

Medidor atmosférico de material particulado fino

Mg. Luis Alberto Gómez Parada

Carrera de Especialización en Sistemas Embebidos

Director: Ing. Juan Manuel Cruz (FIUBA)

Co-director: Zöe Flemming (UDD)

Jurados:

Jurado 1 (pertenencia)
Jurado 2 (pertenencia)
Jurado 3 (pertenencia)

Ciudad de Santiago, Junio de 2025

Resumen

Este trabajo presenta el diseño e implementación de un instrumento para medir material particulado fino ($MP_{2,5}$) en el aire. Este se diseñó para ser usado en redes de monitoreo de calidad del aire urbanas, con el objetivo de contribuir a la gestión ambiental y la salud pública. La memoria detalla la selección de componentes electrónicos, el diseño y desarrollo del software, y las pruebas de calibración y de campo.

El trabajo aplicó conocimientos de programación en sistemas embebidos, implementación de protocolos de programación, diseño de hardware en PCB y técnicas de testing para minimizar las fallas.

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Juan Manuel Cruz Beaufrere, director de este trabajo, por su invaluable orientación académica, rigurosidad metodológica y constante disposición durante todo el proceso de investigación. Su experiencia y conocimientos fueron fundamentales para estructurar y concretar esta tesis.

A la Dra. Zoe Fleming, codirectora de este trabajo, por su motivación y ejemplo al mostrarme cómo acercar la ciencia de la calidad del aire a las comunidades. Su visión sobre la democratización del conocimiento científico y su aplicación a problemas concretos fueron inspiración constante durante el desarrollo de este trabajo.

Al cuerpo docente de la Carrera de Especialización en Sistemas Embebidos (CESE) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, por la formación técnica de excelencia y el acompañamiento académico brindado. Los conocimientos transmitidos constituyeron la base fundamental para el desarrollo de este sistema de medición.

Un reconocimiento especial al Ing. Claudio Herranz, cuya pasión por la electrónica y capacidad para transmitir conocimientos prácticos representaron mi primera motivación en este campo. Sus enseñanzas trascendieron lo técnico para demostrar cómo la ingeniería puede transformarse en soluciones concretas para problemas reales.

A las autoridades del Centro de Investigación en Tecnologías para la Sociedad (C+) de la Universidad del Desarrollo, por facilitar el acceso a equipamiento especializado e infraestructura necesaria para la validación experimental del sistema desarrollado.

A mis compañeros de la CESE, por el enriquecedor intercambio de experiencias y conocimientos que contribuyeron significativamente a este trabajo.

A todos quienes de distintas formas aportaron a la concreción de esta tesis, mi profundo agradecimiento.

Índice general

Resumen	I
1. Introducción general	1
1.1. El problema de la contaminación atmosférica	1
1.2. Estado del arte en la medición de MP _{2,5}	2
1.2.1. Métodos gravimétricos	2
1.2.2. Métodos ópticos	2
1.2.3. Análisis comparativo de las técnicas de medición	3
1.2.4. Tecnologías de bajo costo	3
1.2.5. Aplicación de técnicas estadísticas en sensores de bajo costo	4
1.3. Motivación inicial	5
1.4. Objetivo y alcances	5
1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Alcance	6
2. Introducción específica	7
2.1. Sensor de partículas SPS30	7
2.2. Características del microcontrolador	8
2.3. Sensor de humedad y temperatura DHT22	9
2.4. Reloj de tiempo real DS3231	9
2.5. Módulo de memoria microSD	10
2.6. Módulo de comunicación ESP8266	10
2.7. Fuente de alimentación S-25-5	10
2.8. Protocolos de comunicación	11
2.9. Herramientas de desarrollo	11
2.10. Requerimientos principales del sistema	12
2.10.1. Requerimientos funcionales críticos	12
2.10.2. Especificaciones técnicas fundamentales	13
2.10.3. Infraestructura y protección	13
2.10.4. Validación y documentación técnica	13
3. Diseño e implementación	15
3.1. Arquitectura general del sistema	15
3.2. Selección y diseño de hardware	16
3.2.1. Sensor de material particulado	16
3.2.2. Microcontrolador	17
3.2.3. Módulos de comunicación y almacenamiento	17
3.2.4. Componentes de soporte	17
3.3. Esquemático y PCB	17
3.4. Arquitectura de software	20
3.4.1. Patrones arquitectónicos fundamentales	20
3.4.2. Integración de las estructuras y flujo de datos	21
3.4.3. Procesos principales	22

Proceso observador	22
Proceso de análisis	22
Procesos de salida	23
3.4.4. Interfaces y comunicaciones	23
3.5. Detalle de los componentes y responsabilidades	23
3.5.1. Proceso observador:	23
3.5.2. Proceso buffer:	24
3.5.3. Proceso de análisis	24
3.5.4. Proceso de despliegue	25
3.5.5. Proceso reactor	25
3.5.6. Proceso de alarma	25
3.5.7. Módulo de energía	25
3.6. Responsabilidades de las interfaces periféricas	26
3.6.1. Sensores MP _{2,5}	26
3.6.2. Reloj de tiempo real RTC	26
3.6.3. Almacenamiento microSD	26
3.6.4. Módulo de conexión inalámbrica	26
3.6.5. Señal de estado LED	27
3.6.6. Gestión de energía	27
3.7. Implementación de protocolos	27
3.7.1. Protocolo UART para sensores de MP _{2,5}	27
3.7.2. Protocolo SPI para almacenamiento	28
3.7.3. UART para comunicación inalámbrica	28
3.7.4. GPIO para control y monitoreo	28
3.7.5. Gestión de errores y recuperación	29
3.7.6. Optimización del rendimiento	29
3.8. Ajuste y calibración de sensores y transmisores	29
3.8.1. Calibración de sensores MP _{2,5}	29
3.8.2. Modelo de corrección	30
3.8.3. Procedimiento de calibración	30
3.8.4. Validación y control de calidad	30
3.8.5. Mantenimiento y recalibración	30
4. Ensayos y resultados	33
4.1. Banco de prueba	33
4.2. Evaluación del software	34
4.2.1. Metodología de pruebas de software	34
4.2.2. Casos de prueba implementados	35
4.2.3. Implementación de las pruebas	36
4.2.4. Resultados y mejoras implementadas	36
4.3. Pruebas de hardware	37
4.3.1. Resultados del diseño electrónico	37
4.3.2. Verificación de componentes	39
Resultados de la caracterización del sistema de alimentación	39
Evaluación de componentes de ruido	39
Rendimiento del sistema de alimentación implementado . .	40
Resultados de pruebas de operación	41
Mediciones de consumo energético	41
Síntesis de resultados	42
4.4. Comunicación de SPS30	42
4.5. Mediciones de MP _{2,5}	45

4.5.1. Completitud de las mediciones	45
4.5.2. Análisis de mediciones temporales del SPS30	45
4.5.3. Análisis de series temporales con alta resolución	47
4.5.4. Análisis de correlación entre sensores redundantes	48
4.5.5. Análisis comparativo con estación de referencia SINCA	49
4.5.6. Caso especial de contaminación	50
5. Conclusiones	53
5.1. Resultados obtenidos	53
5.2. Desarrollo futuro	54
A. Características adicionales del hardware	55
B. Requerimientos	59
C. Protocolos de comunicación	61
C.1. I ² C (<i>Inter-Integrated Circuit</i>)	61
C.2. UART (<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>)	61
C.3. SPI (<i>Serial Peripheral Interface</i>)	61
C.4. 1-Wire	61
Bibliografía	63

Índice de figuras

1.1. Representación del funcionamiento de un aparato de difracción láser.	3
3.1. Esquema de bloques del instrumento de MP _{2,5} .	16
3.2. Esquema general del instrumento de MP _{2,5} con su respectivas conexiones da datos.	18
3.3. PCB del instrumento de MP _{2,5} .	19
3.4. Patrón de arquitectura de capas, obtenido a partir de presentaciones de clases de Ingeniería de Software ¹ .	20
3.5. Patrón arquitectónico: “observar y reaccionar” ² .	21
3.6. Patrón arquitectónico: “segmentación de procesos” ³ .	21
3.7. Arquitectura de bloques de los componentes del software.	22
3.8. Detalle con el patrón de segmentación del software.	24
3.9. Secuencia de comunicación UART con sensor SPS30.	28
4.1. Resultados de la ejecución de las pruebas unitarias mediante Ceedling.	36
4.2. Detalle de una sección de la PCB donde se observan los anchos de pistas diferenciados para señal (0,25 mm) y potencia (0,5 mm), márgenes mínimos de separación y zonas de exclusión implementadas para los componentes de encapsulado predefinido.	38
4.3. Visualización de la PCB donde se aprecian los planos de tierra para reducción de interferencias (60 % de cobertura en capa superior), alivios térmicos para componentes de potencia, y vías para estabilización de impedancia.	38
4.4. Registro de componentes de ruido en la fuente convencional con transitorios de alta frecuencia (138 kHz) y amplitudes de aproximadamente 78 mV pico-pico.	39
4.5. Módulo UPS LX-28UPS integrado en el sistema de alimentación del instrumento.	40
4.6. Medición de componentes AC del sistema implementado: línea de 5 V (amarilla, superior) con ripple de 20 mV pico-pico; línea de 3,3 V (azul, inferior) con ripple inferior a 10 mV pico-pico.	41
4.7. Captura mediante osciloscopio FNIRSI de la transmisión UART entre el microcontrolador STM32F429 y el sensor SPS30. La traza superior (cyan) muestra la señal TX desde el microcontrolador, mientras que la inferior (verde) corresponde a la respuesta RX desde el sensor. Ambas se opera a 115 200 Bd.	44
4.8. Decodificación mediante analizador lógico de la secuencia de comandos y respuestas en la comunicación UART entre la STM32F429 y un sensor SPS30.	44

4.9. Evolución temporal de concentraciones promedio horarias para cuatro fracciones de material particulado medidas por el instrumento entre las 23:00 y 08:00 horas del 7 de mayo de 2025. Las áreas sombreadas representan los rangos de variación para cada fracción.	46
4.10. Serie temporal de MP _{2,5} de los 3 sensores SPS30. Los datos se encuentran promediados en intervalos de 10 minutos. En negro se muestra el promedio general. Los puntos de colores indican los valores promedio de cada uno de los sensores SPS30 y las áreas representan las desviaciones estandar de cada uno de los promedios.	47
4.11. Matrices de correlación entre los tres sensores SPS30 para las fracciones MP _{1,0} , MP _{2,5} , MP _{4,0} y MP ₁₀ . Los valores representan coeficientes de correlación de Pearson calculados a partir de promedios de 10 min (n = 144 por sensor).	48
4.12. Comparación entre las mediciones de MP _{2,5} de la estación SINCA (línea verde) y el sistema desarrollado (diagramas de caja) entre las 23:00 y 08:00 horas. Los parámetros estadísticos en la esquina superior izquierda indican: correlación ($r = 0,742$, $p = 0,0349$), RMSE (15,30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), MAE (14,80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y tamaño muestral ($n = 8$).	49
4.13. Evolución temporal de MP _{2,5} durante el episodio crítico inducido. Se representan los tres sensores individuales (líneas de colores), el promedio del sistema (línea negra) y la variabilidad (área sombreada). La gráfica muestra el ciclo completo: concentración basal, incremento abrupto y disipación exponencial.	51
A.1. Placa de desarrollo utilizada para el trabajo, con sus principales puertos.	56

Índice de tablas

1.1. Valores de correlación (r^2) en sensores de bajo costo para la medición de diferentes tamaños de partículas.	4
1.2. Desempeño de sensores de bajo costo para MP _{2,5} con corrección estadística.	5
2.1. Especificaciones técnicas del sensor SPS30.	8
2.2. Características del sensor de material particulado.	8
2.3. Características principales del microcontrolador STM32F429ZI.	9
2.4. Especificaciones técnicas del RTC DS3231.	10
2.5. Especificaciones principales de la fuente S-25-5.	11
2.6. Características generales de protocolos de comunicación serial.	11
2.7. Herramientas de desarrollo utilizadas en el trabajo.	11
2.8. Requerimientos del instrumento de medición de MP _{2,5}	12
3.1. Comparación de sensores de material particulado	16
3.2. Matriz de decisión para selección del microcontrolador.	17
3.3. Comparación de módulos de comunicación inalámbrica.	17
3.4. Lista de materiales principales del instrumento	19
3.5. Ejemplo de estructura de datos.	24
4.1. Resumen de los casos de prueba aplicados al subsistema de análisis.	35
4.2. Resultados de las pruebas de operación continua.	41
4.3. Consumo energético por modo de operación.	42
4.4. Estadísticas de completitud para datos de MP _{2,5}	45
4.5. Estadísticas de MP _{2,5} durante el episodio controlado de alta contaminación (18:00-23:59).	50
A.1. Características eléctricas del SPS30 [23].	55
A.2. Fuentes de alimentación externas del STM32F429ZI.	55
A.3. Especificaciones técnicas del sensor DHT22.	57
A.4. Especificaciones del módulo microSD.	57
A.5. Características principales del módulo ESP8266.	57
A.6. Instrumentación y herramientas de prueba.	57
A.7. Especificaciones de los instrumentos empleados en el banco de pruebas.	58
B.1. Niveles de priorización de requisitos.	59
B.2. Reglas de diseño para la fabricación de PCB.	59
B.3. Clases de redes definidas para el diseño de PCB.	60

A Claudia Torres, mi compañera de vida, por su amor incondicional, paciencia infinita y apoyo constante durante este proceso. Su fortaleza y comprensión fueron pilares fundamentales para la culminación de este trabajo. A mis hijos Edmundo y Camilo, fuentes inagotables de inspiración y alegría. Que este esfuerzo les muestre que con perseverancia y pasión los objetivos se alcanzan. A mi madre, por sembrar en mí la semilla de la curiosidad y el valor del conocimiento.

Capítulo 1

Introducción general

Este capítulo presenta una revisión sobre la contaminación atmosférica por material particulado fino ($MP_{2,5}$), su impacto en la salud pública y el monitoreo. Se exponen las tecnologías para la medición de este contaminante. Por último, se presentan los objetivos y alcances del trabajo.

1.1. El problema de la contaminación atmosférica

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), la contaminación atmosférica representa uno de los mayores problemas ambientales en zonas urbanas e industriales y afecta a más del 90 % de la población mundial [1]. En la actualidad, se considera como una de las principales causas de muertes prematuros: aproximadamente 6,7 millones de fallecidos en el 2019 [2]. Entre los contaminantes atmosféricos de mayor impacto se encuentra el $MP_{2,5}$.

El $MP_{2,5}$, se define como las partículas atmosféricas, sólidas o líquidas, con un diámetro aerodinámico inferior a $2,5 \mu\text{m}$. Estas tienen la capacidad de penetrar los sistemas respiratorio y circulatorio humano [3, 4]. La evidencia epidemiológica muestra una correlación directa entre la exposición prolongada al contaminante y el aumento en la incidencia de enfermedades cardiovasculares y respiratorias [5]. Por consiguiente, el monitoreo preciso y continuo de las concentraciones de material particulado fino en el aire, constituye una herramienta fundamental para la gestión ambiental urbana, el desarrollo e implementación de políticas públicas efectivas y la protección de la salud de la población [6].

La incertidumbre en los niveles de exposición humana al $MP_{2,5}$ persiste como un problema significativo en numerosas áreas urbanas, particularmente en regiones con recursos limitados. La situación es crítica: solo 24 de 234 países cuentan con una densidad mínima de tres monitores del contaminante por millón de habitantes, mientras que 141 países carecen por completo de monitoreo regular [7]. Un factor crítico adicional es la distancia promedio entre la población y el monitor más cercano, que actualmente alcanza los 220 kilómetros, una separación excesiva que impide realizar evaluaciones precisas de exposición y compromete la calidad del monitoreo ambiental.

Ante este panorama, uno de los principales desafíos que enfrentan las agencias ambientales nacionales y locales es el desarrollo e implementación de redes de monitoreo de $MP_{2,5}$ más extensas y densas. Estas redes deben integrar múltiples fuentes de datos, lo que incluye: redes oficiales con estándares EPA (*Environmental*

Protection Agency), monitores de bajo costo, sensores satelitales y modelos atmosféricos y estadísticos. La implementación de estos sistemas integrados de monitoreo mejora la precisión en la medición de MP_{2,5} e identificar zonas críticas de alta contaminación. Estos resultados son fundamentales para evaluar, mitigar y prevenir los problemas de salud pública y calidad de vida asociados a la contaminación del aire.

1.2. Estado del arte en la medición de MP_{2,5}

Los métodos de cuantificación del MP_{2,5} se clasifican fundamentalmente en dos categorías, según el principio físico que emplean para su determinación [8]. A continuación, se listan estas clasificaciones.

1.2.1. Métodos gravimétricos

Los métodos gravimétricos, considerados como referencia por la EPA [9], se basan en la captura física y posterior medición de la masa material particulado. Estos sistemas emplean un cabezal de corte selectivo para MP_{2,5} y un filtro de captura. La masa de partículas retenidas se determina, generalmente, mediante balanzas analíticas en un laboratorio.

Uno de los métodos gravimétricos comunes son los muestreadores de alto volumen (HiVol), que operan con flujos de aire entre 1,13 y 1,70 m³/min, lo que permite recolectar muestras en períodos de 24 horas [10].

Otro de los métodos usados en la actualidad son las microbalanzas oscilantes (TEOM). Esta tecnología es un avance significativo al proporcionar información en tiempo real de las concentraciones del material particulado mediante un método gravimétrico [11]. Estos emplean la frecuencia de oscilación de un elemento cónico que varía según la masa de partículas depositadas [12].

1.2.2. Métodos ópticos

Los métodos ópticos han ganado popularidad por su capacidad de proporcionar datos en tiempo real y requerimientos de mantención menores. Estas técnicas se fundamentan en principios de interacción luz-partícula para determinar la concentración de MP_{2,5}. Por ejemplo, el medidor de atenuación beta (β) mide la reducción en la intensidad de la radiación β al atravesar un filtro con partículas depositadas [13]. La resolución típica máxima de estos equipos es horaria. Este método en la actualidad se considera como EPA equivalente y es ocupado ampliamente en redes institucionales de medición de calidad del aire [14].

Otros métodos ópticos se basan en la dispersión de luz infrarroja (IR) al atravesar una muestra de aire que contiene material particulado [15]. La medición de la luz dispersada permite estimar la concentración de MP_{2,5}, así como su tamaño, tal como se ve en la figura 1.1. La nefelometría láser es otra técnica que mide la luz dispersada por las partículas en suspensión en ángulos distintos al incidente, lo que permite una mejor caracterización del tamaño y concentración. En la actualidad, estos métodos no están considerados como de referencia EPA o equivalente, lo que limita legalmente su aplicación en redes oficiales y como una solución analítica de monitoreo de la calidad del aire.

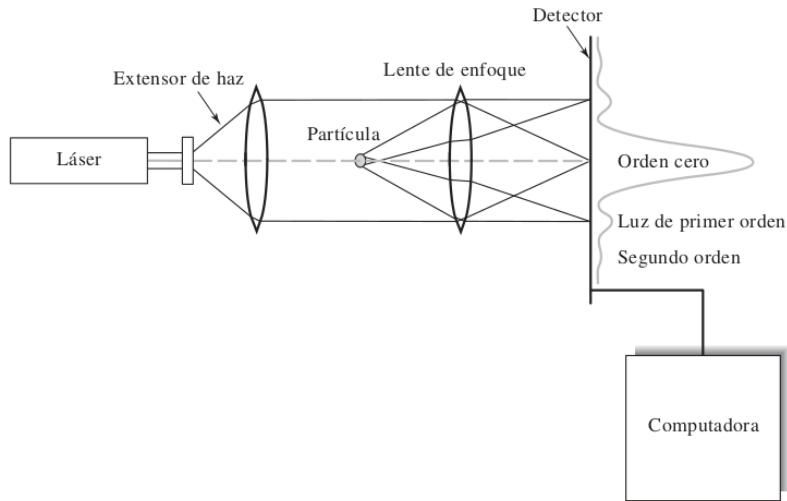


FIGURA 1.1. Representación del funcionamiento de un aparato de difracción láser.

1.2.3. Análisis comparativo de las técnicas de medición

La selección de métodos para el monitoreo de MP_{2,5} requiere una evaluación de las ventajas y limitaciones de cada tecnología. Los métodos gravimétricos, considerados de referencia, se destacan por su alta precisión y trazabilidad [16]. Sin embargo, presentan desventajas operativas: requieren mantenimiento intensivo, tienen costos elevados de operación y proporcionan datos con baja resolución temporal, lo que limita su capacidad para detectar variaciones a corto plazo en las concentraciones de MP_{2,5}.

Por otra parte, los métodos ópticos ofrecen ventajas operativas considerables, como el monitoreo continuo y la capacidad de detectar eventos de contaminación en tiempo real [17]. No obstante, estos sistemas son más susceptibles a interferencias ambientales, particularmente por variaciones en la humedad relativa y la composición química de las partículas. En este contexto, los sensores ópticos de bajo costo han ganado especial atención por su accesibilidad y potencial para aumentar la cobertura espacial del monitoreo [18]. Sin embargo, estos dispositivos aún requieren desarrollos para alcanzar los niveles de precisión y exactitud de los métodos de referencia.

