



Diseño e Implementación de una Estación Autónoma de Bajo Costo para la Medición de Material Particulado.

Autora: Silvia Jacqueline Barreto Cristaldo¹ and Co-autores: Carolina Recalde, Luis Bernal, Diego Stalder²

¹ Facultad de Ingeniería UNA

Resumen

La contaminación por material particulado, PM por sus siglas en inglés, representa uno de los principales riesgos ambientales para la salud humana, especialmente en zonas urbanas. Este trabajo presenta el diseño e implementación de una estación autónoma de bajo costo para la medición de PM_1 , $PM_{2,5}$, PM_4 , PM_{10} y variables ambientales (humedad relativa y temperatura). El sistema integra el sensor Sensirion SPS30 -especializado en medición de partículas con tecnología láser y salida digital- con un módulo ESP32 que gestiona la adquisición de datos, módulo SD card, comunicación WiFi/LTE dual y administración energética mediante un panel solar con sistema de carga de baterías Li-ion. Se implementó un protocolo de transmisión para la inserción remota de datos en una base de datos en la nube. Los resultados obtenidos en laboratorio y en las pruebas de campo demostraron que la estación es capaz de operar de forma autónoma y estable, adquiriendo y transmitiendo de manera continua las series de concentración de material particulado y variables ambientales. Esta solución se presenta como una alternativa de bajo costo que contribuye a democratizar el acceso a datos sobre calidad del aire.

1. Introducción

El material particulado (PM) consiste en una mezcla compleja de partículas sólidas y líquidas en suspensión en el aire, compuestas por sustancias tanto orgánicas como inorgánicas. Su composición química puede incluir compuestos carbonosos (como carbono elemental y orgánico), sales inorgánicas (como sulfatos y nitratos), compuestos orgánicos volátiles, metales traza, así como partículas de origen natural como polvo y tierra. Estas partículas varían en tamaño, lo que influye en su comportamiento atmosférico, su transporte y sus efectos sobre la salud y el medio ambiente [1].

El material particulado se clasifica comúnmente según su diámetro aerodinámico, distinguiéndose principalmente dos fracciones: PM_{10} , que incluye partículas gruesas con diámetros iguales o menores a $10\ \mu m$, y $PM_{2,5}$, que corresponde a partículas finas con diámetros de hasta $2,5\ \mu m$. Esta diferenciación se fundamenta en la capacidad de las partículas para penetrar en el sistema respiratorio humano y en sus implicancias en la salud pública [2].

Estudios epidemiológicos han demostrado una relación del efecto agudo entre las partículas en el aire y la morbilidad y mortalidad de la población. Las altas concentraciones de contaminación por partículas pequeñas y finas se asocian particularmente con un alto número de muertes por enfermedades del corazón y derrames cerebrales, así como con enfermedades respiratorias y cáncer [3]. Además, la exposición prolongada a la contaminación por material particulado también está asociada a otras condiciones de salud como el déficit cognitivo, enfermedades neurodegenerativas y desórdenes neurológicos [1].

A nivel local, el equipo de investigación del Laboratorio de Mecánica y Energía (LME) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción (FIUNA), desarrolló un proyecto para la implementación de una red de medición, registro y monitoreo de material particulado, cofinanciado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Como resultado principal, se logró establecer la primera red de monitoreo de Material Particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$ del país. Los datos obtenidos evidenciaron que en varios días específicos, se superaron límites per-

misibles por la legislación nacional. Además, el promedio anual de concentración de partículas finas $PM_{2,5}$ se encontró en el umbral del valor límite permitido, lo que pone de manifiesto la necesidad de implementar sistemas continuos de monitoreo de la calidad del aire a nivel nacional [4].

Sin embargo, la medición del material particulado requiere el uso de instrumentos de alta precisión, que suelen tener un costo elevado, así como la disponibilidad de personal técnico capacitado para su operación, mantenimiento y calibración. Estas exigencias han limitado la expansión de redes de monitoreo en regiones de bajos ingresos, donde la cobertura espacial resulta insuficiente y su distribución geográfica irregular [5].

En este contexto, el presente trabajo propone el diseño e implementación de una estación de monitoreo de material particulado basada en componentes de bajo costo, con el objetivo de desarrollar un modelo replicable y escalable. La estación está orientada específicamente a la detección de partículas $PM_{2,5}$ y PM_{10} , debido a su alta relevancia en la salud pública y ambiental. Adicionalmente, se registran las concentraciones de PM_1 y PM_4 como parte de las mediciones realizadas, lo que permite un análisis más amplio del perfil de partículas presentes en el ambiente. La selección de estos tamaños permite que el sistema de detección responda adecuadamente a los desafíos ambientales vinculados con su exposición, proporcionando datos confiables y de utilidad para la toma de decisiones. Asimismo, la estación desarrollada se perfila como una fuente robusta de información para aplicaciones futuras en modelos de pronóstico y sistemas de alerta temprana que utilizan técnicas de aprendizaje automático basados en modelos de machine learning [6].

