



Arquitectura básica y el diseño preliminar del software MADCASE

(MADCASE-RS01-ARQ)

Autor:
Mg. Luis Alberto Gómez Parada

Director:
Ing. Juan Manuel Cruz (FIUBA)

*Este documento fue realizado en el curso Ingeniería de Software
el 23 de noviembre de 2023, tercer bimestre.*

Índice general

1	Introducción General	5
	Introducción	5
	Planteamiento del problema y alcance	6
	Motivación	6
	Conceptos generales	6
	Estado del arte	7
	Objetivos y alcances	7
2	Introducción específica	9
	Componentes Principales del Hardware	9
	2.1.1 Destalles del equipo, la tecnología del sensor y muestreo estadístico	9
	2.1.2 Plataforma de Desarrollo y Microcontrolador	10
	2.1.3 Sensores Empleados	12
	2.1.4 Módulos de Comunicación	14
	2.1.5 Fuentes de Alimentación	15
	2.1.6 Otros Componentes	15
3	Diseño e Implementación	17
	Arquitectura General del Sistema	17
	Diseño del Hardware	17
	3.2.1 Circuito Impreso del Nodo Sensor	17
	3.2.2 Módulo de Energía	17
	Desarrollo del Software	17
	3.3.1 Software del Nodo Sensor	17

Comunicación y Protocolos	18
Interfaz de Usuario	18
Implementación del Sistema	18
Pruebas y Validación	18

Registros de cambios

Revisión	Detalles de los cambios realizados	Fecha
MADCASE-RS01-ARQ	Creación del documento	23 de noviembre de 2023

Capítulo 1

Introducción General

1.1. Introducción

En el contexto actual de gestión ambiental de las grandes ciudades, los instrumentos para medir el material particulado fino (MP2,5) se han convertido en herramientas esenciales. La creciente contaminación atmosférica se cuenta entre las principales causas de muertes prematuras en el mundo, de manera directa e indirecta. Sin embargo, lograr una medición precisa del MP2,5 representa un desafío significativo debido a los elevados costos y los complejos requisitos técnicos involucrados. En muchas áreas urbanas, especialmente en las menos desarrolladas, persiste la incertidumbre acerca de los niveles de exposición al MP2,5 a los que está sometida la población. En respuesta a este desafío, la presente propuesta de proyecto busca diseñar un instrumento para la medición del MP2,5 que, utilizando sensores de bajo costo, aspire a acercarse a los estándares de los equipos analíticos de alto rendimiento que se emplean actualmente, pero a un precio notablemente reducido. Este proyecto está íntimamente ligado a la trayectoria y formación profesional del autor del presente trabajo, como químico atmosférico especializado en la calidad del aire urbano.

Con base en lo anteriormente expuesto, el objetivo de este proyecto es desarrollar un instrumento especializado en la medición del material particulado fino atmosférico urbano (MP2,5). Este instrumento no solo será capaz de almacenar y transmitir los datos recopilados, sino que también se espera superar la precisión que ofrecen los sensores de bajo costo actualmente en el mercado. Como innovación, se propone emplear un conjunto de tres sensores de MP2,5 en un mismo instrumento, coordinados por un microprocesador. Este último será encargado de realizar los cálculos, coordinar el almacenamiento y transmisión de los datos (ver figura 2.1). Al utilizar tres sensores ópticos de MP2,5 operando en simultáneo, se prevé la obtención de mediciones replicadas, lo que permitirá ejecutar análisis estadísticos en tiempo real. Esto facilitará la obtención de promedios y la validación o descarte de datos atípicos. Se hipotetiza que esta estrategia mejorará tanto la precisión como la exactitud de las mediciones y, además, añadirá robustez al sistema. Es decir, si un sensor llegara a fallar, el mal funcionamiento podría detectarse rápidamente, mitigando el riesgo de una interrupción completa del sistema.