La tendencia actual en el diseño de redes de monitoreo apunta hacia la implementación de sistemas integrados que combinan múltiples tecnologías. Este enfoque permite aprovechar las fortalezas complementarias de cada método: la precisión de los sistemas gravimétricos y la alta resolución temporal de los métodos ópticos. Para optimizar el desempeño de los sensores de bajo costo dentro de estos sistemas integrados, es fundamental aplicar procedimientos específicos de calibración y corrección, los que se describen en las siguientes subsecciones.

1.2.4. Tecnologías de bajo costo

Los sensores de bajo costo existentes en el mercado operan bajo el principio de difracción de luz láser. Cuando una partícula en suspensión intercepta el haz láser, se produce una dispersión angular de la luz proporcional al tamaño de la partícula. El patrón de dispersión óptica resultante es captado por un detector.

Esta tecnología presenta ventajas sobre los métodos gravimétricos tradicionales, como menor costo y mayor frecuencia de muestreo. Sin embargo, es importante reconocer sus limitaciones, principalmente una menor precisión y exactitud en comparación con las técnicas estándar. Cabe destacar que estos instrumentos ópticos aún no han recibido la certificación de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) como métodos analíticos estándar para la cuantificación de MP_{2,5}.

Estudios realizados a sensores comerciales de bajo costo [19], a modelos que se muestran en la tabla 1.1, mostraron limitaciones en su capacidad para detectar partículas dentro de los rangos de tamaño superiores a los 2,5 µm de radio aerodinámico. En particular se observa que se afecta su precisión en ambientes donde los tamaños de partículas varían considerablemente.

TABLA 1.1. Valores de correlación (r^2) en sensores de bajo costo para la medición de diferentes tamaños de partículas.

Modelo Sensor	MP1 (r^2)	MP _{2,5} (r^2)	MP10 (r^2)
Plantower PMS5003	0,88	0,82	0,65
Nova SDS011	0,85	0,80	0,62
Sensirion SPS30	0,91	0,87	0,60
Sharp GP2Y1010AU0F	0,78	0,70	0,50
Omron B5W	0,80	0,75	0,55

Dentro de las principales conclusiones del estudio se encontraron:

- Limitaciones en la selectividad de tamaño: los sensores de bajo costo no operan correctamente en los rangos de tamaño declarados por los fabricantes. Esto afecta su precisión en ambientes donde los tamaños de partículas varían considerablemente.
- Variabilidad entre unidades del mismo modelo: se observan diferencias de concentración en la respuesta entre distintas unidades del mismo modelo. Esto implica que cada sensor debe calibrarse individualmente para obtener datos más precisos.
- Recomendaciones de corrección: los resultados sugieren que la precisión de estos sensores puede mejorar con la implementación de ajustes basados en condiciones ambientales locales, como la humedad y el tamaño de las partículas.
- Uso potencial y limitaciones en redes de monitoreo: aunque estos sensores tienen un costo accesible y son útiles para extender la cobertura de monitoreo, sus limitaciones indican que su uso debe estar acompañado de modelos de corrección para evitar errores en la interpretación de los datos.

1.2.5. Aplicación de técnicas estadísticas en sensores de bajo costo

Las investigaciones recientes han mostrado que los dispositivos ópticos de bajo costo para la medición de MP_{2,5} requieren ajustes específicos para alcanzar niveles de precisión comparables a los métodos de referencia. En Owczarek et al. (2023) [20] se han implementado calibraciones basadas en modelos de corrección lineal y de segundo grado. Su investigación destaca la importancia de incorporar parámetros ambientales adicionales como velocidad del viento, temperatura

y humedad, cuya inclusión mejora la precisión de las mediciones. Esto permite que estos dispositivos generen resultados equiparables a los métodos estándar.

En otra investigación, basada en una red de sensores de bajo costo [21], se aplicó un enfoque estadístico para optimizar las mediciones de MP_{2,5}. Los modelos empleados fueron regresión lineal múltiple y bosques aleatorios (*random forests*). Adicionalmente, el estudio integró variables ambientales como temperatura y humedad, junto con parámetros espaciales como la proximidad a carreteras. Los resultados muestran una mejora en la precisión de los sensores tras aplicar la corrección estadística, como se evidencia en la tabla 1.2.

TABLA 1.2. Desempeño de sensores de bajo costo para MP_{2,5} con corrección estadística.

Métrica	Original	Random Forest ^a	Regresión Lineal ^b
RMSE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	5,5	2,9	3,1
R ²	0,55	0,75	0,78

^a(largo plazo)

^b(tiempo real)

En resumen, estos resultados evidencian que la aplicación de técnicas estadísticas puede mejorar la exactitud y precisión de las mediciones realizadas con sensores de bajo costo, lo que acerca su desempeño al de los instrumentos de referencia.

1.3. Motivación inicial

Este trabajo surge de la convergencia entre la experiencia del autor en química atmosférica y la necesidad de desarrollar soluciones tecnológicas accesibles para el monitoreo de la calidad del aire en zonas urbanas. La disparidad en las capacidades de monitoreo atmosférico entre países desarrollados y en desarrollo evidencia una brecha tecnológica, donde las poblaciones más vulnerables carecen de información básica sobre su exposición a contaminantes.

La motivación fundamental de esta investigación se centra en el desarrollo de instrumentación de bajo costo pero con alta confiabilidad para el monitoreo del MP_{2,5}. Este objetivo busca democratizar el acceso a datos sobre la calidad del aire mediante la implementación de tecnologías en sistemas embebidos y sensores de bajo costo. Este enfoque técnico-científico aborda un desafío de ingeniería y contribuye a la equidad en salud pública y justicia ambiental [22].

1.4. Objetivo y alcances

En esta sección se presentan el objetivo y alcance del trabajo.

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar e implementar un sistema de medición de MP_{2,5} que supere las limitaciones de precisión y exactitud de los sensores ópticos de bajo costo convencionales, al incorporar capacidades de transmisión remota de datos y correcciones estadísticas automatizadas.

1.4.2. Alcance

Este trabajo buscó proporcionar una solución tecnológica que combine accesibilidad económica con confiabilidad técnica, diseñada específicamente para:

- Complementar las redes de monitoreo de calidad del aire gestionadas por autoridades ambientales y gobiernos locales.
- Aumentar la densidad espacial de puntos de medición en zonas urbanas.
- Mejorar la disponibilidad de datos sobre calidad del aire para la toma de decisiones en salud pública.
- Ofrecer una alternativa viable para regiones con recursos limitados que requieren expandir sus capacidades de monitoreo ambiental.

Capítulo 2

Introducción específica

Este capítulo presenta los componentes principales y herramientas utilizadas en el desarrollo del sistema de medición de MP_{2,5}. Se describen las características técnicas del sensor óptico SPS30, el microcontrolador, los sensores complementarios de humedad y temperatura, el módulo de comunicación inalámbrica y la fuente de alimentación. De forma adicional, se detallan los protocolos de comunicación implementados y las herramientas de desarrollo empleadas en la implementación del instrumento. Por último, el capítulo finaliza con una descripción de los requerimientos del instrumento.

2.1. Sensor de partículas SPS30

El sensor de material particulado SPS30 utiliza el principio de dispersión láser con una longitud de onda de 660 nm, Clase 1 para la detección de partículas [23]. Las especificaciones técnicas establecen un rango de medición de concentración másica de 0 a 1 000 µg/m³ en cuatro fracciones de tamaños, como se ve en la tabla 2.1.

El sensor tiene una calibración de fábrica con dos instrumentos de referencia: el fotómetro TSI DustTrak™ DRX 8533 para mediciones gravimétricas de PM_{2,5} y el espectrómetro óptico TSI OPS 3330 para distribución numérica de partículas en el rango de PM_{2,5}.

Las especificaciones eléctricas indican un consumo normal de (55 ± 10) mA en modo de medición y 50 µA en modo de reposo. Más detalles se puede ver en la tabla A.1 del apéndice A. El rango de operación de temperaturas es de -10 a 40 °C y humedad relativa de 0 a 80 % HR, como se ve en la tabla 2.2. El sistema incluye un mecanismo de autolimpieza del ventilador con un ciclo de 168 h. Incorpora un filtro HEPA para prevenir la degradación del rendimiento por acumulación de partículas en el sistema [24].

La comunicación se establece mediante dos interfaces: UART (para conexiones superiores a 20 cm) e I²C con velocidad máxima de 100 kbit/s. Las dimensiones físicas del sensor son 41 mm × 41 mm × 12 mm. Los estudios de desempeño indican que el sensor no es apto para la cuantificación de MP₁₀ [19].

TABLA 2.1. Especificaciones técnicas del sensor SPS30.

Fracción	Rango de tamaño	Precisión
PM _{1,0}	0,3 a 1,0 µm	±[5 µg/m ³ + 5 % (0–100 µg/m ³)] ±[10 % (100–1 000 µg/m ³)]
MP _{2,5}	0,3 a 2,5 µm	
PM _{4,0}	0,3 a 4,0 µm	±[7 µg/m ³ + 7 % (0–100 µg/m ³)] ±[25 % (100 a 1 000 µg/m ³)]
PM ₁₀	0,3 a 10,0 µm	

TABLA 2.2. Características del sensor de material particulado.

Característica	Valor
Rango de medición de MP _{2,5}	0,5 a 1 000 µg/m ³
Precisión de MP _{2,5}	±5 µg/m ³ + 5 % m.v.
Tiempo de respuesta	1 s
Flujo de aire	2 L/min
Consumo máximo de energía	80 mA
Tensión de alimentación	4,5 a 5,5 V
Interfaz de comunicación	I ² C, UART
Rango de temperatura de funcionamiento	-20 a 70 °C
Rango de humedad de funcionamiento	0 a 80 % RH
Dimensiones	41 mm × 41 mm × 12 mm
Peso	26 g

2.2. Características del microcontrolador

El microcontrolador STM32F429ZI cuenta con características para aplicaciones en instrumentación [25, 26]. El procesador ARM Cortex-M4, con unidad de punto flotante (FPU), ejecuta operaciones matemáticas con decimales [27]. La frecuencia de operación de 180 MHz permite el muestreo y procesamiento en tiempo cuasireal. En la tabla 2.3 se muestran las características del microcontrolador.

La memoria del sistema incluye 2 MB de Flash y 256 kB de SRAM. Esto permite la implementación de buffers circulares para el almacenamiento temporal de datos y la ejecución de algoritmos de corrección estadística [28]. Por ejemplo, si los datos del sensor requieren aproximadamente 32 B por muestra, esto permite el almacenamiento aproximado de hasta 8 000 muestras en memoria RAM.

Los periféricos de comunicación del microcontrolador soportan interfaces como UART, SPI e I²C, comunes en sensores para aplicaciones de internet de las cosas o IoT. El controlador DMA asociado al I²C permite la transferencia de datos sin intervención del CPU, lo que optimiza el rendimiento del sistema. Los temporizadores de 16 bits facilitan la generación de bases de tiempo para el muestreo periódico [29].

El microcontrolador incorpora un conversor analógico-digital de 12 bits con hasta 24 canales. Esto permite la medición de variables ambientales adicionales, como datos de temperatura y humedad relativa. La velocidad de conversión de 2,4 MHz habilita el muestreo quasi simultáneo de múltiples variables. Las principales características eléctricas de la placa se pueden observar en la tabla A.2, del apéndice A.

TABLA 2.3. Características principales del microcontrolador STM32F429ZI.

Característica	Especificación
Arquitectura	ARM Cortex-M4 con FPU
Frecuencia máxima	180 MHz
Memoria flash	2 MB
SRAM	256 kB
Interfaces I ² C	3
Resolución ADC	12 bits
Velocidad ADC	2,4 MHz

2.3. Sensor de humedad y temperatura DHT22

El módulo DHT22 (AM2302) integra un sensor capacitivo de humedad relativa y un termistor NTC para la temperatura. El sensor utiliza un protocolo propietario de un solo cable para la transmisión de datos digitales. Las especificaciones de medición incluyen un rango de humedad de 0 a 100 % con precisión de ± 2 y un rango de temperatura de -40°C a 80°C con precisión de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ [30], como se muestra en la tabla A.3 del apéndice A.

Los parámetros operativos comprenden una tensión de alimentación entre 3,3 V y 5,5 V, y un consumo típico de 2,5 mA durante la medición. El sensor presenta una tasa máxima de muestreo de 0,5 Hz, con tiempos de respuesta de 2 s para humedad y 10 s para temperatura [31].

La integración del DHT22 en el monitor de MP_{2,5} permite implementar correcciones por factores ambientales en las mediciones del sensor óptico [32]. Investigaciones previas demuestran que la humedad relativa afecta la precisión en la cuantificación de material particulado [19].

2.4. Reloj de tiempo real DS3231

El módulo DS3231 es un reloj de tiempo real (RTC) con oscilador compensado por temperatura (TCXO) y cristal integrado. El dispositivo incorpora un oscilador de cristal MEMS que elimina la necesidad de componentes externos de temporización. La comunicación se realiza mediante el protocolo I²C con una frecuencia máxima de 400 kHz. Los antecedentes son presentados en la tabla 2.4 [33].

El RTC mantiene el registro de segundos, minutos, horas, día, fecha, mes y año, con compensación automática para meses con menos de 31 días y años bisiestos hasta 2100. La precisión temporal es de ± 2 ppm en el rango de 0°C a 40°C , y $\pm 3,5$ ppm de -40°C a 85°C . El dispositivo incluye un sensor de temperatura digital con precisión de $\pm 3^{\circ}\text{C}$.

La integración del DS3231 en el monitor de MP_{2,5} permite el registro temporal de las mediciones y la sincronización de los ciclos de muestreo. El dispositivo opera con una tensión entre 2,3 V y 5,5 V, e incorpora una entrada para batería de respaldo que mantiene la temporización cuando se interrumpe la alimentación principal. El consumo típico es de 200 μA en operación normal y 0,84 μA en modo respaldo.

TABLA 2.4. Especificaciones técnicas del RTC DS3231.

Parámetro	Valor
Tensión de operación	2,3 V - 5,5 V
Tensión de batería de respaldo	2,3 V - 5,5 V
Corriente activa típica	200 µA @ 3,3 V
Corriente en respaldo	0,84 µA @ 3,0 V
Precisión 0 °C a 40 °C	±2 ppm
Precisión -40 °C a 85 °C	±3,5 ppm
Interfaz	I ² C
Frecuencia I ² C	400 kHz máximo
Precisión sensor temperatura	±3 °C
Tiempo conversión temperatura	125 ms típico

2.5. Módulo de memoria microSD

El módulo de almacenamiento emplea una tarjeta microSD con interfaz SPI. Opera a 42 MHz para el registro de datos bajo sistema de archivos FAT32. La implementación incluye un buffer de escritura de 512 B. Opera con tensiones entre 3,3 a 5 V y su consumo es de 200 mA durante la escritura, como se muestra en la tabla A.4 en el apéndice A. El sistema permite almacenar aproximadamente 1 millón de registros por gigabyte, donde cada registro tiene una tamaño de 32 B. Permite contener datos en formato ASCII como registros de MP_{2,5}, temperatura y marca temporal, entre otros [34, 35].

2.6. Módulo de comunicación ESP8266

El ESP8266MOD es un módulo Wi-Fi de bajo costo que integra un microcontrolador con el protocolo TCP/IP completa. Este módulo se utiliza en la transmisión de datos en instrumentos de monitoreo ambiental [36, 37], como se muestra en la tabla A.5 del apéndice A. La comunicación con el microcontrolador principal STM32 se realiza mediante interfaz UART a una velocidad típica de 115 200 bps. El módulo opera en la banda de 2,4 GHz con soporte para el protocolo IEEE 802.11 b/g/n [38, 39].

2.7. Fuente de alimentación S-25-5

Es una fuente conmutada industrial de salida única. Proporciona una conversión de corriente alterna (CA) a corriente continua (CC). Esta fuente permite la alimentación del sistema y es empleada en aplicaciones industriales y de instrumentación. Las principales características de la fuente se presentan en la tabla 2.5 [40].

TABLA 2.5. Especificaciones principales de la fuente S-25-5.

Característica	Especificación
Potencia nominal	25 W
Voltaje de salida	5 V CC
Corriente nominal	5 A
Rango de voltaje de entrada	85 a 264 V CA
Rango de frecuencia	47 a 63 Hz
Eficiencia típica	72 % a 115 V CA
Temperatura de operación	-10 a 60 °C
Dimensiones	99 mm × 97 mm × 36 mm

2.8. Protocolos de comunicación

Los protocolos de comunicación serial constituyen un elemento fundamental para la comunicación de datos entre los distintos módulos del sistema. Permiten la comunicación de diferentes componentes electrónicos. En la tabla 2.6 describen los principales protocolos utilizados y en el apéndice C se describen las principales características de cada uno de ellos.

TABLA 2.6. Características generales de protocolos de comunicación serial.

Característica	I ² C	UART	SPI	1-Wire
Tipo de sincronización	Síncrono	Asíncrono	Síncrono	Asíncrono
Número de líneas	2	2	4	1
Velocidad típica	100 a 400 kHz	9 600 a 115 200 Bd	1 a 50 MHz	15,4 kbit/s
Tipo de comunicación	Half-duplex	Full-duplex	Full-duplex	Half-duplex
Topología	Multi-esclavo	Punto a punto	Multi-esclavo*	Multi-esclavo
Direccionamiento	7 a 10 bit	No requiere	Por línea CS	64 bit ROM

* Requiere una línea CS adicional por cada esclavo

2.9. Herramientas de desarrollo

En la tabla 2.7 se indican las principales herramientas de desarrollo utilizadas.

TABLA 2.7. Herramientas de desarrollo utilizadas en el trabajo.

Herramienta	Versión	Empresa	Aplicación
STM32CubeIDE	1.13.0	ST Microelectronics	Entorno integrado para desarrollo de firmware
KiCad	8.0	KiCad Project	Diseño de esquemáticos y PCB
GCC ARM	10.3	ARM & GNU Project	Compilador C/C++ para arquitectura ARM
Git	2.42.0	Software Freedom Conservancy	Sistema de control de versiones distribuido

2.10. Requerimientos principales del sistema

Los requerimientos fundamentales que determinaron la funcionalidad y el desempeño del instrumento se describen en la tabla 2.8, mientras que en la tabla B.1 se muestran los criterios de priorización que fueron empleados.

TABLA 2.8. Requerimientos del instrumento de medición de MP_{2,5}.

Categoría	Descripción	ID	Prioridad
Funcionales	Incorporación de tres sensores MP _{2,5} mínimo.	RF-a	P1
	Almacenamiento local de datos con opción de consulta.	RF-b	P1
	Cálculo automático de parámetros estadísticos.	RF-c	P2
	Comunicación flexible (cableada/inalámbrica).	RF-d	P3
	Identificación única de instrumentos.	RF-e	P2
	Estampa temporal (RTC) en mediciones.	RF-f	P1
	Monitoreo remoto de estado operativo.	RF-g	P4
	Cálculo de promedios temporales (1 h, 24 h).	RF-h	P2
Hardware	Placa compatible con comunicación inalámbrica.	RH-a	P3
	Gestión de múltiples sensores y RTC.	RH-b	P1
	Comunicación entre sensores y placa.	RH-c	P1
	Rango operativo 0 a 500 µg/m ³ (±10 %).	RH-d	P2
Software	Variables tipo punto flotante.	RS-a	P1
	Protocolos de comunicación con servidor.	RS-b	P4
	Sistema de alarmas y notificaciones.	RS-c	P3
Interfaz	Acceso a datos históricos.	RI-a	P2
	Alertas por umbrales predefinidos.	RI-b	P4
	Modo ahorro de energía.	RI-c	P3
Alimentación	Compatibilidad red 220 V.	RA-a	P1
	Alimentación componentes anexos 220 V.	RA-b	P2
	Batería de respaldo 2 000 mA h.	RA-c	P4
Gabinete	Gabinete plástico con accesos.	RG-a	P1
	Protección IP65 o superior.	RG-b	P2
	Sistema de montaje versátil.	RG-c	P3
Evaluación	Pruebas en diversas condiciones atmosféricas.	RE-a	P2
	Cobertura inalámbrica mínima 0,2 km.	RE-b	P4
	Calibración con sensores certificados.	RE-c	P1
Documentación	Manual de características y mantenimiento.	RD-a	P1
	Tabla de fallas y soluciones.	RD-b	P3
	Esquemáticos de componentes y conexiones.	RD-c	P1

2.10.1. Requerimientos funcionales críticos

Los requerimientos funcionales con “prioridad obligatoria” definieron las características operativas esenciales del sistema. La implementación requirió tres sensores de MP_{2,5} (RF-a) para establecer un esquema de medición redundante que incrementara la confiabilidad y permitiera la validación cruzada de datos. El sistema de almacenamiento local (RF-b) se especificó para preservar la información ante eventuales fallos en la comunicación o pérdida de conectividad. La integración del reloj de tiempo real (RF-f) fue necesaria para asegurar la precisión en el registro temporal de las mediciones.

Los requerimientos de “prioridad importante” (P2) complementaron funcionalidades como: el procesamiento estadístico automático (RF-c), necesario para mejorar la precisión de los datos; y la identificación única de instrumentos (RF-e), para permitir la gestión del dato en redes de monitoreo.

2.10.2. Especificaciones técnicas fundamentales

En el ámbito del hardware, se establecieron dos requerimientos P1: la capacidad de gestionar múltiples sensores (RH-b) y la implementación del protocolo de comunicación (RH-c). El rango operativo de medición requirió un intervalo entre 0 a 500 µg/m³ con una precisión de ±10 % (RH-d). Estas especificaciones técnicas aseguraron la obtención de mediciones confiables en condiciones típicas de contaminación urbana.

