



Diseño de un nodo sensor Edge IoT para el monitoreo de contaminantes atmosféricos

Design of an Edge IoT sensor node for air pollutant monitoring

Christian Alejandro Sarmiento Sánchez

Universidad ECCI, Bogotá, Colombia

csarmientos@ecci.edu.co ✉

ORCID: 0000-0003-0394-1714



<https://doi.org/10.36825/RITI.13.30.003>

Recibido: Abril 28, 2025

Aceptado: Septiembre 13, 2025

Resumen: La contaminación atmosférica es un problema ambiental y de salud pública que requiere soluciones de monitoreo efectivas. Este trabajo presenta un nodo sensor Edge IoT de bajo costo para el monitoreo de contaminantes atmosféricos, diseñado para ampliar la cobertura geográfica y mejorar la accesibilidad a los datos ambientales en la ciudad de Bogotá. El sistema utiliza un ESP32 como unidad de procesamiento, sensores para medir partículas y gases contaminantes, y un módulo LoRa para transmitir datos a largas distancias. Se incorporó un filtro de media móvil exponencial para reducir el ruido en las mediciones y se realizaron calibraciones comparativas con estaciones de referencia. Los resultados indican que el nodo proporciona mediciones confiables de PM10, PM2.5, CO y NO2, aunque con menor exactitud que los equipos especializados. Sin embargo, su integración con plataformas robustas permite complementar las redes tradicionales de monitoreo. Esta solución representa una alternativa escalable y accesible para apoyar decisiones relacionadas con la calidad del aire y políticas ambientales.

Palabras clave: Contaminación Atmosférica, Internet de las Cosas, Edge IoT, Sensores Ambientales, Monitoreo de Calidad del Aire.

Abstract: Air pollution is an environmental and public health issue that requires effective monitoring solutions. This work presents a low-cost Edge IoT sensor node for air pollutant monitoring, designed to expand geographic coverage and improve accessibility to environmental data. The system uses an ESP32 as the processing unit, sensors to measure particulate matter and pollutant gases, and a LoRa module for long-distance data transmission. An exponential moving average filter was implemented to reduce measurement noise, and comparative calibrations were conducted with reference stations. Results indicate that the node provides reliable measurements of PM10, PM2.5, CO, and NO2, although with lower accuracy compared to specialized monitoring stations. However, its integration with robust platforms allows it to complement traditional monitoring networks. This solution represents a scalable and accessible alternative to support decision-making related to air quality and environmental policies.

Keywords: Air Pollution, Internet of Things, Edge IoT, Environmental Sensors, Air Quality Monitoring.

1. Introducción

La contaminación atmosférica constituye uno de los desafíos ambientales más críticos a nivel mundial, debido a su impacto directo sobre la salud humana, la biodiversidad, así como la dinámica climática [1]. El acelerado

proceso de urbanización junto con la industrialización ha intensificado la concentración de contaminantes en la atmósfera, lo que ha generado una demanda creciente de sistemas de monitoreo más eficientes, escalables y económicamente viables [2]. En este contexto, las tecnologías asociadas al Internet de las Cosas (IoT) han impulsado el desarrollo de soluciones innovadoras que permiten la medición en tiempo real, además del análisis avanzado de la calidad del aire.

En particular, los nodos sensores basados en arquitecturas Edge IoT ofrecen ventajas sustanciales al incorporar capacidades de preprocesamiento de datos en el punto de adquisición. Esta característica reduce la latencia mientras optimiza el uso del ancho de banda durante la transmisión de información [3]. Adicionalmente, el bajo costo de implementación facilita la expansión de la cobertura de monitoreo en entornos urbanos o rurales.

Sin embargo, la integración de estas soluciones requiere sistemas robustos y técnicamente validados. Aunque mejoran la accesibilidad junto con la densidad de muestreo, los nodos IoT tienden a presentar una precisión inferior en comparación con estaciones de referencia de mayor complejidad tecnológica [4]. Por consiguiente, su utilización se concibe como una estrategia complementaria a las infraestructuras existentes, aportando un volumen adicional de datos, pero exigiendo procesos de calibración y validación que aseguren la confiabilidad de la información generada.

Este trabajo presenta el diseño y desarrollo de un nodo sensor basado en Edge IoT para la monitorización de contaminantes atmosféricos. Se detallan los dispositivos empleados, la metodología de integración y calibración de sensores, el diseño del hardware junto con el firmware, además de las pruebas experimentales realizadas para evaluar su desempeño. La propuesta busca ofrecer una solución eficiente, modular y escalable destinada al seguimiento de la calidad del aire, contribuyendo así a la formulación de políticas ambientales fundamentadas y a estrategias de mitigación de la contaminación.

2. Estado del arte

La investigación sobre sistemas IoT para el monitoreo de la calidad del aire ha progresado en varias direcciones, desde infraestructuras industriales hasta soluciones portátiles y modelos híbridos de predicción basados en inteligencia artificial. A continuación, se agrupan y analizan críticamente los trabajos más relevantes en cuatro líneas temáticas.

Infraestructura IoT en entornos industriales. García *et al.* [4] presentan una plataforma sólida para la monitorización de la calidad del aire en plantas industriales, donde se integran sensores fijos con una arquitectura de comunicaciones basada en MQTT sobre Ethernet y LoRaWAN, y almacenamiento en nube. El estudio detalla el flujo de datos desde los transductores electroquímicos hasta un servidor central, enfatizando la fiabilidad y escalabilidad de la infraestructura. Sin embargo, esta solución depende de estaciones de alto coste y requiere conectividad permanente, lo que limita su despliegue en zonas con cobertura intermitente y dificulta su adopción en comunidades de bajos recursos.

Modelos híbridos AI-IoT para predicción en “Smart Cities”. Kataria y Puri [5] diseñaron un modelo híbrido que combina algoritmos de regresión múltiple y Random Forest con datos recogidos por una red de sensores distribuidos en la ciudad. Su aproximación, orientada a la predicción de índices de contaminación, demostró mejoras en precisión frente a métodos puramente estadísticos. No obstante, el procesamiento centralizado de los datos y la dependencia de un servidor de alta capacidad introducen cuellos de botella en tiempo real y riesgos de latencia, especialmente durante episodios críticos de contaminación.

Sistemas LoRaWAN de largo alcance para zonas externas. Jabbar *et al.* [6] implementaron un sistema basado en LoRaWAN para cubrir áreas rurales y periurbanas, logrando comunicaciones fiables a más de 5 km de distancia de la puerta de enlace. Los nodos midieron parámetros como PM_{2.5}, NO₂ y O₃, enviando datos cada 15 minutos a una plataforma en línea. El estudio valida la estabilidad del enlace en condiciones adversas, pero carece de un análisis profundo sobre la precisión de sensores de bajo costo frente a estaciones de referencia y no contempla estrategias de calibración in situ ni técnicas de filtrado para mitigar el ruido de medición.

Dispositivos wearables para monitorización ambiental. Salamone, Masullo y Sibilio [7] realizaron una revisión sistemática de *wearables* aplicados a entornos construidos, detectando un creciente interés por la portabilidad y la interacción usuario-dispositivo. Aunque destacan la conveniencia de soluciones ligeras, muchos prototipos presentan limitaciones en duración de batería, variabilidad de sensores y falta de estandarización en protocolos de comunicación. Este enfoque revela un alto potencial de “*citizen science*”, pero subraya la necesidad de mejorar la ergonomía y la fiabilidad de los datos.

A pesar de los avances, persisten tres limitaciones comunes: (i) dependencia de infraestructuras costosas o centralizadas, (ii) procesamiento de datos fuera del nodo que incrementa latencia y ancho de banda, y (iii) ausencia de calibración y filtrado integrados en el dispositivo. Nuestra propuesta de un nodo sensor Edge IoT de bajo costo aborda estas debilidades al incorporar filtrado exponencial y regresión lineal simple localmente, comunicación LoRa resiliente con recuperación de enlace y una arquitectura unificada de microcontrolador optimizada, ofreciendo precisión, autonomía y accesibilidad ampliada para el monitoreo de contaminantes atmosféricos.