Dada la creciente preocupación pública sobre la contaminación atmosférica urbana, tanto desde la perspectiva ambiental como de salud, es probable que autoridades a nivel municipal y gubernamental encuentren este tipo de sistemas de monitoreo altamente relevantes. Estos instrumentos, siendo más asequibles que las tecnologías de monitoreo tradicionales, facilitarían una mayor cobertura en áreas que actualmente carecen de mediciones. Este incremento en la cobertura permitiría evaluar la exposición humana al MP_{2,5} y podría aportar datos cruciales para monitorear la efectividad de políticas públicas, como los planes de descontaminación atmosférica implementados en diversas ciudades. Adicionalmente, estos sistemas pueden ayudar, como parte del fundamento, a la puesta en marcha de medidas preventivas y correctivas en relación con las emisiones y las concentraciones de MP_{2,5}.

Dentro del contexto de las soluciones para el monitoreo ambiental, estos dispositivos podrían ser una alternativa coste-efectiva para la gestión de la calidad del aire en entornos urbanos. Su asequibilidad económica, en comparación con los sistemas de monitoreo tradicionales, unida a una mayor precisión y robustez, podría ser valorada positivamente por entidades públicas. Se estima que su implementación facilitaría la gestión de la calidad del aire, sin generar una carga financiera excesiva en los recursos públicos.

1.2. Planteamiento del problema y alcance

1.3. Motivación

1.4. Conceptos generales

El funcionamiento de los sensores escogidos para esta investigación se fundamenta en el fenómeno de la difracción de luz láser. Concretamente, cuando una partícula en suspensión intercepta un haz láser, se produce una dispersión angular de la luz, la cual es proporcional al tamaño de la partícula involucrada. El patrón de dispersión óptica resultante se captura mediante un detector. Este enfoque presenta algunas mejoras sobre los métodos gravimétricos convencionales, al ofrecer ventajas como la reducción de costos y un incremento notable en la velocidad de muestreo. Sin embargo, es imperativo reconocer ciertas limitaciones inherentes a esta tecnología, tales como una menor precisión y exactitud en comparación con técnicas estándar. Cabe señalar que los instrumentos ópticos todavía no han obtenido la certificación de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) como métodos analíticos estándar para la cuantificación de partículas finas en el aire.

Para evaluar cómo el número de muestras (n) afecta la precisión y la exactitud de un sensor de material particulado fino, se deben considerar las métricas como media, varianza y desviación estándar de la muestra. De acuerdo a esto, la precisión se relaciona con la dispersión de las mediciones y se puede estimar mediante la desviación estándar muestral (s). A medida que n aumenta, el error estándar de la media (SEM) disminuye, lo cual se puede expresar como:

$$SEM = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Por lo tanto, un incremento en n resultará en una disminución de SEM, mejorando así la precisión del instrumento.

Para evaluar la exactitud, podemos usar el valor medio muestral (\bar{x}) y compararlo con un valor de referencia conocido (μ). La diferencia absoluta entre \bar{x} y μ proporciona una medida de la exactitud del instrumento. Dado que \bar{x} es un estimador insesgado de μ , su exactitud mejora con un mayor número de muestras, acercándose más al valor verdadero μ debido al Teorema del Límite Central.

1.5. Estado del arte

1.6. Objetivos y alcances

El propósito de este proyecto es desarrollar un equipo de medición de material particulado fino (MP2,5) que brinde una mayor precisión y exactitud que los sensores ópticos de bajo costo, mediante técnicas estadísticas de muestreo. El dispositivo también contará con características para almacenar y transmitir datos de forma remota. Se pretende elaborar una solución económica y fiable que pueda integrarse en las redes de control de calidad del aire, comúnmente gestionadas por autoridades ambientales o gobiernos locales. Con esto se espera contribuir a la mejora de la salud pública en entornos urbanos.

En este proyecto se incluyen las siguientes actividades:

a) Diseño y desarrollo del hardware

- Diseño y dimensionamiento del hardware acorde a los niveles de consumo eléctrico, necesidad de cómputo, almacenamiento y transmisión de datos.
- Selección y adquisición los sensores ópticos de MP2,5, y el microcontrolador central, adecuado a los requerimientos de cómputo y administración del sistema.
- Diseño del sistema de almacenamiento de datos y del mecanismo de transmisión de información. Cada dato deberá contar con hora y fecha. Esta información debe ser proporcionada a partir de la implementación del RTC.
- Dimensionamiento del sistema de alimentación eléctrica acorde a los requerimientos del hardware .