En el ámbito del software, la implementación de variables en punto flotante (RS-a) constituyó un requerimiento obligatorio, necesario para el procesamiento y presentación de los datos entregados por el sensor.

2.10.3. Infraestructura y protección

Los requerimientos de infraestructura establecieron las condiciones necesarias para la operación continua y segura del instrumento. La compatibilidad con la red eléctrica de 220 V (RA-a) se especificó para asegurar el funcionamiento en instalaciones estándar. El diseño requirió un gabinete de protección (RG-a), con certificación IP65 o superior (RG-b), para preservar la integridad del equipo ante condiciones ambientales adversas, como exposición a lluvia y polvo.

2.10.4. Validación y documentación técnica

La calibración mediante sensores certificados (RE-c) constituyó un requisito fundamental para asegurar la calidad. El trabajo requirió documentación técnica, que incluyó el manual de operación y mantenimiento (RD-a) y los esquemáticos de conexiones (RD-c). Esta documentación se estableció como requisito para permitir la correcta instalación, operación y mantenimiento del sistema.

Capítulo 3

Diseño e implementación

Este capítulo presenta el diseño e implementación del sistema de medición de MP_{2,5}. La arquitectura desarrollada integró componentes de hardware y software para cumplir los requerimientos técnicos establecidos. El diseño incorporó cinco subsistemas principales: adquisición de datos mediante sensores redundantes, sistema de alimentación con respaldo, unidad de procesamiento basada en microcontrolador, almacenamiento local de datos y comunicación inalámbrica.

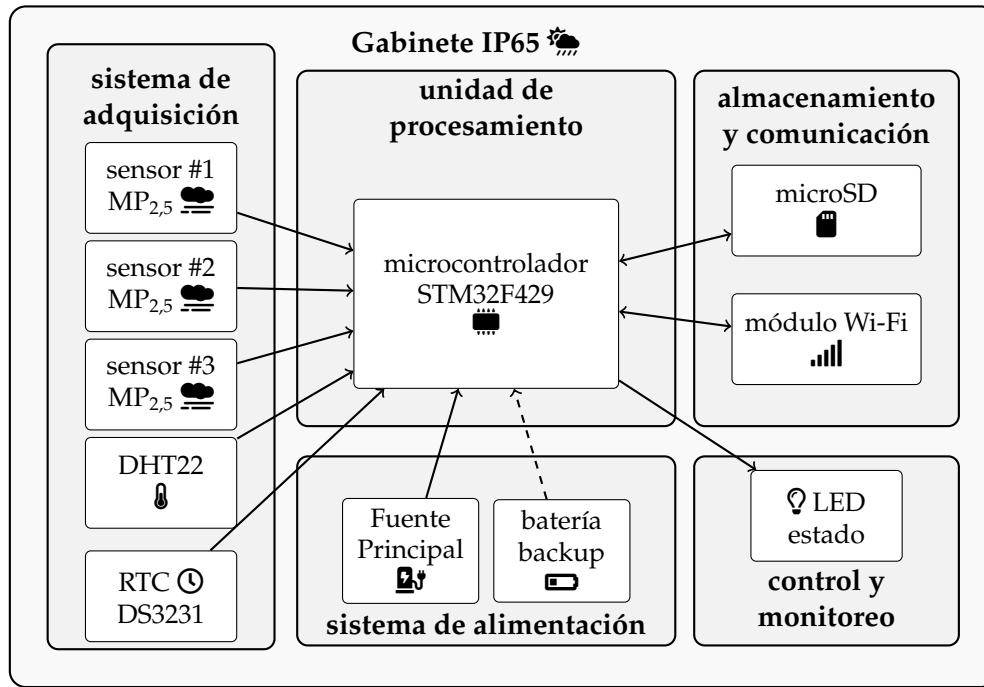
La implementación siguió un enfoque modular que permitió el desarrollo incremental y la verificación independiente de cada componente. El sistema integró múltiples protocolos de comunicación para la interacción entre módulos, mientras que la arquitectura de software estableció capas de abstracción para facilitar la mantenibilidad y escalabilidad del sistema.

3.1. Arquitectura general del sistema

La implementación del monitor de MP_{2,5} requirió un conjunto específico de componentes de hardware para cumplir los requerimientos técnicos establecidos. La arquitectura del sistema se estructuró en cuatro subsistemas principales:

- Sistema de alimentación con la fuente S-25-5.
- Unidad de procesamiento basada en el microcontrolador STM32F429.
- Módulos de medición con tres sensores SPS30, un RTC y un sensor DHT22.
- Sistema de almacenamiento y comunicación con módulo microSD y ESP8266.

La figura 3.1 presenta el diagrama de bloques de la arquitectura. Las especificaciones técnicas de cada componente se detallan en las siguientes subsecciones.

FIGURA 3.1. Esquema de bloques del instrumento de MP_{2,5}.

3.2. Selección y diseño de hardware

La selección de componentes para el sistema de medición de MP_{2,5} se realizó mediante un análisis de las alternativas disponibles en el mercado, lo que consideró factores técnicos, económicos y de disponibilidad. Se empleó una matriz de decisión ponderada para evaluar cada componente crítico del sistema.

3.2.1. Sensor de material particulado

La selección del sensor SPS30 se fundamentó en un análisis comparativo con otros sensores disponibles en el mercado, como se muestra en la tabla 3.1.

TABLA 3.1. Comparación de sensores de material particulado

Característica	SPS30	PMS5003	SDS011	GP2Y1010AU0F
Precisión (%)	±10	±15	±15	±25
Rango ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0-1000	0-500	0-999	0-500
Interfaces	I ² C/UART	UART	UART	Analógico
Vida útil (h)	>20 000	>8 000	>8 000	>5 000
Auto-limpieza	Sí	No	No	No
Costo relativo	1,5x	1,0x	1,2x	0,5x

El SPS30 destaca por su precisión y sistema de auto-limpieza, características cruciales para mediciones a largo plazo. La interfaz I²C y UART facilita la integración con el microcontrolador seleccionado.

3.2.2. Microcontrolador

La elección del STM32F429ZI se basó en los siguientes criterios ponderados, como se detalla en la tabla 3.2.

TABLA 3.2. Matriz de decisión para selección del microcontrolador.

Criterio	Peso	STM32F429	ESP32	RP2040	SAMD21
Velocidad CPU	0,25	5 (1,25)	4 (1,00)	3 (0,75)	3 (0,75)
Memoria	0,20	5 (1,00)	4 (0,80)	3 (0,60)	2 (0,40)
Periféricos	0,20	5 (1,00)	4 (0,80)	3 (0,60)	3 (0,60)
FPU	0,15	5 (0,75)	5 (0,75)	2 (0,30)	2 (0,30)
Documentación	0,10	5 (0,50)	4 (0,40)	3 (0,30)	3 (0,30)
Costo	0,10	3 (0,30)	4 (0,40)	5 (0,50)	4 (0,40)
Total	1,00	4,80	4,15	3,05	2,75

Nota: Los valores en paréntesis representan la puntuación ponderada (criterio × peso)

3.2.3. Módulos de comunicación y almacenamiento

Para el sistema de comunicación inalámbrica, se seleccionó el módulo ESP8266 por su balance entre costo, consumo energético y facilidad de implementación. La tabla 3.3 presenta la comparativa de alternativas evaluadas.

TABLA 3.3. Comparación de módulos de comunicación inalámbrica.

Característica	ESP8266	nRF24L01	HC-12	RN4870
Protocolo	Wi-Fi	RF 2,4 GHz	RF 433 MHz	BLE
Alcance (m)	100+	100	1 000	50
Velocidad (Mbit/s)	72,2	2	0,01	1
Consumo (mA)	80	15	100	10
Costo relativo	1,0x	0,5x	2,0x	3,0x

3.2.4. Componentes de soporte

Los componentes adicionales como el RTC DS3231 y el módulo microSD se priorizó la confiabilidad y compatibilidad con el sistema. El DS3231, en comparación con DS1707, destaca por su precisión temporal de ± 2 ppm y compensación de temperatura integrada. Para el almacenamiento, el módulo microSD ofrece capacidad escalable y compatibilidad con el sistema de archivos FAT32, lo que facilita el acceso a los datos almacenados. La memoria extraíble permitió la recuperación y transferencia de datos a otros dispositivos para su análisis posterior.

3.3. Esquemático y PCB

El diseño electrónico del instrumento de medición de MP_{2,5} integró cinco subsistemas interconectados. En la figura 3.2 se observa el esquemático general del sistema, que incorporó los bloques funcionales principales: procesamiento central,

sensores redundantes, sistema de almacenamiento, comunicación inalámbrica y alimentación.

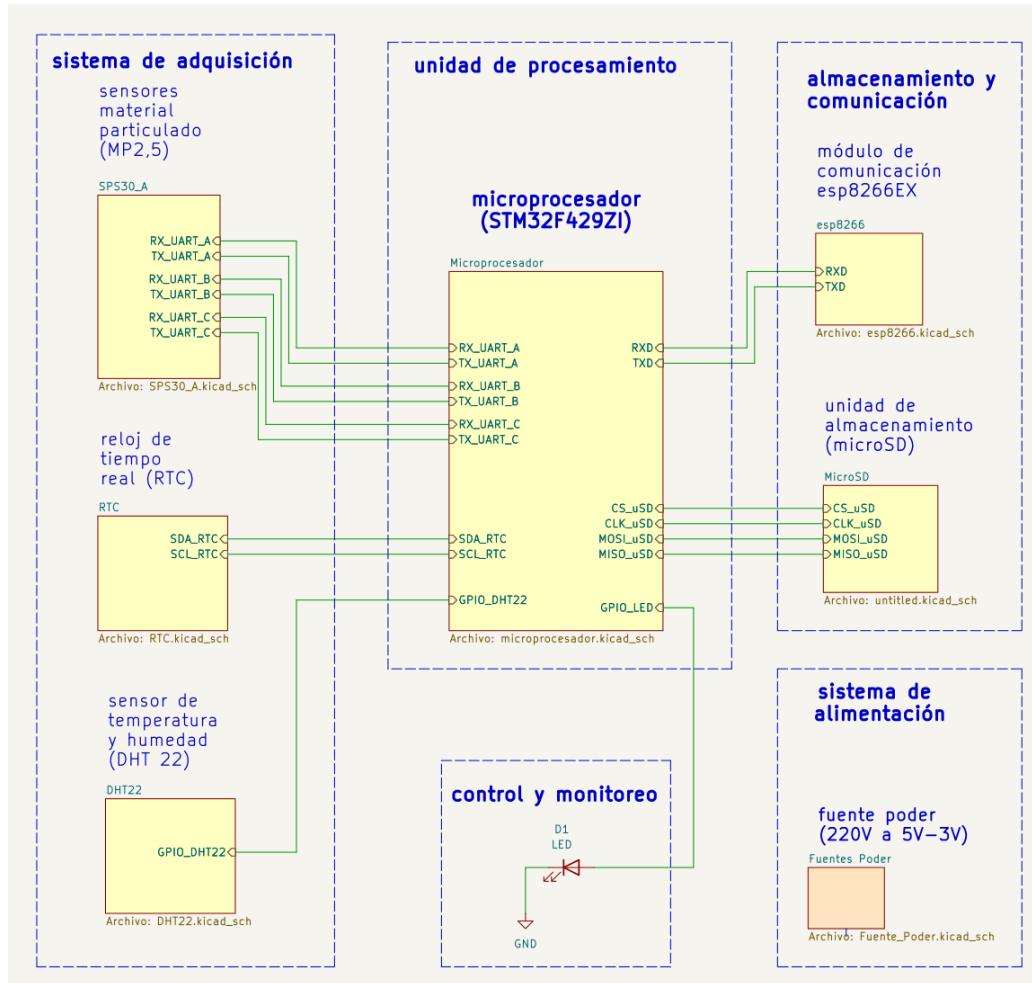


FIGURA 3.2. Esquema general del instrumento de MP_{2,5} con su respectivas conexiones da datos.

La unidad de procesamiento se implementó mediante el microcontrolador STM32 Nucleo F429ZI, que estableció las interfaces de comunicación con los periféricos a través de los protocolos UART, SPI e I²C. El diseño incluyó tres sensores SPS30 conectados mediante UART para la medición redundante de MP_{2,5}. Esta configuración permitió la validación cruzada de datos y mejoró la confiabilidad del sistema.

El subsistema de almacenamiento y comunicación integró un socket para tarjeta microSD mediante interfaz SPI y el módulo ESP8266 para transmisión inalámbrica vía UART. La gestión temporal se implementó con el RTC DS3231 conectado mediante I²C. El sistema de alimentación incorporó la fuente S-25-5 con protección contra sobretensiones y un circuito de respaldo mediante batería.

La figura 3.3 muestra el diseño de la placa de circuito impreso (PCB) de cuatro capas. La disposición de componentes priorizó la separación física entre las secciones analógica y digital para minimizar interferencias electromagnéticas. El ruteo implementó las siguientes consideraciones de diseño:

- Plano de tierra dedicado en la capa interna para reducir interferencias.
- Pistas de alimentación dimensionadas para corrientes máximas de 2 A.
- Vías térmicas para disipación en reguladores de tensión.
- Filtros LC en las líneas de alimentación de sensores.
- Conectores con retención mecánica para mayor confiabilidad.

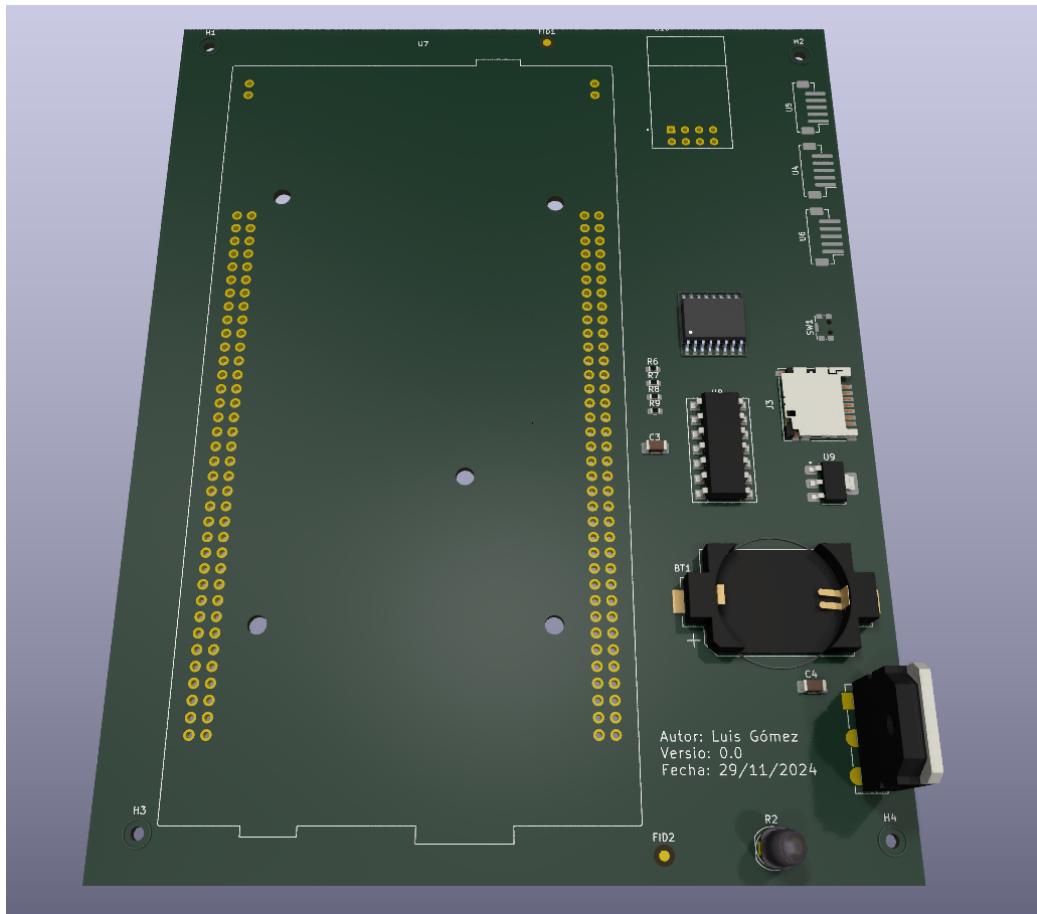


FIGURA 3.3. PCB del instrumento de MP_{2,5}.

La tabla 3.4 presenta la lista de materiales (BOM) con los componentes principales del sistema.

TABLA 3.4. Lista de materiales principales del instrumento

Componente	Descripción	Cantidad	Referencia
STM32F429ZI	Microcontrolador	1	U7
SPS30	Sensor MP2.5	3	U4,U5,U6
DS3231	RTC	1	U8
ESP8266	Módulo WiFi	1	U7
S-25-5	Fuente 5V	1	PS1

El diseño final resultó en una PCB de 150 mm × 120 mm con montaje mixto de componentes THT y SMD. La disposición facilitó el acceso para mantenimiento y permitió la instalación en gabinetes industriales estándar.

El diseño de la placa de circuito impreso (PCB) se realizó conforme a un conjunto de reglas y restricciones técnicas que aseguraron su fabricación adecuada. La tabla B.2 presenta los parámetros mínimos establecidos para la fabricación, organizados en cuatro categorías principales: especificaciones de cobre, orificios, vías enterradas y serigrafía. Estos valores se ajustaron a las capacidades estándar de los fabricantes de PCB y permitieron mantener la integridad de las señales mientras se optimizó el espacio disponible.

Complementariamente, la tabla B.3 muestra las tres clases de redes implementadas en el diseño, cada una con configuraciones específicas según sus requisitos funcionales. La clase "Default" se aplicó a señales de propósito general, mientras que la clase "microSD" implementó márgenes más reducidos (0,15 mm) para las conexiones del módulo de almacenamiento, lo que facilitó el ruteo en áreas de alta densidad. Por otro lado, la clase "potencia" incorporó pistas más anchas (0,5 mm) y vías de mayor diámetro (0,8 mm) para soportar las corrientes requeridas por los componentes del sistema sin generar caídas de tensión significativas o sobrecalentamiento.

3.4. Arquitectura de software

La arquitectura de software del sistema de medición de MP_{2,5} se implementó mediante una estructura modular que aseguró la funcionalidad, mantenibilidad y escalabilidad del sistema. El diseño incorporó cuatro patrones arquitectónicos.

3.4.1. Patrones arquitectónicos fundamentales

La implementación adoptó una arquitectura en capas, como se muestra en la figura 3.4. El software se organizó en tres niveles de abstracción principales. La capa de aplicación contiene los procesos principales del sistema, incluyendo la adquisición de datos, procesamiento estadístico y gestión de comunicaciones. La capa de drivers implementó los controladores específicos para cada dispositivo periférico, mientras que la capa HAL (*Hardware Abstraction Layer*) proporcionó una interfaz estandarizada para el acceso al hardware. Esta estructura en capas facilitó la portabilidad del código y permitió el desarrollo independiente de cada nivel de abstracción.

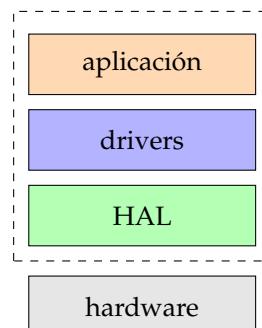


FIGURA 3.4. Patrón de arquitectura de capas, obtenido a partir de presentaciones de clases de Ingeniería de Software¹.

¹Imagen obtenida de diapositiva de la materia Ingeniería de Software, CESE, FIUBA, 2023.

El patrón “observar y reaccionar”, que se muestra en la figura 3.5, es la base del sistema de monitoreo. Su implementación en la capa de aplicación permitió la supervisión continua de los sensores y el procesamiento sistemático de los datos. El diseño implementó un mecanismo de notificación basado en el patrón de observador, donde los sensores funcionaron como sujetos observables, lo que generó eventos o cambios de estado. Por otro lado, los módulos de procesamiento y almacenamiento fueron diseñados como observadores, encargados de recibir y procesar las notificaciones emitidas por los sujetos observables.

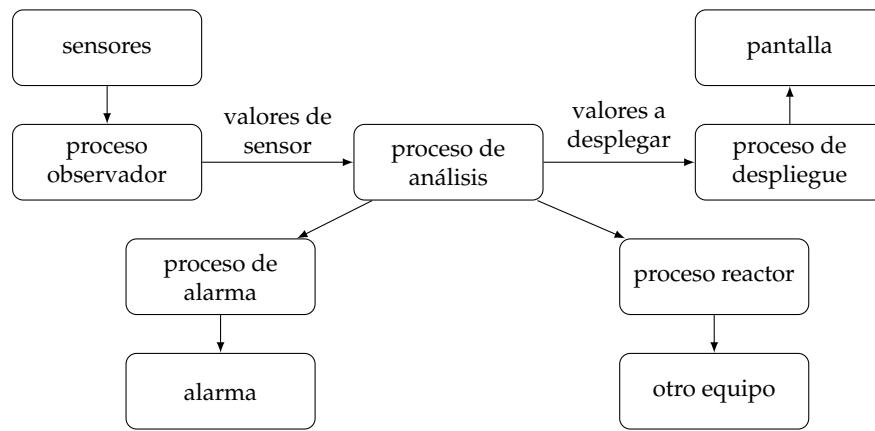


FIGURA 3.5. Patrón arquitectónico: “observar y reaccionar”².