3. Materiales y métodos

Para llevar a cabo el diseño e implementación de un nodo Edge IoT, fue fundamental establecer conceptos clave que proporcionaran un marco teórico sólido. En esta sección, se presentó el contexto conceptual, junto con las características que definieron tanto el nodo Edge IoT como las variables que se midieron.

3.1. Contaminantes atmosféricos

Los contaminantes atmosféricos en las ciudades son variados e incluyen partículas suspendidas en el aire, como el material particulado PM10 y PM2.5, así como gases nocivos como los óxidos de azufre y los óxidos de nitrógeno. Estos contaminantes representan un grave riesgo para la salud humana y para todas las especies que habitan el entorno urbano. [8].

3.1.1. PM10 Y PM2.5

Por una parte, las partículas PM2.5 y PM10 son términos utilizados para describir dos categorías de material particulado suspendido en el aire que representan una preocupación significativa para la calidad ambiental y la salud humana. Las PM2.5 corresponden a partículas finas con un diámetro aerodinámico igual o inferior a 2.5 micrómetros, lo que les permite penetrar profundamente en el sistema respiratorio. Estas partículas constituyen una mezcla de materia orgánica, metales, polvo y compuestos químicos, generados principalmente por la combustión de combustibles fósiles, la actividad industrial y el tráfico vehicular. Debido a su tamaño reducido, las PM2.5 ocasionan diversos problemas de salud, entre ellos enfermedades respiratorias, cardiovasculares e incluso alteraciones en el sistema nervioso, particularmente en población infantil o con antecedentes médicos [9].

Por otra parte, las partículas PM10 presentan un diámetro ligeramente mayor, de hasta 10 micrómetros, lo que les permite alcanzar las vías respiratorias superiores, aunque con menor probabilidad de penetrar en los pulmones. A pesar de su mayor tamaño, estas partículas también contienen sustancias nocivas y se originan a partir de múltiples fuentes, tales como el polvo de carreteras sin pavimentar, la actividad constructiva, la erosión del suelo o los procesos agrícolas. La exposición prolongada a las PM10 igualmente puede desencadenar afecciones respiratorias y agravar patologías preexistentes. Tanto las PM2.5 como las PM10 constituyen un motivo de preocupación para la salud pública; por ello, la monitorización sistemática y la regulación de su concentración resultan esenciales para mitigar sus efectos adversos.

3.1.2. Óxidos de carbono

Los óxidos de carbono, que comprenden el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO₂), son compuestos gaseosos formados por carbono y oxígeno, aunque presentan propiedades y efectos notablemente distintos sobre el medio ambiente y la salud humana. El monóxido de carbono (CO) es un gas incoloro e inodoro que se genera principalmente como subproducto de la combustión incompleta de combustibles fósiles, tales como la quema de gasolina o carbón. Este compuesto es altamente tóxico para los seres humanos, ya que interfiere con la capacidad de la sangre para transportar oxígeno, lo que provoca síntomas de intoxicación por monóxido de carbono, como cefalea, mareos y, en casos graves, la muerte [10]. La exposición a concentraciones elevadas de CO representa un riesgo significativo en espacios mal ventilados o durante eventos como incendios.

En contraste, el dióxido de carbono (CO₂) es un gas de efecto invernadero natural que también se genera durante los procesos de combustión, pero es considerablemente menos tóxico que el monóxido de carbono. Aunque el CO₂ desempeña un papel fundamental en el ciclo del carbono y en la fotosíntesis de las plantas, su concentración atmosférica se encuentra en aumento debido a la quema de combustibles fósiles y la deforestación, contribuyendo al calentamiento global y al cambio climático [11]. En niveles elevados, el CO₂ puede generar efectos indirectos sobre la salud humana a través de la intensificación de fenómenos climáticos extremos y la

propagación de enfermedades transmitidas por vectores. La regulación de las emisiones de CO, junto con la reducción de las emisiones de CO₂, resulta esencial para abordar tanto la calidad del aire como el cambio climático, protegiendo así la salud de la población y la estabilidad ambiental.

3.1.3. Óxidos de nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno, comúnmente denominados NO_x, constituyen una familia de compuestos químicos que incluye diversos óxidos de nitrógeno; sin embargo, los más relevantes son el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el óxido nítrico (NO). Estos compuestos se generan principalmente durante procesos de combustión a alta temperatura, como los que ocurren en motores de combustión interna y en determinadas actividades industriales. Los NO_x representan una de las principales preocupaciones en materia de calidad del aire y de impacto ambiental [12].

El dióxido de nitrógeno (NO₂) es un gas de color marrón rojizo, caracterizado por un olor acre e irritante, que puede afectar las vías respiratorias. La exposición a concentraciones elevadas de NO₂ ocasiona problemas respiratorios, agrava enfermedades pulmonares preexistentes y favorece la formación de partículas finas y ozono troposférico, lo cual repercute negativamente en la calidad del aire y en la salud humana [13]. Por su parte, el óxido nítrico (NO) es un gas incoloro que actúa como precursor fundamental en la formación de NO₂ y otros compuestos secundarios en la atmósfera, contribuyendo así a la contaminación del aire y a la generación de *smog*.

La regulación y el control de las emisiones de óxidos de nitrógeno resultan esenciales para preservar la calidad del aire y proteger la salud pública. Tecnologías de control de emisiones, como los convertidores catalíticos instalados en automóviles y la optimización de procesos industriales, se aplican para reducir las emisiones de NO_x. Una gestión adecuada de estas emisiones es crucial para mitigar la formación de partículas finas y *smog*, lo que a su vez disminuye el riesgo de enfermedades respiratorias y otros efectos adversos asociados a la exposición a NO_x [14].

3.1.4. Índice de calidad del aire

Si bien las ciudades monitorean contaminantes de manera individual también se utiliza el término de índice de calidad del aire (ICA), el cual es un valor adimensional en un rango de 0 a 500 indicando la calidad del aire. El ICA puede calcularse de diferentes maneras en diferentes lugares, ya que las fórmulas específicas y los componentes que se utilizan pueden variar según las regulaciones y estándares de calidad del aire de cada región o país. Para el caso de Colombia la Resolución 2254 de 2017 del ministerio de ambiente [15], establece el ICA con la Ecuación (1).

$$ICA_p = \left(\frac{I_{alto} - I_{bajo}}{PC_{alto} - PC_{bajo}} \right) * (C_p - PC_{bajo}) + I_{bajo} \quad (1)$$

Donde:

- ICA_p es el Índice de calidad del aire para un contaminante (PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, SO₂, CO, O₃)
- C_p concentración medida para el contaminante p.
- PC_{alto} Punto de corte mayor o igual a C_p .
- PC_{bajo} Punto de corte menor o igual a C_p .
- I_{alto} valor del ICA correspondiente al PC_{alto} .
- I_{bajo} valor del ICA correspondiente al PC_{bajo} .

En la Tabla 1 se recopila los puntos de corte de los contaminantes más comunes.

Tabla 1. Puntos de corte correspondiente a cada rango del ICA.

Índice de calidad del aire	PM ₁₀ μg/m ³ 24horas	PM _{2.5} μg/m ³ 24horas	CO μg/m ³ 8horas	SO ₂ μg/m ³ 1horas	NO ₂ μg/m ³ 1horas	O ₃ μg/m ³ 8horas	O ₃ μg/m ³ 1horas
0-50	0-54	0-12	0-5094	0-93	0-100	0-106	

51-100	55-154	13-37	5094-10819	94-197	101-189	107-138	
101-150	155-254	38-55	10820-14254	198-486	190-677	139-167	245-323
151-200	255-354	56-150	14255-17688	487-797	678-1221	168-207	324-401
201-300	355-424	151-250	17689-34862	798-1583	1222-2349	208-393	402-794
301-500	425-604	251-500	34863-57703	1584-2629	2350-2853	394	795-1185

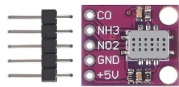
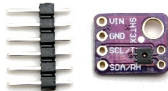
Fuente: Reconstruido a partir de [15].

