciones ambientales y climáticas a las que se encuentra expuesta la estructura.

Teniendo en cuenta que las condiciones climáticas son un factor clave en la degradación del hormigón, se evidencia la necesidad de desarrollar sistemas de monitoreo efectivos que permitan una evaluación continua de las condiciones ambientales a las que se encuentran expuestas las estructuras de concreto reforzado. Es por esto que se ha diseñado un sistema piloto basado en sensores de temperatura y humedad, que permite el monitoreo remoto en tiempo real de las condiciones ambientales de un puente de concreto reforzado. Si bien en un futuro este sistema podría implementarse en puentes de concreto de grandes luces; en este caso, y para el alcance de este proyecto, se implementa en un pórtico de concreto reforzado que se encuentra expuesto a las condiciones ambientales anteriormente mencionadas.

2. Antecedentes

Oliva (2009) en un artículo llamado “Influencia de las variables climáticas en el deterioro del puente en Boca de Camarioca debido a la corrosión atmosférica”, señala que debido a las condiciones climáticas inherentes a la ubicación geográfica de Cuba, la corrosión por picadura y por carbonatación es un fenómeno que afecta las estructuras de hormigón y acero; y que además, estas variables influyen de manera notoria en la durabilidad de los puentes de hormigón armado,

por lo que considera es un factor a tener en cuenta para la rehabilitación y reparación de los mismos.

Mendoza et al. (2019) en su artículo llamado “Red de sensores de humedad y temperatura de bajo costo”, señala que construyó una red de bajo costo de sensores inalámbricos, compuesto por un ESP8266 y un sensor digital de temperatura-humedad, que puede ser utilizado para el monitoreo a distancia en diferentes estructuras. Los resultados obtenidos permitieron conocer el comportamiento de la temperatura y humedad en el área; asimismo, se determina que, al ser un sistema de bajo costo y de fácil construcción, es una excelente opción para una amplia variedad de aplicaciones.

Hasan et al. (2015) en un artículo titulado “Un nuevo sistema económico para SHM de tableros de puentes mediante redes de sensores inalámbricos basados en mediciones de temperatura y humedad”, describe un sistema diseñado para el monitoreo de la salud estructural del tablero de un puente basado en la temperatura y humedad con uso de redes de sensores inalámbricos, tales como LM35 y HIH400, respectivamente. El sistema de monitoreo SHM propuesto utiliza técnicas de minería de datos como el algoritmo KNN para analizar datos históricos de temperatura y humedad relacionados con la ubicación del puente. Esto permite predecir valores futuros en los nodos de interés. Además, se ha implementado un sistema de inferencia difusa para generar alertas y mensajes basados en análisis difusos de estos pronósticos. Estas mejoras transforman el sistema de monitoreo en uno proactivo de mantenimiento. Debido a la precisión y confiabilidad de las evaluaciones y a los costos reducidos tanto en la fase de implementación como de mantenimiento, el sistema propuesto es adecuado para el monitoreo a largo plazo y en tiempo real de puentes de tamaño mediano a grande.

El proyecto de Sepúlveda (2020) implementa una red inalámbrica de sensores que monitorea variables medioambientales como temperatura, humedad, radiación, viento y lluvia, obteniendo datos que posteriormente serán analizados, modelados y expuestos para su evaluación. La comunicación de los nodos de sensores se realizó mediante tecnología GSM y WiFi. Este sistema fue implementado en un edificio de 4 plantas en donde se distribuyeron los sensores según la topología planteada, para posteriormente visualizar la información en las plataformas Web de los equipos utilizados (como fue mencionado por López, S. p. 6)

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Diseñar un sistema piloto basado en sensores de temperatura y humedad, que permita el monitoreo remoto en tiempo real de las condiciones ambientales de un puente de concreto reforzado.

3.2 Objetivos Específicos

Identificar los requerimientos para el diseño del sistema de monitoreo de las condiciones ambientales del puente de concreto reforzado.

Diseñar un dispositivo electrónico que lleve a cabo la medición de la temperatura y la humedad relativa de la estructura de concreto y las envíe en tiempo real a una plataforma virtual.

Diseñar una plataforma virtual que registre los datos del dispositivo que lleva a cabo la medición y permita su visualización mediante gráficas e históricos.

Verificar el funcionamiento del sistema piloto diseñado mediante un prototipo en laboratorio implementado en una estructura de concreto reforzado.

4. Alcance

El alcance de este trabajo de grado abarca los siguientes aspectos:

- Selección de los sensores de temperatura y humedad necesarios para realizar el monitoreo de las condiciones ambientales, contemplando el uso de **instrumentos de bajo costo**.
- Selección de un protocolo de comunicación para el envío de datos en tiempo real que se ajuste a las necesidades del proyecto.
- Diseño de un prototipo de sistema de monitoreo de condiciones ambientales utilizando el protocolo de comunicación y los sensores de temperatura y humedad seleccionados sin contemplar el diseño del sistema de alimentación debido a que dicha temática será tratada en otro proyecto de grado.
- Diseño de una base de datos donde se guarden las lecturas recopiladas por los sensores.
- Diseño de una interfaz de usuario en la que se pueda acceder en tiempo real a los datos recopilados por el sistema.
- Verificación del funcionamiento del prototipo sobre un pórtico de concreto reforzado debido a su fácil acceso para la toma de datos y prueba del sistema.

Este trabajo de grado hace parte del proyecto de investigación interno de la vicerrectoría de investigación y extensión de la UIS titulado “Sistema piloto para el monitoreo continuo de la salud estructural en puentes de concreto de grandes luces” y su financiamiento proviene en su totalidad de este.

5. Marco teórico

5.1 Bases conceptuales

En lo que concierne a esta investigación, el resultado del prototipo está pensado para que sea empleado en puentes de concreto de grandes luces; sin embargo, debe aclararse que, el proceso de prueba y recolección de datos que sustenta este trabajo se llevará a cabo en un pórtico de material de concreto reforzado.

5.1.1 *Conceptos civiles*

5.1.1.1 Concepto de estructura. Una estructura es un conjunto estable de elementos resistentes de una construcción con la finalidad de soportar cargas y transmitir las, para llevar finalmente estos pesos o cargas al suelo (Giordani & Leone, s.f.). Esta logra recibir cargas externas, soportarlas internamente y transmitir las a los apoyos que posee. La estructura posee unas formas y dimensiones, además de estar compuesta por material resistente como el hormigón, madera, acero, entre otros, con el fin de aportar estabilidad.

Delimitando al tipo de estructura a la que responde este proyecto, debe definirse el concreto reforzado u hormigón armado, como un material compuesto por la incorporación de barras o mallas de acero en la mezcla de concreto.

5.1.1.2 Monitoreo de condiciones ambientales - temperatura y humedad. Los puentes expuestos al ambiente presentan una característica particular: el acero dentro de un concreto de alta calidad generalmente permanece sin reaccionar durante períodos prolongados de uso. Sin embargo, esta inacción puede ser perturbada por la penetración de agentes agresivos en el concreto, tales como los cloruros y el dióxido de carbono atmosférico.

Según Perepérez et al. (s.f), en entornos marinos los cloruros se encuentran tanto en el agua de mar como en la humedad del aire. Estos cloruros penetran a través de los poros y grietas del concreto. Cuando alcanzan la armadura en cantidades suficientes, rompen la capa protectora pasivante del acero. Además, los cloruros pueden causar daños severos por corrosión en entornos no marinos, especialmente cuando se utilizan como sales para el deshielo. En este caso, se acumulan dentro del concreto cada invierno, lo que reduce significativamente la vida útil de puentes y carreteras donde se aplican (p. 18).

En cuanto al dióxido de carbono presente en la atmósfera (y en general todas las sustancias ácidas), este reacciona con los componentes alcalinos del concreto, lo que provoca una disminución de su pH hasta niveles que eliminan rápidamente la capa protectora pasivante y, por lo tanto, facilitan la corrosión del acero. Este proceso se conoce comúnmente como "carbonatación", y la velocidad media de su avance se puede calcular utilizando la siguiente expresión:

$$X = K\sqrt{t}$$

donde X es el espesor carbonatado en un tiempo t y K es una constante de valores muy diferentes en función de la calidad del hormigón y la humedad ambiental, señala Perepérez (s.f.).

5.1.1.2.1 Factores acelerantes. Los cloruros y el anhídrido carbónico son factores ambientales que pueden hacer cambiar las condiciones del hormigón, ya que determinan la corrosión o pasividad de las armaduras. Existen, en cambio, otros factores ambientales que no tienen influencia en la vida útil cuando el acero permanece pasivo, pero que cuando la corrosión ha empezado por otras causas (cloruros o carbonatación), determinan la velocidad de corrosión. Según Perepérez et al. (s.f.) “los factores ambientales más importantes como acelerantes del proceso de corrosión son: la humedad, [...] y la temperatura” (p. 18).

A) Humedad

La presencia de agua es imprescindible para la corrosión en medios neutros y alcalinos, pues interviene en el proceso catódico de reducción del oxígeno. Además, Perepérez (s.f.) señala que el agua es fundamental para la movilidad de los iones a través del electrolito. En el hormigón completamente seco, la resistividad eléctrica es tan alta que evita la corrosión incluso sin la presencia de la capa pasivante sobre el acero; solo cuando existe una mínima cantidad de humedad en los poros del hormigón se pueden iniciar los procesos corrosivos (p. 18). Así pues, cuanto más humedad haya en los poros del hormigón, menor será la resistividad eléctrica, por tanto, será mayor la velocidad de corrosión. Ahora bien, el contenido de agua en los poros del hormigón depende de la humedad relativa del ambiente en condiciones no saturadas. Debe tenerse en cuenta que la humedad del hormigón suele ser mayor que la ambiental en condiciones cambiantes, ya que pierde agua más lentamente en comparación a la que absorbe, especialmente en hormigones con cloruros, que son higroscópicos.

B) Temperatura

La temperatura juega también un papel doble en los procesos de deterioro. Por un lado, Tuuti (1979) menciona que su aumento promueve la movilidad de las moléculas, lo que facilita el

transporte de sustancias; por otro lado, Lago P (1083) agrega que su disminución puede dar lugar a condensaciones que, a su vez, pueden producir incrementos locales importantes del contenido de humedad del material (como fue mencionado por Perepérez et al, p. 20).

El análisis de estructuras deterioradas por corrosión de las armaduras de Rasheeduzzafar et al (1984) ha corroborado el fenómeno, demostrando que, al igual que todos los demás condicionantes, los climas son tanto más agresivos cuanto más cálidos, y que entre los 20°C y los 40°C se producen aumentos bruscos de la velocidad de corrosión, en particular en presencia de humedades relativas relativamente elevadas (como fue mencionado por Perepérez et al, p. 20).

5.1.2 Instrumentos

Los instrumentos empleados para medir las condiciones ambientales en una estructura comprenden transductores o sensores que convierten magnitudes físicas en señales eléctricas; acondicionadores de señal para ajustar estas señales; dispositivos de adquisición de datos que capturan la información de los sensores; y soporte físico y lógico, como hardware y software, que permite la interpretación, almacenamiento y análisis de los datos recopilados. Comúnmente, los sensores son instalados en la estructura, transmitiendo señales por radio, por fibra óptica, microondas a una central donde se da la interpretación de los datos. Por un lado, se tiene la posibilidad de almacenar dichos datos para su posterior análisis (in situ o almacenado remotamente en una nube), por otro lado, es posible automatizar la interpretación de los datos y efectuar el monitoreo en tiempo real.

5.1.2.1 Sensores

A) El termohigrómetro

Un termohigrómetro permite la toma de los valores de temperatura y humedad del medio ambiente. Entre las principales aplicaciones en las que se usa termohigrómetros constan: ventilación, aire acondicionado, climatización, laboratorios, hospitales, etc.

Clasificación de termohigrómetros por categorías:

Antes de presentar los tipos de sensores de temperatura y humedad se considera necesario clasificar los termohigrómetros en diversas categorías.

Según la tecnología empleada existen dos tipos de termohigrómetros (Guachamin & Pástor, 2014, p. 9-10):

Termohigrómetros analógicos: emplean instrumentos analógicos, por lo que la medición viene indicada mediante esferas de agujas y escalas graduadas. Sus ventajas son que funcionan sin electricidad, su precisión y su facilidad de uso y lectura.

Termohigrómetros digitales: son dispositivos electrónicos que cuentan generalmente con interfaces para la visualización de datos, por ejemplo pantalla LCD, y requieren de alimentación eléctrica, ya sea mediante toma de red o baterías. Sus principales ventajas son la gran cantidad de funciones, su precisión, la facilidad de uso y lectura, y la posibilidad de emplear sensores remotos inalámbricos.

Según su modo de empleo se pueden distinguir dos tipos de termohigrómetros: termohigrómetros de interior, y de exterior en materiales que resistan las condiciones ambientales.