b) Desarrollo de software

- Programación del microprocesador para realizar cálculos y transmitir resultados.
- Desarrollo de algoritmos para efectuar estadísticas en tiempo real.
- Generación de algoritmo para el chequeo del funcionamiento de los sensores e implementación de códigos de error en caso de que alguno falle.

c) Pruebas de calibración

- Calibración inicial de los sensores con estaciones de monitoreo de referencia o instrumentos de referencia disponibles.

d) **Recolección de datos**

- Periodo de recolección de datos de MP2,5 para evaluar el funcionamiento y rendimiento del dispositivo.

e) **Análisis de datos**

- Evaluación de precisión y exactitud del dispositivo en comparación con los métodos ópticos tradicionales y los de referencia.

f) **Documentación**

- Generación de informes técnicos que validen el rendimiento y robustez del dispositivo.

El presente proyecto no incluye las siguientes actividades:

a) **Despliegue a gran escala**

- Este proyecto no incluye la fabricación en masa ni la distribución a gran escala del dispositivo.

b) **Mantenimiento prolongado**

- El mantenimiento del dispositivo más allá del periodo de pruebas no está incluido.

c) **Formación o capacitación**

- No se incluye la formación o capacitación para usuarios finales o para entidades gubernamentales.

d) **Adopción por parte de las autoridades**

- Aunque se espera que las autoridades consideren esta tecnología, su adopción oficial no está garantizada dentro del alcance de este proyecto.

e) **Investigaciones futuras**

- No se incluye el seguimiento a largo plazo de la efectividad del dispositivo en políticas públicas o investigaciones futuras.

Capítulo 2

Introducción específica

2.1. Componentes Principales del Hardware

2.1.1. Destalles del equipo, la tecnología del sensor y muestreo estadístico

En la figura 2.1, se presenta el diagrama en bloques del instrumento. En él, se puede apreciar un microcontrolador central responsable de gestionar: tres sensores de MP2,5, encargados de medir el contaminante; un sistema de almacenamiento de datos local y un sistema encargado de la transmisión de los registros hacia un servidor remoto. Además, incluye un reloj de tiempo real (RTC) que registra el momento de cada medición y un sistema de alimentación, compatible con la red eléctrica.

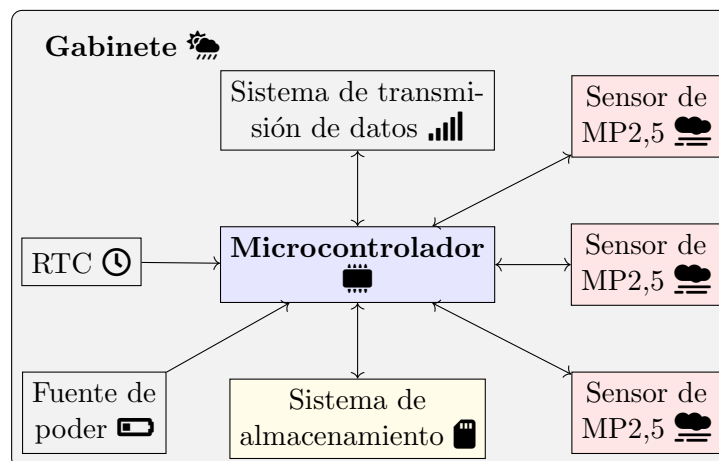


Figura 2.1. Esquema de bloques del instrumento.

2.1.2. Plataforma de Desarrollo y Microcontrolador

Se incluye en el proyecto una placa STM32 NUCLEO-F429ZI (2.2), perteneciente a la serie Nucleo-144, diseñada para facilitar el prototipado rápido con microcontroladores STM32. Equipada con el microcontrolador STM32F429ZI, la placa ofrece características avanzadas como una unidad de punto flotante (FPU), amplia memoria y diversos periféricos integrados. La compatibilidad con la interfaz ST Morpho y el sistema Arduino permite una expansión sencilla y acceso completo a señales de microcontrolador y periféricos.

Destaca la capacidad de programación y depuración a través del ST-LINK/V2-1 integrado, lo que proporciona una solución eficiente para el desarrollo de aplicaciones. Con LEDs indicadores, botones de usuario y reset, y soporte para diversas fuentes de alimentación, incluida la USB, esta placa se orienta a aplicaciones de alta demanda de procesamiento y flexibilidad en la conexión de periféricos. Es adecuada para una variedad de aplicaciones, desde prototipos de IoT hasta sistemas embebidos complejos, destacándose por su escalabilidad y robustez como plataforma de desarrollo.