3.2. Sensores y dispositivos físicos

Para la construcción del nodo sensor es crucial especificar todos los dispositivos físicos necesarios, así como sus características fundamentales, estos son definidos y detallados en la Tabla 2. Esta tabla sirve como un recurso integral que proporciona una visión detallada de los componentes esenciales que conforman la estructura del nodo Edge IoT de un sistema más robusto. Desde sensores inteligentes hasta sistemas embebidos, cada dispositivo ha sido seleccionado para garantizar una integración fluida y un rendimiento óptimo dentro del ecosistema IoT.

Tabla 2. Información de los dispositivos físicos utilizados.

Procesamiento					
Dispositivo	Unidad de procesamiento	Memoria	Conectividad		Imagen
ESP32 WROOM [17]	Procesador dual-core Xtensa LX6 a 240Mhz	ROM:448 KB. SRAM: 520 KB	Wi-Fi 802.11 Bluetooth 5.0 y BLE SPI, I2C, UART, 34 pines GPIO, 18 canales ADC y 2 canales DAC.		
Comunicación					
Dispositivo	Tipo de comunicación	Sensibilidad /potencia	Modulación	Frecuencia	Imagen
LoRa Semtec SX1278 Ra-0210 [18]	SPI- half duplex	-148dBm +20dBm	FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRaTM y OOK	420-915Mhz	
Módulo GPS Neo 6m [19]	UART	-165dBm	L1 frequency band, precisión: 3m	5Hz	
Sensores					
Nombre	Variables	Precisión /resolución	Tipo de comunicación		Imagen
Sensor PMS5003 [20]	PM10 PM2.5 PM1.0	50%@0.3µm 98%@>=0.5 µm	UART		

Sensor MICS-6814 [21]	Principales: CO, NO2, NH3	Factor de sensibilidad: 2	N/A Dato analógico resistivo	
Sensor BMP180 [22]	Temperatura Presión	Resolución: 0.01°C, 0.16Pa	I2C	
Sensor SHT30 [23]	Humedad y temperatura	Precisión ±2%, ±3°C	I2C	

Fuente: Reconstruido mediante las hojas de datos de cada sensor.

3.3. Estrategia metodológica

La metodología utilizada en este trabajo se enmarca en la investigación aplicada y el desarrollo tecnológico experimental. En primer lugar, se diseñó e implementó un filtro digital de media móvil exponencial con el fin de reducir el ruido en las mediciones y mejorar la estabilidad de los datos proporcionados por los sensores. A continuación, se procedió al ajuste de los sensores mediante una comparación con estaciones de referencia, garantizando la precisión y consistencia de las mediciones. Tras la validación de los datos obtenidos, se integró el nodo con un firmware que permitió la gestión y visualización de los datos en una plataforma IoT de desarrollo propio. Finalmente, se diseñó un circuito impreso (PCB) para optimizar la disposición de los componentes electrónicos, asegurando la operatividad del nodo en condiciones reales y alcanzando un nivel de madurez tecnológica (TRL) 6, lo que avaló su funcionalidad en entornos de prueba y validación en el campo.

3.4. Diseño del filtro digital

Para mitigar el ruido de alta frecuencia proveniente de los sensores, se optó por el uso de un filtro digital. En este caso, se planteó la implementación de un filtro de media móvil exponencial. El filtro de media móvil exponencial (EMA) es un filtro IIR de primer orden que otorga mayor peso a las muestras recientes, comportándose de manera equivalente a un filtro RC discreto de paso bajo. Gracias a su implementación recursiva, sólo requiere almacenar el último valor filtrado, lo que minimiza el uso de memoria y la carga computacional en microcontroladores con recursos limitados. Esta simplicidad es clave en nodos Edge IoT, donde la eficiencia energética y la velocidad de cómputo son críticas. Además, el EMA suaviza eficazmente el ruido de alta frecuencia presente en sensores de gas, manteniendo la sensibilidad ante cambios bruscos de concentración, aspecto fundamental para la detección temprana de eventos de contaminación y contribuye a reducir transmisiones de datos atípicos y la latencia de red. La ecuación en diferencias utilizada para implementar el filtro se observa en la Ecuación (2)

$$y_k = \alpha * x_k + (1 - \alpha)y_{k-1} \quad (2)$$

Donde:

y_k Salida del filtro

y_{k-1} Salida del filtro en una muestra anterior

α Factor del filtro

De la Ecuación (2) se puede obtener la función de transferencia en el dominio Z la cual se evidencia en la Ecuación (3).

$$\frac{Y[Z]}{X[Z]} = \frac{\alpha}{1 - (1 - \alpha)Z^{-1}} \quad (3)$$

La cual es equivalente al par transformado de una señal exponencial (ver Ecuación (4)).

$$\frac{k * 1}{1 - e^{-aT} Z^{-1}} \leftrightarrow e^{-akT} \quad (4)$$

De la Ecuación (3) y la Ecuación (4) se puede observar una relación entre a y α vista en la Ecuación (5)

$$e^{-aT} = (1 - \alpha) \Rightarrow a = \frac{-\ln(1 - \alpha)}{T} \quad (5)$$

Al analizar la Ecuación 5 se pueden hacer las siguientes afirmaciones:

- El factor α debe estar limitado de 0 a 1 de lo contrario la respuesta implicará valores complejos.
- La relación entre α y a es inversamente proporcional, de tal manera que: un valor $\alpha = 0$ devuelve $a = 1$ mientras que el valor $\alpha = 1$ devuelve un valor $a = 0$.
- Entre menor sea α , el filtro será más selectivo, pero a su vez la salida presenta un mayor retardo y atenuación.

Las afirmaciones anteriores se pueden comprobar al observar la Figura 1, la cual evidencia una disminución de la pendiente a medida que el factor α cambia de 0 a 1.

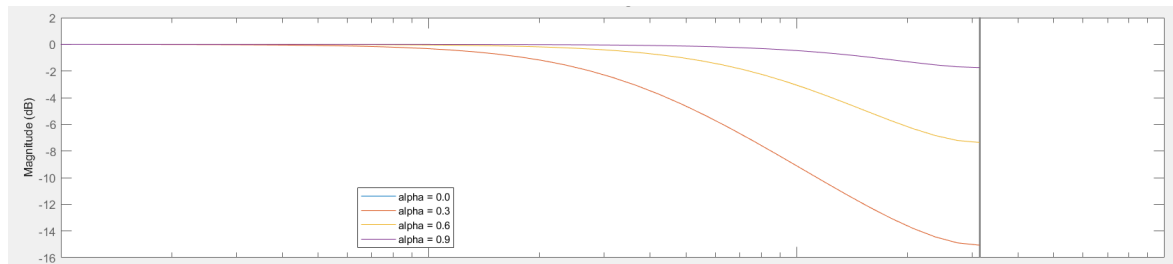


Figura 1. Diagrama de bode filtro en función de α . Fuente: Elaboración propia.

Las afirmaciones mencionadas también pueden ser validadas mediante su implementación directa como se comprueba en la Figura 2. Para este caso se utilizó una muestra de datos procedentes del sensor PMS5003, puntualmente la variable en concreto es PM1.0.

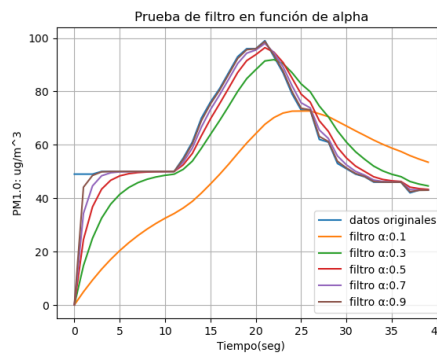


Figura 2. Implementación del filtro en función de α . Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar en la figura 2 que un valor muy pequeño de α , produce una atenuación importante teniendo una respuesta no deseada, por otro lado, un valor de α muy alto produce una salida prácticamente igual a la entrada, en consecuencia, el filtro no estaría haciendo ninguna función. Con todo esto se definió un α entre 0.3 y 0.7 dependiendo cada variable puntual.