Clasificación de termohigrómetros por tipo de sensores:

Ahora bien, teniendo en cuenta que el termohigrómetro está compuesto por un sensor de temperatura y otro de humedad, se considera necesario abordar los tipos de sensores mencionados que existen. A través de la siguiente tabla se presentan los sensores de temperatura según su clasificación:

Tabla 1.*Dispositivos de medición de temperatura*

Dispositivos de medición de temperatura			
Electricos	Mecánicos	Radiación térmica	Varios
Termocuplas	Sistemas de dilatación	Pirómetros de radiación	Indicadores de color
Termorresistencias	Termómetros de vidrio con líquidos	-Total (banda ancha)	-Lápices
Termistores	Termómetros bimetálicos	-Óptico	-Pinturas
Diodos		-Pasabanda	Sondas neumáticas
Sensores de silicio con efecto resistivo		-Relación	Sensores ultrasónicos
		Termómetros infrarrojos	Indicadores pirométricos
			Termómetros acústicos
			Cristales líquidos
			Sensores fluídicos
			Indicadores de luminiscencia(termografía)

Nota. Adaptado de Sensores de temperatura (Bausá et al, s.f, p. 4)

Por otro lado, algunos de los sensores utilizados para la medición de la humedad son: Los psicrómetros, sensores por condensación, sensores mecánicos, sensores de bloque de polímero

resistivo, sensores capacitivos, sensores de temperatura y humedad integrado. Teniendo en cuenta esto, se hará el abordaje del sensor que ha sido implementado en la presente investigación.

B) Sensor de temperatura y humedad integrado (Termohigrómetro)

Según Guemisa (s.f.) son sensores capacitivos para la medición de humedad y termistores para la medición de temperatura. Por lo anterior, se considera indispensable abordar específicamente los que componen el termohigrómetro.

Los sensores capacitivos (polímero orgánico capacitivo) son diseñados normalmente con platos paralelos con electrodos porosos o con filamentos entrelazados en el sustrato. El material dieléctrico absorbe o elimina vapor de agua del ambiente con los cambios del nivel de humedad. Los cambios resultantes en la constante dieléctrica causa una variación en el valor de la capacitancia eléctrica del dispositivo, por lo que resulta una impedancia que varía con la humedad. Un cambio en la constante dieléctrica de aproximadamente el 30 % corresponde a una variación de 0...100 % en la humedad relativa (Dpfsensors, s.f., p. 7).

Dpfsensors (s.f.) menciona que, el material del sensor es extremadamente delgado, lo que limita su capacidad para generar cambios significativos en la señal con cambios en la humedad. Esto facilita el intercambio rápido de vapor de agua y asegura un secado rápido, lo cual es beneficioso para la calibración sencilla del sensor. Los sensores capacitivos también son idóneos para aplicaciones que requieren alta sensibilidad a niveles bajos de humedad, proporcionando una respuesta relativamente rápida.

Bausá et al. (s.f.) menciona que los termistores son mucho más económicos. Aunque no son lineales, estos son mucho más sensibles, compuestos de una mezcla sintetizada de óxidos metálicos. El termistor es esencialmente un semiconductor que se comporta como un "resistor térmico". Se pueden encontrar en el mercado con la denominación NTC (*Negative Temperature*

Coeficient), habiendo casos especiales de coeficiente positivo cuando su resistencia aumenta con la temperatura y se los denomina PTC (*Positive Temperature Coefficient*).

En algunos casos, la resistencia de un termistor a la temperatura ambiente puede disminuir en hasta 6% por cada 1°C de aumento de temperatura. Esta elevada sensibilidad a variaciones de temperatura hace que el termistor resulte muy adecuado para mediciones precisas de temperatura.. Por otra parte, los termistores sirven para la medición o detección de temperatura tanto en gases, como en líquidos o sólidos; y se los puede adosar fácilmente o montar con tornillos, ir roscados en superficies o cementados.

5.1.2.1.1. Selección de un sensor de temperatura y humedad. Para seleccionar un sensor de temperatura y humedad que se adecue a las necesidades específicas, es importante tener en consideración los siguientes criterios (Gutiérrez & Iturralde, 2017):

A) Exactitud: Se entiende por exactitud que el valor verdadero de la variable se pueda detectar sin errores sistemáticos positivos o negativos en la medición. La exactitud de la medición debe ser tan alta como fuese posible. Sobre varias mediciones de la variable, el promedio de error entre el valor real y el valor detectado tenderá a ser cero (Gutiérrez & Iturralde, p. 41).

B) Precisión: La precisión significa que existe o no una pequeña variación aleatoria en la medición de la variable. La precisión de la medición debe ser tan alta como fuese posible. La dispersión en los valores de una serie de mediciones será mínima (Gutiérrez & Iturralde, 2017, p. 42).

C) Rango de funcionamiento: El sensor debe tener un amplio rango de funcionamiento según la aplicación y debe ser exacto y preciso en todo el rango (Gutiérrez & Iturralde, 2017, p. 42).

D) Velocidad de respuesta: El transductor debe ser capaz de responder a los cambios de la variable detectada en un tiempo mínimo. Lo ideal sería una respuesta instantánea (Gutiérrez & Iturralde, 2017, p. 42).

E) Calibración: El sensor debe ser fácil de calibrar. El tiempo y los procedimientos necesarios para llevar a cabo el proceso de calibración deben ser mínimos; además, el sensor no debe necesitar una recalibración frecuentemente (Gutiérrez & Iturralde, 2017, p. 42).

F) Fiabilidad: El sensor debe tener una alta fiabilidad. No debe estar sujeto a fallos frecuentes durante el funcionamiento (Gutiérrez & Iturralde, 2017, p. 42).

5.1.2.2 El microcontrolador o dispositivo de adquisición de datos. Un microcontrolador es un circuito integrado digital que puede ser usado para muy diversos propósitos debido a que es *programable*. Está compuesto por una unidad central de proceso (CPU), memorias (ROM y RAM) y líneas de entrada y salida (periféricos) (Sherlin, s.f.).

En lo referente al funcionamiento, puede mencionarse que como el hardware ya viene integrado en un solo chip, para usarlo se debe especificar su funcionamiento por software a través de programas que indiquen las instrucciones que el microcontrolador debe realizar. En una memoria se guardan los programas y un elemento llamado CPU se encarga de procesar paso por paso las instrucciones del programa (Sherlin, s.f.).

Asimismo, es necesario conocer los bloques funcionales básicos del microcontrolador, estos bloques son, según Sherlin (s.f.): CPU (Unidad central de proceso), memoria ROM (Memoria de solo lectura), memoria RAM (Memoria de acceso aleatorio), líneas de entrada y salida (Periféricos). Asimismo, debe recordarse que para grabar un programa en un microcontrolador,

señala Sherlin (s.f) “se necesita, básicamente, tres cosas: Un computador, software de programación (incluyendo un compilador), un circuito programador y un microcontrolador”.

A) Categorías

Por otro lado, debe mencionarse que los microcontroladores se dividen en categorías según su memoria, arquitectura, número de bits y conjuntos de instrucciones (Electrónica Lugo, s.f.):

- Bits:

El microcontrolador de 8 bits ejecuta la lógica de las operaciones aritméticas; el microcontrolador de 16 bits se ejecuta con mayor precisión y rendimiento en contraste con 8 bits; el microcontrolador de 32 bits se emplea principalmente en dispositivos controlados automáticamente, como máquinas de oficina, dispositivos médicos implantables, etc.

- Memoria:

Cuando una estructura integrada se construye con un microcontrolador que no forma parte de todos los bloques de funcionamiento existentes en un chip, se denomina microcontrolador de memoria externa. Por otra parte, el microcontrolador de memoria incorporada es cuando se construye una estructura incrustada con un microcontrolador que forma parte de todos los bloques funcionales que existen en un chip.

- Conjunto de instrucciones:

CISC-CISC significa computador con set de instrucciones complejas, le permite al usuario aplicar 1 instrucción como una alternativa a muchas instrucciones simples. Por otro lado, RISC-RISC significa ordenador de conjunto de instrucciones reducido. RISC reduce el tiempo de operación al acortar el ciclo de reloj por instrucción.

- Arquitectura de memoria:

- Microcontrolador de Arquitectura de Memoria Harvard

- Microcontrolador de Arquitectura de Memoria Princeton

5.1.2.2.1 SoC- System on Chip. Según Geeks for geeks (2024) el System on Chip es un chip que combina las funciones que antes requería varios chips. Un SoC encapsula una o más CPUs, memoria, microcontroladores, SDP, aceleradores y hardware de soporte, aunque no sigue ningún estándar específico respecto a los circuitos que lo contienen. También, está diseñado para aplicaciones que tienen requisitos bastante complejos para ser manejados por una sola unidad de microcontrolador. En definitiva, este es un sistema informático completo en un solo chip, capaz de realizar tareas complejas con mayores requisitos de recursos.

5.1.2.3 Internet de las Cosas. La Internet de las cosas o Internet of Things (IoT) se refiere a la interconexión en red de objetos cotidianos, que a menudo están equipados con algún tipo de inteligencia. Chitiva, Y (2020) considera la Internet de las Cosas (IoT), como “evolución natural de la tecnología Máquina-Máquina (M2M), es la interconexión de dispositivos inteligentes y plataformas de gestión que habilitan colectivamente el “mundo inteligente” del entorno” (p.50).

5.1.2.3.1 Arquitectura IoT. Según Chivita (2020) esta estructura es construida alrededor de una arquitectura multicapas en la que los objetos inteligentes se conectan y se usan para prestar diferentes servicios gracias a las cuatro (4) capas principales: la capa de aplicación, la capa de soporte de servicio y aplicación, la capa de red, y la capa de dispositivo.

Asimismo, IoT puede imaginarse como una estructura que ofrece servicios de aplicación habilitados por varias tecnologías, Chivita (2020) señala que:

Sus servicios de aplicación pueden dotar de inteligencia a ciudades, transporte, edificios, administración de la energía, de la industria, y de la salud, proporcionadas por diferentes tecnologías como sensores y redes de sensores inalámbricos WSN (Wireless Sensor Network), nanotecnología, identificación de radio frecuencia RFID (Radio Frequency Identification), localización, almacenamiento y nube (p.48).

1. Capa de aplicación IoT

Chivita (2020) menciona que, esta capa contiene “las aplicaciones para IoT y el control de las mismas, por medio de la computación en la nube, reconocimiento difuso y otras tecnologías de computación inteligente para el análisis y cómputo de grandes cantidades de información y de control inteligente” (p.48).

2 Capa de soportes de servicios y aplicaciones IoT

La capa de soporte de servicios y aplicaciones consiste en los dos siguientes grupos de capacidades (Chivita Y, 2020):

- Capacidades de soporte genéricas: Son funciones comunes que pueden ser utilizadas por diferentes aplicaciones IoT, tales como procesamiento o almacenamiento de datos. Estas funciones también pueden utilizarlas otras funciones específicas para crear más funciones específicas.

- Capacidades de soporte específicas: Son funciones para atender las necesidades particulares de diversas aplicaciones, pueden consistir en diversos grupos de funciones precisas que ofrecen distintos apoyos a las diferentes aplicaciones IoT (pp. 48-49).

3 Capa de red IoT

Chivita (2020) señala que esta capa se basa en dos tipos de capacidades:

- Capacidades de red: ofrecen funciones de control de la conectividad en red, tales como funciones de control de acceso y de recursos de transporte, gestión de la movilidad y autenticación, autorización y contabilidad.

- Capacidades de transporte: centradas en suministrar conectividad para el transporte de información y datos específicos de servicios y aplicaciones IoT, así como el transporte de información de control y gestión relacionada con IoT. (p.49)

4 Capa de dispositivo IoT

Las capacidades de la capa del dispositivo se pueden clasificar en dos (2):

- Las capacidades de dispositivo, dentro de las cuales se tiene, según Chivita (2020), las siguientes:

Interacción directa con la red de comunicaciones: Los dispositivos pueden obtener y cargar información directamente en la red de comunicación y pueden recibir directamente información de la red de comunicación.

Interacción indirecta con la red de comunicación: Los dispositivos pueden obtener y cargar información indirectamente en la red de comunicación, mediante capacidades de pasarela. Además, los dispositivos pueden recibir información indirectamente de la red de comunicación.

Modo reposo y activo: Las capacidades de dispositivo deben disponer de mecanismos para pasar a los modos "reposo" y "activo" con el fin de ahorrar energía. (p. 49)

- Las capacidades de pasarela, que según Chivita (2020) son entre otras:

Soporte de interfaces múltiples: En la capa de dispositivo, las capacidades de pasarela soportan dispositivos conectados mediante diferentes tipos de tecnologías alámbricas e inalámbricas, tales como el bus de red de control de zona (CAN), ZigBee, Bluetooth o Wi-Fi. En la capa de red, las capacidades de pasarela pueden comunicarse a través de diversas tecnologías,

tales como la red telefónica pública conmutada (PSTN), las redes móviles de tercera o cuarta generación (3G o 4G), las redes 5G (evolución a corto plazo), Ethernet o las líneas digitales de abonado (DSL).