Además, considerando que la concentración y dispersión de los contaminantes atmosféricos están fuertemente influenciados por variables meteorológicas [7], la estación diseñada e implementada en este trabajo que incorpora sensores para el monitoreo continuo de la temperatura y la humedad relativa, permite no solo una mejor caracterización del comportamiento del material particulado, sino también el fortalecimiento del análisis de correlación entre condiciones atmosféricas y niveles de contaminación, contribuyendo así a una evaluación más integral de los riesgos ambientales.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Diseñar e implementar una estación autónoma de bajo costo para la medición, registro y monitoreo de material particulado.

2.2. Objetivos Específicos

- Seleccionar e integrar el sensor de material particulado y el microcontrolador, compatibles con módulos de gestión de energía, paneles solares y sistema de envío de datos vía LTE.
- Automatizar la transmisión de los valores medidos a la base de datos de la Dirección de Tecnología de la Información y la Comunicación (DTIC's) de la Facultad de Ingeniería.
- Diseñar una estructura mecánica para el soporte y protección de la estación de medición.
- Comparar los datos obtenidos con datos históricos, evaluando la integración de sensores de bajo costo a la red existente, mediante protocolo de comunicación RS-485.

3. Materiales y métodos

La estación desarrollada se diseñó a partir de una arquitectura modular basada en un microcontrolador ESP32-S3, encargado de la adquisición, procesamiento y transmisión de datos. Como sensor principal de material particulado se empleó el Sensirion SPS30, un sensor óptico capaz de medir concentraciones de PM_1 , $PM_{2,5}$, PM_4 y PM_{10} . Las variables de temperatura y humedad relativa se midieron mediante el sensor digital de bajo costo DHT11, utilizadas como variables de contexto para la interpretación de las series de material particulado. El sistema incorpora además una tarjeta SD para el almacenamiento local de respaldo, un módulo de comunicación celular LTE incorporado en la placa de desarrollo LILYGO T-SIM7670G S3, así como conectividad Wi-Fi para la transmisión de datos a un servidor remoto. La alimentación se realizó mediante un panel solar de 24 V y un banco de baterías Li-ion, gestionados por un cargador tipo MPPT, dimensionados a partir de un análisis del balance energético del sistema.

El firmware se estructuró como una máquina de estados finitos que gestiona ciclos de medición cada 5 minutos. En cada ciclo, el ESP32-S3 activa los sensores, realiza la lectura de PM y de variables ambientales, aplica validaciones básicas de calidad, almacena los datos en memoria local y, en intervalos prefijados, envía los registros al servidor mediante peticiones HTTP sobre Wi-Fi o LTE. Se implementaron mecanismos de tolerancia a fallos, incluyendo reintentos escalonados de conexión, colas de datos pendientes y uso de memoria SD como respaldo ante interrupciones de conectividad.

El análisis comparativo de los datos obtenidos por prototipo desarrollado se llevó a cabo combinando ensayos de laboratorio y periodos de mediciones en campo, con la estación instalada frente al Laboratorio de Mecánica y Energía (LME) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción (FIUNA). A partir de las series temporales registradas se construyeron promedios y perfiles horarios, se aplicaron métricas estadísticas y comparaciones frente a los límites establecidos en la normativa nacional para evaluar el desempeño del sistema desarrollado.

3.1. Requerimientos de diseño

El diseño de la estación estuvo guiado por un conjunto de requerimientos funcionales, operativos y de mantenimiento. En primer lugar, el sistema debía ser capaz de medir en tiempo real las concentraciones de PM_1 , $PM_{2,5}$, PM_4 y PM_{10} , así como temperatura y humedad relativa, con una frecuencia de muestreo del orden de minutos y con capacidad de registro continuo en una base de datos remota. Asimismo, se estableció como requisito la integración transparente con la infraestructura de monitoreo existente en el Laboratorio de Mecánica y Energía, mediante comunicación dual Wi-Fi/LTE y un protocolo de transmisión que permitiera la inserción automática de los datos en el servidor institucional.

Desde el punto de vista operativo, la estación debía funcionar de manera autónoma en exteriores, alimentada exclusivamente por energía solar y un banco de baterías, garantizando varios días de operación bajo condiciones de baja radiación. El diseño del encapsulado debía ofrecer protección frente a lluvia, radiación solar directa y variaciones de temperatura, facilitando al mismo tiempo el acceso para tareas de mantenimiento.

Finalmente, se priorizó el uso de componentes de bajo costo y fácil disponibilidad local, así como una arquitectura de hardware y firmware replicable, orientada a la futura expansión de la red de monitoreo con múltiples nodos de características similares.

3.2. Diseño del circuito

3.2.1. Diagrama de funcionamiento

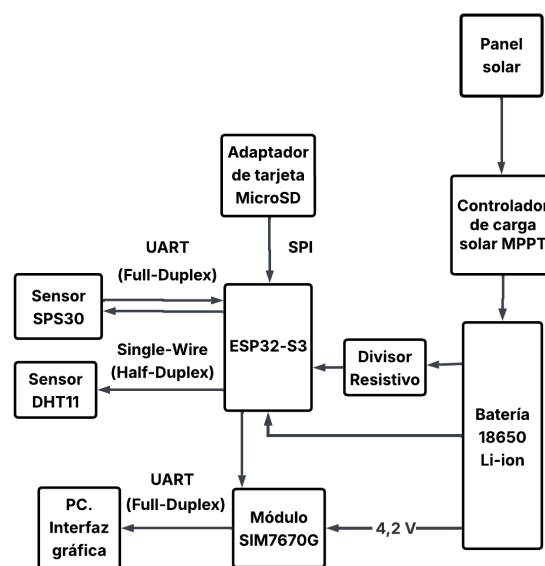


Figura 1: Diagrama funcional de la estación de medición desarrollada.