Para verificar el funcionamiento del filtro, se evaluó su comportamiento en relación con cada variable y sensor específico. En la Figura 3 se muestran las mediciones del sensor PMS5003, utilizando un valor de $\alpha=0.6$. La Figura 3(a) presenta los datos de la variable PM2.5, la Figura 3(b) corresponde a la variable PM1.0, y la Figura 3(c) muestra las mediciones de la variable PM10.

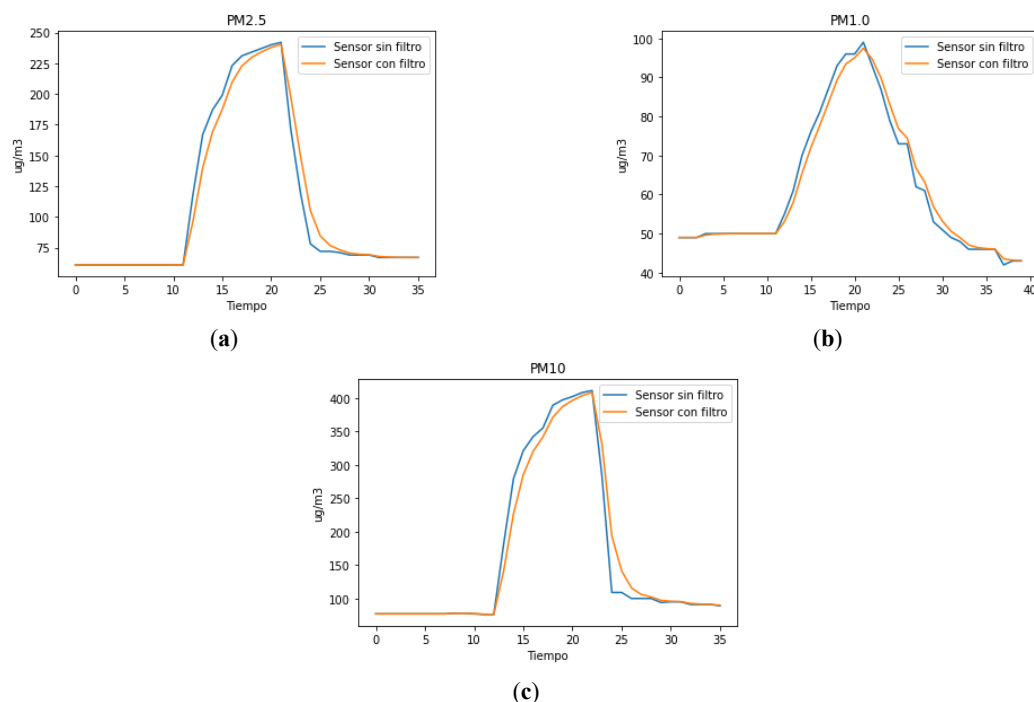


Figura 3. Filtro a sensor PMS5003; (a) contaminante PM2.5, (b) contaminante PM1.0, (c) contaminante PM10.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 3, el nivel de ruido manejado por el sensor sin ningún tipo de filtro es relativamente bajo, ya que en valores estables las variaciones son mínimas. Después de verificar el funcionamiento del filtro en el sensor PMS5003, se procedió a aplicar el mismo procedimiento al sensor BMP180. Los resultados obtenidos para este sensor se muestran en la Figura 4.

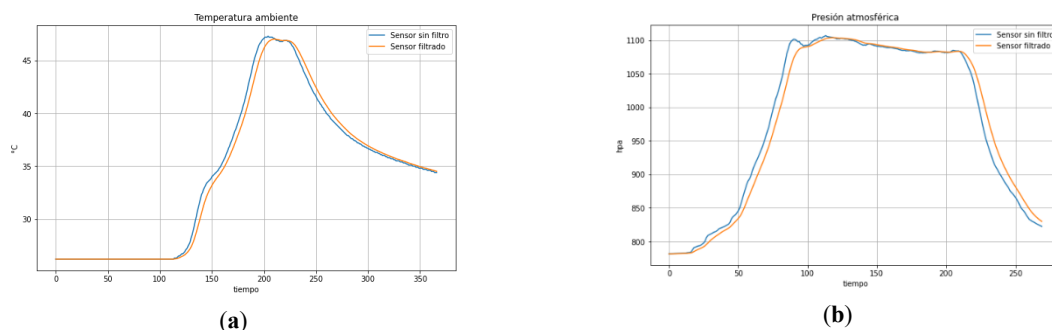


Figura 4. Filtro a sensor BMP180; (a) Temperatura, (b) Presión atmosférica. Fuente: Elaboración propia.

Aunque la temperatura no presenta grandes variaciones en las mediciones, el filtro contribuye a obtener valores más precisos. En cuanto a los datos de presión atmosférica, aunque las variaciones no son significativas, se observan de manera constante. Sin embargo, el filtro implementado, con un valor de $\alpha=0.6$, nuevamente ayuda a reducir el ruido presente en las mediciones.

Finalmente, el sensor SHT30 mide el nivel de humedad en el ambiente. En este caso, se observa un nivel significativo de ruido en las mediciones sin el uso del filtro. Al aplicar el filtro con un valor de $\alpha=0.4$, se logra mitigar este ruido, como se puede ver en la Figura 5.

Como se puede observar en las comparaciones de cada variable, el filtro contribuye a obtener mediciones más estables, mejorando la precisión de los sensores. Es importante señalar que el uso del filtro introduce un retardo en la señal, ya que se trata de un filtro digital. Sin embargo, dado que no se trata de un sistema de control en el que la disponibilidad inmediata de los datos sea crucial, el retardo es aceptable debido al beneficio que aporta el filtro en términos de estabilidad y precisión de las mediciones.

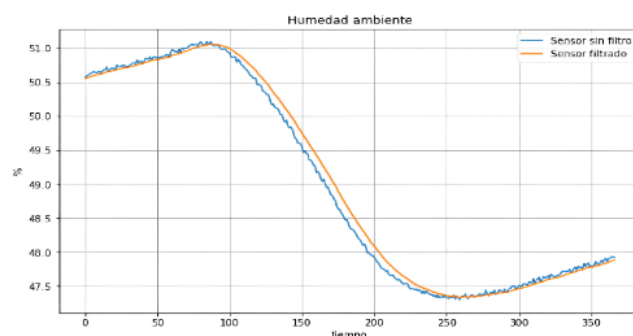


Figura 5. Filtro a sensor SHT30. Fuente: Elaboración propia.

3.5. Ajuste de los sensores

Para el ajuste de los sensores, se eligió como sistema de referencia la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), que cuenta con veinte estaciones distribuidas por la ciudad. Sin embargo, se consideró como referencia principal la estación del Ministerio de Ambiente. El procedimiento consistió en ubicar el nodo sensor cerca de la estación de referencia y recopilar datos durante un día completo. Con los datos obtenidos, se desarrolló un modelo de regresión lineal simple para mejorar la precisión de las mediciones del sensor. Las ecuaciones obtenidas para cada variable, junto con sus respectivos coeficientes de correlación (R^2), se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Ecuaciones obtenidas mediante regresión lineal.

Variable	Ecuación lineal	R^2
CO	$0.8207 * CO_{medido} + 0.244$	0.867
NO2	$0.6599 * NO2_{medido} + 8.668$	0.782
PM2.5	$0.7083 * PM2.5_{medido} + 9.709$	0.836
PM10	$0.7977 * PM10_{medido} + 10.732$	0.8142

Fuente: Elaboración propia.

Estas ecuaciones se integraron en el firmware del dispositivo como una corrección para las mediciones. Posteriormente, se evaluaron los modelos utilizando muestras tomadas en un día diferente. La métrica empleada para evaluar los modelos fue el MAE (Error Absoluto Medio), con el objetivo de determinar la tolerancia por variable de cada sensor después de su ajuste. Los valores del MAE para cada variable se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Error absoluto medio.