Conversión de protocolo: Hay dos tipos de situaciones en las que se necesitan capacidades de pasarela. Una es cuando las comunicaciones en la capa de dispositivo utilizan protocolos diferentes, por ejemplo, protocolos de tecnología ZigBee y Bluetooth, y la otra es cuando en la comunicación intervienen la capa de dispositivo y la de red y se utilizan protocolos diferentes en cada una, por ejemplo, el protocolo de tecnología ZigBee en la capa de dispositivo y el protocolo de tecnología 3G o 4G en la capa de red (pp.49-50).

6. Marco metodológico

6.1 Identificación de requerimientos del sistema

Para la selección de los instrumentos para la medición de temperatura y humedad se contemplan instrumentación de bajo costo. Además, debido a la necesidad de monitorear las condiciones ambientales a las que se somete el puente en su totalidad, y no secciones del puente específicas, la instalación de los instrumentos se realiza en un único punto del puente.

Debido a que la cobertura de red celular es nula sobre la estructura del puente, el sistema de monitoreo contempla una arquitectura que no depende de conexión a internet en la etapa de medición. Por lo que se decide hacer uso de redes de área amplia y baja potencia (LPWAN) como

zigbee o LoRa para la conexión local, esto implica la utilización de un gateway ubicado en un lugar donde si exista conexión a internet, con el objetivo de recibir los datos de las mediciones realizadas en el lugar de medida, para su posterior carga a un servidor donde puedan ser almacenados y puestos a disposición de un usuario final.

Para la comunicación entre el gateway y el servidor existen diversas alternativas de protocolos de comunicación que se pueden utilizar. El seleccionado debe ser fiable, de bajo consumo energético y de bajo consumo de datos, debido a que la red de internet celular en las inmediaciones del puente no es muy buena.

El servidor debe tener una capa intermedia de gestión de solicitudes a la base de datos (*backend*), esta se desarrolla con el objetivo de administrar qué datos entran y salen de la base de datos. Puede recibir solicitudes tanto desde el gateway, como desde un cliente web, desde donde el usuario podrá tener acceso a los datos recogidos por el sistema en tiempo real.

En cuanto a la base de datos se contempla un gestor de bases fiable y de acceso continuo, de preferencia en el mismo servidor que se ejecute todo el código *backend* para que la comunicación entre ambos sea fluida e ininterrumpida

Para el cliente web (*frontend*) se necesita una plataforma organizada y presentable, en la que se puedan visualizar los datos en tiempo real, además se debe poder hacer una consulta histórica del comportamiento de la temperatura y la humedad cada día del mes, y debe estar habilitada la descarga de estos datos en un rango de fechas especificado por el usuario.

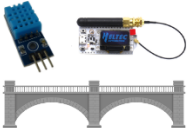


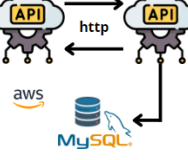

6.2 Diseño del sistema

Para dar solución a todos los requerimientos previamente expuestos, se diseñó un sistema piloto de monitoreo en tiempo real de las condiciones ambientales. Este sistema está compuesto por varias etapas, cada una de las cuales será explicada en detalle en las secciones siguientes de este proyecto. Cada etapa cumple un rol específico dentro del proceso global de monitorización, asegurando un flujo eficiente de información desde la recolección de datos hasta su visualización y análisis.

En la imagen a continuación se resumen las tecnologías empleadas en cada una de estas etapas, proporcionando una visión general de los componentes técnicos que permiten la implementación del sistema de monitoreo, facilitando su comprensión.

Figura 1.

Tecnologías empleadas en las diferentes etapas del sistema de monitoreo

	Instrumentación
	Gateway
	Broker
	Servidor
	Cliente web

6.2.1 Instrumentación

En esta etapa se diseña un dispositivo de medición de temperatura y humedad, contemplando instrumentación de bajo costo, que envía las lecturas recolectadas a través de una conexión local mediante una red LPWAN a un gateway ubicado en las inmediaciones del punto de medición. Dicho dispositivo está compuesto principalmente por dos componentes principales: los sensores y el microcontrolador, cuyo proceso de selección y adecuación se describe a continuación.

6.2.1.1 Sensores

6.2.1.1.1 Selección de sensores. Para la selección de sensores se tuvieron en cuenta rango, precisión, resolución y precio de los mismos, comparando estas características con las de la estación meteorológica Wireless Vantage Pro2 Weather Station, proporcionada por el profesor Alvaro Viviescas que es utilizada actualmente para los mismos fines por el “Grupo de Investigación en Materiales de Construcción y Estructuras INME”. La siguiente tabla muestra un resumen de la comparativa entre las características de varios de los sensores estudiados.

Tabla 2.

Comparativa de las características de los sensores estudiados

Nombre del sensor	Temperatura			Humedad			Precio
	Rango	Precisión	Resolución	Rango	Precisión	Resolución	
Wireless Vantage Pro2 Weather Station	0°C a 60°C	± 0.3°C	0.1°C	1% RH a 100% RH	±2%RH	1%RH	4'106.405 COP
XY-MD02	-40°C a 60°C	± 0.5°C	0.1°C	0% RH a 80% RH	±3%RH	0.1%RH	57.255 COP

Nombre del sensor	Temperatura			Humedad			Precio
	Rango	Precisión	Resolución	Rango	Precisión	Resolución	
MW-RS485-RS30	-30 °C a 80°C	± 0.5°C	0.1°C	0% RH a 100% RH	±5%RH	0.1%RH	86.500 COP
DHT 11	0°C a 50°C	± 2°C	1°C	20% RH a 90% RH	±5%RH	1%RH	8.500 COP
DHT 22	-40°C a 80°C	± 0.5°C	0.1°C	0% RH a 100% RH	±5%RH	0.1%RH	14.900 COP
AM2301	-40°C a 80°C	± 0.3°C	0.1°C	0% RH a 100% RH	±3%RH	0.1%RH	35.575 COP

Se decidió utilizar el termohigrómetro AM2301, que integra en su interior el sensor DHT21, n. Este módulo tiene el rango de medida necesario para monitorear las magnitudes de interés, una resolución y una precisión adecuadas para el requerimiento del proyecto, además en comparación con la estación meteorológica utilizada como referencia, tiene un precio inferior y ofrece características similares.

6.2.1.1.2 Comparativa AM2301 vs Wireless Vantage Pro2 Weather Station. Para establecer un punto de referencia confiable para las mediciones realizadas con el sensor seleccionado, se calculó el error al comparar sus datos con los registrados por la estación meteorológica Vantage Pro2 Weather Station, cuyas especificaciones fueron detalladas anteriormente. Se llevó a cabo una medición simultánea de temperatura y humedad con ambos sensores, ubicados en la terraza del sexto piso del edificio de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Este proceso se realizó de manera continua durante 12 horas, con un intervalo de muestreo de 5 minutos.

Las mediciones obtenidas fueron comparadas para cada intervalo, permitiendo calcular el error asociado a cada conjunto de datos. Posteriormente, se determinó el error promedio para cada variable, utilizando la suma de los valores absolutos de los errores individuales. Los resultados

obtenidos indicaron un error promedio de 1.26% en la medición de temperatura y 1.19% en la de humedad.

Figura 2.

Gráfica comparativa de resultados obtenidos en las medición de temperatura

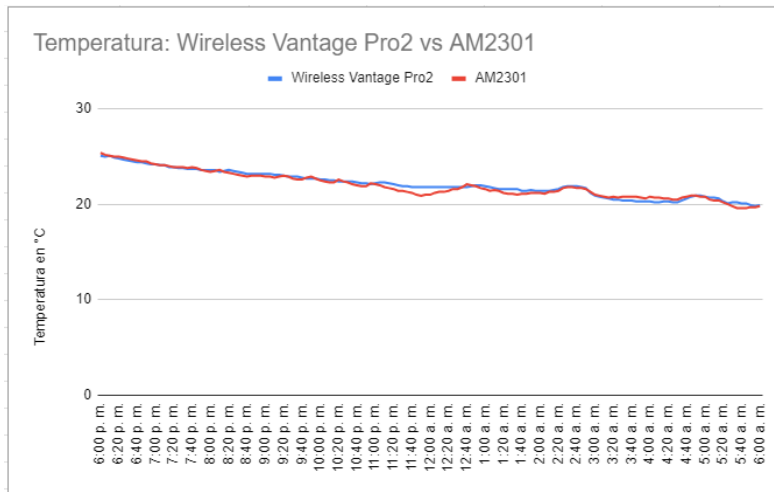


Figura 3.

Gráfica de error en °C de temperatura medida por el sensor AM2301 con respecto a la estación meteorológica

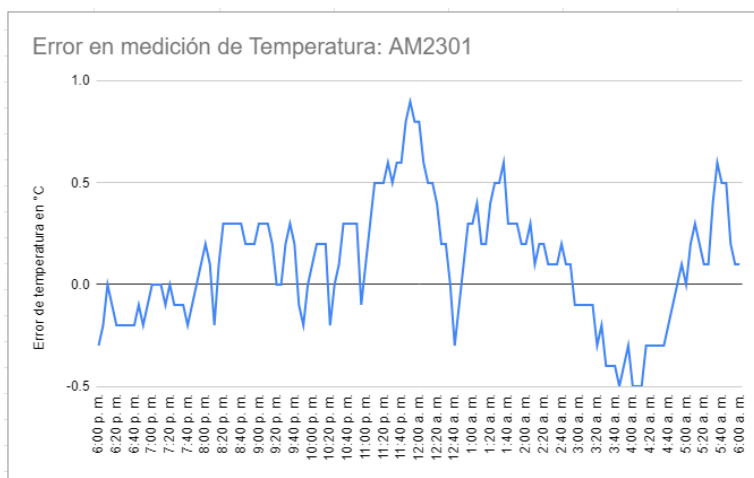


Figura 4.

Gráfica comparativa de resultados obtenidos en las medición de humedad

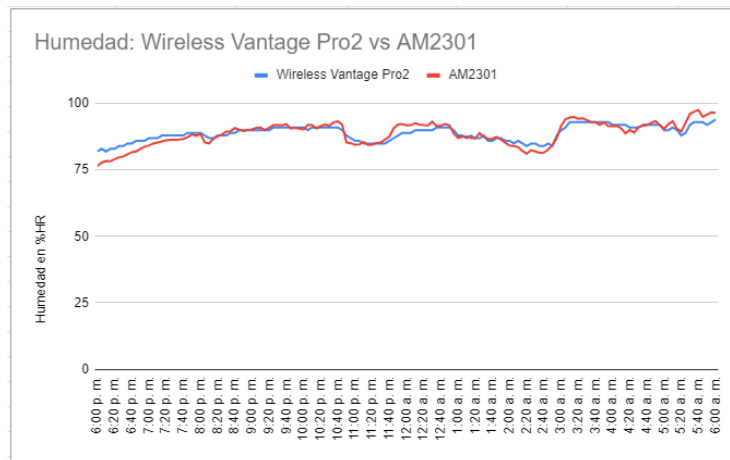
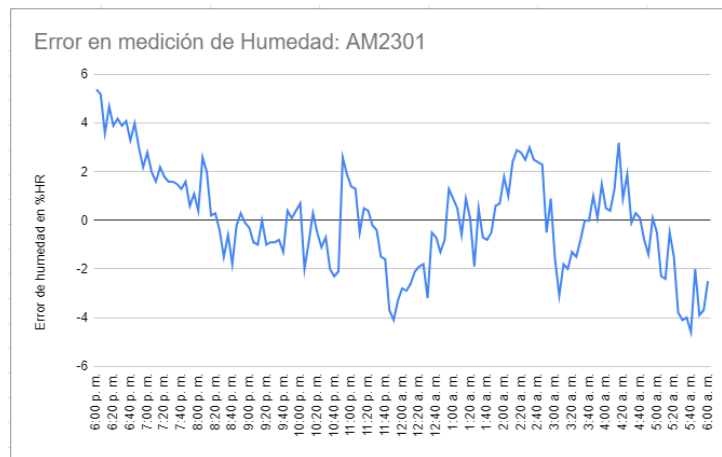


Figura 5.