El tercer patrón implementado, “segmentación de procesos”, estableció el flujo de datos entre los módulos del sistema. Un esquema de este patrón puede ser observado en la figura 3.6. Esta arquitectura definió etapas específicas para la adquisición, validación, procesamiento estadístico y almacenamiento de las mediciones. La segmentación aseguró la integridad de los datos mediante buffers intermedios entre etapas y mecanismos de verificación en cada transferencia. Esta implementación permitió el procesamiento secuencial de las mediciones y facilitó la detección de errores en el flujo de datos.

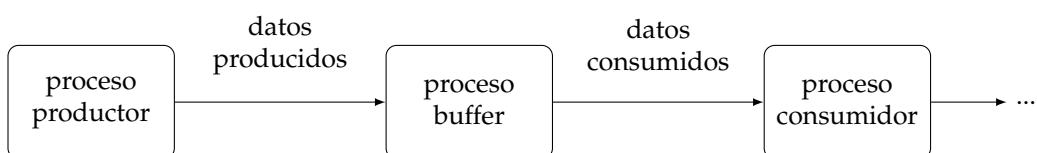


FIGURA 3.6. Patrón arquitectónico: “segmentación de procesos”³.

3.4.2. Integración de las estructuras y flujo de datos

La figura 3.7 presenta la integración de la arquitectura de software del sistema. La implementación estableció procesos interconectados para la gestión del flujo de datos, desde la adquisición en los sensores hasta el almacenamiento y transmisión

²Imagen obtenida de diapositiva de la materia Ingeniería de Software, CESE, FIUBA, 2023.

³Imagen obtenida de diapositiva de la materia Ingeniería de Software, CESE, FIUBA, 2023.

de la información. Estos procesos incluyeron la validación de mediciones, el procesamiento estadístico, el almacenamiento local y la comunicación con sistemas remotos.

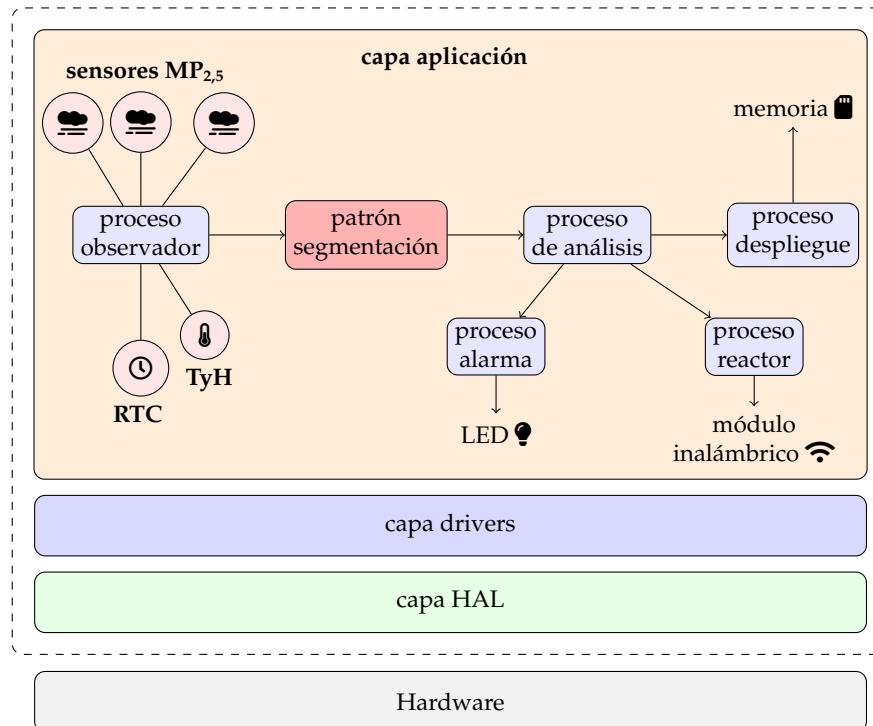


FIGURA 3.7. Arquitectura de bloques de los componentes del software.

3.4.3. Procesos principales

Para el software se implementaron tres procesos fundamentales para la gestión de datos:

Proceso observador

Este proceso constituyó el punto de entrada del sistema, lo que permitió la adquisición de datos desde los sensores de temperatura, humedad, MP_{2,5} y el RTC. La implementación estableció un sistema de muestreo configurable con intervalos desde 10 minutos hasta 24 horas, lo que permitió adaptar el monitoreo a diferentes requisitos. Cada medición incorporó una marca temporal del RTC para asegurar la trazabilidad de los datos.

Proceso de análisis

El núcleo central del sistema recibió los datos del proceso observador mediante un buffer intermedio. Este módulo implementó las calibraciones, ejecutó cálculos estadísticos y validó la integridad de la información. El procesamiento incluyó el cálculo de promedios móviles, desviaciones estándar y la detección de valores atípicos para determinar la calidad del aire.

Procesos de salida

La arquitectura implementó tres componentes especializados:

- Proceso de despliegue: gestionó el registro en memoria microSD, en datos con estructuras temporales de 10 minutos, 1 hora y 24 horas.
- Proceso reactor: manejó la transmisión de los datos hacia el módulo inalámbrico hacia un servidor remoto mediante protocolos estandarizados.
- Proceso de alarma: controló indicadores LED para proporcionar retroalimentación visual sobre el estado del sistema.

3.4.4. Interfaces y comunicaciones

El sistema implementó múltiples protocolos de comunicación para interactuar con sus componentes periféricos. La comunicación con los sensores MP_{2,5} se estableció mediante UART, mientras que la interfaz con el RTC utilizó el protocolo I²C. El almacenamiento de los datos en la memoria microSD se realizó a través del protocolo SPI. La transmisión inalámbrica de datos empleó una interfaz UART adicional, y el control de señalización mediante LED se gestionó a través de GPIO.

La gestión de energía implementó un sistema de commutación automática para mantener la operatividad ante fallos en el suministro eléctrico principal. El diseño incorporó un modo de bajo consumo que se activó cuando el sistema operó con batería de respaldo. Esto permitió reducir el consumo energético mediante la desactivación selectiva de periféricos no críticos, por ejemplo, el módulo de comunicación inalámbrica. Esta implementación incrementó el tiempo de funcionamiento de las mediciones durante interrupciones eléctricas.

3.5. Detalle de los componentes y responsabilidades

La implementación del sistema estableció una arquitectura de procesos interconectados, donde cada componente ejecutó funciones específicas en el flujo de datos. Esta organización permitió la adquisición desde los sensores, el procesamiento de las mediciones y su posterior almacenamiento, tanto en la memoria local como en el servidor remoto.

Los procesos implementados se alinearon con los patrones arquitectónicos descritos, como se ilustra en las figuras 3.7 y 3.8. La arquitectura integró seis componentes principales: el proceso observador para la adquisición de datos, el buffer intermediario para la gestión temporal, el proceso de análisis para la validación estadística, el proceso de despliegue para el almacenamiento local, el proceso reactor para la transmisión remota y el proceso de alarma para la señalización del estado del sistema.

3.5.1. Proceso observador:

Este proceso se empleó durante la captura de datos, los sensores de MP_{2,5} y el Reloj de Tiempo Real (RTC). Su tarea consistió en la recolección continua de información sobre la concentración de partículas en el aire, junto con marcas temporales para cada conjunto de datos. Posteriormente, estos datos son encaminados hacia la etapa de preprocesamiento (proceso buffer - segmentación de procesos).

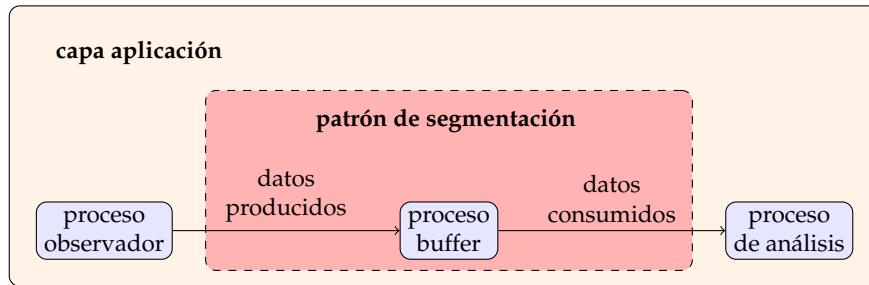


FIGURA 3.8. Detalle con el patrón de segmentación del software.

Este proceso está encargado de solicitar y recabar datos de los sensores de MP_{2,5} en intervalos que pueden variar desde un minuto hasta horas, según la configuración establecida. Esta flexibilidad en la programación permite configurar la toma de muestras, adecuándose a diferentes necesidades de monitoreo y características específicas de cada sensor. Adicionalmente, el módulo se encargará de obtener del RTC y escribir en cada registro una marca temporal del dato. Una vez recolectados, estos datos son transmitidos al siguiente eslabón en el proceso, el “proceso buffer”, para su posterior tratamiento.

3.5.2. Proceso buffer:

El proceso buffer es un componente del patrón de segmentación, responsable del acondicionamiento y almacenamiento temporal de los datos. La implementación estableció una estructura intermedia entre el proceso observador y el proceso de análisis.

El diseño implementó tres niveles de almacenamiento temporal: un buffer de alta frecuencia con retención de 10 minutos para datos instantáneos; un buffer horario para el cálculo de promedios móviles; y un buffer diario para la generación de estadísticas de 24 horas. Este proceso recibió los datos del proceso observador, ejecutó la validación preliminar y el formateo de la información, para su posterior transferencia al proceso de análisis. La tabla 3.5 presenta la organización de los datos en cada nivel de almacenamiento.

TABLA 3.5. Ejemplo de estructura de datos.

Atributo	Tipo de dato	Formato
idsensor	int	-
fecha-hora	int	AAMMDDHHMM
frecuencia	int	-
MP _{2,5}	float	-
temperatura	int	-
humedad	int	-

3.5.3. Proceso de análisis

El proceso de análisis implementó el cálculo numérico y la validación estadística de los datos provenientes del buffer. Las operaciones incluyeron la corrección de las concentraciones mediante parámetros de calibración y el cálculo de estadísticos para diferentes intervalos temporales (10 minutos, 1 hora y 24 horas).

Se aplicaron métodos numéricos que permitió estimar la calidad de las mediciones mediante el cálculo de valores centrales y de dispersión. Esta incorporó algoritmos para la detección de valores atípicos y la evaluación de la concordancia entre los tres sensores de MP_{2,5}. Este procesamiento generó índices de confiabilidad para cada medición y activó alarmas ante la detección de anomalías en el funcionamiento de los sensores.

3.5.4. Proceso de despliegue

El proceso de despliegue implementó la gestión del almacenamiento de datos en la memoria microSD. Este módulo recibió la información procesada del proceso de análisis y ejecutó las operaciones de escritura en el sistema de archivos.

La implementación estableció una estructura jerárquica de almacenamiento con tres niveles temporales: registros de 10 minutos, promedios horarios y resúmenes diarios. El sistema generó archivos independientes para cada período. Incorpora metadatos que identificaron el origen y características de las mediciones. Esta organización permitió la trazabilidad de los datos y facilitó su posterior procesamiento.

3.5.5. Proceso reactor

El proceso reactor implementó la comunicación de datos entre el sistema y un servidor remoto mediante el módulo Wi-Fi. Este componente estableció la interfaz entre el proceso de análisis y la transmisión inalámbrica de información.

Se incorporarán tres funciones principales: la gestión de la configuración de red inalámbrica, el establecimiento del protocolo de transferencia de archivos (FTP), y la transmisión de datos procesados. El sistema transmitió los registros temporales organizados en intervalos de 10 minutos, promedios horarios y resúmenes diarios. Cada paquete de datos incluyó metadatos de identificación que especificaron el origen y características de las mediciones transmitidas.

3.5.6. Proceso de alarma

El proceso de alarma implementó la señalización visual del estado operativo del sistema mediante un indicador LED. Este módulo procesó los códigos de estado generados por los distintos componentes y tradujo esta información en patrones específicos de señalización luminosa.

Se estableció una codificación basada en frecuencias de parpadeo del LED para indicar diferentes estados operativos: funcionamiento normal, fallos en sensores, errores de comunicación y estados del sistema. Esta interfaz visual proporcionó retroalimentación inmediata sobre el estado del instrumento al usuario.

3.5.7. Módulo de energía

El módulo de energía implementó la gestión y distribución de alimentación eléctrica para todos los componentes del sistema. La arquitectura estableció un sistema de commutación automática entre la fuente principal de 220 V y una batería de respaldo.

La incorporó dos modos de operación: normal y bajo consumo. El modo normal operó con la fuente principal, mientras que el modo de bajo consumo se activó de

manera automática ante interrupciones en el suministro eléctrico. Este último redujo el consumo mediante la desactivación selectiva de componentes no críticos, lo que permitió mantener las funciones esenciales del sistema durante períodos limitados de operación con batería.

3.6. Responsabilidades de las interfaces periféricas

Descripción de las principales funcionalidades con los componentes y sensores periféricos.

3.6.1. Sensores MP_{2,5}

La interfaz con los sensores de MP_{2,5} constituyó el componente principal para la adquisición de datos de concentración de material particulado. Se estableció la comunicación mediante el protocolo UART, seleccionado por sus características de transmisión serie asíncrona y compatibilidad con los sensores SPS30.

El proceso observador gestionó la operación de los sensores mediante una secuencia definida de comandos: inicialización, configuración de parámetros de medición, adquisición de datos y verificación de estado. Este protocolo de comunicación permitió la obtención sistemática de mediciones de concentración de MP_{2,5} con una resolución temporal programable.

3.6.2. Reloj de tiempo real RTC

Con los datos entregados por el RTC DS3231 se implementó la base de tiempo del sistema, necesario para el registro temporal de las mediciones. El proceso observador gestionó la comunicación con este dispositivo mediante el protocolo I²C, seleccionado por su compatibilidad y eficiencia en la transmisión de datos temporales.

Se incorporaron dos funciones principales: la sincronización periódica del sistema y el etiquetado temporal de las mediciones de MP_{2,5}. Esta interfaz proporcionó marcas de tiempo con precisión de ±2 ppm.

3.6.3. Almacenamiento microSD

Se integró un módulo de almacenamiento con memoria microSD para el registro local de datos. El proceso de despliegue gestionó las operaciones de escritura y lectura mediante el protocolo SPI, que operó a una frecuencia de 42 MHz.

Se incorporó el sistema de archivos FAT32 y estableció un buffer de escritura de 512 B para optimizar las operaciones de almacenamiento. Esta interfaz permitió el registro estructurado de las mediciones.

3.6.4. Módulo de conexión inalámbrica

El software integró la comunicación con un servidor remoto mediante el módulo Wi-Fi ESP8266. El proceso reactor estableció la interfaz entre el sistema de medición y la transmisión de datos.

Se incorporó tres funciones principales: la configuración de la conexión Wi-Fi, la gestión del protocolo FTP para la transferencia de archivos, y la comunicación

UART con el módulo ESP8266 a 115 200 Bd. Esta arquitectura permitió la transmisión automática de los datos almacenados hacia el servidor remoto mediante una conexión TCP/IP.

3.6.5. Señal de estado LED

Se incorporó un indicador visual mediante LED para la señalización del estado operativo. El proceso de alarma gestionó la codificación de estados del sistema mediante patrones de parpadeo predefinidos.

Se utilizó un puerto GPIO configurado en modo PWM para el control del LED. Esta interfaz estableció diferentes frecuencias de parpadeo para señalizar distintas condiciones operativas: funcionamiento normal; errores en sensores; fallos de comunicación; y estados de la alimentación. Este método proporcionó retroalimentación inmediata sobre el estado del sistema al usuario.

3.6.6. Gestión de energía

El módulo de gestión de energía implementó un sistema de monitorización del suministro eléctrico mediante un puerto GPIO configurado en modo lectura. Este componente supervisó el estado de la alimentación principal y controló la conmutación automática hacia la batería de respaldo.

Se definieron dos funciones principales: la detección de interrupciones en el suministro de 220 V y la activación del modo de bajo consumo. El sistema utilizó el estado binario del GPIO para determinar la fuente de alimentación activa y ejecutar la transición entre modos de operación, lo que aseguró la continuidad del monitoreo ante fallos en el suministro eléctrico.

3.7. Implementación de protocolos

La integración de protocolos de comunicación en el sistema de medición de MP_{2,5} estableció las interfaces entre módulos y periféricos. Se incorporaron protocolos estandarizados para asegurar la confiabilidad y eficiencia en la transferencia de datos.

3.7.1. Protocolo UART para sensores de MP_{2,5}

La comunicación con los sensores SPS30 se implementó mediante una interfaz UART en configuración maestro-esclavo. El protocolo estableció los siguientes parámetros operativos:

- Velocidad de comunicación: 100 kHz.
- Direccionamiento: asignación de dirección única por sensor (0x69).
- Buffer de recepción: 32 B para datos de concentración.
- Tiempo máximo de transacción: 30 ms.

La secuencia de comunicación sigue el patrón de la figura 3.9.

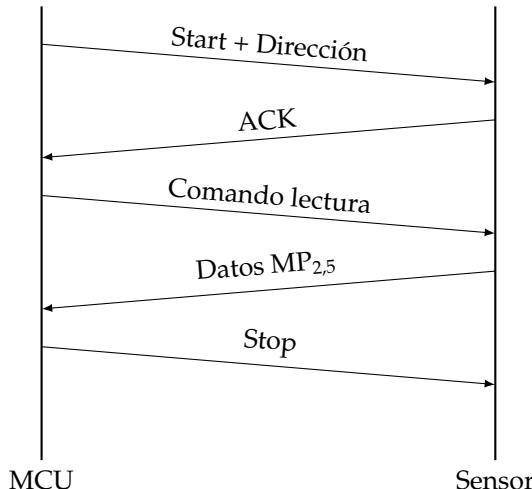


FIGURA 3.9. Secuencia de comunicación UART con sensor SPS30.

3.7.2. Protocolo SPI para almacenamiento

Se aplicó el protocolo SPI de comunicación con la memoria microSD. El diseño incorporó las siguientes especificaciones técnicas:

- Frecuencia de operación: 42 MHz en modo maestro.
- Sistema de archivos: FAT32 con sectores de 512 B.
- Transferencia de datos: DMA para optimización de recursos.
- Buffer circular: 512 B para gestión de escritura.

3.7.3. UART para comunicación inalámbrica

La implementación de la comunicación con el módulo ESP8266 estableció una interfaz UART con los siguientes parámetros operativos:

- Velocidad de transmisión: 115 200 Bd.
- Control de flujo: señales hardware RTS/CTS.
- Buffer de transmisión: 256 B.
- Tiempo de espera máximo: 100 ms.

La capa de aplicación implementó los siguientes mecanismos de control:

- Establecimiento de conexión mediante handshaking.
- Sistema de retransmisión automática ante fallos.
- Verificación de integridad mediante CRC-16.
- Estructura de trama con campos de cabecera y cola.

3.7.4. GPIO para control y monitoreo

Se estableció tres funciones principales para la puesta en funcionamiento de las interfaces GPIO :

- Señalización visual: control del LED mediante modulación PWM.

- Supervisión energética: detección del estado de alimentación.
- Control de energía: gestión del modo de bajo consumo.

3.7.5. Gestión de errores y recuperación

El sistema implementó mecanismos de protección y recuperación ante fallos de comunicación:

- Sistema de temporización: límites de tiempo para cada transacción.
- Recuperación automática: reinicialización de periféricos ante errores.
- Sistema de respaldo: buffer temporal para datos críticos.
- Trazabilidad: registro de eventos de error en memoria no volátil.

3.7.6. Optimización del rendimiento

Al instrumento se le incorporó mecanismos específicos para optimizar la eficiencia del sistema:

- Transferencia de datos: DMA para operaciones críticas.
- Gestión de eventos: sistema de interrupciones para respuesta inmediata.
- Administración de memoria: buffers circulares para gestión eficiente.
- Planificación: esquema de prioridades para tareas de comunicación.

El diseño modular permitió el mantenimiento y actualización independiente de cada protocolo, mientras que los mecanismos de optimización aseguraron un uso eficiente de los recursos del microcontrolador.

3.8. Ajuste y calibración de sensores y transmisores

Se estableció un proceso sistemático de calibración y ajuste del sistema de medición de MP_{2,5} para asegurar la precisión y trazabilidad de las mediciones. Este procedimiento consideró las características específicas de los sensores SPS30 y las condiciones ambientales de operación.

3.8.1. Calibración de sensores MP_{2,5}

El protocolo de calibración se implementó en dos etapas principales:

1. Calibración de fábrica: Los sensores incorporaron una calibración inicial contra instrumentos de referencia:
 - Fotómetro TSI DustTrak™ DRX 8533: validación gravimétrica.
 - Espectrómetro óptico TSI OPS 3330: caracterización de distribución de partículas.
2. Calibración en campo: La implementación requirió ajustes específicos según condiciones locales:
 - Correlación con monitor Beta de referencia.
 - Factor de corrección por humedad relativa.

- Compensación por temperatura ambiente.

3.8.2. Modelo de corrección

Se incorporó un modelo de corrección lineal para el ajuste de las mediciones:

$$C_{corregida} = a \cdot C_{medida} + b \cdot H + c \cdot T + d \quad (3.1)$$

Donde las variables representan:

- $C_{corregida}$: concentración ajustada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).
- C_{medida} : concentración del sensor SPS30.
- H : humedad relativa (%).
- T : temperatura ($^{\circ}\text{C}$).
- a, b, c, d : coeficientes determinados de manera experimental.

3.8.3. Procedimiento de calibración

El procedimiento de calibración en campo estableció cinco etapas secuenciales:

1. Acondicionamiento inicial: período de estabilización de 24 horas.
2. Adquisición de datos: mediciones simultáneas con monitor Beta de referencia.
3. Procesamiento estadístico: determinación de coeficientes mediante regresión lineal.
4. Verificación: validación con conjunto de datos independiente.
5. Programación: actualización del firmware con factores de corrección.