3.3. Componentes electrónicos

- Módulo LILYGO T-SIM7670G-S3, que integra un microcontrolador ESP32-S3 y un módem LTE SIM7670G.
- Sensor óptico de material particulado Sensi-ion SPS30.
- Sensor digital de temperatura y humedad DHT11.
- Módulo lector de tarjeta microSD con interfaz SPI.
- Controlador de carga solar tipo MPPT para baterías Li-ion.
- Banco de baterías recargables Li-ion 18650.
- Panel solar fotovoltaico de 20 W.
- Divisor resistivo para la medición del voltaje de batería mediante el ADC del ESP32-S3.

- Borneras y conectores para la interconexión de alimentación y sensores.

3.3.1. Alimentación y gestión de energía

La estación fue diseñada para operar de manera completamente autónoma mediante energía solar. La fuente primaria de energía está constituida por un panel fotovoltaico de 20 W, conectado a un controlador de carga tipo MPPT encargado de gestionar la carga de un banco de baterías recargables Li-ion 18650 conectadas en paralelo. Este banco suministra la energía necesaria para el módulo LILYGO T-SIM7670G-S3, el sensor de material particulado y el resto de la electrónica, de modo a garantizar la operación del sistema durante periodos prolongados de baja radiación solar.

A partir del balance energético del sistema se dimensionaron el panel y el banco de baterías de forma que cubran el consumo asociado a los ciclos de medición, almacenamiento y transmisión de datos, incorporando estrategias de bajo consumo basadas en modos de suspensión profunda del microcontrolador y en la desconexión selectiva de periféricos. El voltaje del banco de baterías se monitorea mediante un divisor resistivo conectado al ADC del ESP32-S3, lo que permite estimar el estado de carga y registrar el comportamiento energético de la estación en el tiempo, contribuyendo a la protección frente a descargas profundas y a la evaluación de la autonomía del sistema.

3.3.2. Módulo de sensado de material particulado

La medición de PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_4 y PM_{10} se realiza mediante el sensor óptico Sensirion SPS30, basado en el principio de dispersión láser y con salida digital. El dispositivo se comunica con el microcontrolador a través de una interfaz serie y se controla mediante comandos específicos para su inicialización, configuración del modo de operación, lectura periódica de datos y gestión de estados de bajo consumo. El diseño del encapsulado de la estación se orientó a asegurar un flujo de aire adecuado hacia el SPS30, reduciendo simultáneamente la entrada de agua y de material particulado grueso que pudiera afectar el desempeño del sensor.

3.3.3. Sensores ambientales y monitoreo de batería

Las variables de temperatura y humedad relativa se adquieren mediante un sensor digital DHT11, utilizado como variable de contexto para la interpretación de las series de material particulado. Además del monitoreo del voltaje de batería a través del ADC del ESP32-S3, el firmware registra estos parámetros de forma conjunta con las concentraciones de PM, lo que permite analizar la influencia de las condiciones ambientales sobre el comportamiento del sensor óptico y sobre la estabilidad del sistema de alimentación.

3.3.4. Comunicaciones y almacenamiento de datos

El módulo LILYGO T-SIM7670G-S3 integra un ESP32-S3 con conectividad Wi-Fi y un módulo LTE SIM7670G, lo que permite seleccionar la interfaz de comunicación más adecuada según la disponibilidad de red. Los datos adquiridos se almacenan inicialmente en una tarjeta microSD mediante una interfaz SPI, utilizada como memoria de respaldo ante interrupciones de conectividad o fallos temporales en la transmisión.

En intervalos programados, los registros acumulados se envían al servidor del laboratorio mediante peticiones HTTP sobre Wi-Fi o LTE. El firmware implementa colas de reenvío y mecanismos de reintento escalonado, de forma a preservar la integridad de la base de datos remota y evitar la pérdida de información durante eventos de desconexión o degradación de la calidad del enlace.

4. Desarrollo del firmware

El firmware del sistema se implementó sobre el microcontrolador ESP32-S3 integrado en el módulo LILYGO T-SIM7670G-S3. La lógica general de funcionamiento se resume en el diagrama de flujo de la Figura 2, que describe las etapas de inicialización, adquisición de datos, almacenamiento local, transmisión remota y gestión de errores.