Gráfica de error en %HR de humedad medida por el sensor AM2301 con respecto a la estación meteorológica



6.2.1.2 Microcontrolador

6.2.1.2.1 Selección de la tecnología de red LPWAN. En la actualidad, las tecnologías más utilizadas en la industria del IoT para la comunicación en redes de tipo LPWAN son SigFox y LoRa. Estas dos tecnologías se han consolidado como las principales opciones debido a sus capacidades para cubrir grandes áreas y su bajo consumo energético, características esenciales para proyectos de monitoreo remoto y dispositivos IoT. Como se puede observar en la tabla comparativa que se presenta a continuación, ambas tecnologías ofrecen un rango de cobertura que se ajusta a los requisitos del sistema, lo que las convierte en opciones viables para la transmisión de datos a largas distancias.

Tabla 3.

Comparativa de las tecnologías de transmisión de datos para largas distancias

Tecnología LPWAN	LoRa	SigFox
Rango	<11 Km	<13 Km
Banda de frecuencia	100 MHz a 900MHz	100 MHz a 900MHz
datarate	30-50 Kbps	10-100 Kbps
bidireccional	si	no

Tanto SigFox como LoRa operan en bandas de frecuencia libres, que van desde 100 MHz hasta 900 MHz, lo que permite que estos sistemas puedan funcionar sin la necesidad de licencias específicas para el uso del espectro, lo cual es una ventaja económica y práctica. No obstante, existen algunas diferencias clave entre ambas que influyen en la elección de una u otra, dependiendo de las características del proyecto y el entorno de implementación.

En el caso particular del mercado colombiano, LoRa tiene una presencia mucho más consolidada en comparación con SigFox. Esta mayor presencia se refleja en una disponibilidad más amplia de dispositivos LoRa y en precios más competitivos. Al contar con una oferta más abundante y accesible, los proyectos basados en LoRa pueden beneficiarse de un menor costo de adquisición de componentes y una mayor facilidad para encontrar soporte técnico y soluciones locales. Estas ventajas económicas y de disponibilidad hacen que LoRa sea una opción preferida para la implementación de sistemas de monitoreo IoT en el contexto colombiano.

Por tanto, aunque ambas tecnologías son capaces de cumplir con los requerimientos del proyecto en términos de cobertura y funcionamiento en bandas de frecuencia libres, la mayor disponibilidad de LoRa en el mercado local y sus costos más bajos inclinan la balanza a favor de esta tecnología para la implementación del sistema. Además, solo los chips de radio LoRa pueden funcionar como transreceptores, es decir, como transmisor o receptor dependiendo de la necesidad del usuario. Teniendo esto en cuenta se podría utilizar el mismo tipo de chip tanto en el punto de medida como en el gateway del sistema.

6.2.1.2 Selección del microcontrolador. Se llevó a cabo una comparativa exhaustiva entre tres microcontroladores económicos, actualmente disponibles en el mercado colombiano, con el objetivo de evaluar su idoneidad para implementaciones en placas de desarrollo que ofrezcan funcionalidad adicional y se ajusten a las necesidades de conectividad del proyecto. Este análisis es fundamental, ya que la elección del microcontrolador influye directamente en el rendimiento y la eficiencia del sistema de monitoreo que se pretende diseñar.

En la comparativa se consideraron características clave como la frecuencia máxima que puede alcanzar la CPU de cada microcontrolador, ya que un mayor rendimiento en este aspecto

podría traducirse en un procesamiento más rápido de las tareas del sistema. Además, se evaluó la capacidad de almacenamiento, tanto en memoria RAM como en ROM, lo que es crucial para manejar los datos y el firmware necesario para la operación del sistema. La capacidad de memoria define tanto la cantidad de datos que puede almacenar el dispositivo en tiempo real como la complejidad del código que puede ejecutar.

Otra característica fundamental que se tomó en cuenta fue la conectividad. Se priorizaron microcontroladores con compatibilidad con tecnologías de comunicación LPWAN (redes de área amplia y baja potencia) y Wi-Fi, dado que el sistema requiere de una comunicación eficiente tanto en distancias largas (mediante LPWAN) como en redes locales (mediante Wi-Fi). Esto es particularmente importante porque la misma placa de desarrollo se utilizará en el gateway del sistema de monitoreo, donde la conectividad a Internet y la transmisión de datos en tiempo real son esenciales para el correcto funcionamiento del sistema.

La siguiente tabla presenta un resumen de las principales características evaluadas para cada una de las placas de desarrollo que fueron consideradas en el proceso de selección, proporcionando una visión clara de los puntos fuertes y las limitaciones de cada opción. Esta comparativa facilita la toma de decisiones para elegir el microcontrolador más adecuado, asegurando que el hardware seleccionado no solo cumpla con los requisitos actuales del proyecto, sino que también sea capaz de adaptarse a posibles expansiones y futuras necesidades del sistema.

Tabla 4.

Comparativa de las principales características de las placas de desarrollo evaluadas para la selección de microcontroladores

Placa de desarrollo	Microcontrolador	CPU	RAM	ROM	WIFI	LPWAN	Precio
Heltec Lora 32 V2	ESP32	Dual Core 240 MHz	520 KB	448 KB	802.11n (2.4 GHz)	LoRa	97.676 COP
TTGO LoRa 32 V2	ESP32	Dual Core 240 MHz	520 KB	449 KB	802.11n (2.4 GHz)	LoRa	115.900 COP
Arduino UNO + LoRa shield	ATmega328P	Single Core 16 MHz	2 kB		No	LoRa	387.000 COP

Se selecciona el microcontrolador ESP32 integrado en una placa de desarrollo Heltec lora 32 v2, que equipa además de los periféricos propios del microcontrolador, un transreceptor LoRa sx1276, por el cual se puede llevar a cabo una conexión local entre el punto de medida y otro transreceptor ubicado en un rango máximo de 1 km de distancia en línea de vista según la información dispuesta por el fabricante en el datasheet del dispositivo. Además tiene disponibilidad de conexión wifi, lo que permite que la misma placa de desarrollo se pueda utilizar como gateway en etapas posteriores del diseño del sistema.

6.2.1.2.3 Lógica de programación del microcontrolador. Se utilizó el IDE de arduino para programar la placa de desarrollo de heltec, en conjunto con la biblioteca de funcionamiento brindada por el proveedor del chip, por lo que las librerías utilizadas son desarrolladas para este IDE y para el microcontrolador ESP32. Para programar la lógica de lectura de los sensores se usaron las siguientes librerías provistas por terceros:

- **heltec.h:** se trata de una serie de librerías de heltec con utilidades para cada una de sus placas de desarrollo, en este caso concretamente utilizamos solamente las librerías con funcionalidades para el chip LoRa sx1276 presente en la HeltecLoRa32_v2

- **DHT.h:** contiene utilidades para la implementación del protocolo one wire de comunicación que implementa el sensor. Para la correcta inicialización de la librería `heltec.h` destinada a la comunicación LoRa, se utilizan una serie de constantes que configuran el transceptor SX1276 de la placa de desarrollo. Estas constantes son configuradas en el código mediante macros, que permiten reemplazar los valores predeterminados en la librería con los ajustes específicos requeridos para el proyecto. Este proceso es clave para adaptar el comportamiento del transceptor a las necesidades de comunicación y al entorno de operación.

En primer lugar, se define la frecuencia en la que se emitirán los paquetes LoRa. Se selecciona la banda de frecuencia de 915 MHz, ya que es la asignada para comunicaciones LoRa en Colombia, asegurando que el dispositivo opere en el rango adecuado y autorizado. Luego, se ajusta la potencia de transmisión de los datos. En este caso, se configura en 20 dBm de los 21 dBm máximos que puede alcanzar el chip. Este valor se selecciona estratégicamente para maximizar el rango de comunicación, garantizando una transmisión a largas distancias sin comprometer demasiado la estabilidad de la señal.

Otro aspecto clave en la configuración es el ancho de banda de la comunicación. Se utiliza el valor por defecto de 125 kHz, el cual corresponde al ancho de banda más básico ofrecido por la modulación LoRa. Este ajuste es suficiente para garantizar una comunicación eficiente en la mayoría de los escenarios, manteniendo un balance entre el rango de transmisión y el consumo de energía.

A continuación, se presenta una tabla que resume las constantes utilizadas para la inicialización de la librería `heltec.h`, proporcionando una visión clara de los valores asignados a cada uno de los parámetros que controlan el transceptor SX1276. Estas configuraciones permiten

optimizar el rendimiento del sistema en función de las características de la red y los requisitos del proyecto.

Tabla 5.

Resumen de constantes utilizadas para la inicialización de la librería heltec.h en la configuración del transceptor SX1276

Parámetro	Valor
RF_FREQUENCY	915MHz
TX_OUTPUT_POWER	20 dBm
LORA_BANDWIDTH	125 Hz
LORA_SPREADING_FACTOR	SF7

Para la inicialización de la librería DHT, es necesario especificar el modelo de sensor de la familia DHT que se va a utilizar. En este caso, se declara una constante mediante una macro que define el sensor como DHT21, lo cual habilita el correcto funcionamiento de la librería y permite su uso en el resto del código. Esta sencilla configuración inicial es esencial para asegurar que el dispositivo pueda leer y procesar los datos de temperatura y humedad de manera precisa.

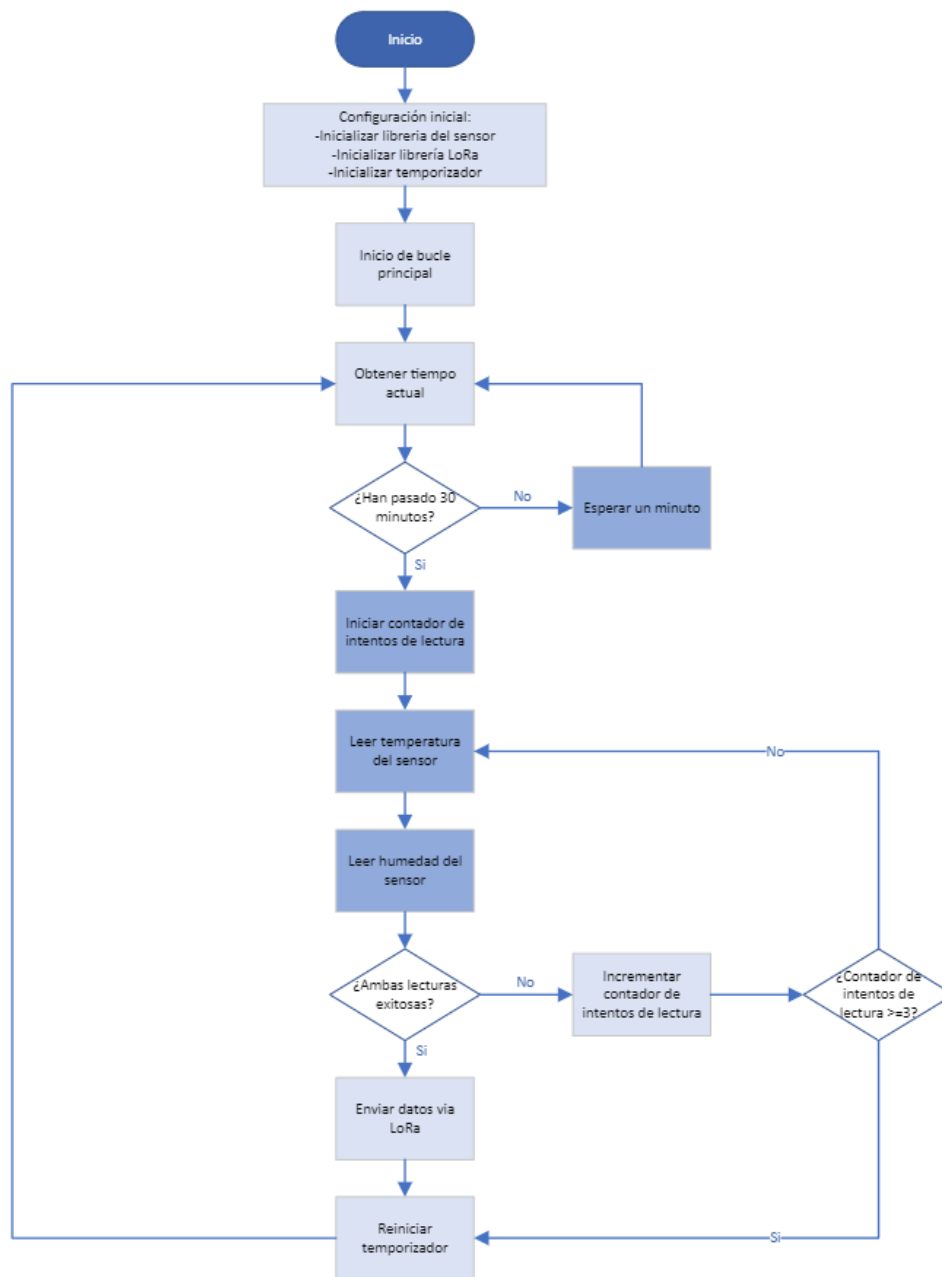
Una vez que las librerías han sido inicializadas correctamente, se establece un periodo de muestreo de 30 minutos, el cual se declara mediante una constante. Este intervalo determina cuándo deben realizarse las lecturas del sensor, evitando mediciones innecesarias que podrían sobrecargar el sistema o consumir recursos de manera ineficiente. Para llevar un control del tiempo transcurrido desde la última medición, se utiliza la función `millis()` de Arduino, que cuenta el tiempo en milisegundos desde el inicio del programa. A través de una estructura condicional, el código evalúa si ha pasado el tiempo necesario para proceder con una nueva lectura. Este enfoque garantiza un ritmo adecuado de recolección de datos, mejorando la eficiencia energética y la vida útil del dispositivo.