Sensor	Variable	MAE
MICS-6814	CO	0.361ppm
	NO2	2.935ppm
PMS5003	PM2.5	2.56ug/m ³
	PM10	4.33ug/m ³

Fuente: Elaboración propia.

En el caso del CO, el MAE obtenido fue de 0.361 ppm. Sin embargo, es relevante señalar que la concentración de CO en el ambiente es generalmente baja, alcanzando niveles máximos de apenas 1 ppm. Dado que este es el límite de medición del sensor utilizado, el error observado en la comparación es comprensible. Por otro lado, para el contaminante NO2, se obtuvo un MAE de 2.935 ppm, con una medición máxima de 21 ppm en el nodo sensor. A diferencia del CO, el NO2 se encuentra en concentraciones más altas debido a la combustión de combustibles en vehículos, fábricas y otros procesos industriales, lo que explica un Error Cuadrático Medio (ECM) más alto en este caso.

El PM2.5 presentó un MAE de 2.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante la prueba de calibración, como se observa en la figura 69. El valor máximo registrado para estas partículas fue de 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En cuanto a las mediciones del contaminante PM10, el MAE fue de 4.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con un pico superior al de PM2.5, lo cual es coherente, ya que es más probable que se encuentren partículas de mayor diámetro en el ambiente.

3.6. Esquema funcional

Una vez confirmado el correcto funcionamiento de los sensores, se procedió a definir el esquema funcional del nodo sensor. Para ello, se utilizaron dos dispositivos ESP32 con el fin de optimizar las funciones específicas de cada parte del proceso. El primer ESP32 se encargó de adquirir y filtrar los datos provenientes de los sensores, y luego los transfiere al segundo dispositivo. Este segundo ESP32 se dedica exclusivamente a la comunicación con el *gateway* a través de la tecnología LoRa, actuando como interfaz entre el primer dispositivo y el *gateway*, facilitando la transmisión eficiente y de larga distancia de los datos procesados hacia el servidor. La división de funciones entre ambos dispositivos permite una mayor eficiencia y especialización en las tareas asignadas, lo que contribuye a un sistema más robusto y eficaz. La comunicación entre el dispositivo encargado de la obtención de datos y el de transmisión se realizó mediante el protocolo UART. La Figura 6 muestra el esquema de conexión de los dispositivos y sensores utilizados.

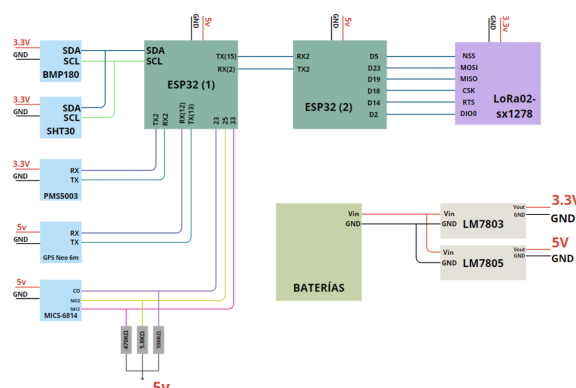


Figura 6. Esquema de conexiones del nodo sensor. Fuente: Elaboración propia.

El esquema incluye dos reguladores de voltaje (LM7803 y LM7805) con el propósito de mantener los valores de 3.3V y 5V controlados, mitigando el ruido y las posibles sobrecargas. Esto es especialmente importante, ya que algunos de los componentes utilizados requieren diferentes niveles de voltaje para su funcionamiento adecuado. Para la alimentación, se eligieron baterías de iones de litio del tipo 18650, con una capacidad de 2500mAh. Se configuraron un total de 4 baterías, tanto en serie como en paralelo, con el objetivo de obtener un voltaje y corriente superiores, garantizando así una fuente de alimentación estable y eficiente para el nodo sensor. Suponiendo que el nodo únicamente despierta una vez cada hora durante 30s para realizar lecturas, filtrado, inferencia y transmisión, y permanece en modo de bajo consumo (≈ 1 mA) el resto del tiempo, la energía consumida en cada ciclo horario es de aproximadamente 0,086 Wh. Dado que el banco de baterías 2S2P de cuatro celdas 18650 proporciona unos 37 Wh, el sistema puede operar de forma continua cerca de 428 horas, es decir, unos 18 días antes de agotar la carga.

3.7. Diseño del Prototipo

Una vez definido el esquema funcional del nodo sensor, se procedió a la fase de diseño del PCB. Este proceso consistió en la disposición estratégica de los componentes electrónicos en la placa de circuito impreso, con el objetivo de lograr una integración eficiente y compacta. El diseño del PCB se realizó para alojar los sensores relevantes, así como los componentes necesarios para el procesamiento inicial de los datos. Además, se tuvieron en cuenta aspectos como la optimización del espacio y la eficiencia energética, asegurando así el rendimiento óptimo del nodo sensor. La finalización de este diseño de PCB marca un paso clave hacia la implementación física del sistema, proporcionando una base sólida y estructurada para el correcto funcionamiento del nodo sensor dentro del sistema IoT propuesto. El diseño de la versión 1 del PCB se muestra en la Figura 7.

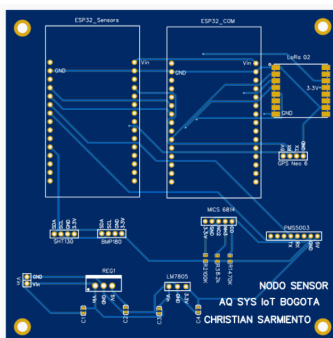


Figura 7. Diseño PCB versión 1 del nodo sensor. Fuente: Elaboración propia.

Una vez finalizado el diseño del PCB, se avanzó en el desarrollo del diseño del chasis específico para el nodo sensor. Este proceso consiste en la creación de la estructura física que albergará y protegerá los componentes electrónicos y sensores del nodo. El diseño del chasis se llevó a cabo con especial atención a factores como la resistencia, durabilidad y capacidad de protección frente a condiciones ambientales adversas. Además, se incluyeron detalles ergonómicos para facilitar tanto la instalación como el mantenimiento. El diseño de la versión 1 del chasis se presenta en la Figura 8.

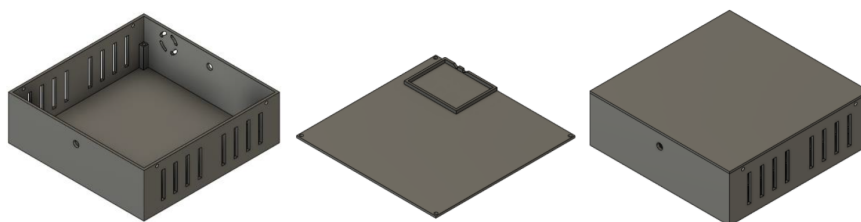


Figura 8. Diseño de chasis v1 del nodo sensor. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede evidenciar en la figura 8, se optó por dejar secciones abiertas para garantizar que los sensores tengan contacto directo con el entorno. Tanto el diseño del PCB como el diseño del chasis se llevaron a cabo utilizando el software Fusion 360. En la Figura 9 se puede visualizar el prototipo construido, el cual refleja la integración de los componentes y la estructura final del nodo sensor.



Figura 9. Prototipo construido. Fuente: Elaboración propia.

3.8 Firmware

El firmware del nodo sensor está compuesto por varias secciones, ya que el procesamiento de datos y la comunicación se gestionan de manera separada, como se mencionó anteriormente. El dispositivo encargado de obtener los datos de los sensores y aplicar el filtro transmite esta información al dispositivo de comunicación a través del protocolo UART, por lo que su funcionamiento es bastante sencillo.

Por otro lado, el firmware del dispositivo que se encarga de la comunicación con el *gateway* debe manejar el **deviceId** y la contraseña generados automáticamente por la plataforma IoT. Dado que la comunicación se realiza mediante LoRa, y considerando que este tipo de comunicación es abierta, se optó por cifrar la comunicación de extremo a extremo y establecer un canal específico para mejorar la seguridad.