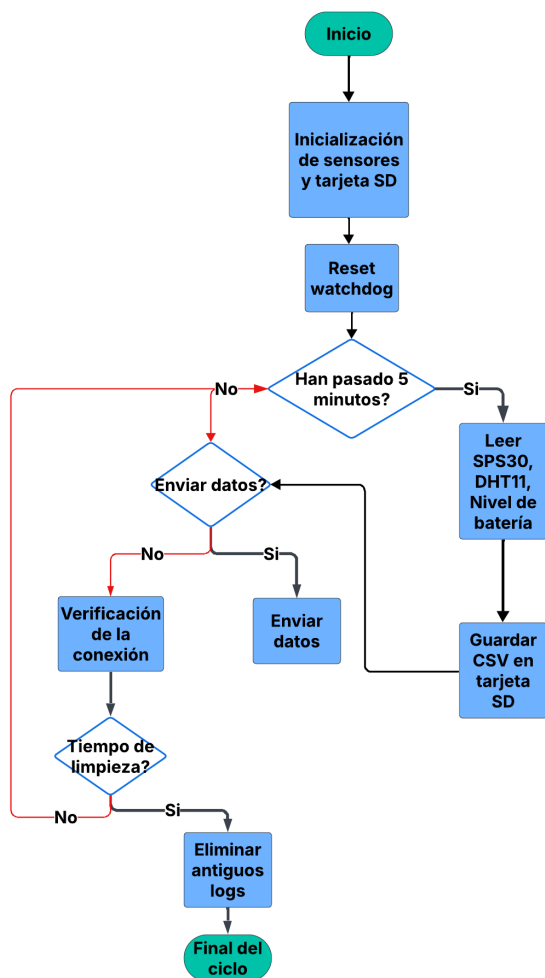


Figura 2: Diagrama de flujo del sistema implementado en el firmware.

En la etapa de inicialización, el firmware configura los periféricos del microcontrolador, establece los parámetros de comunicación con el sensor SPS30, el sensor DHT11, la tarjeta microSD y el módem LTE, y realiza una verificación básica del estado de la batería. Una vez completada la configuración, el sistema ingresa en un ciclo periódico de operación con un periodo de muestreo del orden de cinco minutos.

En cada ciclo de medición, el ESP32-S3 activa el sensor de material particulado y el sensor de temperatura y humedad, respetando un tiempo de calentamiento mínimo para garantizar lecturas estables. A continuación, se adquieren las concentraciones de PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_4 y PM_{10} reportadas por el SPS30, así como la temperatura, la humedad relativa y el voltaje de batería. El firmware aplica verificaciones de rango y consistencia a las lecturas, y descarta o marca aquellas que no cumplan criterios básicos de calidad. Las mediciones válidas se empaquetan junto con la

marca temporal correspondiente y se almacenan en la tarjeta microSD en formato de registro, lo que permite disponer de un respaldo local de toda la serie temporal.

La transmisión de datos al servidor del laboratorio se realiza de forma desacoplada del ciclo de muestreo, en intervalos programados de mayor duración. Para ello, el firmware mantiene una cola de registros pendientes de envío y, cuando se alcanza el intervalo de transmisión, establece la conexión mediante Wi-Fi o LTE según la configuración, y envía los datos al servidor utilizando peticiones HTTP. En caso de fallo de comunicación o de pérdida de enlace durante el envío, los registros se conservan en la cola de pendientes y se reintentan en ciclos posteriores mediante un esquema de reintento escalonado, evitando la pérdida de información y reduciendo la carga sobre la red.

Con el fin de optimizar el consumo energético, el firmware emplea modos de suspensión profunda del microcontrolador entre ciclos de medición, desactivando el módem de comunicaciones y los sensores cuando no son necesarios. Solo los módulos estrictamente requeridos permanecen activos durante los intervalos de sueño, lo que permite reducir significativamente la demanda energética del sistema y aumentar la autonomía de la estación. Además, se registran eventos relevantes (errores de lectura, fallos de conexión y estado de la batería) para facilitar el análisis posterior del desempeño en condiciones reales de operación.

5. Pruebas experimentales

Con el fin de evaluar el funcionamiento integral de la estación desarrollada, se realizaron pruebas experimentales en dos etapas principales: ensayos de laboratorio y pruebas en campo. En la Figura 3 se muestra el montaje de la estación durante la fase de pruebas en el campus universitario, donde se verificó su comportamiento en condiciones reales de operación.



Figura 3: Montaje de la estación para la realización de pruebas.

En la etapa de laboratorio se llevaron a cabo ensayos controlados orientados a comprobar la correcta interacción entre los componentes electrónicos y el firmware. Se verificó la inicialización de los sensores, la adquisición periódica de datos de material particulado, temperatura y humedad, el registro de la información en la tarjeta microSD y el funcionamiento del enlace de comunicación mediante Wi-Fi y LTE. Asimismo, se ajustaron parámetros de temporización, tiempos de calentamiento del sensor de material particulado y ciclos de suspensión profunda del microcontrolador, con el objetivo de garantizar estabilidad en la operación y coherencia en la secuencia de mediciones y transmisiones.

Posteriormente, en la etapa de campo, la estación se instaló en el entorno del Laboratorio de Mecánica y Energía, expuesta a condiciones ambientales reales de temperatura, humedad, radiación solar y eventos meteorológicos. Durante esta fase se mantuvo la frecuencia de muestreo definida en el diseño del sistema, se operó la estación de manera continua durante un periodo prolongado y se supervisó el comportamiento del sistema de alimentación solar y de la transmisión de datos hacia el servidor remoto. Las series registradas en esta campaña constituyen la base para el análisis detallado que se presenta en la sección de resultados.