Cuando se inicia el proceso de lectura, se implementa un contador de intentos que permite hasta tres oportunidades para obtener lecturas correctas de temperatura y humedad. Este mecanismo es importante para asegurar la confiabilidad de los datos; si después de tres intentos las lecturas no son exitosas, el sistema decide no almacenar ningún dato, previniendo el registro de valores inexactos. Solo cuando se obtienen lecturas exitosas de ambas variables, el sistema procede al siguiente paso.

Una vez que se han obtenido tanto la temperatura como la humedad, se utiliza la librería `heltec.h` para transmitir los datos a través del transceptor SX1276 mediante la comunicación LoRa. Esta tecnología permite enviar la información recolectada a largas distancias, lo cual es esencial para aplicaciones de monitoreo remoto. Finalmente, en el diagrama de flujo adjunto, se presenta una descripción detallada del funcionamiento lógico de los procesos que realiza el dispositivo de medición, desde la inicialización del sensor hasta la transmisión de los datos. Este enfoque asegura que el sistema opere de manera eficiente y confiable en entornos de monitoreo continuo.

Figura 6.

Diagrama de flujo del proceso de adquisición de lecturas



6.2.1.3 Diseño del dispositivo. Se diseñó un dispositivo utilizando todo el hardware seleccionado a través del software de diseño de PCBs y circuitos electrónicos KiCad 6.0, una herramienta versátil que permite crear circuitos complejos de manera eficiente. Dado que la

mayoría de los componentes electrónicos requeridos para la construcción tanto del gateway como del dispositivo de medición de variables ambientales son prácticamente los mismos, se tomó la decisión de realizar un único diseño de PCB que pueda cumplir ambas funciones. Este enfoque optimiza el proceso de diseño y fabricación, permitiendo reducir costos y tiempos de desarrollo.

El diseño es configurable a través de firmware, lo que significa que, dependiendo del software cargado en el dispositivo, este puede operar como un gateway, encargado de gestionar la comunicación con el servidor en la nube, o como un dispositivo de medición de variables ambientales, enfocado en capturar datos como temperatura y humedad. Esta flexibilidad en el diseño del hardware no solo simplifica la producción, sino que también permite una mayor versatilidad, ya que el mismo dispositivo puede adaptarse a diferentes roles dentro del sistema simplemente modificando el firmware.

Este enfoque modular y adaptable permite que el dispositivo pueda ser fácilmente reprogramado y actualizado para cambiar su funcionalidad según las necesidades del proyecto, sin tener que rediseñar el hardware.

6.2.1.3.1 Circuito de regulación. Se diseñó un circuito de regulación de voltaje utilizando el integrado LM 7805, un regulador lineal que permite una entrada de voltaje en un rango que va desde 5V hasta 35V, ofreciendo una salida estable de 5V DC. Este tipo de regulador es ideal para aplicaciones donde se necesita una fuente de alimentación constante y fiable. Para optimizar su funcionamiento, se añadieron varios componentes pasivos estratégicamente colocados. En la entrada del regulador, se incorporaron dos capacitores: uno de 220 μF , que tiene como propósito principal suavizar las variaciones de tensión que puedan surgir debido a interrupciones en el suministro energético, proporcionando así una mayor estabilidad. Este capacitor también ayuda a

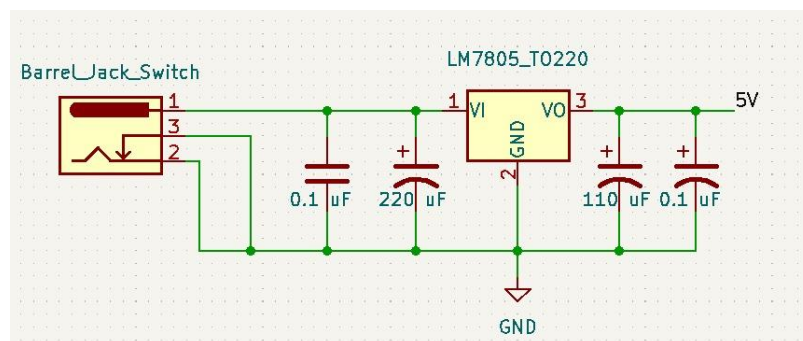
prevenir el ruido en bajas frecuencias. Además, se incluyó un capacitor de derivación de $0.1 \mu\text{F}$, que actúa como un filtro, eliminando el ruido de alta frecuencia que podría interferir en el correcto funcionamiento del circuito.

En la salida del regulador, se añadieron otros dos capacitores para asegurar una salida de 5V lo más limpia posible. Ambos capacitores, de $110 \mu\text{F}$, fueron seleccionados para mantener la estabilidad del voltaje y minimizar cualquier posible ondulación o fluctuación que pudiera afectar los dispositivos conectados a la salida. De esta manera, se garantiza que la alimentación sea continua y sin imperfecciones.

Para la conexión de la fuente de alimentación externa al circuito, se optó por un conector tipo Jack, el cual facilita la inserción y extracción del cable de alimentación, brindando además una conexión segura y fiable. Este diseño proporciona flexibilidad en cuanto a las fuentes de entrada, permitiendo conectar el circuito a una amplia gama de adaptadores y fuentes de voltaje sin comprometer la estabilidad de la salida.

Figura 7.

Circuito de regulación

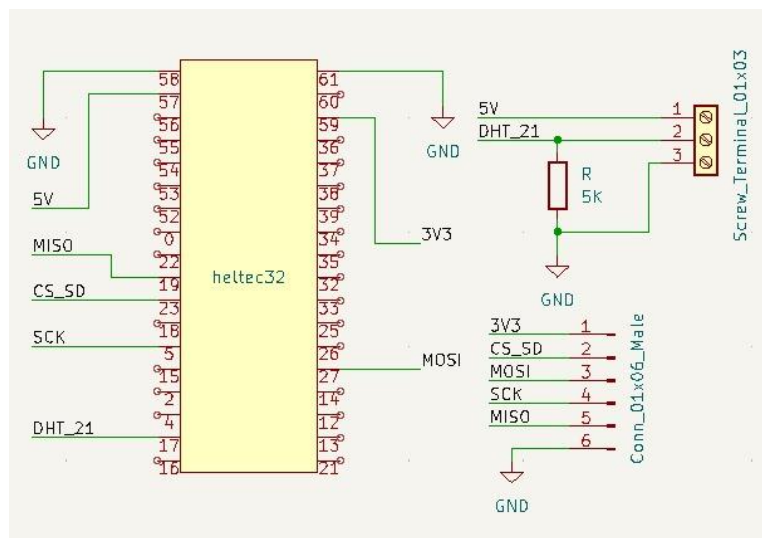


6.2.1.3.2 Conexiones entre microcontrolador, sensor y periféricos. Como único periférico no integrado directamente en la placa de desarrollo, se emplea un módulo lector de tarjetas micro SD, el cual se utiliza para cargar las credenciales de la red WiFi a la que deberá conectarse el dispositivo en caso de ser utilizado como gateway. Este módulo de almacenamiento externo se comunica mediante el protocolo SPI (Serial Peripheral Interface), por lo que fue necesario utilizar todos los pines dedicados a este propósito en la placa de desarrollo. Además, se asignó el pin 19 como chip selector (CS), encargado de gestionar la selección del dispositivo. Para facilitar la conexión física, se rutearon todos estos pines hacia un conector tipo macho, donde el módulo micro SD fue soldado, permitiendo así una conexión robusta y estable.

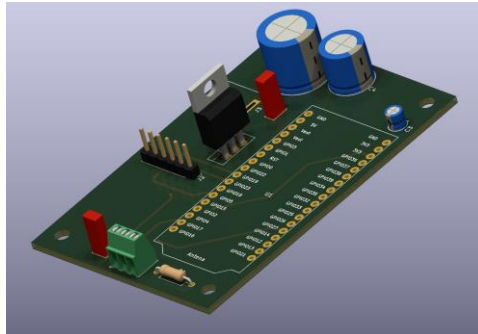
En cuanto a la conexión con el sensor AM2301, encargado de medir variables ambientales, se siguió el esquema de conexión recomendado por el proveedor del sensor. Dado que este dispositivo utiliza el protocolo de comunicación OneWire, fue necesario destinar un solo pin de la placa de desarrollo, el pin 17, para la transmisión y recepción de datos. Además, el sensor se alimenta directamente desde la salida de 5V proporcionada por el circuito de regulación de la placa, asegurando una alimentación estable. Para asegurar una conexión firme y fácil de manipular entre la PCB y el sensor, se implementó un conector tipo bornera de tres pines con tornillos, lo que permite una instalación y desconexión segura del sensor sin necesidad de soldaduras adicionales. Este diseño contribuye a una mayor flexibilidad y facilidad de uso durante la implementación y mantenimiento del sistema.

Figura 8.

Conexiones entre microcontrolador, sensor y periféricos



6.2.1.3.2 Diseño de la placa de circuito impreso Para el diseño de la placa de circuito impreso (PCB), se utilizó el software Kicad 6.0, una herramienta potente y versátil para el desarrollo de PCBs. Todos los componentes electrónicos necesarios fueron cuidadosamente dispuestos en un circuito de dos capas, asegurando que se cumplieran todas las conexiones y requisitos técnicos especificados en el diseño original. Este proceso incluyó la correcta distribución de pistas y la ubicación estratégica de los componentes, garantizando así la eficiencia y fiabilidad del circuito.

Figura 10.*Diseño de la PCB 3D***6.2.2 Gateway**

Tal como se especificó en el diseño del dispositivo, el gateway comparte el mismo hardware que el dispositivo encargado de medir las variables ambientales. Sin embargo, aunque ambos dispositivos tienen componentes similares, el gateway posee una lógica de funcionamiento diferente que le permite actuar como una pasarela entre la red LoRa y el servidor en la nube. Esta diferencia en su programación le permite recibir datos de los sensores a través de la red LoRa y luego transmitirlos al servidor remoto.

Para su correcto funcionamiento, el gateway necesita estar conectado a una red WiFi con seguridad de tipo WPA2. Las credenciales de acceso a esta red no se configuran directamente en el código, sino que se suministran en un archivo de texto (.txt) almacenado en una tarjeta micro SD. Esta tarjeta se inserta en el módulo de lectura de micro SD que está integrado en el gateway, permitiendo al dispositivo leer las credenciales de acceso y establecer la conexión a Internet de forma dinámica.

A continuación, se describe en detalle la lógica de programación utilizada por este dispositivo para llevar a cabo sus funciones, desde la gestión de las credenciales hasta su rol como puente entre la red LoRa y el servidor en la nube.

6.2.2.1 Librerías utilizadas. Para la programación del gateway se hizo uso de diferentes librerías que facilitan la intercomunicación entre los diferentes periféricos el mismo,

Tabla 6.

Librerías utilizadas para la programación del gateway y su intercomunicación con periféricos

Nombre de la librería	Autor
heltec.h	Heltec Automation
wifi.h	Espressif Systems
ArduinoJson.h	bblanchon
time.h	Espressif Systems
ESP32Time.h	fbiego
PubSubClient.h	knolleary
WiFiClientSecure.h	ArduCAM

- **heltec.h:** esta librería se utiliza para la configuración del chip lora sx 1265, para el caso del gateway se utilizan los mismo parámetros de comunicación LoRa que para el dispositivo de medición.

- **wifi.h:** se utiliza para configurar el módulo wifi que posee la placa de desarrollo HeltecLoRa32 v2, las credenciales de acceso deben ser dispuestas por el usuario en un archivo .txt que es leído por el microcontrolador desde una micro sd colocada en el módulo sd del dispositivo de medición.

- **ArduinoJson.h:** facilita la creación y manipulación de archivos json, para el caso del proyecto, se utiliza para crear los mensajes que se enviarán al servidor con información propia de las lecturas recopiladas y del dispositivo de medición.

- **time.h:** biblioteca cuya función es facilitar el trabajo con datos con formato de fecha y hora, para este proyecto se utilizan para conseguir el timestamp de la lectura que recibe el gateway del dispositivo de medición. Esta librería también ofrece una funcionalidades para obtener la hora y la fecha actual mediante petición a un servidor NTP.