Para facilitar la configuración y evitar la necesidad de manipular el código directamente, se diseñó un servidor web en el ESP32. Este servidor permite acceder a través de un punto de acceso (*Access Point*, AP) y modificar parámetros de comunicación LoRa y otros ajustes de la plataforma IoT sin necesidad de intervención directa en el código fuente. De esta manera, el operario solo tendría que conocer los datos de acceso a la plataforma y los parámetros de comunicación. La interfaz del AP se visualiza en la Figura 10.

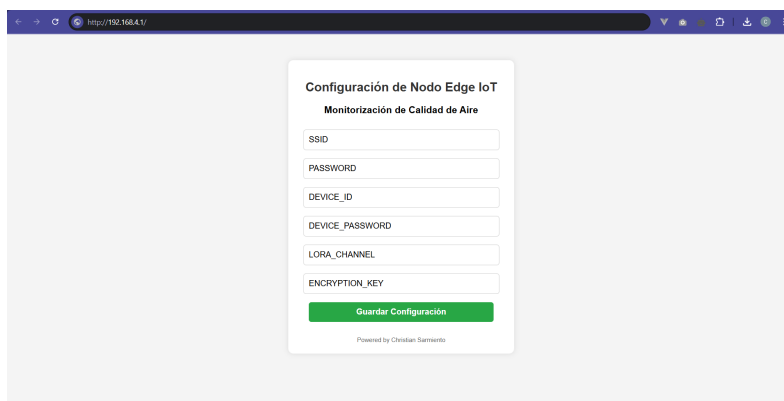


Figura 10. Interfaz del AP en el nodo sensor. Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se han configurado los datos necesarios para la transmisión a través del punto de acceso (AP), el dispositivo comienza a transmitir la información de los sensores al *gateway*. Este actúa como un intermediario entre el dispositivo de comunicación y la capa de operación de la plataforma IoT. Los datos se envían en formato JSON, siguiendo una estructura que garantiza la correcta interpretación y procesamiento de la información por parte del sistema.

3.9. Prueba de alcance comunicación lora

Uno de los aspectos clave del diseño fue determinar el alcance máximo que los módulos LoRa podían lograr. Para ello, se utilizaron antenas de 3dBi (2W) a 433MHz, frecuencia en la que operan los módulos LoRa. Se realizaron dos pruebas en diferentes ubicaciones para evaluar el rendimiento de la comunicación. La primera prueba se realizó en un área suburbana, con edificios bajos (aproximadamente 16 metros de altura) y una gran extensión de terreno abierto. En este escenario, el *gateway* se ubicó a 10 metros de altura, y la distancia máxima de transmisión alcanzada fue de 2.5 km. La Figura 11 presenta los valores de la sensibilidad (RSSI) bajo estas condiciones, lo que demuestra el alcance efectivo alcanzado en un entorno de baja interferencia y con la configuración mencionada. Este resultado proporciona una buena referencia para el rendimiento del sistema en condiciones óptimas, permitiendo estimar el alcance y la cobertura esperada en escenarios similares.

En la Figura 11 se observa que la señal alcanza los -120 dBm cerca de los 3 km de distancia. La segunda prueba se llevó a cabo en un entorno urbano, caracterizado por edificios mucho más altos, con alturas que oscilan entre los 30 y 100 metros. En esta ocasión, el nodo sensor se ubicó en la terraza de un edificio de aproximadamente 40 metros de altura.

Bajo estas condiciones, se logró una distancia de transmisión de 1.2 km, como se muestra en la Figura 12. Es evidente que la altura de los edificios y su proximidad afectaron negativamente el desempeño de la comunicación. Por tanto, se recomienda ubicar el Gateway en puntos estratégicamente elevados y considerar el uso de antenas de mayor potencia para mejorar el alcance y la fiabilidad del enlace en entornos urbanos más exigentes.

3.10 Despliegue en plataforma IoT

Si bien la investigación se enfocó únicamente en la capa física de un sistema IoT de borde (Edge IoT), es importante destacar que una característica fundamental de esta arquitectura es que parte del procesamiento de los datos se realiza directamente en el borde, es decir, en los propios nodos sensores o en las capas físicas, sin requerir conexión inmediata a las capas lógicas para el procesamiento de la información capturada. Cabe mencionar que la

plataforma IoT utilizada en este trabajo fue desarrollada previamente como parte de otra investigación. La arquitectura general de dicha plataforma se presenta en la Figura 13.

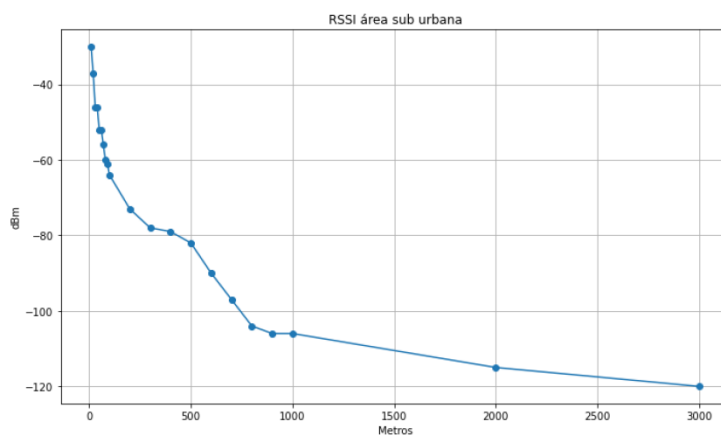


Figura 11. RSSI en áreas suburbanas. Fuente: Elaboración propia.

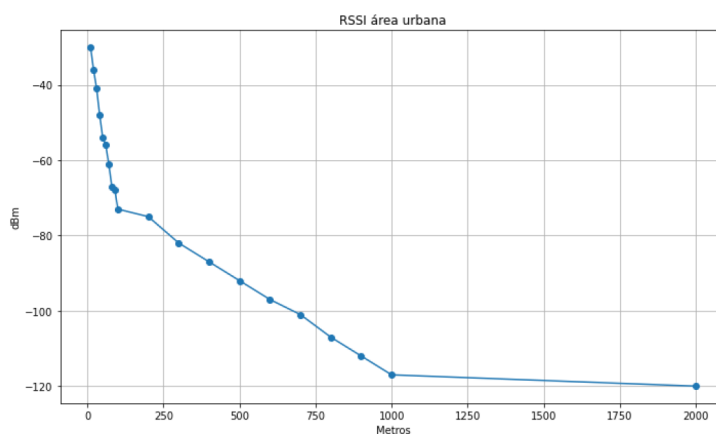


Figura 12. RSSI en áreas urbanas. Fuente: Elaboración propia

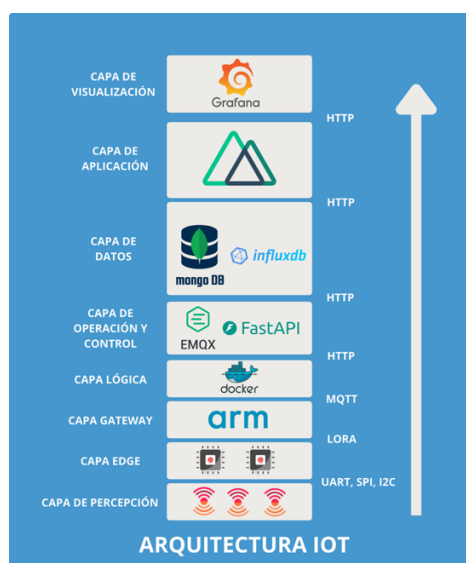


Figura 13. Arquitectura IoT de la plataforma. Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 13, el *gateway* es el encargado de establecer la conexión entre los nodos sensores y la plataforma IoT. Esta comunicación es gestionada mediante EMQX, que actúa como *broker* MQTT y que, además, dispone de un *WebSocket* para facilitar la interoperabilidad entre distintos protocolos, como MQTT y HTTP. El almacenamiento de los datos recopilados se lleva a cabo utilizando dos bases de datos; una base de datos no relacionan de MongoDB en el cual se almacenan los usuarios, dispositivos, reglas, variables y medidas y una *timeSeries* de *influxDB* ideal para ser consumida por la capa de visualización construida con grafana, el control y lógica del sistema está desarrollado con una *fastapi* todo el ecosistema está *dockerizado* para permitir su rápido despliegue entre diversos sistemas computacionales y/o operativos.