6. Resultados experimentales

6.1. Medición de material particulado

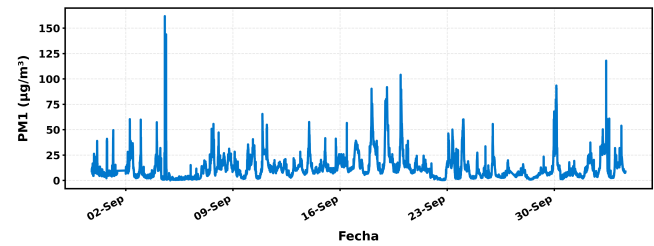


Figura 4: Serie temporal de concentración de PM_1 del mes de septiembre a octubre del año 2025.

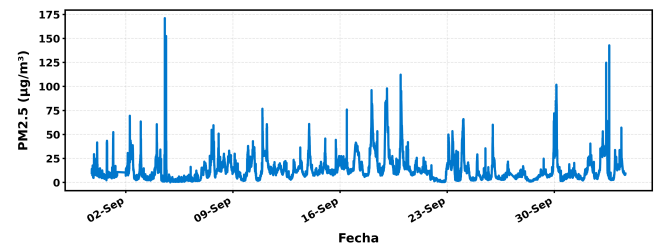


Figura 5: Serie temporal de concentración de $PM_{2.5}$ del mes de septiembre a octubre del año 2025.

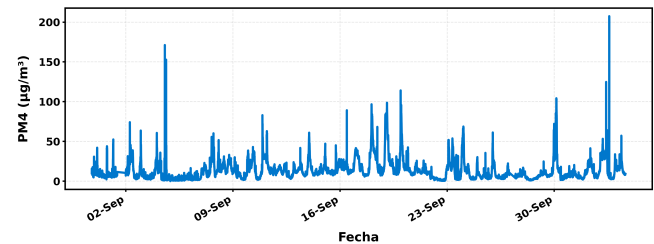


Figura 6: Serie temporal de concentración de PM_4 del mes de septiembre a octubre del año 2025.

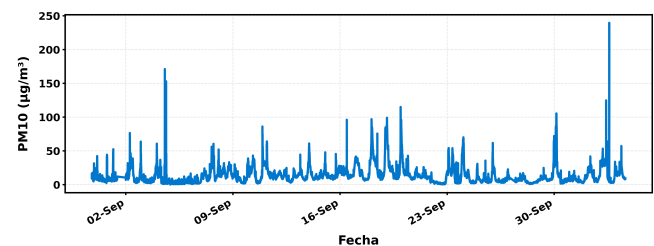


Figura 7: Serie temporal de concentración de PM_{10} del mes de septiembre a octubre del año 2025.

Las Figuras 4–7 presentan las series temporales de concentración de PM_1 , $PM_{2,5}$, PM_4 y PM_{10} registradas por la estación durante el periodo de pruebas. Se observa un patrón temporal muy similar entre las distintas fracciones, con incrementos y descensos coincidentes que reflejan la respuesta del sistema frente a variaciones en las condiciones locales (tránsito, resuspensión de polvo, cambios meteorológicos, entre otros).

Esta similitud se explica por el principio de funcionamiento del sensor Sensirion SPS30. Se trata de un contador óptico de partículas basado en dispersión láser, que guía el aire ambiente a través de una celda de medición donde un haz láser ilumina las partículas en suspensión. La luz dispersada es detectada por un fotodetector y procesada internamente para obtener la distribución de tamaños de partículas y el conteo por unidad de volumen [8]. A partir de esta distribución y de supuestos sobre propiedades físicas del aerosol (densidad y características ópticas), el firmware del sensor calcula las concentraciones de masa para distintas fracciones de PM en $\mu g m^{-3}$.

En sensores de bajo costo como el SPS30, las fracciones PM_1 , $PM_{2,5}$, PM_4 y PM_{10} no corresponden a mediciones completamente independientes, sino que se derivan de la misma distribución de tamaños mediante integraciones sucesivas sobre intervalos de diámetro aerodinámico. Además, en el rango de partículas gruesas (por ejemplo, para PM_{10}) el conteo directo presenta limitaciones estadísticas debido a la baja densidad numérica de partículas grandes en el volumen muestreado. Como consecuencia, es esperable una correlación entre las series temporales de las distintas fracciones, particularmente entre PM_1 y $PM_{2,5}$, y entre PM_4 y PM_{10} . Esta característica es inherente al algoritmo de estimación interno del sensor SPS30.

Para complementar el análisis gráfico, la Tabla 1 resume los principales datos estadísticos diarios de cada fracción de material particulado durante el periodo de medición.

Tabla 1: Datos estadísticos diarios de PM.

Variable	Media	Mediana	Mín	Máx
PM_1	12.68	12.47	1.66	30.08
$PM_{2,5}$	13.65	13.42	2.46	32.11
PM_4	13.85	13.61	3.03	32.36
PM_{10}	13.95	13.70	3.32	32.49

Tabla 2: Indicadores adicionales de variabilidad diaria de PM.

Variable	n	σ	CV %
PM_1	36	2.31	18.2
$PM_{2,5}$	36	2.46	18.0
PM_4	36	2.50	18.1
PM_{10}	36	2.52	18.1

Los valores de desvío estándar y coeficiente de variación (CV %) indican una baja dispersión relativa de las mediciones diarias, lo que refleja una buena estabilidad de los datos registrados por la estación.