- **PubSubClient.h:** Esta biblioteca permite intercambiar información a través de un broker mqtt mediante la suscripción a uno o más topics dependiendo de las necesidades de la aplicación. Se utiliza para suscribirse mediante mqtt al broker utilizado por el sistema y enviar las mediciones realizadas en tiempo real al backend del servidor.

- **WiFiClientSecure.h:** se utiliza para proveer SSL a la conexión con el broker utilizado. En este caso se utiliza un certificado TLS para brindar seguridad en la comunicación entre ambos.

6.2.2.2 Lógica de programación del gateway

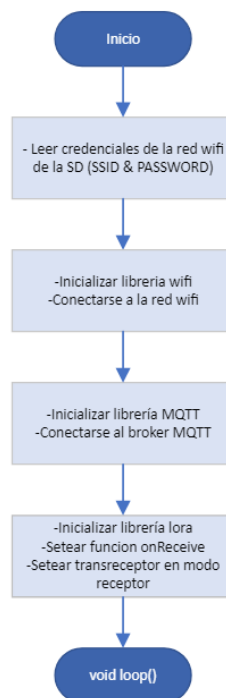
6.2.2.2.1 Inicialización de librerías. Se hace uso del bloque void setup(), el cual se ejecuta una única vez al inicio del programa, para llevar a cabo la inicialización de todas las librerías y configuraciones necesarias para garantizar el correcto funcionamiento del gateway. En primer lugar, se utiliza un módulo para la lectura de tarjetas micro SD, cuya función es extraer las credenciales de acceso a la red WiFi a la que se conectará el gateway. Una vez obtenidas estas credenciales, se procede a establecer la conexión con la red utilizando la librería wifi.h, lo que permite que el gateway tenga acceso a Internet.

Una vez establecida la conexión a Internet, se realiza la conexión con el broker MQTT, utilizando para ello las credenciales del proyecto, así como el certificado SSL correspondiente, asegurando una comunicación segura y autenticada. Posteriormente, se inicializa el chip LoRa, configurando todos los parámetros necesarios para la comunicación con el dispositivo de medición. El transceptor se configura en modo receptor, de modo que esté continuamente preparado para recibir paquetes LoRa que lleguen desde los sensores.

A continuación, se muestra un diagrama de flujo que detalla de manera clara y sencilla el proceso seguido para inicializar cada una de las librerías mencionadas, así como la secuencia de pasos necesarios para que el sistema quede completamente operativo.

Figura 11.

Diagrama de flujo del proceso de inicialización de librerías y secuencia de arranque del sistema



6.2.2.2 Bucle de eventos. Para cumplir con sus requisitos funcionales, el gateway hace uso de funciones de tipo callback, las cuales se ejecutan únicamente cuando ocurre un evento específico. En este caso, el evento principal es la recepción de un paquete LoRa. Una vez que se inicializa la librería `heltec.h` y se configuran adecuadamente los parámetros necesarios para el correcto funcionamiento del transceptor `SX1276`, se configura el chip para operar en modo receptor. Esto significa que el dispositivo estará continuamente sintonizado en la banda de frecuencia previamente establecida, a la espera de recibir algún paquete LoRa. Cuando finalmente se recibe un paquete, se activa la función `onReceive`, la cual se encarga de interpretar el paquete LoRa recibido. Esta función extrae las lecturas enviadas por el dispositivo de medición, asignándole a sus respectivas variables para su posterior procesamiento. Posteriormente, se modifica el valor de una variable `flag` a `true`, con el fin de indicar al bucle principal que las lecturas están listas para ser enviadas al servidor.

El bucle principal del sistema, implementado en la función `void loop()`, está constantemente monitoreando el estado de la variable `flag`. En caso de que su valor sea `true`, el sistema realiza una solicitud a un servidor NTP para obtener el timestamp correspondiente al momento actual. Con esta información, se genera un payload en formato JSON que contiene las lecturas obtenidas, y que será enviado al servidor a través del protocolo MQTT. La estructura del JSON que se envía puede observarse en la figura 8, la cual detalla la disposición y el formato de los datos incluidos en el mensaje.

Figura 12.

Estructura JSON detallando la disposición y formato de los datos en el mensaje

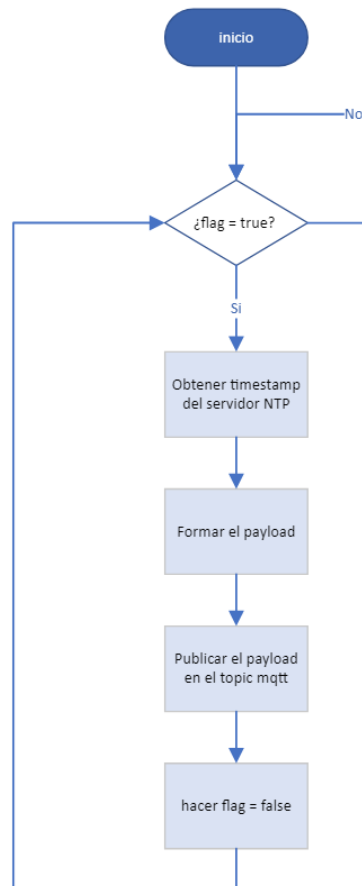
```
1  {  
2    "fecha": "2024-09-19 15:30:00",  
3    "nodo": "1",  
4    "temperatura": "25.2",  
5    "humedad": "74.4"  
6  }
```

Una vez que se ha creado el payload con las lecturas obtenidas, el siguiente paso es publicar el mensaje en el topic MQTT “PROYECTO/MEDICIONES/1”. El broker MQTT se encargará de gestionar este topic, asegurando que el mensaje esté disponible para que el servidor, así como cualquier otro cliente que se encuentre suscrito a dicho topic, pueda acceder al payload de manera oportuna. Este mecanismo de publicación y suscripción facilita la distribución de la información, permitiendo que los dispositivos que monitorizan el topic reciban el mensaje en tiempo real.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo que ilustra detalladamente los procesos que se llevan a cabo dentro de la función void loop(), desde la creación del payload hasta la publicación del mensaje en el broker MQTT.

Figura 13.

Diagrama de flujo del proceso en la función `void loop()`, desde la creación del payload hasta la publicación en el broker MQTT

**6.2.3 Broker**

En el contexto del IoT (Internet de las Cosas), un broker es un intermediario que facilita la comunicación entre dispositivos y aplicaciones utilizando principalmente el protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Este tipo de broker es esencial para gestionar la transferencia de datos entre dispositivos conectados, asegurando que los mensajes lleguen de manera eficiente, confiable y segura.

6.2.3.1 Selección del broker MQTT. Para elegir un broker MQTT es necesario tener en cuenta las siguientes características:

- **Escalabilidad:** Es fundamental para gestionar una capacidad cada vez mayor de dispositivos y mensajes de IoT.
- **Seguridad:** Los broker MQTT deben contar con funciones de seguridad sólidas, como cifrado, autenticación y control de acceso.
- **Resiliencia:** El agente MQTT debe ser resistente y capaz de manejar fallas de red y pérdida de mensajes sin perder datos ni interrumpir la comunicación.
- **Agilidad:** Los agentes públicos MQTT deben ser ágiles y adaptarse rápidamente a los cambios en los requisitos y casos de uso.
- **Observabilidad:** La capacidad de observación es fundamental para la resolución de problemas, la supervisión del rendimiento del agente de MQTT y la identificación de problemas.
- **Disponibilidad:** Los agentes MQTT también deben poder gestionar cargas de tráfico elevadas sin experimentar tiempos de inactividad.

Algunos de los brokers más destacados son:

- **Mosquitto:** Es un broker MQTT de código abierto, ligero y confiable lo cual lo hace apto en todos los dispositivos, desde computadoras de placa única de bajo consumo hasta servidores completos. Este broker implementa las versiones 5.0, 3.1.1 y 3.1 del protocolo MQTT.
- **RabbitMQ:** Es un agente de mensajes de uso general que admite varios protocolos de mensajería, incluyendo el cliente MQTT. Es fácil de implementar en entorno de nube, locales y en su máquina local. Está escrita en el lenguaje de programación ERLANG y cuenta con colas de mensajes, enrutamiento y garantía de entrega, lo que hace adecuado para proyectos que requieren alta confiabilidad y escalabilidad.

- **HiveMQ:** Este broker facilita la transferencia de datos hacia y desde dispositivos conectados de manera eficiente, rápida y confiable. La plataforma HiveMQ amplía la potencia de MQTT, el estándar de la industria para mensajería IoT, con una solución completa para implementaciones de IoT de producción.

Tabla 7.*Tabla comparativa de brokers utilizados y sus características*

Broker	Protocolo	Escalabilidad	Seguridad	Clustering	Licencia	Uso Principal
Mosquitto	MQTT	Moderada	TLS/SSL, autenticación básica	No nativo	Código abierto (EPL/EDL)	Proyectos pequeños y ligeros
RabbitMQ	AMQP, STOMP, MQTT	Alta	TLS/SSL, control de acceso	Soporta plugins	Código abierto (MPL 1.1)	Aplicaciones empresariales
HiveMQ	MQTT	Muy alta	TLS/SSL, control avanzado	Nativo	Comercial y open-source	IoT industrial a gran escala

Se decide utilizar un bloker mqtt de HiveMQ ya que posee una gran escalabilidad, además ofrece un servicio serverless, es decir que no es necesario instalar nada en nuestro servidor, sino que HiveMQ se encarga de gestionar el broker desde sus servidores, dejando a disponibilidad una dirección pública para utilizar el servicio como lo requiera el proyecto.

6.2.4 Servidor

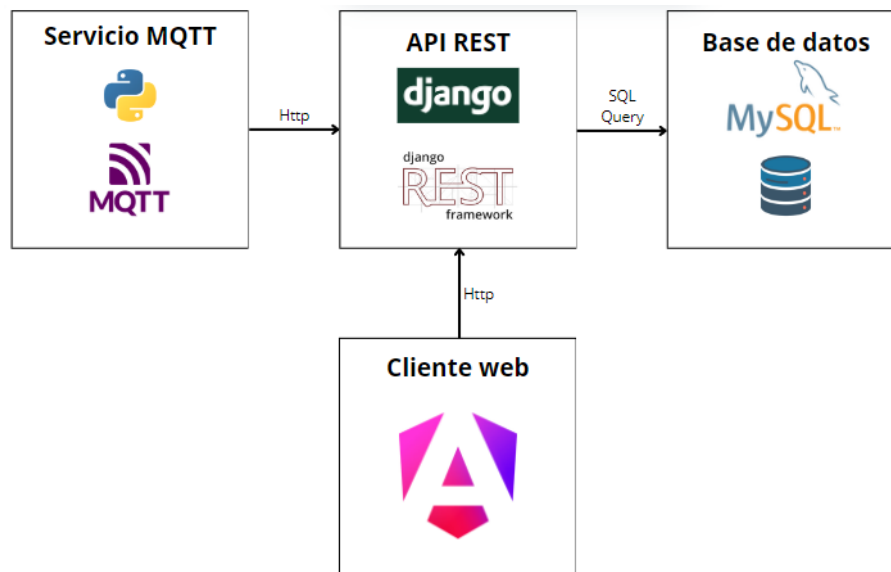
Para el servidor se decide utilizar una máquina virtual de aws del tipo ec2, ya que es una opción ideal para implementar aplicaciones en la nube. Primero, ofrece escalabilidad y flexibilidad, permitiendo ajustar los recursos de cómputo según la demanda del proyecto, lo que

resulta en ahorro de costos al pagar solo por lo que se utiliza. Además, EC2 proporciona una amplia gama de tipos de instancias con diferentes configuraciones de CPU, memoria, almacenamiento y redes, adaptándose a las necesidades de diferentes tipos de aplicaciones, desde sitios web pequeños hasta aplicaciones intensivas en datos y procesamiento. Para este proyecto los requerimientos no superan la capa gratuita que ofrece amazon, así que se puede utilizar por un año sin tener ningún tipo de costo.

6.2.4.1 Arquitectura del backend. La lógica del servidor, también conocida como backend, fue estructurada en dos servicios principales, cada uno con responsabilidades específicas. El primero de estos servicios está encargado de suscribirse al topic MQTT, con el propósito de gestionar, validar y organizar todos los payloads que el gateway envía a través del broker. Este servicio actúa como el intermediario que garantiza que los datos recibidos sean procesados de manera adecuada antes de su posterior utilización. El segundo servicio está enfocado en la comunicación directa con la base de datos, funcionando como una capa intermedia que facilita las operaciones CRUD (Crear, Leer, Actualizar y Eliminar). Esta capa intermedia asegura que los registros en la base de datos se manejen de manera eficiente y segura, permitiendo la creación, modificación, consulta y eliminación de información según las necesidades del sistema.