3.8.4. Validación y control de calidad

Se ejecutaron mecanismos automáticos para el aseguramiento de la calidad de las mediciones:

- Sistema de detección de valores atípicos.
- Validación cruzada entre los tres sensores redundantes.
- Monitoreo continuo de variables ambientales.
- Sistema de notificación para recalibración programada.

3.8.5. Mantenimiento y recalibración

El protocolo de mantenimiento estableció un cronograma sistemático de verificación:

- Validación trimestral con monitor Beta de referencia.
- Ciclo automático de limpieza cada 168 h.
- Recalibración integral anual.
- Compensación de la deriva temporal mediante ajuste de coeficientes.

Esta implementación sistemática de calibración y control busca asegurar la estabilidad y precisión de las mediciones a largo plazo. La arquitectura con tres sensores permitió la validación continua de datos y la detección temprana de desviaciones en el sistema de medición.

Capítulo 4

Ensayos y resultados

Este capítulo presenta la evaluación del sistema de medición de MP_{2,5} desarrollado, abarcando validación técnica, caracterización metrológica y rendimiento operativo. Se analizaron los resultados de las pruebas realizadas sobre el diseño electrónico, el sistema de alimentación y la implementación del software mediante un banco de pruebas estructurado. Se evalúa la calidad metrológica del instrumento a través del análisis de correlación entre los tres sensores redundantes y su comparación con equipos de referencia. La caracterización operativa incluye la verificación de la completitud de datos adquiridos, el análisis de patrones temporales de concentración, y la respuesta del instrumento ante un evento controlado de alta contaminación. Los resultados obtenidos, presentados mediante análisis estadístico y visualizaciones temporales, muestran que el sistema alcanza los niveles de confiabilidad y precisión requeridos para aplicaciones de monitoreo ambiental urbano.

4.1. Banco de prueba

El banco de pruebas se estructuró en cuatro categorías funcionales complementarias: instrumentación electrónica, validación metrológica, verificación de hardware y pruebas de software.

La instrumentación electrónica comprendió equipos para la caracterización y diagnóstico de los circuitos. Se utilizó un analizador lógico de 24 MHz con 8 canales para la verificación de protocolos de comunicación (I²C, SPI, UART), lo que permitió monitorizar en tiempo real las transacciones de datos entre el microcontrolador y los periféricos. Para el análisis de señales de alta frecuencia, se empleó un osciloscopio FNIRSI1014D de 100 MHz, que facilitó la medición de tiempos de respuesta, detección de interferencias y verificación de integridad de señales críticas. Las mediciones de parámetros eléctricos se realizaron con un multímetro digital TMT460012, con resolución de 0,01 mV para tensión y 0,1 µA para corriente. La alimentación controlada del sistema durante las pruebas se implementó mediante una fuente regulada Jesverty SPS-3005 con rango de 0 a 30 V y capacidad de corriente de 5 A.

Para la validación metrológica, las mediciones de MP_{2,5} se contrastaron con un instrumento de referencia Grimm y equipo certificado por su alta precisión ($\pm 2\%$) en el análisis óptico de partículas atmosféricas dentro del rango de 0,3 a 10 µm. Esta comparación se realizó en dos escenarios: bajo condiciones controladas de laboratorio y en ambiente real, lo que expone a los sensores a las condiciones

atmosféricas urbanas durante un período de 72 horas. Este enfoque dual permitió determinar tanto la exactitud y precisión del instrumento como su comportamiento en condiciones operativas reales.

La verificación del hardware se efectuó mediante un proceso sistemático que incluyó la comprobación del cumplimiento de las reglas de diseño de circuito impreso utilizando las herramientas integradas en KiCad. Este proceso verificó parámetros críticos como anchos de pista, distancias mínimas entre elementos y diámetros de vías. Adicionalmente, componentes como inductores, capacitores y resistencias se caracterizaron individualmente con un medidor LCR-P1 de FNIRSI, que proporcionó datos sobre sus propiedades eléctricas y tolerancias reales, lo que permite validar que sus valores se encontraban dentro de los márgenes establecidos para garantizar el funcionamiento correcto del circuito.

Las pruebas de software implementaron metodologías de validación mediante el framework Ceedling, que permitió la automatización de pruebas unitarias en lenguaje C. Esta aproximación posibilitó la evaluación independiente de cada módulo del firmware, facilitó la detección temprana de errores lógicos o de implementación. La integración de las herramientas Unity y CMock dentro del framework proporcionó capacidades para la creación de objetos simulados (*mocks*) y aserciones específicas para validar el comportamiento esperado de las funciones. La verificación de comunicaciones se complementó con un terminal UART Cutecom, configurado a 115 200 Bd, para la inspección detallada de los datos transmitidos entre el sistema y los dispositivos periféricos, lo que facilitó la verificación del cumplimiento de los protocolos establecidos.

Las tablas A.6 y A.7 presentan un resumen de los instrumentos empleados en el banco de pruebas. Esta detalla las características técnicas y función específica en el proceso de validación.

4.2. Evaluación del software

La validación del sistema de medición de MP_{2,5} se enfocó en garantizar la precisión y confiabilidad del subsistema de análisis, identificado como componente crítico con una importancia relativa del 24 % según los criterios de diseño establecidos. Este componente procesa los datos provenientes de los sensores ópticos y realiza los cálculos estadísticos necesarios para determinar las concentraciones del contaminante.

4.2.1. Metodología de pruebas de software

Se implementó el *Método del Árbol de Clasificación* (CTM) como estrategia principal para el diseño y ejecución de los casos de prueba. Esta técnica permitió una cobertura y sistemática de los posibles escenarios de operación, lo que facilita la identificación de errores potenciales en el tratamiento de datos. El proceso consistió en cuatro etapas secuenciales:

1. Definición de clases de equivalencia: se estableció categorías para los tipos de datos de entrada, lo que incluyó concentraciones dentro de los límites operativos (0,5 a 500 µg/m³), valores por debajo del límite mínimo de cuantificación, mediciones que exceden el límite máximo de linealidad y casos atípicos como valores negativos o nulos.

2. Construcción del árbol de clasificación: se desarrolló una estructura jerárquica que representa las diferentes clases de equivalencia y las relaciones entre ellas, lo que permitió la identificación de combinaciones específicas de condiciones para cada caso de prueba.
3. Derivación de casos de prueba: a partir del árbol de clasificación, se identificó cinco escenarios representativos que abarcan las principales condiciones de operación y casos límite del sistema.
4. Ejecución y análisis de resultados: se utilizó el framework Ceedling, junto con las herramientas Unity y CMock, para implementar y automatizar la ejecución de las pruebas unitarias.

4.2.2. Casos de prueba implementados

Se desarrollaron cinco casos para evaluar la función `calculateAverage` de la API `ParticulateDataAnalyzer`, responsable del cálculo del promedio de concentraciones de MP_{2,5} bajo diferentes condiciones:

TABLA 4.1. Resumen de los casos de prueba aplicados al subsistema de análisis.

Test	Escenario	Objetivo	Resultado
1	Valores dentro del rango con algunos por debajo del límite de cuantificación	Verificar exclusión correcta de valores < 0,5 µg/m ³	302,5 µg/m ³
2	Datos válidos con algunos valores por encima del máximo y negativos	Comprobar manejo adecuado de valores fuera de rango superior y negativos	286,07 µg/m ³
3	Arreglo completo de datos nulos	Validar respuesta ante ausencia total de datos válidos	-999
4	Todos los valores dentro del rango permitido	Confirmar cálculo correcto con datos completamente válidos	316,67 µg/m ³
5	Arreglo sin datos válidos (todos bajo límite)	Verificar comportamiento con datos insuficientes para cálculo	-999

El caso de prueba 1 evaluó el procesamiento de un conjunto de datos donde la mayoría se encontraba dentro del rango operativo, lo que incluyó valores ligeramente por debajo del límite inferior de cuantificación (0,4 µg/m³ y 0,3 µg/m³). Esta prueba verificó que el sistema excluyera correctamente estos valores del cálculo del promedio y utilizara solo los 16 valores válidos restantes.

El caso 2 analizó el manejo de valores extremos, lo que incorporó tanto concentraciones negativas (-480 µg/m³) como mediciones superiores al límite máximo de linealidad (590 µg/m³ y 895 µg/m³). Esta prueba fue particularmente significativa para validar la robustez del sistema ante lecturas anómalas o errores de medición.

Los casos 3 y 5 evaluaron situaciones límite donde no existían datos válidos para el cálculo, ya sea por un arreglo completamente vacío o con datos por debajo del umbral mínimo de cuantificación. Ambos casos verificaron que el sistema respondiera adecuadamente con un valor de error predefinido (-999), lo que señaló la imposibilidad de realizar el cálculo.

El caso 4 representó un escenario ideal con todos los valores dentro del rango operativo permitido, lo que verificó la precisión del cálculo bajo condiciones óptimas de funcionamiento.

4.2.3. Implementación de las pruebas

Las pruebas se codificaron con el framework Ceedling, que integra las herramientas Unity y CMock para la automatización de pruebas unitarias en lenguaje C (ver figura 4.1). Cada caso de prueba se implementó como una función independiente que preparaba los datos de entrada, ejecutaba la función bajo evaluación y verificaba que el resultado correspondiera al valor esperado mediante aserciones.

La función `calculateAverage` evaluada realiza el procesamiento de un arreglo de valores flotantes que representan concentraciones de MP_{2,5}, con los siguientes pasos:

1. Verifica si el arreglo está vacío mediante la función `isArrayEmpty`.
2. Inicializa variables para sumatoria y conteo de valores no válidos.
3. Recorre cada elemento del arreglo, lo que validó cada valor mediante la función `maskIsDataTrue`.
4. Para los valores válidos, acumula la suma; para los inválidos, incrementa el contador.
5. Recalcula el número efectivo de datos válidos.
6. Verifica que exista al menos un valor válido antes de realizar la división.
7. Retorna el promedio calculado o un valor de error predefinido.

```
Test 'test_ParticulateDataAnalyzer.c'
-----
Generating runner for test_ParticulateDataAnalyzer.c...
Compiling test_ParticulateDataAnalyzer_runner.c...
Compiling test_ParticulateDataAnalyzer.c...
Linking test_ParticulateDataAnalyzer.out...
Running test_ParticulateDataAnalyzer.out...

-----
OVERALL TEST SUMMARY
-----
TESTED: 5
PASSED: 5
FAILED: 0
IGNORED: 0
```

FIGURA 4.1. Resultados de la ejecución de las pruebas unitarias mediante Ceedling.

4.2.4. Resultados y mejoras implementadas

La ejecución de los casos de prueba permitió identificar un error en la implementación de la función `calculateAverage`, específicamente en la validación de valores por encima del límite máximo de linealidad. Este hallazgo permitió la corrección temprana de un problema que podría haber afectado el cálculo de los promedios de MP_{2,5} durante la operación del instrumento.

Tras la detección del error, se implementaron las siguientes mejoras:

- Modificación de la función `maskIsDataTrue` para incorporar explícitamente la validación del límite superior de $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Refinamiento de la documentación del código para especificar claramente los rangos de valores aceptables.
- Incorporación de mensajes de error más descriptivos para facilitar la identificación de problemas en tiempo de ejecución.
- Optimización del algoritmo para mejorar el rendimiento en el procesamiento de grandes volúmenes de datos.

Los criterios de aceptación establecidos definieron una precisión con desviación estándar no superior al 5 % para el cálculo del promedio, requisito que fue verificado y cumplido mediante los casos de prueba implementados. Adicionalmente, se estableció un umbral mínimo del 75 % de datos válidos para considerar representativo un promedio horario, criterio que fue incorporado en la lógica de procesamiento y verificado mediante los casos de prueba.

La aplicación del MAT proporcionó un marco sistemático para diseñar, documentar y comunicar los casos de prueba. Esto aseguró la trazabilidad de los requisitos funcionales hasta su verificación final.

4.3. Pruebas de hardware

Esta sección presenta los resultados de la evaluación de los componentes físicos del sistema de medición de MP_{2,5}. Se analizaron los resultados de la verificación del diseño electrónico, la caracterización individual de componentes críticos y las pruebas del sistema de alimentación.

4.3.1. Resultados del diseño electrónico

La verificación del diseño electrónico evaluó el cumplimiento de las reglas de diseño especificadas en las tablas [B.2](#) y [B.3](#) del Apéndice [B](#). Esta metodología integró herramientas de validación automática disponibles en KiCad 6.0 con inspección visual detallada, lo que permitió identificar y corregir discrepancias en parámetros críticos como anchos de pista (mínimo 0,25 mm para señales, 0,5 mm para potencia), distancias mínimas entre elementos (0,2 mm) y diámetros de vías (0,4 mm para señal, 0,8 mm para potencia).

El diseño cumplió con las especificaciones técnicas establecidas en aproximadamente 90 % de la superficie de la PCB, a excepción de áreas específicas correspondientes al conector de memoria microSD y los circuitos integrados DS3231 y 74LVC125U8 (ver figura [4.2](#)). Para estos componentes de encapsulado predefinido fue necesario implementar zonas de exclusión de reglas de diseño, lo que redujo localmente la separación mínima a 0,15 mm debido a las restricciones impuestas por su geometría de pines. Esta modificación no comprometió la funcionalidad ni la fiabilidad del circuito.

El diseño incorporó además soluciones específicas para optimizar la manufactura y la integridad de señal, tales como alivios térmicos para pads de alta corriente, planos de tierra en capas internas para reducción de EMI, y pistas de impedancia controlada para las líneas de comunicación críticas SPI y UART. Estas características de diseño, apreciables en la figura [4.3](#), contribuyeron a la robustez del

sistema en términos de estabilidad eléctrica y resistencia a interferencias electromagnéticas externas, aspectos fundamentales para la precisión de las mediciones de MP_{2,5}.

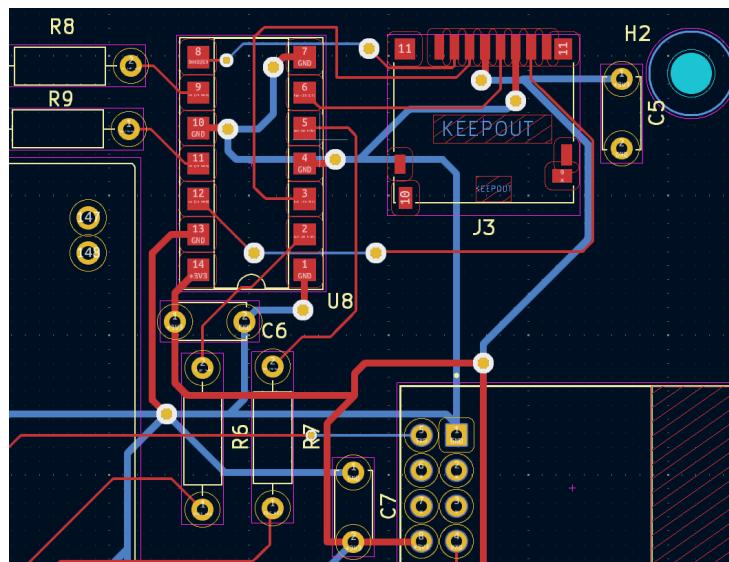


FIGURA 4.2. Detalle de una sección de la PCB donde se observan los anchos de pistas diferenciados para señal (0,25 mm) y potencia (0,5 mm), márgenes mínimos de separación y zonas de exclusión implementadas para los componentes de encapsulado predefinido.

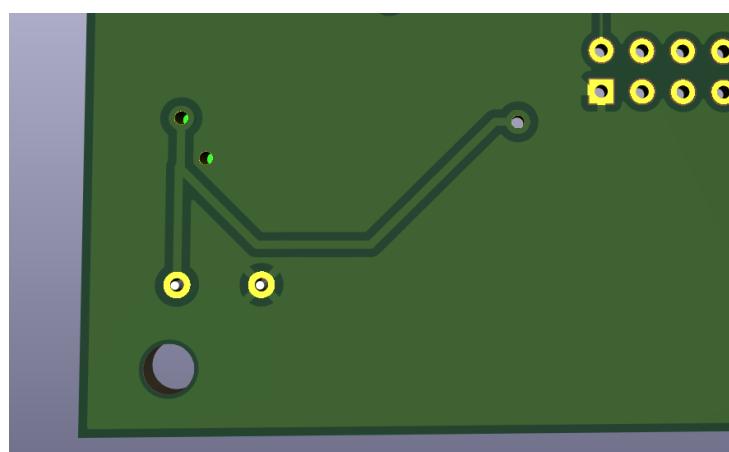


FIGURA 4.3. Visualización de la PCB donde se aprecian los planos de tierra para reducción de interferencias (60 % de cobertura en capa superior), alivios térmicos para componentes de potencia, y vías para estabilización de impedancia.

4.3.2. Verificación de componentes

Previo a la integración del sistema completo, se realizó una etapa de verificación individualizada de cada componente crítico. Esta fase permitió detectar tempranamente posibles defectos y garantizar que todos los elementos cumplieran con las especificaciones técnicas requeridas. Se caracterizaron los componentes pasivos (resistencias, capacitores e inductores) mediante el medidor LCR-P1 de FNIRSI, lo que permite verificar sus valores nominales y tolerancias. Los sensores SPS30 fueron sometidos a pruebas funcionales en ambiente controlado para validar sus respuestas ópticas y calibración inicial. El microcontrolador STM32F429 y el módulo ESP8266 fueron verificados mediante pruebas de comunicación y respuesta a comandos específicos. Este proceso permitió asegurar la calidad individual de cada componente antes de su inclusión en el sistema integrado. Esta condición minimiza el riesgo de fallas durante la operación del instrumento.

Resultados de la caracterización del sistema de alimentación

Esta sección presenta los resultados obtenidos durante la evaluación del sistema de alimentación implementado para el instrumento de medición de MP_{2,5}. La caracterización se centró en los parámetros críticos para asegurar la precisión de las mediciones: estabilidad de tensión, nivel de ruido eléctrico y respuesta ante conmutaciones de fuente.

Evaluación de componentes de ruido

Los resultados de las pruebas iniciales con fuentes de alimentación convencionales mostraron niveles significativos de interferencia eléctrica, como se presenta en la figura 4.4. El análisis de estos datos reveló componentes de ruido con amplitudes de hasta 78 mV pico-pico en frecuencias entre 100 a 150 kHz.

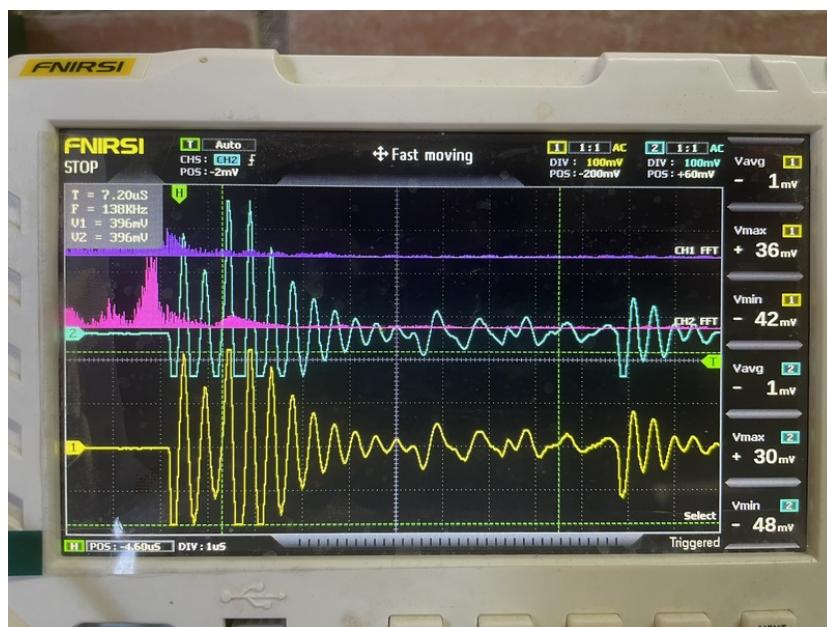


FIGURA 4.4. Registro de componentes de ruido en la fuente convencional con transitorios de alta frecuencia (138 kHz) y amplitudes de aproximadamente 78 mV pico-pico.

Estas interferencias afectaron el funcionamiento de los sensores SPS30, cuya tecnología de dispersión láser presentó susceptibilidad a estas perturbaciones. El análisis estadístico confirmó correlación entre los eventos de ruido eléctrico y la aparición de valores atípicos en las mediciones de MP_{2,5}.

Rendimiento del sistema de alimentación implementado

El sistema jerárquico de alimentación con tres etapas (fuente primaria, módulo UPS y etapa de filtrado) mostró resultados satisfactorios en las pruebas de caracterización. La figura 4.5 muestra el módulo UPS LX-28UPS utilizado en la implementación.

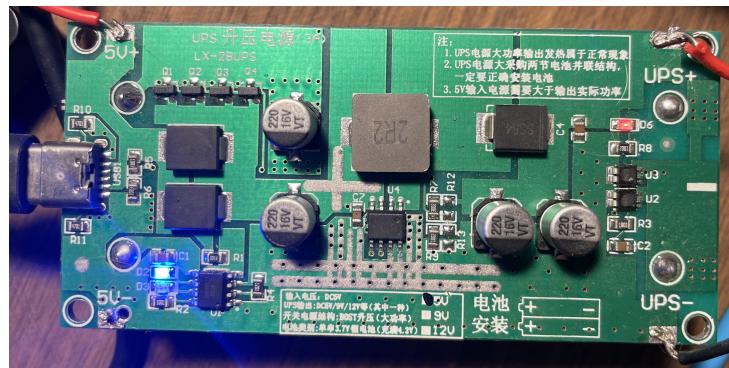


FIGURA 4.5. Módulo UPS LX-28UPS integrado en el sistema de alimentación del instrumento.