6.2. Comparación con normativas paraguayas

Los valores promedio de material particulado registrados durante el periodo de monitoreo (29 de agosto al 4 de octubre de 2025) fueron de $13.65 \mu g m^{-3}$ para $PM_{2,5}$ y $13.95 \mu g m^{-3}$ para PM_{10} . Estos resultados se contrastaron con los límites establecidos en la Resolución N.º 259/15 del Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES), que fija un valor máximo diario de $30 \mu g m^{-3}$ y un límite anual de $15 \mu g m^{-3}$ para $PM_{2,5}$, así como un límite diario de $150 \mu g m^{-3}$ para PM_{10} [9].

De acuerdo con dicha normativa, las concentraciones medidas por la estación desarrollada se mantuvieron ampliamente por debajo de los umbrales permisibles tanto para $PM_{2,5}$ como para PM_{10} , sin registrarse excedencias diarias durante el periodo analizado. Si bien se observaron picos esporádicos en $PM_{2,5}$ que se aproximaron al límite diario, estos no lo superaron y se asociaron a incrementos temporales en las emisiones vehiculares o a condiciones meteorológicas desfavorables. En conjunto, los resultados indican que, en el intervalo de observación, la calidad del aire en el sitio de instalación se mantuvo dentro del marco legal vigente y evidencian que el prototipo es capaz de registrar de manera consistente niveles de material particulado coherentes con el contexto urbano estudiado.

6.3. Comparación con una estación de referencia

Para evaluar las mediciones de la estación desarrollada frente a un equipo de referencia, se utilizaron datos históricos de una estación Libellium perteneciente a la red de monitoreo del Laboratorio de Mecánica y Energía de la FIUNA [4].

Esta estación se encuentra instalada en un entorno urbano exterior similar, opera con transmisión de datos mediante el protocolo RS-485 y registra, entre otras variables, PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_{10} , temperatura, humedad, presión y estado de batería.

Sobre ambos conjuntos de datos se aplicó un flujo de procesamiento homogéneo: ajuste de zona horaria local, control de calidad (eliminación de valores fuera de rangos físicos plausibles), cálculo de promedios horarios y diarios, y construcción de perfiles horarios (medianas y cuartiles) para PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_{10} . A partir de estos perfiles se evaluaron el sesgo diario, el error absoluto medio (MAE) y el error cuadrático medio (RMSE).

Los resultados mostraron que las medianas horarias de $PM_{2.5}$ y PM_{10} de la estación desarrollada se ubican, durante la mayor parte del día, dentro del rango intercuartílico de la estación de referencia, con picos coincidentes en los horarios de mayor tránsito vehicular (mañana y tarde). El sesgo diario fue bajo, las métricas MAE/RMSE se mantuvieron en niveles coherentes con la variabilidad típica de escenarios urbanos sin eventos extremos y la correlación de Spearman entre perfiles horarios resultó alta, evidenciando una fuerte coherencia en el patrón diurno de concentraciones entre ambos sistemas.

Adicionalmente, la estratificación de los datos según humedad relativa ($HR < 85\%$ vs. $HR \geq 85\%$) mostró tendencias concordantes entre la estación desarrollada y la estación Libellium, con disminuciones suaves de las medianas horarias de PM bajo condiciones más húmedas, en línea con procesos de deposición higroscópica y con la respuesta esperada de sensores ópticos. Estos resultados respaldan la consistencia de las mediciones de la estación propuesta y su viabilidad como solución de bajo costo para complementar la red de monitoreo existente basada en comunicación RS-485.

6.4. Variables ambientales

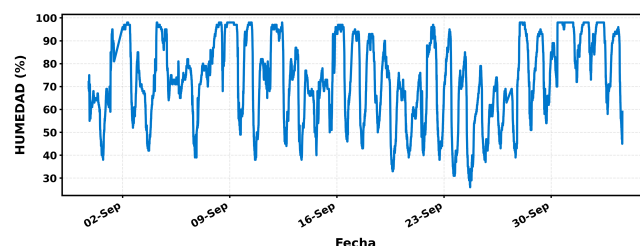


Figura 8: Serie temporal de la humedad relativa medida desde el mes de septiembre a octubre del año 2025.

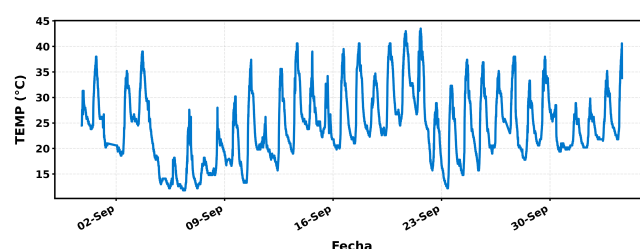


Figura 9: Serie temporal de la temperatura medida desde el mes de septiembre a octubre del año 2025.

Las Figuras 8 y 9 muestran las series temporales de humedad relativa y temperatura registradas por el sensor DHT11 durante el mismo periodo de medición. Estas variables se utilizan como contexto para la interpretación de las concentraciones de material particulado, ya que la humedad y la temperatura influyen tanto en la dinámica del aerosol atmosférico como en la respuesta de los sensores ópticos. La información conjunta de PM, temperatura, humedad y estado de batería sirve de base para los análisis sobre el comportamiento del sistema en condiciones reales de operación.