Figura 14.

Arquitectura del backend del sistema



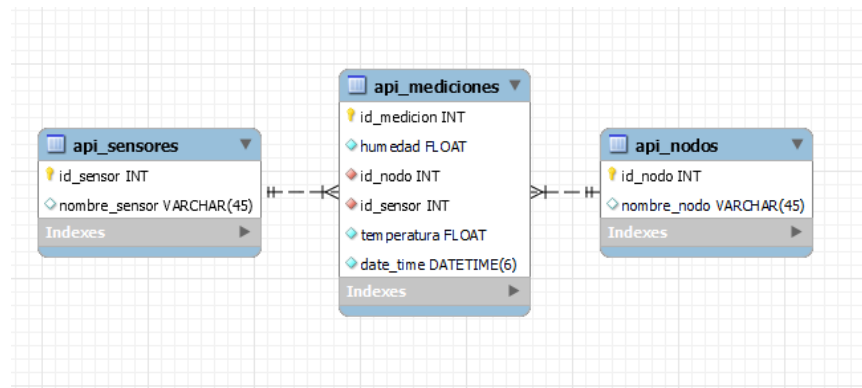
6.2.4.1.1 Base de datos. Se escoge MySQL como motor de base de datos ya que es una solución open-source, confiable y de alto rendimiento, ideal para sistemas que requieren gestionar grandes volúmenes de datos. MySQL ofrece escalabilidad y es compatible con diversas plataformas, lo que garantiza la integridad de los datos y la seguridad en su manejo. Además, su amplio soporte y comunidad hacen que sea una opción popular y de fácil mantenimiento.

La tabla con las columnas `id_lectura`, `id_nodo`, `id_sensor`, `fecha_hora`, `temperatura` y `humedad` se ha diseñado para almacenar las lecturas de los sensores. La columna `id_lectura` actúa como clave primaria, asegurando la unicidad de cada registro. `id_nodo` identifica el dispositivo que realizó la medición, `id_sensor` identifica el sensor que se está empleando para obtener las variables ambientales de interés, permitiendo relacionar los datos con un nodo y un sensor específico. `fecha_hora` almacena el momento exacto en que se tomó la lectura, lo que es crucial para el monitoreo temporal. Las columnas `temperatura` y `humedad` contienen los valores

recolectados por los sensores, que son las variables clave para el análisis de condiciones ambientales. A continuación se muestra el diagrama entidad relación que describe la base de datos creada para el proyecto.

Figura 15.

Diagrama entidad-relación de la base de datos



Por su parte, la tabla con las columnas `id_usuario`, `username`, `email` y `password` se ha creado para gestionar el acceso de usuarios al sistema. `id_usuario` es la clave primaria que identifica de forma única a cada usuario. `Username` permite identificar fácilmente a los usuarios dentro de la plataforma, mientras que el `email` se puede usar para una recuperación de cuenta en una futura implementación del sistema. La columna `password` asegura que solo los usuarios autorizados puedan acceder, garantizando la seguridad del sistema. Esta tabla ya se encuentra prediseñada por el framework Django de python, por lo que solo se realizó la implementación de la misma en la api

6.2.4.1.2 Rest API. Para gestionar de manera eficiente la interacción con la base de datos, se implementó una API REST utilizando el framework Django de Python, en conjunto con la

biblioteca Django REST Framework (DRF). Esta combinación permite construir una interfaz robusta, escalable y segura para manejar todas las operaciones de creación, lectura, actualización y eliminación (CRUD) necesarias para el proyecto. Además, Django facilita la estructuración de la lógica del servidor y el manejo de la seguridad, mientras que DRF simplifica la creación de endpoints para exponer los datos de manera eficiente.

Se han desarrollado varios endpoints diseñados para satisfacer las diferentes necesidades del proyecto, permitiendo interactuar de forma directa con la base de datos. Cada endpoint está optimizado para realizar tareas específicas, como la inserción de nuevos datos de sensores, la consulta de mediciones previas por rango de fecha, la actualización de registros o la eliminación de entradas obsoletas. Además, la API asegura que cada interacción con la base de datos esté debidamente validada, garantizando la integridad y seguridad de la información.

A continuación, se describe detalladamente el funcionamiento de cada uno de estos endpoints, explicando cómo se estructuran las solicitudes y respuestas para facilitar la comunicación entre el servidor y los dispositivos del proyecto.

- **data_collector/withvalidations:** se trata de una petición POST cuyo cuerpo tiene la siguiente estructura: {id_nodo: int, date_time: yyyy-MM-dd HH:mm:ss, temperatura: float, humedad: float}. Este endpoint inserta las lecturas recopiladas en la base de datos. Si el cuerpo de la solicitud no cumple con la estructura o los tipos de datos requeridos, el servidor devolverá una respuesta con código 400 (BAD REQUEST). En caso de éxito en la inserción de los datos, se retornará un código 200 (OK).

- **data_collector/getdata:** es una petición POST cuyo cuerpo tiene la siguiente estructura: {id_nodo: int, fecha_inicio: yyyy-MM-dd HH:mm:ss, fecha_fin: yyyy-MM-dd HH:mm:ss}. Este endpoint busca en la base de datos todas las lecturas dentro del rango de fechas proporcionado y

que correspondan al nodo indicado en la solicitud. Si la estructura o los datos no son correctos, el servidor devolverá una respuesta con código 400 (BAD REQUEST). En caso de éxito en la búsqueda, se retornará un código 200 (OK) con un cuerpo que tendrá la siguiente estructura: [{date_time: yyyy-MM-dd HH:mm:ss, temperatura: float, humedad: float},...].

- **data_collector/getlast:** es una petición POST cuyo cuerpo tiene la siguiente estructura: {id_nodo: int}. Este endpoint busca en la base de datos la última lectura recopilada para el nodo indicado en la solicitud. Si la estructura o los datos no son correctos, el servidor devolverá una respuesta con código 400 (BAD REQUEST). En caso de éxito en la búsqueda, se retornará un código 200 (OK) con un cuerpo que tendrá la siguiente estructura: [{date_time: yyyy-MM-dd HH:mm:ss, temperatura: float, humedad: float}].

- **data_collector/login:** es una petición POST cuyo cuerpo tiene la siguiente estructura: {username: string, password: string}. Este endpoint verifica que el nombre de usuario y la contraseña sean válidos y estén previamente registrados en el sistema. Si es así, devolverá una respuesta con código 200 (OK) y un cuerpo con la siguiente estructura: {token: string, user: {username: string, email: string}}. El token generado tiene una validez de 4 horas y permite al sistema asegurarse de que el usuario está correctamente autenticado. En caso de que el usuario no exista o la contraseña sea incorrecta, el sistema devolverá una respuesta con código 400 (BAD REQUEST).

- **data_collector/register:** Es una petición POST cuyo cuerpo tiene la siguiente estructura: {username: string, email: string, password: string}. Este endpoint registra un usuario en la base de datos, permitiendo que posteriormente pueda validarse e iniciar sesión cuando lo requiera. Si el registro se realiza con éxito, el sistema devolverá una respuesta con código 200

(OK) y el siguiente cuerpo: {user: {username: string, email: string}}. En caso de error, el sistema devolverá una respuesta con código 400 (BAD REQUEST).

- **data_collector/downloadcsv:** Es una petición POST cuyo cuerpo tiene la siguiente estructura: {id_nodo: int, fecha_inicio: yyyy-MM-dd HH:mm:ss, fecha_fin: yyyy-MM-dd HH:mm:ss}. Este endpoint obtiene de la base de datos todas las lecturas dentro del rango de fechas especificado que correspondan al nodo indicado en el cuerpo de la solicitud, y las prepara para que el usuario pueda descargarlas.

Esta API REST está implementada en un servidor que utiliza Gunicorn y Nginx para gestionar las solicitudes. Nginx actúa como servidor web, recibiendo las peticiones provenientes del navegador o de otros clientes HTTP. Luego, dirige estas solicitudes a Gunicorn, que las traduce al formato adecuado para que la aplicación de Django pueda procesarlas. Gunicorn, además de hacer esta conversión, se encarga de gestionar la ejecución de la aplicación, asegurándose de que los procesos de Django se inicien y se mantengan activos sólo cuando sea necesario, optimizando el uso de recursos. Esta configuración permite manejar múltiples solicitudes simultáneamente de manera eficiente, garantizando la estabilidad y escalabilidad del servicio.

6.2.4.1.3 Servicio MQTT. Se trata de un servicio de Python que se ejecuta en segundo plano y utiliza la librería Paho para crear un cliente MQTT. Este cliente se suscribe al topic por el cual el gateway transmite las lecturas. Cuando el topic se actualiza con nuevas lecturas, automáticamente se invoca la función de callback onMessage(), que gestiona el nuevo mensaje. Esta función valida el mensaje recibido y verifica que no sea una réplica de un mensaje anterior, evitando así duplicidades en los datos. Una vez que todas las validaciones se han completado, se

realiza una solicitud POST al endpoint `data_collector/withvalidations`, permitiendo que la API REST inserte las lecturas en la base de datos.

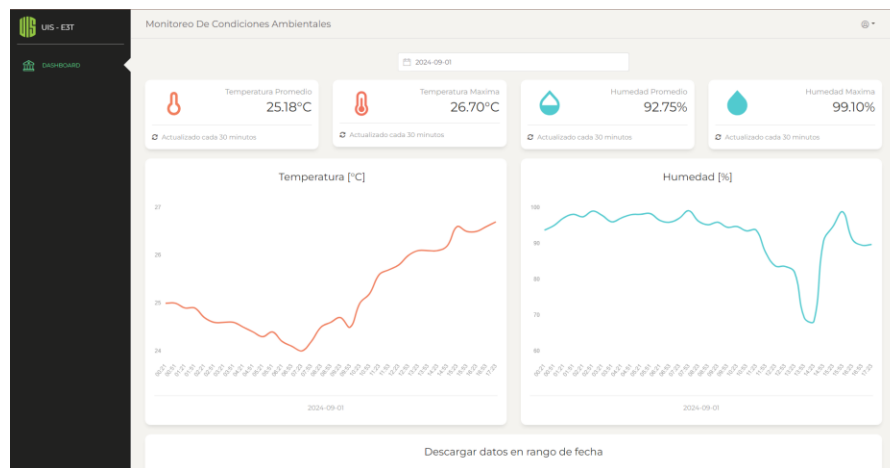
Para mantener el servicio en ejecución de manera confiable, se utiliza `systemctl`, el administrador de servicios y demonios de Linux. Esto garantiza que el servicio se inicie automáticamente en caso de eventos imprevistos, como reinicios del servidor, actualizaciones o redimensionamientos. `Systemctl` también se encarga de supervisar el servicio, asegurando su disponibilidad continua.

6.2.5 Cliente web

6.2.5.1 Diseño del dashboard. Para gestionar de manera eficiente las lecturas recopiladas por el sistema, se utiliza un dashboard sencillo pero funcional, diseñado con una interfaz web desarrollada en Angular, un potente framework de JavaScript. Esta interfaz gráfica permite a los usuarios monitorear de forma continua las lecturas de temperatura y humedad, presentadas en gráficos dinámicos que se actualizan automáticamente cada 30 minutos. Esto ofrece una visión clara y en tiempo real de las condiciones ambientales monitoreadas. Además, el sistema proporciona información adicional, como los valores promedio y máximos de temperatura y humedad, los cuales también se actualizan en tiempo real, enriqueciendo así el monitoreo y la toma de decisiones. Cabe destacar que la plataforma es completamente responsiva, por lo que puede ejecutarse sin inconvenientes en dispositivos móviles, celulares o pantallas pequeñas.

Figura 16.

Diseño del dashboard del sistema



Además de la visualización en tiempo real, el sistema proporciona la opción de descargar los datos históricos en un archivo .csv, lo que facilita su uso en análisis o informes posteriores. El usuario puede seleccionar un rango de fechas específico para la exportación, permitiendo una mayor flexibilidad y adaptabilidad a las necesidades particulares de cada proyecto o investigación.

Figura 17.

Proceso de descarga de datos en un rango de fechas

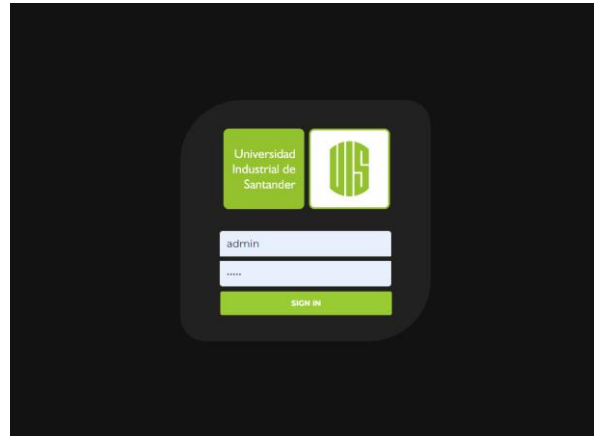
The form, titled 'Descargar datos en rango de fecha', contains two date input fields: 'Fecha inicial' (2024-09-01) and 'Fecha final' (2024-09-02). A green 'DESCARGAR' button is positioned below the fields.