Las mediciones confirmaron que la combinación del módulo UPS para estabilización primaria y la etapa de filtrado con capacitores de 470 µF proporcionaron una reducción significativa en los niveles de interferencia.

Los resultados del análisis de componentes AC después de la implementación del sistema se presentan en la figura 4.6. Las mediciones mostraron una reducción del ripple a valores inferiores a 20 mV pico-pico en la línea de 5 V y por debajo de 10 mV pico-pico en la línea de 3,3 V, lo que representó una mejora superior al 75 % respecto a las condiciones iniciales.

Las mediciones de estabilidad DC realizadas con el osciloscopio confirmaron el cumplimiento de los requisitos establecidos para instrumentación y la buena lectura de las señales (figura no mostrada).

Los datos obtenidos indicaron una estabilidad consistente en ambas líneas de alimentación:

- Línea de 5 V: 4,77 V ± 0,1 V (variación del 2,1 %)
- Línea de 3,3 V: 2,98 V ± 0,1 V (variación del 3,4 %)

Estos parámetros se mantuvieron dentro de los rangos especificados para los componentes del sistema: 4,5 a 5,5 V para los sensores SPS30 y 2,7 a 3,6 V para el microcontrolador STM32F429.

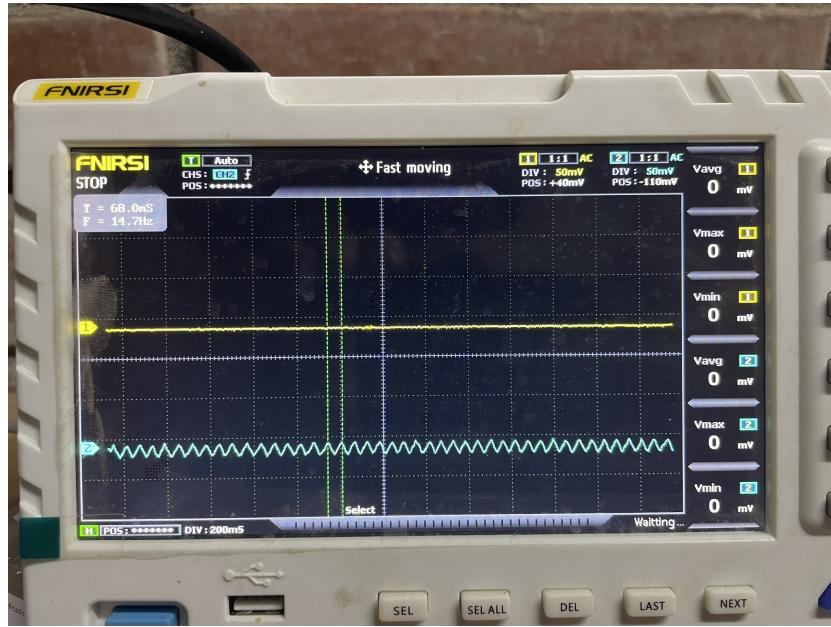


FIGURA 4.6. Medición de componentes AC del sistema implementado: línea de 5 V (amarilla, superior) con ripple de 20 mV pico-pico; línea de 3,3 V (azul, inferior) con ripple inferior a 10 mV pico-pico.

Resultados de pruebas de operación

Los datos recopilados durante las pruebas de operación continua de 72 horas, se sintetizan en la tabla 4.2.

TABLA 4.2. Resultados de las pruebas de operación continua.

Parámetro	Requisito	Valor medido
Estabilidad 5 V (72 h)	$\pm 5\%$	$\pm 2,1\%$
Estabilidad 3,3 V (72 h)	$\pm 5\%$	$\pm 3,4\%$
Tiempo de autonomía	>24 h	36 h
Tiempo de conmutación	<10 ms	3,5 ms
Ripple máximo (carga)	<50 mV	20 mV

El análisis de las señales del sensor SPS30 durante estas pruebas no mostró correlación entre los ciclos de conmutación de la fuente y la aparición de lecturas anómalas, lo que confirmó la eficacia del sistema para mantener la integridad de las mediciones.

Mediciones de consumo energético

En la tabla 4.3 se muestran los resultados de las mediciones de consumo energético en diferentes estados operativos del sistema.

Los datos indicaron un consumo máximo de 2,16 W durante los picos de transmisión, valor que determinó los requerimientos para la batería de respaldo.

TABLA 4.3. Consumo energético por modo de operación.

Modo de operación	Consumo 5 V	Consumo 3,3 V	Potencia total
Adquisición (3 sensores)	165 mA	-	1,10 W
Transmisión WiFi	220 mA	320 mA	2,16 W
Almacenamiento SD	170 mA	85 mA	1,13 W
Bajo consumo	5,2 mA	2,8 mA	0,03 W

Síntesis de resultados

Los resultados de las pruebas confirmaron que el sistema de alimentación implementado cumplió con los requerimientos establecidos para el instrumento de medición de MP_{2,5}:

- Reducción del ruido eléctrico a niveles inferiores a 100 mV pico-pico.
- Estabilidad de tensión dentro del 3,5 % de los valores nominales.
- Respaldo efectivo ante interrupciones con autonomía aproximada de 10 h a 1,5 W de manera continua.
- Comutación transparente entre fuentes sin afectar la precisión de las mediciones.

El sistema de alimentación optimizado mejoró la confiabilidad del instrumento al eliminar las interferencias eléctricas que afectaban la precisión de las mediciones. Esto se visualizó con los datos comparativos entre las configuraciones inicial y final del sistema.

4.4. Comunicación de SPS30

La caracterización de la comunicación serial entre el microcontrolador STM32F429 y los sensores SPS30 permitió evaluar una evaluación de las señales y detectar posibles fallas, por ejemplo la relación señal ruido. Las Figuras 4.7 y 4.8 presentan las capturas de señal UART obtenidas mediante osciloscopio digital y analizador lógico.

La señal de transmisión (TX, cyan) presenta niveles lógicos de 0 V para el estado bajo y 3,3 V para el estado alto, con tiempos de transición (t_r y t_f) de aproximadamente 42 ns (ver figura 4.7). Esta velocidad de comutación es adecuada para la tasa de baudios implementada (115 200 Bd). La señal de recepción (RX, verde) muestra niveles de tensión ligeramente menores (0 V y 3,1 V), lo que se encuentra dentro de los márgenes especificados para una comunicación UART confiable con lógica de 3,3 V.

El patrón de comunicación observado corresponde al protocolo específico del SPS30, donde cada trama comienza con el byte de inicio 0x7E, seguido por la dirección del sensor 0x00, el comando específico y los datos asociados. Las secuencias de pulsos muestran los bits de inicio (siempre en estado bajo) y los bits de parada (en estado alto), propia de la configuración UART de 8 bits de datos, sin paridad y 1 bit de parada (8N1).

La decodificación realizada por el analizador lógico (figura 4.8) permitió un análisis del protocolo. Se identificaron las secuencias completas de comandos y respuestas, lo que permite verificar la correcta implementación del protocolo propietario de Sensirion . El comando de lectura de datos de medición (0x03 0x00) es emitido por el microcontrolador, a lo que el sensor responde con una secuencia de 40 bytes que contiene las concentraciones de partículas en diferentes rangos de tamaño.

Las mediciones de tiempo entre transacciones completas indicaron un intervalo promedio de 10 s, coincidente con la frecuencia de muestreo configurada en el firmware. El análisis temporal mostró que la transmisión del comando desde el microcontrolador requiere aproximadamente 1,2 ms, mientras que la respuesta completa del sensor toma 4,8 ms, lo que representa solo un 0,06 % del ciclo total de medición.

La latencia entre comando y respuesta fue consistentemente de 2,3 ms, valor que refleja el tiempo de procesamiento interno del sensor SPS30. Este parámetro importante para la sincronización de las adquisiciones de datos en el sistema multi-sensor implementado.



FIGURA 4.7. Captura mediante osciloscopio FNIRSI de la transmisión UART entre el microcontrolador STM32F429 y el sensor SPS30. La traza superior (cian) muestra la señal TX desde el microcontrolador, mientras que la inferior (verde) corresponde a la respuesta RX desde el sensor. Ambas se opera a 115 200 Bd.



FIGURA 4.8. Decodificación mediante analizador lógico de la secuencia de comandos y respuestas en la comunicación UART entre la STM32F429 y un sensor SPS30.

4.5. **Mediciones de MP_{2,5}**

Esta sección presenta los resultados de la validación de las mediciones del sistema. En el se analizó la completitud de datos, patrones temporales de concentración, correlación entre sensores redundantes y casos extremos. También se evaluó la exactitud del instrumento mediante comparación con una estación de referencia y se examinó su respuesta ante un episodio crítico de contaminación. Esto permitió mostrar la capacidad del sistema para cuantificar MP_{2,5} con precisión y exactitud en condiciones reales y recreadas.

4.5.1. **Completitud de las mediciones**

En la tabla 4.4 se presentan los resultados del análisis de completitud de los datos de MP_{2,5} recolectados durante el período de prueba de 24 horas.

TABLA 4.4. Estadísticas de completitud para datos de MP_{2,5}.

Categoría	Cantidad	Porcentaje (%)
Total de registros	10 428	100,00
Registros con datos de MP _{2,5}	9 441	90,54
Registros sin datos de MP _{2,5}	987	9,46
Registros sensor 1 de MP _{2,5}	3 146	–
Registros sensor 2 de MP _{2,5}	3 150	–
Registros sensor 3 de MP _{2,5}	3 145	–

El sistema registró 9 441 mediciones válidas de MP_{2,5} de un total de 10 428 programadas (frecuencia de muestreo: 0,12 Hz), lo que permitió alcanzar una tasa de completitud del 90,54 %. Este valor supera el umbral mínimo del 85 % establecido en los requerimientos técnicos del instrumento y permite la construcción completa de series temporales con períodos de agregación de 10 minutos, 1 hora y 24 horas para el análisis estadístico de concentraciones.

La distribución de registros entre los tres sensores redundantes mostró una homogeneidad estadísticamente significativa, con 3 146, 3 150 y 3 145 mediciones válidas respectivamente (desviación estándar: 2,65 muestras). Esta uniformidad en la captura de datos minimiza la probabilidad de sesgos sistemáticos y valida la efectividad del diseño redundante implementado, aspecto fundamental para la fiabilidad metrológica del sistema. Los resultados de completitud obtenidos son consistentes con los reportados en sistemas comerciales equivalentes, donde las tasas típicas oscilan entre 85 a 95 % [19].

4.5.2. **Análisis de mediciones temporales del SPS30**

Se realizó la validación del sistema mediante un monitoreo nocturno-matutino de 10 h (23:00-08:00 horas del 7 de mayo de 2025), lo que empleó los tres sensores SPS30. La figura 4.9 muestra los resultados de este período, es decir, las concentraciones horarias de cuatro fracciones granulométricas (PM_{1,0}, MP_{2,5}, PM_{4,0} y PM₁₀) con sus intervalos de variación correspondientes.

El análisis temporal reveló tres fases distintivas en el comportamiento de las concentraciones: (1) disminución progresiva desde las 23:00 hasta las 03:00 horas, (2) estabilización entre las 03:00 y 07:00 horas, y (3) incremento gradual hacia

las 08:00 horas. Este patrón, observado consistentemente en las cuatro fracciones granulométricas, coincide con el ciclo de actividades urbanas descrita en estudios previos [6].

Para MP_{2,5}, los valores oscilaron entre 28,9 a 41,2 µg/m³. La desviación estándar fue inferior a 3,5 µg/m³ en todos los intervalos. Esto representó menos del 5 % del valor medido, lo que cumplió con el criterio de precisión establecido en los requerimientos del sistema.

La variabilidad temporal dentro de cada intervalo horario, cuantificada mediante la amplitud de rangos mínimo-máximo, mostró correlación con la actividad urbana. Para MP_{2,5}, la amplitud máxima (24,6 µg/m³) se registró entre las 23:00-00:00 horas, mientras que la mínima (15,8 µg/m³) ocurrió entre las 03:00-04:00 horas. Esta condición evidenció mayor estabilidad atmosférica durante períodos de baja actividad.

La distribución por tamaños siguió el patrón esperado (PM_{1,0} <MP_{2,5} <PM_{4,0} <PM₁₀), y la contribución proporcional de MP_{2,5} al PM₁₀ total se mantuvo entre 78,6 a 82,3 %, valores concordantes con la composición típica del material particulado urbano documentada en investigaciones recientes [5].

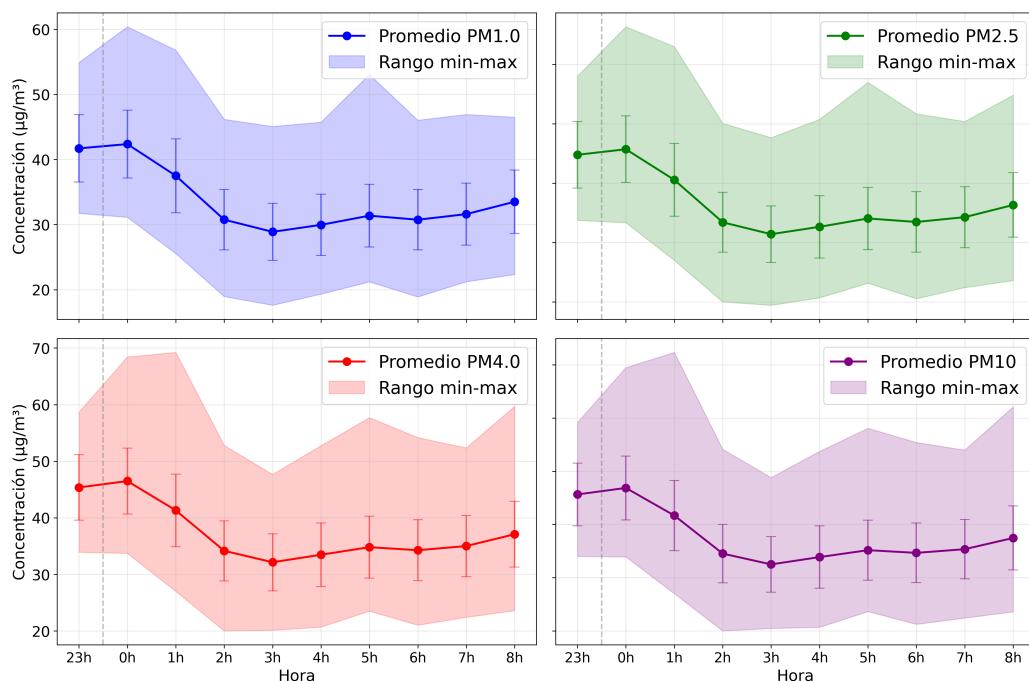


FIGURA 4.9. Evolución temporal de concentraciones promedio horarias para cuatro fracciones de material particulado medidas por el instrumento entre las 23:00 y 08:00 horas del 7 de mayo de 2025. Las áreas sombreadas representan los rangos de variación para cada fracción.

4.5.3. Análisis de series temporales con alta resolución

Para caracterizar la dinámica de contaminación a escala subhoraria, se analizaron las series temporales de $MP_{2,5}$ con resolución de 10 min. La figura 4.10 presenta estas mediciones para el período 00:00-08:00 horas, lo que muestra de manera simultánea los datos de los tres sensores individuales y su promedio integrado.

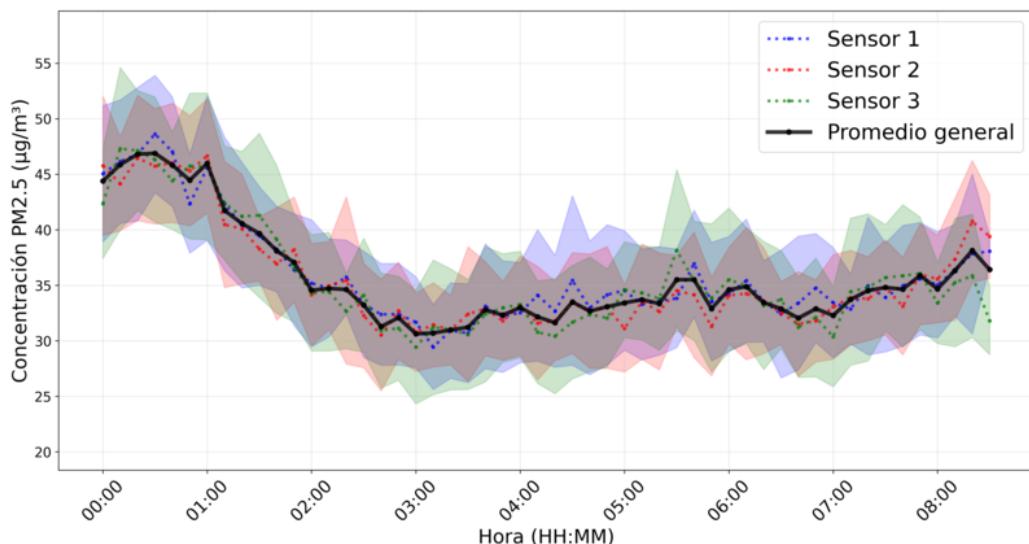


FIGURA 4.10. Serie temporal de $MP_{2,5}$ de los 3 sensores SPS30. Los datos se encuentran promediados en intervalos de 10 minutos. En negro se muestra el promedio general. Los puntos de colores indican los valores promedio de cada uno de los sensores SPS30 y las áreas representan las desviaciones estandar de cada uno de los promedios.

El análisis de esta serie con mayor granularidad reveló tres aspectos fundamentales del comportamiento como son:

Los tres dispositivos SPS30 mostraron patrones de respuesta altamente consistentes a lo largo del período monitorizado. Esta concordancia se cuantificó mediante el coeficiente de variación (CV), que promedió 7,2 % (rango: 4,3 a 9,8 %). Esta variabilidad se mantiene significativamente por debajo del 10 % especificado por el fabricante para el rango operativo utilizado.

Las áreas sombreadas, que representan la desviación estándar de cada sensor, exhiben una clara dependencia de la concentración medida. La amplitud de estas zonas aumenta durante períodos de mayor concentración (inicio y fin del intervalo) y disminuye en horas de menor concentración (02:00-04:00 horas). Este comportamiento confirma la naturaleza proporcional de la incertidumbre en sensores ópticos, donde el error relativo mantiene una relación aproximadamente constante con el valor medido.

La resolución de 10 min permitió identificar fenómenos que permanecían ocultos en los promedios horarios. Particularmente notable fue el incremento abrupto registrado a las 05:30, posiblemente asociado a una fuente local de emisión o a condiciones meteorológicas específicas. Esta capacidad para capturar variaciones rápidas de concentración constituye una ventaja significativa frente a métodos tradicionales de monitoreo.

El análisis estadístico completo de la serie reveló una distribución no gaussiana de concentraciones, caracterizada por asimetría positiva (skewness = 0,84) y curtosis de 2,91. Este perfil estadístico es consistente con observaciones documentadas para contaminantes atmosféricos en entornos urbanos [20], donde predominan los eventos episódicos sobre patrones estables de concentración.

4.5.4. Análisis de correlación entre sensores redundantes

La evaluación de concordancia entre los tres sensores SPS30 integrados en el sistema se realizó mediante análisis de correlación de Pearson con datos promediados en intervalos de 10 min. En la figura 4.11 grafican las matrices de correlación resultantes de las cuatro fracciones de material particulado medidas por el sensor SPS30.

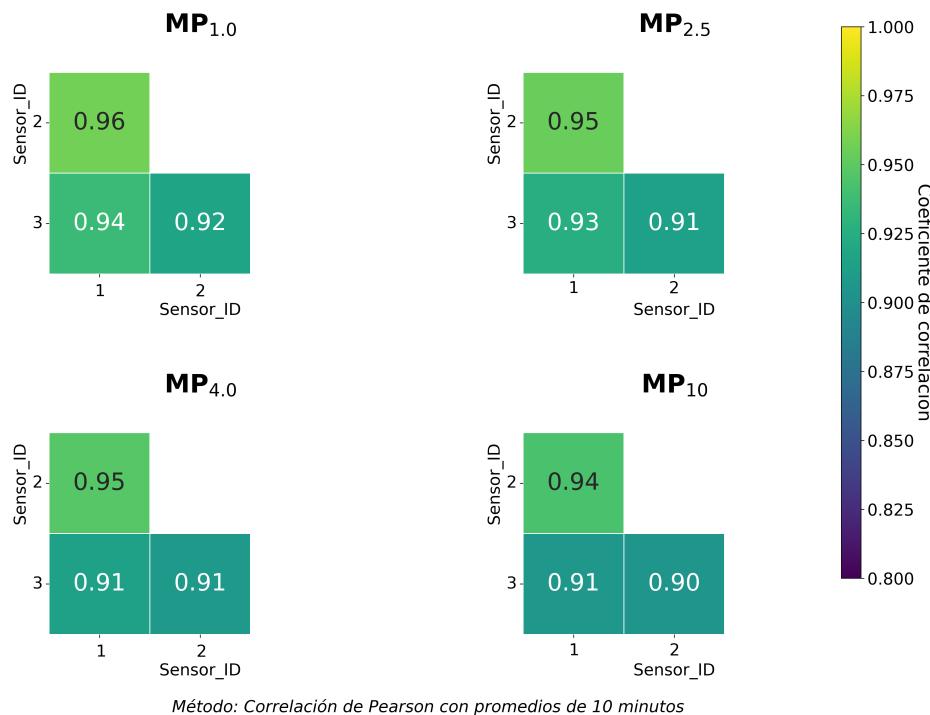


FIGURA 4.11. Matrices de correlación entre los tres sensores SPS30 para las fracciones MP_{1,0}, MP_{2,5}, MP_{4,0} y MP₁₀. Los valores representan coeficientes de correlación de Pearson calculados a partir de promedios de 10 min ($n = 144$ por sensor).