6.5. Autonomía del sistema

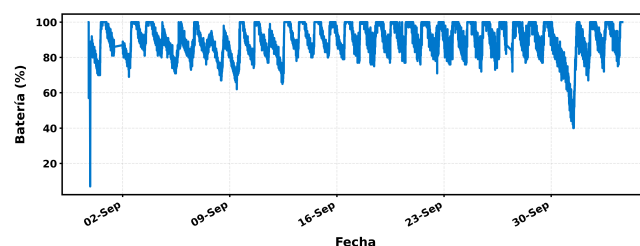


Figura 10: Comportamiento energético del sistema durante el periodo de pruebas, expresado como porcentaje estimado de carga de batería.

La Figura 10 ilustra la evolución temporal del porcentaje estimado de carga de la batería a lo largo de la campaña de mediciones. El perfil observado refleja el régimen de operación solar de la estación, con ciclos diarios de carga asociados a la disponibilidad de radiación y fases de descarga vinculadas al funcionamiento del microcontrolador, de los sensores y del módem de comunicaciones. Durante el periodo analizado, el sistema mantuvo niveles de carga compatibles con una operación continua, lo que confirma la capacidad del dimensionamiento propuesto (panel fotovoltaico de 20 W y banco de baterías Li-ion 18650) para sostener los ciclos de medición, almacenamiento y transmisión definidos en el firmware bajo las condiciones ambientales presentes en el sitio de instalación.

6.6. Visualización de datos

ID	FECHA	HORA	MP1	MP2_5	MP4	MP10	TEMPERATURA	HUMEDAD	BATERIA
14502	2025-10-22	03:47:00	3.39	3.64	3.69	3.71	22.2	70	88
14503	2025-10-22	03:52:00	2.43	2.57	2.57	2.57	21.8	70	86
14504	2025-10-22	03:57:00	7.34	9.94	11.74	12.63	21.8	70	87
14505	1969-12-31	21:00:00	3.42	3.85	4.05	4.15	21.8	70	85
14506	2025-10-22	04:08:00	2.46	3.24	3.75	4.01	21.8	70	87
14507	2025-10-22	04:14:00	1.84	2.34	2.66	2.82	21.8	70	87
14508	2025-10-22	04:19:00	3.05	3.49	3.7	3.81	21.8	70	87
14509	2025-10-22	04:24:00	5.59	7.75	9.26	10.02	21.8	70	87
14510	2025-10-22	04:29:00	2.75	2.91	2.91	2.91	21.8	70	88
14511	2025-10-22	04:35:00	3.66	6.31	8.32	9.32	21.8	70	86
14512	2025-10-22	04:40:00	3.54	3.89	4.01	4.06	21.8	70	86
14513	2025-10-22	04:45:00	2.87	3.12	3.18	3.22	21.4	70	87
14514	2025-10-22	04:51:00	4.95	8.06	10.39	11.55	21.4	69	86
14515	2025-10-22	04:56:00	3.14	4.16	4.85	5.2	21.4	69	85
14516	2025-10-22	05:01:00	5.91	6.25	6.25	6.25	21.5	68	86
14517	2025-10-22	05:06:00	3.86	6.65	8.76	9.81	21.8	66	86
14518	2025-10-22	05:12:00	3.46	6.01	7.94	8.9	21.8	64	87
14519	2025-10-22	05:17:00	3.48	3.68	3.68	3.68	21.8	63	85
14520	2025-10-22	05:22:00	2.04	2.16	2.16	2.16	21.8	64	87
14521	2025-10-22	05:28:00	2.65	2.8	2.8	2.8	21.8	63	86
14522	2025-10-22	05:33:00	2.51	2.66	2.66	2.66	21.8	63	85
14523	2025-10-22	05:43:00	2.3	4.9	6.94	7.96	21.4	64	86

Figura 11: Visualización de datos en el servidor de la DTIC's-FIUNA.

Los registros generados por la estación se envían periódicamente al servidor de la Dirección de Tecnología de la Información y Comunicación (DTIC's) mediante solicitudes HTTP, utilizando una trama compacta que incluye fecha, hora, fracciones de material particulado (PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_4 , PM_{10}), temperatura y estado de batería. En el servidor, estos datos se almacenan en una base de datos, lo que permite su consulta posterior por rango de fechas, variables específicas o identificador de estación.

La Figura 11 muestra la interfaz de visualización implementada sobre dicha base de datos,

donde es posible inspeccionar en tiempo real las últimas mediciones recibidas, verificar la continuidad de la serie temporal y detectar posibles interrupciones en la transmisión. Esta capa de visualización facilitó las tareas de validación y depuración durante la etapa de pruebas, además de constituir el punto de partida para el desarrollo de paneles más avanzados de análisis y monitoreo en futuras extensiones del sistema.

7. Conclusiones

El trabajo presentado permitió diseñar, implementar y validar un prototipo de estación autónoma de bajo costo para la medición de material particulado en las categorías PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_4 y PM_{10} , así como de variables ambientales relevantes como la temperatura y la humedad relativa, incorporando adicionalmente el monitoreo del nivel de batería como variable de estado energético del sistema. Durante una campaña de seis semanas en condiciones reales de operación, la estación demostró ser capaz de medir, registrar y transmitir las variables definidas en intervalos regulares, manteniendo un funcionamiento estable y completamente autónomo incluso bajo escenarios climáticos exigentes. La combinación entre un diseño fotovoltaico sobredimensionado (panel solar, controlador MPPT y banco de baterías Li-ion) y la implementación de estrategias de ahorro energético mediante *deep sleep* en el microcontrolador aseguró la continuidad operativa del sistema.