La STM32 NUCLEO-F429ZI incluye numerosos puertos especializados que facilitan la conexión a dispositivos, como sensores de material particulado, esenciales en proyectos de monitoreo de calidad del aire y otras aplicaciones ambientales. Está equipada con interfaces como I2C, SPI, UART/USART, CAN y GPIOs, permitiendo la integración de múltiples sensores y dispositivos periféricos para expandir las funcionalidades del sistema conforme sea necesario.

Estas interfaces refuerzan la capacidad de escalar la solución, permitiendo la integración de una variedad de sensores y módulos. Los sensores de material particulado, que generalmente utilizan interfaces I2C o UART, pueden ser fácilmente incorporados, posibilitando la recolección de datos ambientales en tiempo real y su integración en sistemas más amplios para análisis y monitoreo.

De acuerdo al manual si el consumo de corriente total de la placa STM32 Nucleo-144 y sus shields excede los 300 mA, es obligatorio utilizar una fuente de alimentación externa, distinta al USB, para alimentar la placa. Las opciones de conexión para esta fuente de alimentación externa incluyen E5V, VIN, o +3.3 V.

Se pueden usar tres opciones diferentes para la alimentación externa:

- **VIN (7 V-12 V):** Un rango de voltaje que permite alimentar la placa a través de una fuente de alimentación externa regulada. Es útil para aplicaciones que requieren más potencia de la que el USB puede suministrar.
- **E5V (5 V):** Otra opción de alimentación que puede ser más conveniente dependiendo de la disponibilidad de fuentes de alimentación de 5 V.
- **+3.3 V:** Esta opción alimenta directamente el microcontrolador STM32 y otros componentes de la placa que operan a 3.3 V. Es importante notar que, cuando se usa esta opción de alimentación, la parte ST-LINK no recibe alimentación y por lo tanto no puede ser utilizada para programación o depuración.