6.2.5.2 Gestion de ingreso de usuarios. Además, se desarrolló un formulario de inicio de sesión con el propósito de garantizar que solo los usuarios autorizados, aquellos que posean las credenciales de acceso correctas, puedan acceder al dashboard. De esta manera, se asegura que las

lecturas recopiladas por el sistema estén protegidos, brindando un entorno controlado y seguro para el manejo de la información.

Figura 18.

Gestión de ingreso de usuarios al sistema



6.2.6 Pruebas del sistema en laboratorio

Se realizan las pruebas del sistema de monitorización en una estructura de tipo pórtico de concreto reforzado, ubicada en los laboratorios de ingeniería civil en la Universidad Industrial de Santander. Esta estructura fue seleccionada debido a sus características que simulan las condiciones presentes en construcciones reales, lo que permite validar la efectividad del sistema en un entorno controlado. El objetivo de estas pruebas es evaluar el rendimiento del sistema en la medición y monitoreo continuo de las variables ambientales de interés para el proyecto. En la figura que se presenta a continuación, se puede observar una imagen detallada de la estructura donde se implementa el sistema de monitoreo.

Figura 19.

Estructura de concreto de tipo pórtico en la que se realizan las pruebas de funcionamiento del sistema



El dispositivo de adquisición de datos fue instalado a una altura de 2.05 metros, en un punto estratégico que garantiza una línea de vista directa hacia el gateway. Para fijar el dispositivo a la estructura, se utilizó cinta adhesiva industrial de doble faz, dado que no está permitido realizar modificaciones permanentes en la estructura, como perforaciones con clavos u otras técnicas que puedan comprometer su integridad.

Esta elección de material de fijación asegura que el dispositivo se mantenga en su posición sin causar daño alguno a la infraestructura. Además, se verificó la estabilidad y seguridad del montaje, garantizando un funcionamiento continuo y confiable del sistema de monitoreo durante el periodo de pruebas.

Figura 20.

Instalación del dispositivo de medición en la estructura



Para las pruebas de laboratorio, se emplearon dos baterías de 12 V como fuente de alimentación. En particular, para el dispositivo de medición, se instaló un cable de longitud adecuada que permitiera que la batería descansara de manera segura sobre el suelo. Esta medida fue tomada con el fin de evitar cualquier riesgo de caída, lo que podría provocar daños tanto en la batería como en el dispositivo.

La elección de un cable lo suficientemente largo no solo garantiza la estabilidad física del sistema, sino que también contribuye a un entorno de trabajo más seguro, minimizando posibles accidentes. Además, se verificó que la instalación no comprometa el funcionamiento del dispositivo ni la precisión de las mediciones realizadas durante las pruebas.

Figura 21.

Montaje mostrando ubicación de la batería



El gateway fue instalado sobre una mesa de trabajo ubicada en las proximidades de la estructura utilizada para las pruebas. Esta ubicación fue cuidadosamente seleccionada para garantizar una línea de vista directa y sin obstrucciones hacia el dispositivo de medición, lo que es fundamental para asegurar una transmisión de datos óptima y sin interrupciones. Esta disposición facilita un monitoreo eficiente y confiable, permitiendo que los datos capturados por el sistema de medición sean enviados de manera precisa para su posterior análisis. La cercanía entre el gateway y el dispositivo también ayuda a reducir posibles retrasos en la transmisión, optimizando así el rendimiento general del sistema.

Figura 22.

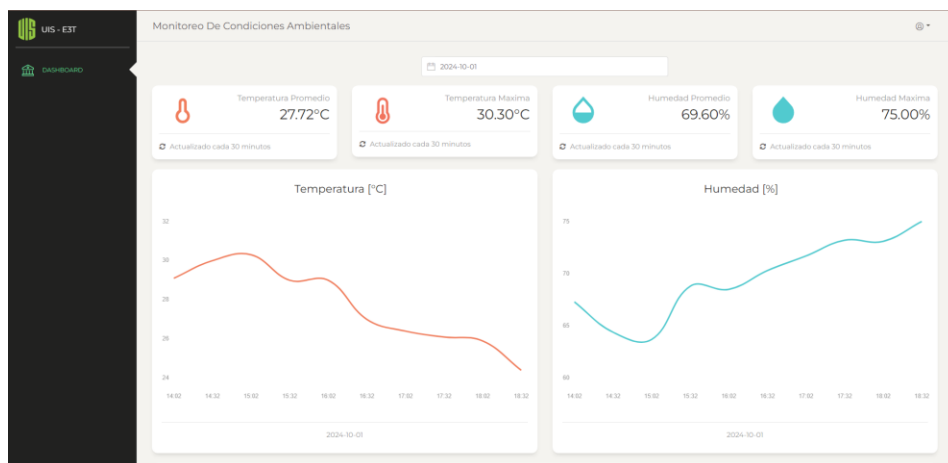
Instalación del gateway con su batería



Por último, los datos recopilados quedan inmediatamente disponibles para su visualización y descarga. Como se puede apreciar en la siguiente figura, tanto en la humedad como en la temperatura, se pueden monitorear en tiempo real gracias a la interfaz web diseñada para interactuar con el usuario.

Figura 23.

Lecturas recopiladas por el sistema



En el desarrollo de este proyecto, se llevó a cabo una prueba para determinar la distancia máxima de enlace de comunicación alcanzada por el hardware del sistema. Para esta evaluación, se empleó una antena comercial con una ganancia de 2.5 dBi, una potencia de transmisión de 10 W y una impedancia de entrada de 50 Ohm. La prueba se realizó en un entorno urbano de la ciudad de Bucaramanga, caracterizado por la presencia de vehículos entre el emisor y el receptor, aunque se mantuvo en todo momento una línea de visión directa entre ambos dispositivos. Este escenario permitió simular condiciones reales de comunicación en áreas urbanas con obstáculos comunes. El sistema logró establecer un enlace de comunicación estable hasta una distancia de 1.5 km, empleando los siguientes parámetros de configuración de LoRa: frecuencia de transmisión de 915 MHz, potencia de transmisión de 20 dBm, un ancho de banda de 125 Hz y un Spreading Factor (SF) de SF7. Estos resultados son indicativos de la capacidad del hardware para operar de manera eficiente en aplicaciones que requieren comunicación a larga distancia en entornos urbanos.

Figura 24.

Prueba de distancia realizada con el hardware diseñado



7. Conclusiones

A lo largo de este proyecto de investigación se logró diseñar, desarrollar y validar un sistema piloto de monitoreo remoto de las condiciones ambientales de una estructura de concreto reforzado. El sistema, compuesto por un termohigrómetro capaz de sensar la temperatura y humedad, ha demostrado ser una herramienta efectiva para el seguimiento en tiempo real de variables críticas que influyen en el deterioro de las infraestructuras de concreto.

En primer lugar, la identificación de los requerimientos técnicos para el diseño del sistema permitió el desarrollo de un dispositivo electrónico confiable, capaz de registrar las variaciones en temperatura y humedad relativa de manera efectiva. Las pruebas realizadas con el prototipo en laboratorio evidenciaron que el sistema cumple con los objetivos planteados, al ofrecer mediciones precisas y una transmisión de datos efectiva hacia una plataforma virtual diseñada para visualizar la información en tiempo real.

El desarrollo de esta plataforma virtual ha sido clave, ya que permite no solo la visualización gráfica de los datos sino también el acceso a históricos que facilitan el análisis a largo plazo de las condiciones ambientales. Esto brinda una herramienta esencial para la toma de decisiones informadas en cuanto a la planificación de estrategias de mantenimiento preventivo.

Asimismo, se puede concluir que el sistema piloto diseñado es una solución tecnológica de bajo costo, accesible y adaptable a diversas aplicaciones dentro del ámbito de la ingeniería civil. Si bien fue probado en un prototipo de laboratorio, la escalabilidad del sistema lo convierte en una opción viable para su implementación en otras infraestructuras críticas que requieran monitoreo continuo.

Finalmente, este proyecto contribuye significativamente a la conservación de infraestructuras civiles, mejorando su durabilidad y ayudando a prevenir fallos prematuros debidos a la exposición a condiciones ambientales adversas. Las posibilidades de ampliar este sistema para integrar nuevas variables o tecnologías más avanzadas abren la puerta a futuros desarrollos en la optimización del monitoreo estructural.

8. Recomendaciones

Dado que la red WiFi disponible durante las pruebas en laboratorio utilizaba seguridad WPA2 Enterprise, incompatible con el firmware del ESP32, fue necesario recurrir a una red WiFi móvil alternativa. Para futuros proyectos en ubicaciones sin acceso estable a redes WiFi o con características de seguridad avanzadas no soportadas, se recomienda implementar un sistema de conectividad basado en redes celulares 3G o 4G. La incorporación de módulos de comunicación celular al gateway permitirá una mayor flexibilidad, facilitando el monitoreo en ubicaciones remotas o en condiciones donde el acceso a internet es limitado o nulo.

Si bien el sistema actual utiliza sensores de bajo costo, en escenarios donde la precisión de los datos es crítica, se sugiere evaluar la integración de sensores de mayor calidad y precisión. Aunque estos puedan tener un costo más elevado, su implementación puede ser justificada en casos donde se requiere un análisis detallado y preciso de las condiciones ambientales.

Referencias Bibliográficas

- Bausá et al. (s.f.). *Sensores de temperatura*.
https://frrq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/14089/mod_resource/content/0/SensoresTemperatura.pdf
- Chivita, Y. (2020). *Diseño de una red de IoT para el hogar* [Monografía de Grado, universidad Cooperativa de Colombia]
<https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/197b735f-90fd-44b7-80b8-aceb440afbd8/content>
- DPFSensors. (s.f.). *Sensores de humedad tipo y aplicaciones*.
<https://guemisa.com/articulos/tutorial-humedad.pdf>
- Electrónica Lugo (s.f.). *Conceptos básicos, tipos y aplicaciones de los microcontroladores*
<https://electronicalugo.com/tipos-aplicaciones-microcontroladores/>
- Geeks for geeks. (2024). *Diferencia entre MCU y SoC* <https://www.geeksforgeeks.org/difference-between-mcu-and-soc/>
- Giordani, C & Leone D. (s.f.). *Estructura*
https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/1_anio/civil1/files/IC%20I-Estructura.pdf
- Guachamin J & Pástor C. (2014). *Implementación de una HMI para monitoreo de variables ambientales en los laboratorios del CIAM (Centro de investigaciones y control ambiental), autorización y monitoreo de destiladores, monitoreo de estufa y mufla*.
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7371/1/CD-5520.pdf>

Gutiérrez, M & Iturralde, S. (2017). *Fundamentos básicos de la instrumentación y control.*

Editorial

UPSE

<https://www.fnmt.es/documents/10179/10666378/Fundamentos+b%3%A1sico+de+instrumentaci%C3%B3n+y+control.pdf/df746edc-8bd8-2191-2218-4acf36957671>

Hasan et al. (2015). *Un nuevo sistema económico para SHM de tableros de puentes mediante redes de sensores inalámbricos basados en mediciones de temperatura y humedad.*

<https://ieeexplore-ieee-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/document/7436181>

López, S. (2021). Sistema de monitoreo de salud estructural (SHM) de puentes de hormigón mediante red WSN [Trabajo de Grado, Universidad Técnica de Ambato]

<https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/34076/1/t1925mtel.pdf>

Mendoza et al. (2019). Red de sensores de humedad y temperatura de bajo costo. *Revista de aplicaciones de ingeniería*, 6 (18), 11-18

num18/Revista_de_Aplicaciones_de_la_Ingenier%C3%ADa_V6_N18_2.pdf

Oliva, A. (2009). Influencia de las variables climáticas en el deterioro del puente en Boca de Camarioca debido a la corrosión atmosférica. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*. 3 (3)

<https://www.redalyc.org/pdf/1939/193915945005.pdf>

Perepérez et al. (s.f.). La agresividad ambiental y la durabilidad de las estructuras de hormigón.

Informes de la Construcción, 38 (388) <https://digital.csic.es/bitstream/10261/87110/1/20-11-2013-di.pdf>

Sherlin. (s.f). *¿Qué es un microcontrolador?*

<https://sherlin.xbot.es/microcontroladores/introduccion-a-los-microcontroladores/que-es-un-microcontrolador>

Silvestre S & Salazar J. (2019). *El mundo Internet of Things (IoT)*

https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/185120/LM01_R_ES.pdf