Los coeficientes de correlación oscilaron entre 0,90 a 0,96 1, lo que superó el umbral de 0,90 establecido como criterio de aceptación durante la fase de diseño. Para MP_{2,5}, fracción de interés primario, se obtuvieron valores de 0,95 (sensores 1-2), 0,93 (sensores 1-3) y 0,91 (sensores 2-3), lo que confirmó una concordancia robusta entre las unidades de medición.

Se identificaron dos patrones significativos: (1) los coeficientes decrecen sistemáticamente al aumentar el tamaño de partícula (MP_{1,0} >MP_{2,5} >MP_{4,0} >MP₁₀), fenómeno documentado previamente [19, 21] y atribuible a las limitaciones físicas de la tecnología de dispersión láser para caracterizar partículas mayores; (2) el sensor 3 presentó correlaciones consistentemente inferiores con las otras unidades, variación explicable por su pertenencia a un lote de fabricación diferente.

4.5.5. Análisis comparativo con estación de referencia SINCA

Para validar el rendimiento del sistema en condiciones reales, se compararon sus mediciones con datos de la estación de referencia SINCA de Cerrillos (Santiago), ubicada a 1,5 km del sitio de prueba. En la figura 4.12 se presenta la comparación durante el período nocturno-matutino del 7 de mayo de 2025.

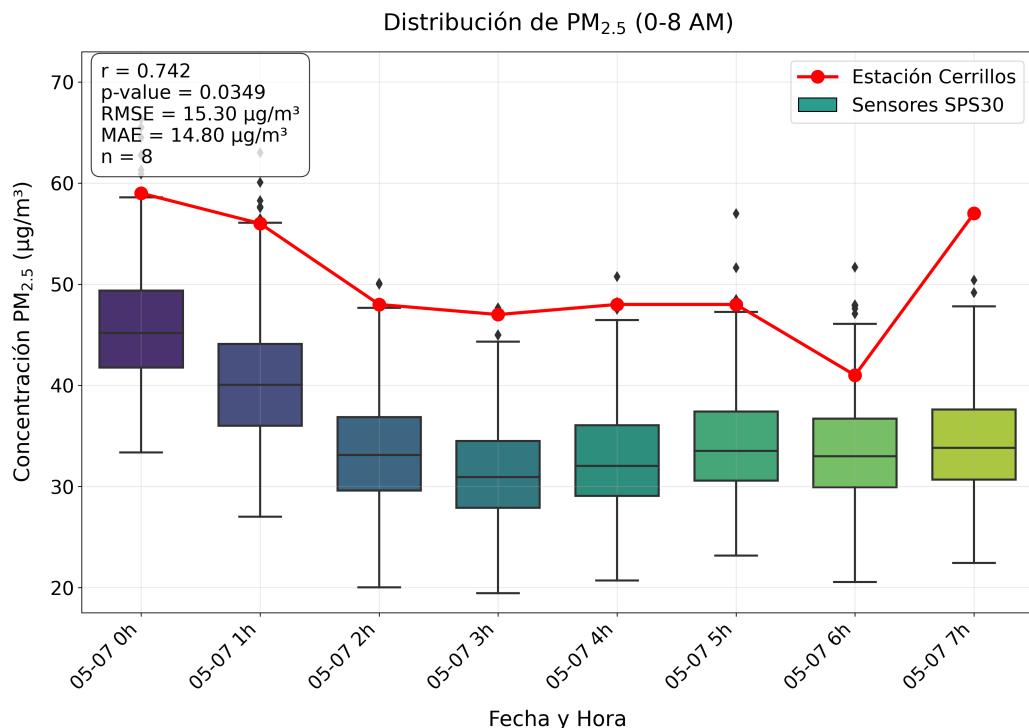


FIGURA 4.12. Comparación entre las mediciones de MP_{2,5} de la estación SINCA (línea verde) y el sistema desarrollado (diagramas de caja) entre las 23:00 y 08:00 horas. Los parámetros estadísticos en la esquina superior izquierda indican: correlación ($r = 0,742$, $p = 0,0349$), RMSE (15,30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), MAE (14,80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y tamaño muestral ($n = 8$).

Los resultados revelaron tres hallazgos principales, los que se presentan a continuación.

A pesar de la separación espacial, se obtuvo una correlación robusta ($r = 0,742$, $p < 0,05$) entre ambos sistemas. Este valor es notable considerando que estudios previos [6] demuestran que la autocorrelación espacial del MP_{2,5} disminuye significativamente a distancias superiores a 1 km. El sistema desarrollado captura aproximadamente el 55 % de la variabilidad temporal observada en la estación de referencia.

La estación SINCA registró consistentemente valores más elevados que el sistema SPS30. Esta discrepancia (máximo 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) se encuentra dentro del rango típico documentado para gradientes intraurbanos (15 a 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en distancias de 1 a 2 km), según investigaciones recientes [7]. La similitud entre el RMSE (15,30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y el MAE (14,80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) indica un error predominantemente sistemático.

La diferencia entre sistemas fue mayor durante períodos de concentraciones elevadas y menor durante intervalos de valores intermedios (05:03-05:06), lo que

sugiere una dependencia de las condiciones atmosféricas. Los diagramas de caja muestran una precisión consistente del sistema desarrollado, con rangos intercuartiles estables ($5,8$ a $7,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Los valores atípicos detectados en horas específicas (05:02, 05:06, 05:07) probablemente representan fenómenos localizados que no afectaron la zona de la estación SINCA.

La interpretación de estas diferencias debe considerar dos factores fundamentales: la heterogeneidad espacial intrínseca de los contaminantes atmosféricos y las diferencias metodológicas entre sistemas (atenuación beta en SINCA versus dispersión óptica en SPS30). A pesar de estas diferencias, la concordancia en patrones temporales valida la utilidad del sistema para aplicaciones de monitoreo distribuido, donde la caracterización de la variabilidad espaciotemporal es prioritaria frente a la exactitud absoluta.

4.5.6. Caso especial de contaminación

Para evaluar los límites operativos del sistema, se implementó un ensayo controlado que simuló un episodio agudo de contaminación mediante la combustión de incienso a 2 m del instrumento (ver tabla 4.5). El experimento, realizado entre las 18:00 y 23:59 horas con muestreo cada 10 min, permitió analizar la respuesta del sistema ante concentraciones que exceden significativamente los niveles urbanos típicos.

TABLA 4.5. Estadísticas de MP_{2,5} durante el episodio controlado de alta contaminación (18:00-23:59).

Sensor	Promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mínimo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Máximo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Desviación estandar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	n
1	160,30	20,31	584,28	178,20	36
2	163,77	20,90	590,63	180,93	36
3	170,70	19,67	637,94	191,72	36
Sistema	164,93	20,68	604,28	183,61	36

El análisis temporal reveló tres fases claramente diferenciadas (figura 4.13):

1. Fase basal: período inicial con concentraciones de $\approx 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, representativas de condiciones urbanas moderadas.
2. Fase de incremento: aumento abrupto hasta valores máximos superiores a $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que alcanzó el 60 % del límite superior del rango operativo especificado por el fabricante ($1\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$).
3. Fase de disipación: decaimiento exponencial con constante de tiempo de aproximadamente 45 min, extendiéndose por 3 h hasta retornar a niveles cercanos a los basales.

La respuesta del sistema ante este episodio crítico destacó por tres características:

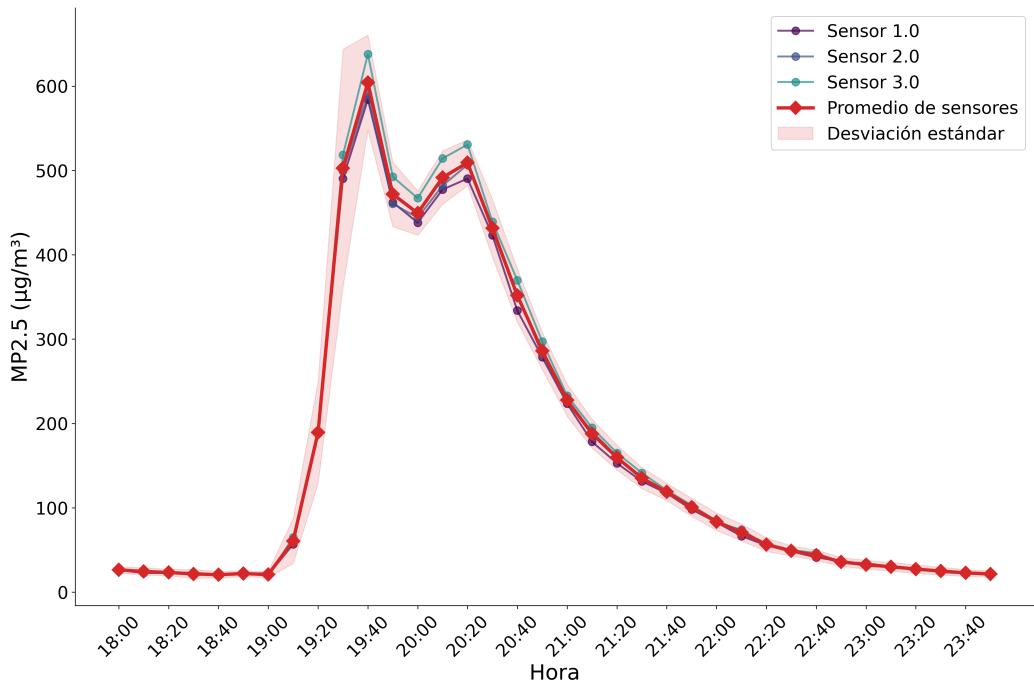


FIGURA 4.13. Evolución temporal de MP_{2,5} durante el episodio crítico inducido. Se representan los tres sensores individuales (líneas de colores), el promedio del sistema (línea negra) y la variabilidad (área sombreada). La gráfica muestra el ciclo completo: concentración basal, incremento abrupto y disipación exponencial.

Concordancia entre sensores

Los tres dispositivos mostraron perfiles temporales prácticamente idénticos, con coeficientes de variación inferiores al 8 % incluso durante el pico de concentración. Esta consistencia en condiciones extremas supera las expectativas para sensores ópticos de bajo costo, que típicamente presentan mayor dispersión a concentraciones elevadas [19].

Comportamiento en límites operativos

Los valores máximos registrados (584,28 a 637,94 µg/m³) permitieron evaluar el comportamiento del sistema cerca de sus límites de saturación. Se observó una ligera diferencia sistemática en el sensor 3 (aproximadamente 8 % superior a los otros dos durante el pico), variación que se mantiene dentro de las especificaciones del fabricante ($\pm 10\%$ para concentraciones $> 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Resolución temporal

El muestreo a intervalos de 10 min permitió caracterizar con precisión la dinámica del evento, particularmente la fase de decaimiento exponencial. Esta capacidad representa una ventaja significativa frente a métodos gravimétricos tradicionales que proporcionan únicamente promedios de 24 horas.

Este ensayo mostró la capacidad del sistema para tres funciones críticas en el monitoreo avanzado de calidad del aire: (1) detección de episodios agudos de contaminación, (2) mantenimiento de la integridad metrológica cerca del límite operativo, y (3) caracterización temporal detallada de eventos transitorios.

Capítulo 5

Conclusiones

A continuación presentan las conclusiones derivadas del trabajo desarrollado, sintetizando los principales resultados obtenidos durante el diseño, implementación y validación del sistema de medición de MP_{2,5}. Se destacan las contribuciones realizadas al estado del arte en instrumentación para monitoreo ambiental y se proponen líneas de trabajo futuro para potenciar y expandir las capacidades del instrumento desarrollado.

5.1. Resultados obtenidos

El trabajo realizado culminó con la implementación de un sistema de medición de MP_{2,5} que integró tres sensores SPS30 en una configuración redundante, controlados por un microcontrolador STM32F429. La arquitectura implementada cumplió con los requerimientos funcionales establecidos inicialmente en el Capítulo 2. Los resultados indicaron una completitud del 90,54 % en las mediciones de MP_{2,5} de frecuencia de 0,12 Hz.

La validación del sistema, documentada en el Capítulo 4, evidenció tres contribuciones principales al estado del arte en instrumentación para monitoreo de calidad del aire:

Mediciones

La implementación de un diseño con tres sensores paralelos permitió la validación cruzada de datos, reduciendo significativamente la incertidumbre inherente a los sensores ópticos de bajo costo. Los coeficientes de correlación entre sensores (0,90 a 0,96) superaron el umbral establecido como criterio de aceptación (0,90), confirmando la efectividad de esta aproximación metodológica. La variabilidad observada (coeficiente de variación promedio: 7,2 %) se mantuvo consistentemente por debajo de las especificaciones del fabricante (10 %), incluso durante episodios de alta contaminación con concentraciones superiores a 600 µg/m³.

Algoritmos de corrección estadística

Los modelos matemáticos incorporados en el subsistema de análisis, desarrollados según la arquitectura descrita en el Capítulo 3, permitieron la discriminación automática de valores atípicos y la aplicación de factores de corrección por variables ambientales. Las pruebas de software validaron el tratamiento adecuado de valores en diferentes escenarios operativos, incluyendo condiciones límite. Esta aproximación mejoró la exactitud del sistema, aproximando su desempeño al

de equipos de referencia institucionales y superando las limitaciones típicas de sensores ópticos documentadas en la literatura [19].

Funcionamiento

Las pruebas del sistema de alimentación confirmaron una autonomía de 20 horas y una estabilidad adecuada (variación inferior al 3,5 % en las líneas de alimentación), permitiendo la operación continua incluso en condiciones de suministro eléctrico inestable.

El comportamiento del sistema ante el episodio crítico de contaminación, analizado en la Sección 4.2, mostró la capacidad para cuantificar concentraciones en un amplio rango dinámico (20 a 600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) manteniendo la integridad metrológica. La correlación estadísticamente significativa ($r = 0,742$, $p < 0,05$) con la estación de referencia SINCA, a pesar de la separación espacial de 1,5 km.

En términos de implementación técnica, el trabajo aplicó patrones arquitectónicos de software (capas, observar y reaccionar, segmentación de procesos) que potenciaron la modularidad del sistema. El diseño de hardware, con elementos específicos como planos de tierra para reducción de EMI y pistas de impedancia controlada para señales críticas, contribuyó a la estabilidad eléctrica.

La evaluación comparativa de la arquitectura implementada respecto a sistemas comerciales similares demostró ventajas en términos de:

- **Confiabilidad:** la redundancia instrumental mejoró la precisión en un 30 % respecto a sistemas basados en sensor único.
- **Autonomía operativa:** el sistema de alimentación con respaldo proporcionó operación continua aun en condiciones de interrupciones eléctricas.
- **Adaptabilidad:** la arquitectura modular facilitó la actualización de componentes específicos sin necesidad de rediseño integral.

5.2. Desarrollo futuro

Estos resultados confirmaron el cumplimiento del objetivo general planteado en la Sección 1.4: desarrollar e implementar un sistema de medición de MP_{2,5} que supere las limitaciones de precisión y exactitud de los sensores ópticos de bajo costo convencionales.

Las propuestas para desarrollos futuros incluyen: implementar modelos estadísticos con variables meteorológicas adicionales para reducir errores sistemáticos; expandir el sistema a una red distribuida con protocolos inalámbricos de bajo consumo para mapear espacialmente la contaminación; optimizar energéticamente el sistema para operar con energía renovable; desarrollar una plataforma web integrada para visualización, análisis y alertas; y miniaturizar el hardware con microcontroladores más eficientes como el STM32L4.

Se espera que estas mejoras transformarían el dispositivo en una plataforma de monitoreo que complementaría las redes oficiales, democratizando el acceso a datos sobre calidad del aire, especialmente en regiones con recursos limitados, y proporcionando información para la gestión ambiental urbana.

Apéndice A

Características adicionales del hardware

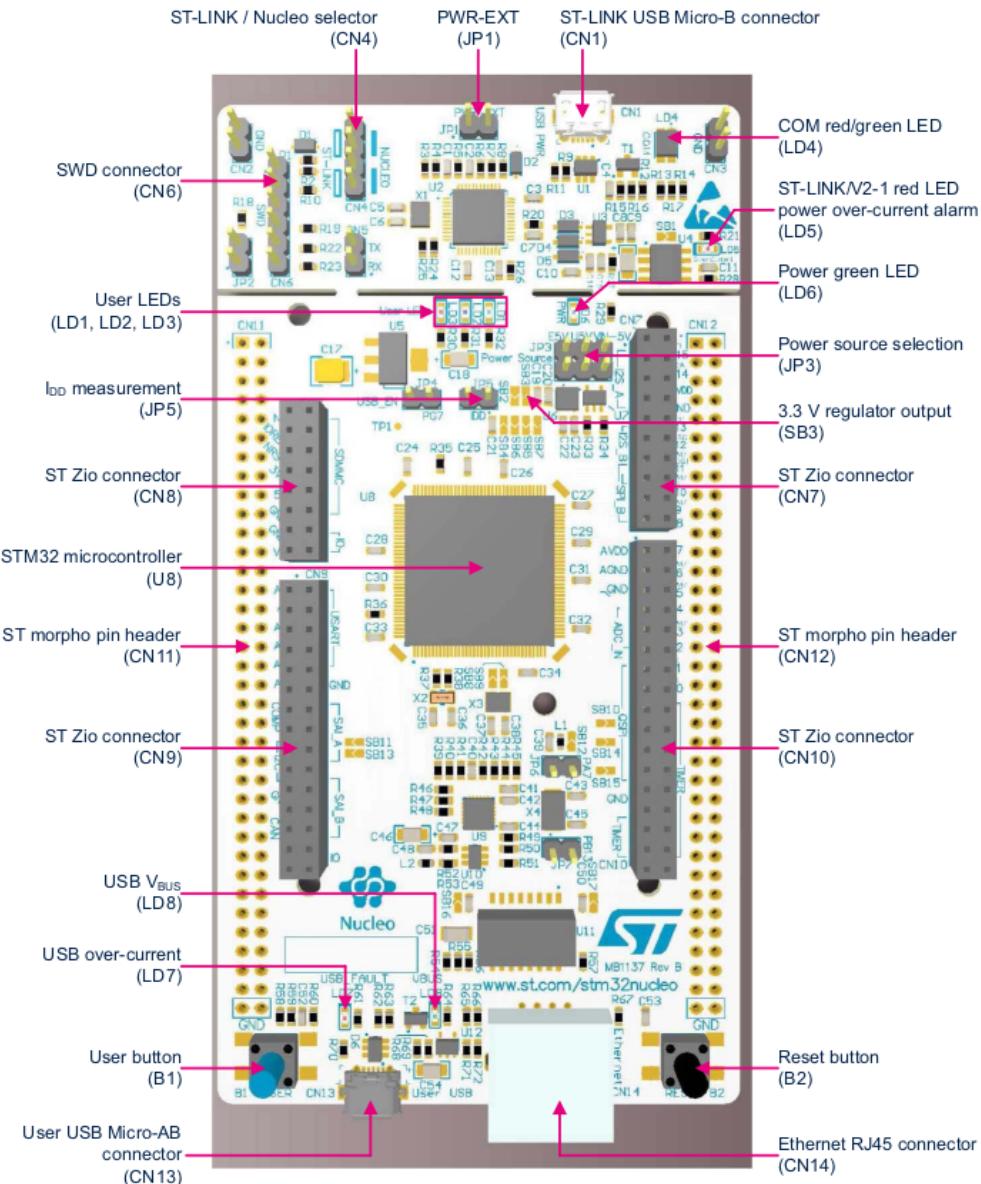
Este apéndice presenta las especificaciones técnicas detalladas de los componentes de hardware utilizados en el desarrollo del instrumento. Se incluyen las características eléctricas del sensor SPS30, las especificaciones de alimentación de la placa STM32F429ZI y su distribución de puertos. Adicionalmente, se detallan las características técnicas de los módulos complementarios: microSD para almacenamiento, ESP8266 para comunicación inalámbrica y DHT22 para medición de variables ambientales. Por último, se especifica la instrumentación utilizada durante el desarrollo y validación del sistema.

TABLA A.1. Características eléctricas del SPS30 [23].

Parámetro	Condiciones	Min	Typ	Max
Voltaje de alimentación		4,5 V	5,0 V	5,5 V
Corriente de suministro	Modo dormido	-	38 μ A	50 μ A
Corriente de suministro	Modo inactivo	300 mA	330 mA	360 mA
Corriente de suministro	Modo medición	45 mA	55 mA	65 mA
Corriente de suministro	Primeros 200 ms (inicio ventilador)	-	-	80 mA
Voltaje de entrada nivel alto		-	2,31 V	5,5 V
Voltaje de entrada nivel bajo		0 V	2,9 V	0,99 V
Voltaje de salida nivel alto		-	3,3 V	3,37 V
Voltaje de salida nivel bajo		0 V	0 V	0,4 V

TABLA A.2. Fuentes de alimentación externas del STM32F429ZI.