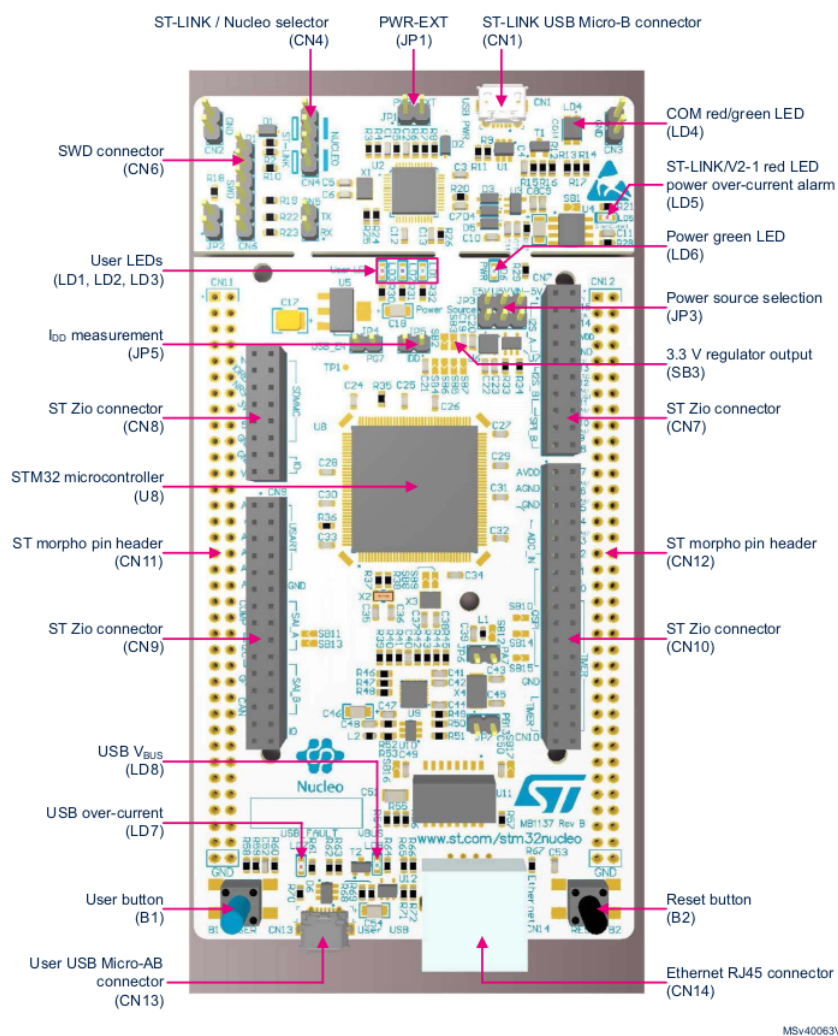


Figura 2.2. Placa de desarrollo utilizada para el proyecto , con sus principales puertos

Cuadro 2.1. Fuentes de alimentación externas

Nombre de la entrada	Pines del conector	Rango de voltaje	Límite de corriente máxima
VIN	CN8 pin 15, CN11 pin 24	7 V a 12 V	800 mA (VIN = 7 V) 450 mA (7 V ≤ VIN ≤ 9 V) 250 mA (9 V ≤ VIN ≤ 12 V)
E5V	CN11 pin 6	4.75 V a 5.25 V	500 mA
+3.3 V	CN8 pin 7, CN11 pin 16	3 V a 3.6 V	-

2.1.3. Sensores Empleados

En esta subsección se describen los sensores utilizados en el proyecto, detallando sus características principales y el papel que desempeñan dentro del sistema.

Sensor de Partículas MP25

El SPS30, diseñado para operar en ambientes con niveles elevados de contaminación, como áreas urbanas congestionadas o zonas industriales. Esta tecnología, facilita mediciones rápidas desde el inicio de su uso. Su vida útil, que supera los diez años. El sensor destaca por su precisión en la medición de PM2.5 y PM10, con una exactitud de $\pm 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $\pm 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, y por su capacidad para medir concentraciones de partículas que van desde $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estas características lo hacen versátil para una amplia gama de aplicaciones, desde la monitorización de calidad del aire interior hasta la identificación de fugas en sistemas de filtración industrial.

Además, su bajo consumo energético (ver tabla) lo hace adecuado para dispositivos portátiles o aquellos alimentados por batería. La facilidad de uso y la integración en sistemas de monitoreo. Posee compatibilidad con interfaces de comunicación estándar como I2C y UART. Estas interfaces permiten la recopilación y análisis de datos ambientales, facilitando la comunicación del sensor con necesidades específicas del proyecto.

Cuadro 2.2. Características del sensor de material particulado

Característica	Valor
Rango de medición de PM2.5	0.5 µg/m³ a 1000 µg/m³
Rango de medición de PM10	0.5 µg/m³ a 1000 µg/m³
Precisión de PM2.5	±5 µg/m³
Precisión de PM10	±5 µg/m³
Tiempo de respuesta	1 s
Flujo de aire	2 L/min
Consumo máximo de energía	80 mA
Tensión de alimentación	4.5 V a 5.5 V
Interfaz de comunicación	I2C, UART
Rango de temperatura de funcionamiento	-20 °C a +70 °C
Rango de humedad de funcionamiento	0 % a 80 % RH
Dimensiones	41 mm x 41 mm x 12 mm
Peso	26 g

Cuadro 2.3. Características eléctricas

Parámetro	Condiciones	Min	Typ	Max
Voltaje de alimentación (V)		4.5	5.0	5.5
Corriente de suministro (µA)	Modo sueño	-	38	50
Corriente de suministro (mA)	Modo inactivo	300	330	360
Corriente de suministro (mA)	Modo medición	45	55	65
Corriente de suministro (mA)	Primeros 200ms (iniventilador)	-	-	80
Voltaje de entrada nivel alto (V)		-	2.31	5.5
Voltaje de entrada nivel bajo (V)		0	2.9	0.99
Voltaje de salida nivel alto (V)		-	3.3	3.37
Voltaje de salida nivel bajo (V)		0	0	0.4

Sensor de Humedad y Temperatura DHT22

El DHT22 es un sensor digital de bajo costo que mide la temperatura y la humedad relativa del ambiente. Es un sensor popular entre los aficionados a la electrónica y los makers debido a su facilidad de uso y su bajo precio.