Finalmente, la capa de aplicación y visualización fue construida utilizando el *framework* Nuxt Black de Creative-Tim, el cual se basa en Nuxt.js y Vue.js. Esta capa permite gestionar usuarios, dispositivos, alarmas y *dashboards* personalizados. La Figura 14 muestra el *dashboard* construido para la visualización de los contaminantes y datos atmosféricos mencionados con anterioridad, se optó por un gráfico de serie temporal, un histograma, un visualizador de valor medio, valor máximo y una tabla histórica con la recolección de datos de un mes con un muestreo ponderado de un dato por hora.

El uso de series temporales, histogramas, tablas y el análisis de datos medios y máximos es fundamental en un sistema IoT para la medición de contaminantes atmosféricos (PM10, PM2.5, CO, NO2, temperatura, presión y humedad), ya que permite una interpretación integral de la información recolectada. Las series temporales facilitan la identificación de variaciones y patrones a lo largo del tiempo, esenciales para detectar anomalías y predecir comportamientos futuros. Los histogramas permiten visualizar la distribución de los datos y evaluar la frecuencia de valores críticos, mientras que las tablas organizan la información de forma estructurada para un análisis preciso y comparativo. Por su parte, los valores medios ofrecen una visión general del comportamiento promedio de los contaminantes, y los valores máximos ayudan a identificar picos de concentración que pueden representar riesgos para la salud o incumplimientos normativos. En conjunto, estas herramientas facilitan la toma de decisiones informadas, la validación de tendencias ambientales y la implementación de medidas preventivas o correctivas dentro de un producto de investigación orientado al monitoreo y control de la calidad del aire.

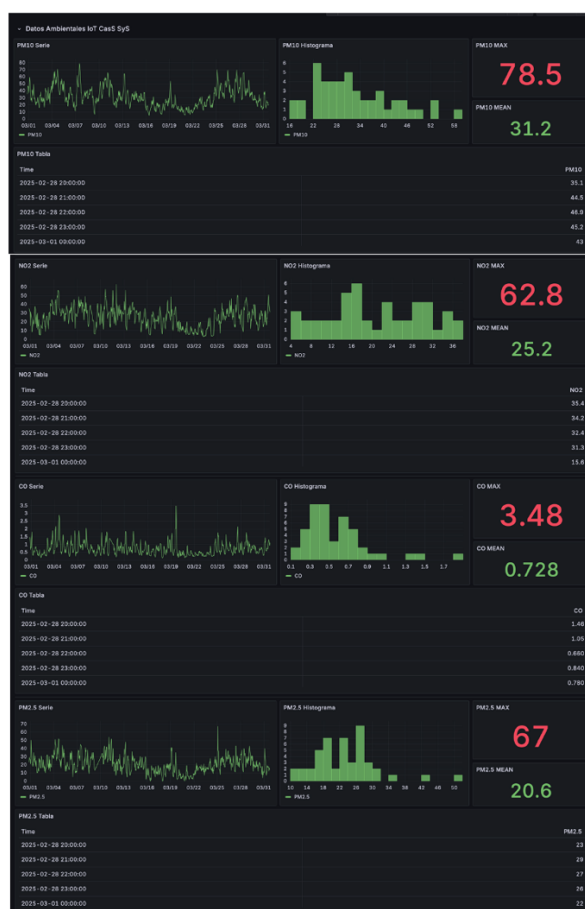


Figura 14. *Dashboard* personalizado. Fuente: Elaboración propia.

4. Resultados

Los resultados en el desarrollo del nodo sensor Edge IoT para el monitoreo de contaminantes atmosféricos muestran la viabilidad de esta solución para ampliar la cobertura del monitoreo ambiental con un bajo costo de implementación. A continuación, se analizan los principales hallazgos del proyecto en términos de filtrado de datos, calibración de sensores, integración, diseño del hardware y pruebas de comunicación.

La implementación del filtro digital de media móvil exponencial permitió mitigar el ruido de alta frecuencia presente en los datos adquiridos por los sensores. Los resultados muestran que este filtrado mejora la estabilidad de las mediciones sin afectar significativamente la latencia del sistema. Se observó que valores de α entre 0.3 y 0.7 proporcionaron una reducción efectiva del ruido en las mediciones de PM10, PM2.5, CO y NO₂, lo que es clave para mejorar la calidad de los datos obtenidos.

El proceso de calibración se realizó comparando los datos obtenidos por el nodo con las mediciones de una estación de monitoreo de referencia (RMCAB). Se aplicaron modelos de regresión lineal para ajustar los valores de los sensores y se determinó un error absoluto medio (MAE) por cada variable monitoreada. Los valores de MAE obtenidos fueron de 0.361 ppm para CO, 2.935 ppm para NO₂, 4.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM2.5 y 2.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10, lo que indica una precisión aceptable para una solución de bajo costo. Sin embargo, se confirmó que estos nodos deben complementar estaciones más avanzadas para asegurar mediciones más precisas.

El firmware del nodo sensor se diseñó para operar de manera modular, separando el procesamiento de datos y la transmisión LoRa en dos ESP32 independientes. Una de las mejoras clave en la implementación fue la incorporación de un Access Point (AP) en el ESP32 de comunicación, permitiendo configurar parámetros clave sin necesidad de modificar el código directamente.

El diseño del circuito impreso (PCB) optimizó la integración de los componentes electrónicos, logrando una arquitectura compacta y eficiente. Se emplearon dos ESP32: uno para la adquisición y filtrado de datos y otro para la transmisión mediante LoRa. El prototipo construido alcanzó un nivel de madurez tecnológica (TRL) 6, demostrando que es funcional en entornos reales y listo para futuras pruebas operativas.

Las pruebas de alcance de comunicación mostraron diferencias significativas en la transmisión de datos según el entorno. En un área suburbana, con edificaciones bajas y espacios abiertos, se logró una cobertura de hasta 2.5 km con una señal aceptable de -120 dBm. En contraste, en un entorno urbano con edificios altos, el alcance se redujo a 1.2 km debido a la obstrucción de las señales. Estos resultados confirman que, para aplicaciones en ciudades, es recomendable ubicar los *gateways* en puntos elevados y utilizar antenas de mayor ganancia para maximizar la cobertura.

Con base en la recolección de aproximadamente 750 datos durante un mes, con una frecuencia de muestreo de una hora, se realizó la comparación de las mediciones obtenidas por el nodo sensor Edge IoT con los datos de referencia proporcionados por la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB). Los resultados de la calibración mediante un modelo de regresión lineal muestran un error absoluto medio (MAE) de 0.361 ppm para CO y 2.935 ppm para NO₂ con el sensor MICS-6814, así como 2.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM2.5 y 4.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10 con el sensor PMS5003. Estos valores evidencian una precisión adecuada para una solución de bajo costo, capaz de complementar las estaciones de monitoreo oficiales. El análisis de las series temporales, histogramas, tablas y valores medios y máximos permitió identificar tendencias, evaluar la estabilidad de las mediciones tras el filtrado de media móvil exponencial (α entre 0.3 y 0.7) y detectar eventos puntuales de alta concentración de contaminantes. En conjunto, estos resultados validan tanto la correcta operación del sensor como la efectividad del modelo de calibración, reforzando la viabilidad de esta plataforma IoT para ampliar la cobertura de monitoreo ambiental.

Los resultados demuestran que el nodo sensor Edge IoT propuesto es una solución viable para la monitorización de contaminantes atmosféricos, ofreciendo un equilibrio entre costo, cobertura y precisión. Si bien los sensores utilizados presentan ciertas limitaciones en comparación con estaciones de referencia, su integración con plataformas IoT y el uso de filtrado digital mejoran la calidad de los datos recopilados. Además, la arquitectura del sistema, basada en LoRa y ESP32, permite la transmisión eficiente de datos con un consumo energético reducido.