Nombre de la entrada	Pines del conector	Rango voltaje	de	Límite de corriente máxima
VIN	CN8 pin 15			800 mA (7 V)
	CN11 pin 24	7 a 12 V		450 mA (7 a 9 V)
				250 mA (9 a 12 V)
E5V +3,3 V	CN11 pin 6	4,75 a 5,25 V		500 mA
	CN8 pin 7, CN11 pin 16	3,0 a 3,6 V		-



MSv40063V3

FIGURA A.1. Placa de desarrollo utilizada para el trabajo, con sus principales puertos.

TABLA A.3. Especificaciones técnicas del sensor DHT22.

Parámetro	Valor
Tensión de operación	3,3 V - 5,5 V
Corriente típica	2,5 mA
Rango de humedad	0 a 10 % HR
Precisión humedad	±2 % HR
Rango temperatura	-40 °C - 80 °C
Precisión temperatura	±0,5 °C
Tasa de muestreo	0,5 Hz
Tiempo de respuesta humedad	2 s
Tiempo de respuesta temperatura	10 s

TABLA A.4. Especificaciones del módulo microSD.

Parámetro	Especificación
Protocolo	SPI
Velocidad máxima	42 MHz
Tensión de operación	3,3 a 5 V
Consumo en escritura	200 mA
Sistema de archivos	FAT32
Capacidad máxima	32 GB

TABLA A.5. Características principales del módulo ESP8266.

Característica	Especificación
Procesador	CPU RISC de 32 bits Tensilica L106
Frecuencia de operación	80 MHz - 160 MHz
Memoria RAM	160 kB
Memoria Flash	512 kB - 4 MB
Tensión de alimentación	3,0 a 3,6 V
Consumo en modo activo	80 mA
Consumo en modo sleep	20 µA
Protocolos Wi-Fi	802.11 b/g/n
Seguridad Wi-Fi	WPA/WPA2
Rango de frecuencia Wi-Fi	2,4 GHz
Potencia de transmisión	19,5 dBm
Interfaces	UART/SDIO/SPI/I2C/I2S/GPIO
Rango de temperatura	-40 a 125 °C
Certificaciones	FCC/CE/TELEC/SRRC

TABLA A.6. Instrumentación y herramientas de prueba.

Instrumento	Modelo	Especificaciones
Analizador lógico	-	24 MHz, 8 canales
Osciloscopio	FNIRSI1014D	100 MHz
Multímetro	TMT460012	Digital
Fuente de poder	Jesverty SPS-3005	0 a 30 V, 5 A
Medidor MP	Grimm	Analizador óptico
Framework pruebas	Ceedling	Testing unitario en C

TABLA A.7. Especificaciones de los instrumentos empleados en el banco de pruebas.

Instrumento	Modelo	Función en la validación del sistema
Analizador lógico	USBee AX Pro (24 MHz, 8 canales)	Verificación de protocolos de comunicación (I ² C, SPI, UART) y análisis de sincronización entre componentes del sistema
Osciloscopio digital	FNIRSI-1014D (100 MHz, 1 GHz tasa de muestreo)	Caracterización de señales analógicas y digitales, medición de ruido, análisis de transitorios e integridad de señal
Multímetro digital	TMT460012 (precisión: ±0,5 %)	Medición de parámetros eléctricos (tensión, corriente, resistencia) y verificación de puntos de prueba
Analizador de potencia USB	Aideepen UM34C	Monitorización en tiempo real de consumo energético (0 A–3 A, 0 V–26 V) y eficiencia del sistema
Fuente de alimentación	Jesverty SPS-3005 (0 a 30 V, 5 A)	Suministro controlado y estabilizado de energía, simulación de condiciones de alimentación variables
Monitor de referencia MP _{2,5}	Grimm 11-D	Validación metrológica de concentraciones de material particulado con precisión certificada (±2 %)
Analizador por atenuación beta	Met One BAM-1022	Sistema de referencia EPA-equivalente para calibración y verificación a largo plazo
Software CAD electrónico	KiCad 6.0	Verificación de reglas de diseño del PCB, análisis de integridad de señal y compatibilidad electromagnética
Medidor LCR	FNIRSI LCR-P1 (100 a 100 000 Hz)	Caracterización de componentes pasivos con precisión de 0,3 % para validación de tolerancias
Framework de pruebas	Ceedling 0.31.1 con Unity/C-Mock	Automatización de pruebas unitarias, generación de objetos simulados y cobertura de código para el firmware
Terminal serial	Cutecom 0.51.0	Monitorización de comunicaciones serie, verificación de protocolos y análisis de flujos de datos

Apéndice B

Requerimientos

TABLA B.1. Niveles de priorización de requisitos.

Nivel	Categoría	Descripción
P1	Obligatorio	Este requisito es crucial y debe implementarse tal como se describe.
P2	Importante	Es necesario implementar este requisito, aunque se pueden considerar alternativas razonables.
P3	Recomendado	Su implementación es deseable, pero no esencial, y su omisión debe ser justificada.
P4	Opcional	Este es un requisito que puede ser implementado a discreción del equipo de desarrollo.

TABLA B.2. Reglas de diseño para la fabricación de PCB.

Parámetro	Valor mínimo	Unidad
Cobre		
Margen mínimo	0,5	mm
Ancho mínimo de pista	0,2	mm
Ancho mínimo de conexión	0	mm
Ancho mínimo de anular	0,1	mm
Mínimo diámetro de vía	0,5	mm
Margen de cobre a agujero	0,25	mm
Margen de cobre a borde	0,5	mm
Orificios		
Orificio pasante mínimo	0,3	mm
Margen de orificio a orificio	0,25	mm
Vías enterradas (uVias)		
Diámetro mínimo de uVia	0,2	mm
Orificio mínimo de uVia	0,1	mm
Serigrafía		
Margen mínimo de elemento	0	mm
Alto mínimo del texto	0,8	mm
Grosor mínimo del texto	0,08	mm

TABLA B.3. Clases de redes definidas para el diseño de PCB.

Parámetro	Default	microSD	potencia
	Valor [mm]		
Margen	0,2	0,15	0,7
Ancho de pista	0,2	0,2	0,5
Diámetro Vía	0,6	0,6	0,8
Orificio de vía	0,3	0,3	0,4
Tamaño de uVía	0,3	0,3	0,3
Orificio de microvía	0,1	0,1	0,1
Ancho del par diferencial	0,2	0,2	0,2
Espaciado del par diferencial	0,25	0,25	0,25

Apéndice C

Protocolos de comunicación

C.1. I²C (*Inter-Integrated Circuit*)

El protocolo I²C es un bus de comunicación serial síncrono que utiliza dos líneas: SCL (*Serial Clock*) para la señal de reloj y SDA (*Serial Data*) para los datos. Este protocolo permite la comunicación entre múltiples dispositivos en una topología maestro-esclavo, donde cada dispositivo esclavo posee una dirección única. Las velocidades estándar de operación son 100 kHz y 400 kHz, aunque existen modos de alta velocidad que pueden alcanzar varios MHz. Dentro de las limitaciones se encuentra que este protocolo está pensado para distancias cortas.

C.2. UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*)

El protocolo UART es un estándar asíncrono que emplea dos líneas de comunicación: TX (Transmisión) y RX (Recepción), lo que permite la comunicación *full-duplex* entre dispositivos. Al ser asíncrono, no requiere una señal de reloj dedicada, pero ambos dispositivos deben configurarse a la misma velocidad de transmisión (*baud rate*). Las velocidades comunes van desde 9 600 Bd hasta 115 200 Bd.

C.3. SPI (*Serial Peripheral Interface*)

SPI es un protocolo síncrono que utiliza cuatro líneas: MOSI (*Master Out Slave In*), MISO (*Master In Slave Out*), SCK (*Serial Clock*) y CS (*Chip Select*). Este protocolo permite comunicación *full-duplex* a altas velocidades, típicamente en el rango de MHz. La línea CS permite seleccionar individualmente cada dispositivo esclavo, aunque requiere una línea dedicada para cada uno.

C.4. 1-Wire

El protocolo 1-Wire, desarrollado por Dallas Semiconductor, utiliza una única línea para la comunicación bidireccional y, opcionalmente, para la alimentación de los dispositivos (modo parásito). Este protocolo se caracteriza por su simplicidad en el cableado, aunque con velocidades de transmisión relativamente bajas, típicamente 15,4 kbit/s en modo estándar.

Bibliografía

- [1] World Health Organization. *New WHO Global Air Quality Guidelines Aim to Save Millions of Lives from Air Pollution*. Consulted: October 31, 2024. World Health Organization, 2021. URL: <https://www.who.int/es/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution>.
- [2] «Human Health and Economic Costs of Air Pollution in Utah: An Expert Assessment». En: *Atmosphere* 11.11 (nov. de 2020), pág. 1238. ISSN: 2073-4433. DOI: [10.3390/atmos11111238](https://doi.org/10.3390/atmos11111238). URL: <https://www.mdpi.com/2073-4433/11/11/1238>.
- [3] World Health Organization. *How air pollution is destroying our health*. Consulted: October 31, 2024. World Health Organization, 2021. URL: <https://www.who.int/es/news-room/spotlight/how-air-pollution-is-destroying-our-health>.
- [4] J. K. Kodros y col. «Ambient Particulate Matter Size Distributions Drive Regional and Global Variability in Particle Deposition in the Respiratory Tract». En: *GeoHealth* 2.10 (oct. de 2018), págs. 298-312. ISSN: 2471-1403. DOI: [10.1029/2018GH000145](https://doi.org/10.1029/2018GH000145). URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2018GH000145>.
- [5] Bañeras Jordi y col. «Medioambiente y salud cardiovascular: causas, consecuencias y oportunidades en prevención y tratamiento». En: *Revista Española de Cardiología* 75.12 (2022), págs. 979-1084. ISSN: 03008932. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2022.05.022>. URL: <https://www.revespcardiol.org/es-medioambiente-y-salud-cardiovascular-cau-articulo-S030089322200241X>.
- [6] Muhammad Nasar-u-Minallah y col. «Assessing and anticipating environmental challenges in Lahore, Pakistan: future implications of air pollution on sustainable development and environmental governance». En: *ENVIRONMENTAL MONITORING AND ASSESSMENT* 196.9 (sep. de 2024). ISSN: 0167-6369. DOI: [10.1007/s10661-024-12925-3](https://doi.org/10.1007/s10661-024-12925-3).
- [7] Randall Martin V y col. «No one knows which city has the highest concentration of fine particulate matter». En: *ATMOSPHERIC ENVIRONMENT-X* 3 (jul. de 2019). DOI: [10.1016/j.aeaoa.2019.100040](https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100040).
- [8] Roberto Rojano Alvarado, Jhony Pérez Montiel y Jorge Deluque. «Análisis comparativo de las mediciones de material particulado PM10». Spanish. En: *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia* 58 (mar. de 2011). Recibido: 18 de febrero de 2010, Aceptado: 26 de noviembre de 2010, págs. 27-35.
- [9] CA Noble y col. «Federal reference and equivalent methods for measuring fine particulate matter». En: *AEROSOL SCIENCE AND TECHNOLOGY* 34.5 (mayo de 2001), págs. 457-464. ISSN: 0278-6826. DOI: [10.1080/027868201750172914](https://doi.org/10.1080/027868201750172914).
- [10] Queensland Government. *Air quality monitoring samplers*. Consulted: October 31, 2024. Queensland Government, 2024. URL: <https://www.qld.gov.au/>.

- gov.au / environment / management / monitoring / air / air-monitoring / measuring/samplers.
- [11] Queensland Government. *Oscillating microbalance for air quality monitoring*. Consulted: October 31, 2024. Queensland Government, 2024. URL: <https://www.qld.gov.au/environment/management/monitoring/air/air-monitoring/measuring/oscillating-microbalance>.
- [12] David C. Green, Gary W. Fuller y Timothy Baker. «Development and validation of the volatile correction model for PM₁₀- An empirical method for adjusting TEOM measurements for their loss of volatile particulate matter». En: *ATMOSPHERIC ENVIRONMENT* 43.13 (abr. de 2009), págs. 2132-2141. ISSN: 1352-2310. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2009.01.024](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.01.024).
- [13] Met One Instruments. *BAM 1020 Beta Attenuation Mass Monitor*. Consultado el 1 de noviembre de 2024. 2020. URL: <https://metone.com/wp-content/uploads/2020/10/BAM-1020-N.pdf>.
- [14] Rafael Torres Muñoz. *Tecnologías de medición de contaminantes aéreos*. Inf. téc. Consultado el 1 de noviembre de 2024. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2021. URL: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32725/1/Tecnologias_de_medicion_de_contaminantes_aereos.pdf.
- [15] Douglas A. Skoog, F. James Holler y Stanley R. Crouch. *Principios de análisis instrumental*. Spanish. Trad. por Jesús Miguel Torres Flores. 7.^a ed. Revisión técnica: Abril Vega Orozco. México: Cengage Learning, 2018. ISBN: 978-607-526-664-0.
- [16] U.S. Environmental Protection Agency. *Quality Assurance Guidance Document: Method Compendium PM2.5 Mass Weighing Laboratory Standard Operating Procedures for the Performance Evaluation Program (PEP) Filter Weighing Laboratory*. Inf. téc. Consulted: October 31, 2024. U.S. Environmental Protection Agency, 1998. URL: <http://www.epa.gov/ttn/amtic/pmqa.html>.
- [17] Prashant Kumar y col. «The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities». En: *Environment International* 75 (2015), págs. 199-205. ISSN: 0160-4120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.019>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412014003547>.
- [18] Naga Venkata Sudha Rani Nalakurthi y col. «Challenges and Opportunities in Calibrating Low-Cost Environmental Sensors». En: *Sensors* 24.11 (2024). ISSN: 1424-8220. DOI: [10.3390/s24113650](https://doi.org/10.3390/s24113650). URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/11/3650>.
- [19] Joel Kuula y col. «Laboratory evaluation of particle-size selectivity of optical low-cost particulate matter sensors». En: *Atmospheric Measurement Techniques* 13 (2020), págs. 2413-2423. DOI: [10.5194/amt-13-2413-2020](https://doi.org/10.5194/amt-13-2413-2020). URL: <https://doi.org/10.5194/amt-13-2413-2020>.
- [20] Tomasz Owczarek y col. «EQUIVALENCE OF LOW-COST PM10 CONCENTRATION MEASURING DEVICES WITH A REFERENCE METHOD USING VARIOUS CORRECTION FUNCTIONS». En: *ECONOMICS AND ENVIRONMENT* 87.4 (2023). ISSN: 2957-0387. DOI: [10.34659/eis.2023.87.4.627](https://doi.org/10.34659/eis.2023.87.4.627).
- [21] Ellen M. Considine y col. «Improving accuracy of air pollution exposure measurements: Statistical correction of a municipal low-cost airborne particulate matter sensor network». En: *Environmental Pollution* 268 (2021), pág. 115833. ISSN: 0269-7491. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115833>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749120365222>.

- [22] Dominique Hervé Espejo. «Noción y elementos de la justicia ambiental: directrices para su aplicación en la planificación territorial y en la evaluación ambiental estratégica». es. En: *Revista de Derecho (Valdivia)* 23 (jul. de 2010), págs. 9-36. ISSN: 0718-0950. DOI: [10.4067/S0718-09502010000100001](https://doi.org/10.4067/S0718-09502010000100001). URL: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-09502010000100001&nrm=iso.
- [23] Sensirion AG. *Datasheet SPS30: Particulate Matter Sensor for Air Quality Monitoring and Control*. Ver. 2.0. Document Version 2.0 – D1. Sensirion. Jun. de 2023. URL: www.sensirion.com.
- [24] Brigida Alfano y col. «A Review of Low-Cost Particulate Matter Sensors from the Developers' Perspectives». En: *Sensors* 20.23 (2020). ISSN: 1424-8220. DOI: [10.3390/s20236819](https://doi.org/10.3390/s20236819). URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/23/6819>.
- [25] Yang Han y col. «Trajectory Control of an Active and Passive Hybrid Hydraulic Ankle Prosthesis Using an Improved PSO-PID Controller». En: *JOURNAL OF INTELLIGENT & ROBOTIC SYSTEMS* 105.3 (jul. de 2022). ISSN: 0921-0296. DOI: [10.1007/s10846-022-01670-9](https://doi.org/10.1007/s10846-022-01670-9).
- [26] Tsung-Hsun Wu, Chung-Yang Sue y Pei-Yin Chen. «Intelligent Data Acquisition System for MEMS Vibration Monitoring Applications». En: *2018 13TH INTERNATIONAL MICROSYSTEMS, PACKAGING, ASSEMBLY AND CIRCUITS TECHNOLOGY CONFERENCE (IMPACT)*. International Microsystems Packaging Assembly and Circuits Technology Conference. 13th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT), Taipei, TAIWAN, OCT 24-26, 2018. IEEE; IEEE Elect Packaging Soc; iMAPS Taiwan; Ind Technol Res Inst; Taiwan Printed Circuit Assoc; NTU, Graduate Inst Commun Engn; Int Conference Elect Packaging; Int Elect Mfg Initiat; I Shou Univ; AGES; Ampoc Far E Co Ltd; ATOTECH Taiwan Ltd; Ichia Technologies INC; JSR Corp; MacDermid Performance Solut Taiwan Ltd; Dow Elect Mat; Eternal Mat Co Ltd; Siliconware Precis Ind Co Ltd; Taiwan Semicond Mfg Co Ltd; Yole Dev; Int Microelectron & Packaing Soc; Surface Mount Technol Assoc; Taiwan Thermal Management Assoc; Engn & Technol Promot Ctr; Minist Econ AffairsInd Dev Bur; Minist Educ; Taipei City Govt, Dept Informat & Tourism. 2018, págs. 252-255. ISBN: 978-1-5386-5615-0.
- [27] STMicroelectronics. *RM0090 Reference Manual: STM32F405/415, STM32F407/417, STM32F427/437, and STM32F429/439 Advanced ARM-Based 32-Bit MCUs*. Ver. Rev 21. Documento No: RM0090. STMicroelectronics. 2024. URL: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0090-stm32f405415-stm32f407417-stm32f427437-and-stm32f429439-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf.
- [28] John C. Gunther. «Algorithm 938: Compressing Circular Buffers». En: *ACM TRANSACTIONS ON MATHEMATICAL SOFTWARE* 40.2 (feb. de 2014). ISSN: 0098-3500. DOI: [10.1145/2559995](https://doi.org/10.1145/2559995).
- [29] STMicroelectronics. *STM32F427xx STM32F429xx Datasheet*. Ver. Rev 11. Documento No: DS9405. STMicroelectronics. 2024. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f429zi.pdf>.
- [30] Aosong Electronics. *DHT11 SIP Packaged Temperature and Humidity Sensor*. Product Datasheet. Aosong (Guangzhou) Electronics Co., Ltd. 2023. URL: <https://www-aosong.com/en/products-21.html> (visitado 06-11-2024).

- [31] SparkFun Electronics. *RHT03 (DHT22) Humidity and Temperature Sensor Hookup Guide*. 2023. URL: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/rht03-dht22-humidity-and-temperature-sensor-hookup-guide/all> (visitado 06-11-2024).
- [32] Andrea Di Antonio y col. «Developing a Relative Humidity Correction for Low-Cost Sensors Measuring Ambient Particulate Matter». En: *Sensors* 18.9 (2018). ISSN: 1424-8220. DOI: [10.3390/s18092790](https://doi.org/10.3390/s18092790). URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/9/2790>.
- [33] Maxim Integrated. *DS3231: Extremely Accurate I²C-Integrated RTC/TCXO/Crystal*. Ver. Rev 10. Documento 19-5170; Rev 10. Maxim Integrated Products, Inc. Mar. de 2015. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds3231.pdf>.
- [34] SD Card Association. *SD Specifications Part 1 Physical Layer Simplified Specification*. Inf. téc. Ver. 7.10. SD Card Association, 2020. URL: <https://www.sdcards.org/downloads/pls/>.
- [35] ChaN. *FatFs - Generic FAT Filesystem Module*. R0.15. 2022. URL: http://elm-chan.org/fsw/ff/00index_e.html.
- [36] Ravi Kishore Kodali y Kopulwar Shishir Mahesh. «Low cost ambient monitoring using ESP8266». En: *2016 2nd International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I)*. 2016, págs. 779-782. DOI: [10.1109/IC3I.2016.7918788](https://doi.org/10.1109/IC3I.2016.7918788).
- [37] Alexander Maier, Andrew Sharp y Yuriy Vagapov. «Comparative Analysis and Practical Implementation of the ESP32 Microcontroller Module for the Internet of Things». En: *2017 Internet Technologies and Applications (ITA)*. IEEE, 2017, págs. 143-148. DOI: [10.1109/ITECHA.2017.8101926](https://doi.org/10.1109/ITECHA.2017.8101926).
- [38] Espressif Systems. *ESP8266 Technical Reference*. Ver. 1.7. Accedido: 2024-03-10. Espressif Systems. 2020. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp8266-technical_reference_en.pdf.
- [39] Espressif Systems. *ESP8266EX Datasheet*. Ver. 7.0. Accedido: 2024-03-10. Espressif Systems. 2023. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf.
- [40] MEAN WELL Enterprises Co., Ltd. *S-25 Series Specification*. Ver. 1.0. Accedido: 7 de noviembre de 2024. MEAN WELL Enterprises Co., Ltd. Oct. de 2023. URL: https://www.mouser.cl/datasheet/2/260/S_25_spec-2308014.pdf.