Cuadro 2.4. Tabla de características del sensor DHT22

Característica	Valor
Rango de medición de temperatura	-40 °C a 80 °C
Precisión de temperatura	±0.5 °C
Rango de medición de humedad	0 % a 100 % HR
Precisión de humedad	±2 % HR
Tiempo de respuesta	2 s
Tensión de alimentación	3.3 V a 5.5 V
Interfaz de comunicación	1-Wire
Dimensiones	26 mm x 29 mm x 15 mm
Peso	4 g

Reloj de Tiempo Real (RTC) DS1307

El DS1307 es un módulo de reloj de tiempo real que proporciona información precisa sobre la hora y la fecha. Se utiliza para marcar temporalmente los datos recopilados por los sensores de material particulado, lo cual es crucial para el análisis histórico. Estos sensores, junto con el módulo RTC, forman la base del sistema de monitoreo, permitiendo la recolección y análisis detallado de datos ambientales.

Cuadro 2.5. Características del Reloj de Tiempo Real (RTC) DS1307

Característica	Valor
Rango de voltaje de alimentación	2.0V a 5.5V
Corriente de alimentación (en funcionamiento)	250µA (típico)
Corriente de alimentación (en modo de espera)	1µA (típico)
Rango de temperatura de funcionamiento	-40°C a +85°C
Interfaz de comunicación	I2C
Precisión de frecuencia	±2 ppm (típico)
Rango de ajuste de frecuencia	32.768 kHz a 1 MHz
Memoria RAM	56 bytes
Formato de fecha y hora	BCD
Cantidad de alarmas	2
Tipo de batería	CR2032
Dimensiones	32 mm x 24 mm x 4 mm

2.1.4. Módulos de Comunicación

Detalles sobre los módulos de comunicación empleados, tales como Wi-Fi, Bluetooth, LTE, LoRa, etc., explicando cómo facilitan la conectividad del sistema y la transmisión de datos.

2.1.5. Fuentes de Alimentación

Información sobre la solución de energía del sistema, incluyendo baterías, paneles solares, o adaptadores de corriente, y cómo estos componentes aseguran un funcionamiento continuo.

2.1.6. Otros Componentes

Mención de cualquier otro hardware relevante para el proyecto, como pantallas, LEDs, botones, etc., y su rol en la interacción del usuario o en la visualización de datos.

Capítulo 3

Diseño e Implementación

3.1. Arquitectura General del Sistema

Descripción de la arquitectura general del sistema desarrollado, incluyendo los principales componentes y cómo interactúan entre sí.

3.2. Diseño del Hardware

3.2.1. Circuito Impreso del Nodo Sensor

Detalles sobre el diseño y desarrollo del circuito impreso específico para el nodo sensor, incluyendo esquemáticos y consideraciones de diseño.

3.2.2. Módulo de Energía

Explicación del diseño y funcionamiento del módulo de energía, incluyendo estrategias de gestión de energía y especificaciones técnicas.

3.3. Desarrollo del Software

3.3.1. Software del Nodo Sensor

Descripción general del software implementado en el nodo sensor, incluyendo arquitectura y principales funcionalidades.

Módulos del Software

Detalles de los diferentes módulos de software desarrollados, como la lectura de sensores, gestión de datos, y comunicación.

Proceso Observador Descripción del proceso encargado de la captura de datos en tiempo real.

Proceso de Análisis Explicación del proceso que analiza los datos recopilados por los sensores.

Proceso de Despliegue Detalles sobre cómo los datos procesados se almacenan y presentan.

3.4. Comunicación y Protocolos

Descripción de los protocolos de comunicación utilizados para la transmisión de datos y la integración con otros sistemas o dispositivos.

3.5. Interfaz de Usuario

Explicación del diseño y funcionalidad de la interfaz de usuario, incluyendo cómo los usuarios interactúan con el sistema.

3.6. Implementación del Sistema

Detalles sobre la implementación física del sistema, incluyendo montaje de hardware y despliegue del software en un entorno operativo.

3.7. Pruebas y Validación

Descripción de las pruebas realizadas para validar el funcionamiento del sistema y los resultados obtenidos.