5. Conclusiones

El diseño y la implementación de un nodo sensor Edge IoT para el monitoreo de contaminantes atmosféricos en Bogotá ha demostrado superar varias de las limitaciones identificadas en la literatura, al tiempo que expone retos

que exigen mejoras continuas. En primer lugar, la ejecución íntegra de las rutinas de filtrado exponencial y regresión lineal directamente en el microcontrolador representa un avance frente a las arquitecturas centralizadas: al desplazar el cómputo “al borde”, se reduce drásticamente la latencia de detección y se minimiza el tráfico de datos en una ciudad donde la cobertura móvil es irregular y fragmentada. Este procesamiento local, además, garantiza lecturas calibradas antes de la transmisión, mejorando la calidad de la información sin incrementar los costes de infraestructura.

En segundo lugar, la separación modular de adquisición y comunicación—y la futura consolidación en un ESP32-S3—ofrece una robustez operativa poco explorada en trabajos previos. Mientras otros sistemas sufren interrupciones en el muestreo ante pérdidas de enlace, nuestro nodo mantiene la captura continua de datos durante caídas de la red LoRa, reiniciando únicamente el subsistema de radio. Esta resiliencia es crítica en las zonas con microclimas variables y topografía accidentada de Bogotá, donde la pérdida de información comprometería la fiabilidad de las estimaciones de contaminación.

Pese a los logros alcanzados, persisten diversos hallazgos que subrayan la necesidad de adoptar un enfoque crítico y multidimensional. Aunque el filtro exponencial logra atenuar buena parte del ruido, la deriva a largo plazo de los sensores de bajo costo hace indispensable establecer protocolos de recalibración periódica, así como incorporar mecanismos de autodiagnóstico que eviten sesgos sistemáticos. A esto se suma la elevada variabilidad entre lotes de sensores MICS-6814 y PMS5003, lo cual introduce incertidumbre en las mediciones absolutas; en consecuencia, resulta recomendable complementar las observaciones con muestreos cruzados frente a estaciones oficiales y aplicar métodos de corrección estadística que fortalezcan la fiabilidad de los datos. Por otra parte, el despliegue masivo con densidades iguales o superiores a un nodo por kilómetro cuadrado plantea importantes retos humanos y técnicos en cuanto a logística, mantenimiento y gestión de flota, lo que hace necesario combinar los procedimientos de actualización OTA y la administración de gateways con herramientas de monitoreo centralizado y sistemas de alerta automática ante fallos.

De cara al trabajo futuro, se proyecta el desarrollo de modelos de predicción y analítica híbrida que integren series de tiempo con aprendizaje profundo, capaces de anticipar picos contaminantes y ser evaluados según métricas de la RMCAB, verificando además su capacidad de generalización en microzonas urbanas. También se plantea la implementación de algoritmos de calibración adaptativa basados tanto en datos históricos como en redes colaborativas de nodos, de modo que los parámetros de filtrado y regresión puedan ajustarse dinámicamente a las variaciones climáticas y de altitud. Para garantizar la autonomía energética, será necesario dimensionar e instalar paneles solares fotovoltaicos con controladores MPPT y baterías de respaldo, analizando su rendimiento en diferentes condiciones de insolación. En paralelo, la migración a microcontroladores ESP32-S3 con aceleración de inteligencia artificial permitirá consolidar todas las funciones en un solo dispositivo, simplificando el hardware, reduciendo el consumo y mejorando la capacidad de procesamiento para modelos más complejos. Finalmente, la transición hacia una infraestructura LoRaWAN de alta densidad facilitará pasar de soluciones punto a punto a una red robusta, en la que los gateways orquesten cientos de nodos con seguridad de extremo a extremo, garantizando el escalado y abriendo la posibilidad de colaboración con entidades municipales.

Con estos avances, el nodo no solo incrementará la cobertura y la precisión del monitoreo en Bogotá, sino que además se convertirá en un prototipo replicable para el desarrollo de redes urbanas de calidad del aire en ciudades que enfrentan limitaciones de conectividad y de recursos.

6. Referencias

- [1] Cantú Martínez, P. C. (2023). La contaminación del aire y los riesgos de la salud. *Revista UANL*, 26 (122), 66-75. <https://cienciauanl.uanl.mx/ojs/index.php/revista/article/view/342>
- [2] Bao, R., Zhang, A. (2020). Does lockdown reduce air pollution? Evidence from 44 cities in northern China. *Science of The Total Environment*, 731, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139052>
- [3] Guth, J., Breitenbucher, U., Falkenthal, M., Leymann, F., Reinfurt, L. (2016). *Comparison of IoT platform architectures: A field study based on a reference architecture*. IEEE Cloudification of the Internet of Things (CIoT), Paris, France. <https://doi.org/10.1109/CIOT.2016.7872918>
- [4] García, L., Garcia-Sanchez, A.-J., Asorey-Cacheda, R., Garcia-Haro, J., Zúñiga-Cañón, C.-L. (2022). Smart air quality monitoring IoT-based infrastructure for industrial environments. *Sensors*, 22 (23), 1-45. <https://doi.org/10.3390/s22239221>

- [5] Kataria, A., Puri, V. (2022). AI- and IoT-based hybrid model for air quality prediction in a smart city with network assistance. *IET Networks*, 11 (6), 221–233. <https://doi.org/10.1049/ntw2.12053>
- [6] Jabbar, W. A., Subramaniam, T., Ong, A. E., Shu'ib, M. I., Wu, W., de Oliveira, M. A. (2022). LoRaWAN-based IoT system implementation for long-range outdoor air quality monitoring. *Internet of Things*, 19, 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2022.100540>
- [7] Salamone, F., Masullo, M., Sibilio, S. (2021). Wearable devices for environmental monitoring in the built environment: A systematic review. *Sensors*, 21 (14), 1–42. <https://doi.org/10.3390/s21144727>
- [8] ONU. (2022). *El 99% de la población mundial respira aire contaminado*. <https://news.un.org/es/story/2022/04/1506592>
- [9] Linares, C., Díaz, J. (2009). Efecto de las partículas de diámetro inferior a 2,5 micras (PM_{2,5}) sobre los ingresos hospitalarios en niños menores de 10 años en Madrid. *Gaceta Sanitaria*, 23 (3), 192–197. <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2008.04.006>
- [10] Quispicuro Huamán, V. (2015). Descripción de los efectos de los óxidos de carbono (CO₂ y CO) en ambientes interiores y exteriores. *Revista de Investigación Universitaria*, 4 (1), 11–15. <https://doi.org/10.17162/riu.v4i1.605>
- [11] Cabana García, N. C. (2020). *Adsorción de hidrocarburos y óxidos de carbono en materiales silicoaluminados microporosos* [Tesis Doctoral]. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/103365>
- [12] Algarrada Gorrillo, D. (2024). *Análisis de la calidad del aire de la ciudad de Sevilla y revisión de la efectividad de sus zonas de bajas emisiones* [Tesis de Maestría]. Universidad de Huelva, Universidad internacional de Andalucía, Sevilla. <https://mastertecnologiaambiental.com/principal/tfm/repositorio/2023-2024/tfm-algarrada-gordillo-daniel.pdf>
- [13] Fernández Rivas, L. (2015). *El papel de los óxidos de nitrógeno en el cambio climático. Efectos sobre la salud* [Trabajo de Fin de Grado]. Universidad Complutense, Madrid. <https://hdl.handle.net/20.500.14352/66245>
- [14] Rugel Campoverde, D. A. (2023). Estudio de emisiones de dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) provenientes del biodiesel a base de aceites empleados en la industria alimentaria y su reutilización en un motor de compresión Euro 5, en el Distrito Metropolitano de Quito [Trabajo de Grado]. Universidad Politécnica Salesiana, Quito. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/25865>
- [15] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Resolución 2254 de 2017*. <https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/resolucion-2254-de-2017/>