Las mediciones de material particulado mostraron niveles coherentes con lo esperado para entornos urbanos y una buena concordancia con la estación de referencia, validando el desempeño del sensor óptico Sensirion SPS30 como alternativa confiable y de bajo costo para aplicaciones de monitoreo ambiental. De igual modo, los enlaces de comunicación Wi-Fi y LTE ofrecieron una transmisión estable hacia el servidor remoto, mientras que el almacenamiento en tarjeta SD y el mecanismo de reenvío de datos garantizaron la integridad de la base de datos frente a interrupciones temporales de conectividad. En conjunto, los resultados experimentales confirmaron la viabilidad técnica, energética y operativa del sistema propuesto, y evidenciaron su potencial como herramienta complementaria para ampliar la densidad espacial de las redes oficiales de monitoreo de calidad del aire, así como su utilidad como plataforma modular para iniciativas de educación

ambiental y monitoreo participativo.

8. Trabajos futuros

Se identificaron diversas líneas de trabajo orientadas a optimizar y ampliar las capacidades del sistema. En el plano de hardware y comunicaciones, se propone incorporar un módulo GPS para la georreferenciación automática de las estaciones, así como explorar la integración de tecnologías de comunicación de largo alcance y bajo consumo (como LoRa o LoRaWAN) que permitan desplegar redes de múltiples nodos en zonas con baja cobertura celular. Asimismo, se plantea mejorar el diseño mecánico de la carcasa y los sistemas de sellado, con el fin de incrementar la robustez frente a condiciones meteorológicas adversas y prolongar la vida útil del equipo en campo, complementándolo con funciones de diagnóstico remoto y generación de alertas sobre el estado energético y de comunicación del sistema.

En cuanto al manejo y aprovechamiento de los datos, resultará relevante optimizar la gestión de la memoria SD mediante algoritmos de sincronización y compresión que faciliten la transmisión eficiente de históricos una vez restablecida la conectividad, así como desarrollar una interfaz web o aplicación móvil para la visualización en tiempo real de las mediciones y la difusión de información ambiental a la ciudadanía. Finalmente, se identifica como una línea de trabajo clave la implementación de campañas de calibración más extensas con estaciones de referencia certificadas y la aplicación de modelos de corrección basados en técnicas estadísticas avanzadas o aprendizaje automático, con el objetivo de reducir sesgos y consolidar el uso de estaciones autónomas de bajo costo como complemento robusto de las redes reglamentarias de monitoreo de la calidad del aire.

Referencias

Stephany Andrea Galvis-Vizcaíno, Iccy Rosana León-Barraza, Katherine del Socorro Padilla-Urueta, María Yolanda Pombo-Navas, Marcela Beatriz Rada-Carrillo, Julieta Vera-Brand, and Roberto Carlos Rebolledo-Cobos. Material particulado y trastornos de los sistemas cardiovascular y respiratorio en trabajadores de diferentes áreas: una revisión narrativa. *Revista de la Aso-*

ciación Española de Especialistas en Medicina del Trabajo, 30(3):362–372, 2021.

Xuzheng Ji, Jianying Huang, Lin Teng, Shuhui Li, Xiao Li, Weilong Cai, Zhong Chen, and Yuekun Lai. Advances in particulate matter filtration: Materials, performance, and application. *Green Energy & Environment*, 8(3):673–697, 2023.

Sergio A Pacsi Valdivia. Análisis temporal y espacial de la calidad del aire determinado por material particulado pm10 y pm2, 5 en lima metropolitana. In *Anales Científicos*, volume 77, pages 273–283. Universidad Nacional Agraria La Molina, 2016.

Nilda Carolina Recalde Acosta, Luis Fernando Bernal, Fátima Colmán, Ángel Alberto Rincón Rodríguez, et al. Determinación y análisis de las concentraciones de material particulado medido por una red de monitoreo continuo para la ciudad de asunción. In *XXXVII Congreso Interamericano Virtual de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 2021.

Ariel Fabricio Scagliotti and Guillermo Antonio Jorge. Caracterización de sensor de material particulado de bajo costo. 2021.

Fernanda Carlés, Carolina Recalde, Carlos Sauer, Luis Bernal, and Diego Stalder. Air quality time series forecasting using machine learning algorithms. In *2023 XLIX Latin American Computer Conference (CLEI)*, pages 1–9, 2023.

Jean Claude Pulfer, Nilda Carolina Recalde Acosta, Luis Fernando Bernal, Fernando Barrios, Diego Fermín Palacios, Reinilda Duré, Luis Gavilán, et al. Implementación de una red de monitoreo de material particulado mp2. 5 y mp10 en la ciudad de asunción. 2020.

Sensirion AG. Sensor specification statement: How to understand specifications of sensirion particulate matter sensors. Technical Report Version 1, Sensirion, March 2020. Application Note D1, March 2020.

Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES). Resolución n.º 259/15: Parámetros permisibles de calidad del aire ambiente. <https://www.mades.gov.py/resolucion-n-259-15/>, 2015. Asunción, Paraguay. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en el aire ambiente.