

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

**INSTITUTO DE INGENIERÍA**



**“Desarrollo de una Cámara con Ambiente Controlado para Calibración de Monitores de Material Particulado con Conectividad Inalámbrica Controlada por una Interfaz Gráfica Basada en Python.”**

**T E S I S**

**que presenta para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS**

**Martín Aarón Sánchez Barajas**

**DIRECTOR DE TESIS:  
Dr. Daniel Cuevas González**

**CO-DIRECTOR DE TESIS:  
Dr. Marco Antonio Reyna Carranza**

**Mexicali, B. C.**

**Junio 2025**

TESIS DEFENDIDA POR

**Martín Aarón Sánchez Barajas**

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITE

---

**Dr. Daniel Cuevas González**  
Director de Tesis

---

**Dr. Marco Antonio Reyna Carranza**  
Co-director de Tesis

---

**Dr. Juan Pablo García Vázquez**  
Secretario

---

**Dr. Saúl Islas Pereda**  
Miembro del comité

---

**Dra. Brenda Leticia Flores Ríos**  
Coordinadora de Posgrado del  
Instituto de Ingeniería

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi padre, Martín Sánchez Zavala, quien me apoyó siempre para que saliera adelante, buscando que tuviese un mejor futuro y lograra mejorar mis habilidades.

A mis maestros y amigos, que me apoyaron durante esta investigación, especialmente a mi director de tesis, el Dr. Daniel Cuevas González, y codirector de tesis, el Dr. Marco Antonio Reyna Carranza, que me guiaron, contagiaron el interés por el aprendizaje y me brindaron conocimiento en sus cursos.

A la Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ingeniería, Mexicali, por permitirme ingresar al programa de calidad del MYDCI.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por brindar apoyo económico para estudiantes con talento e interés en el desarrollo de ciencia y tecnología.

## RESUMEN

Uno de los contaminantes atmosféricos de mayor relevancia actualmente es el material particulado (PM), este existe en distintos tamaños ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{1.0}$ ) y lo conforman diferentes sustancias provenientes de sitios de construcción, espacios urbanos no pavimentados, campos de cultivo, procesos de combustión, centrales energéticas, industrias y automóviles. El estudio y monitoreo del material particulado en el ambiente es de vital importancia por las implicaciones adversas en la salud humana. Según la Organización Mundial de la salud de 2016 a 2021, la contaminación del aire provocó 12 millones de muertes anuales a nivel mundial. Para monitorear estas partículas es necesario utilizar monitores pequeños, de bajo costo, fáciles de calibrar y con suficiente precisión para detectar estos contaminantes y evitar la exposición continua. Actualmente los procesos de calibración representan un desafío de complejidad del proceso, tiempo del procedimiento, altos costos, y este procedimiento debe realizarse periódicamente (usualmente cada año). Por estas razones la calibración es una limitante en el monitoreo de entornos reales y planteamiento de soluciones a problemas involucrados en la contaminación del aire y sus efectos en la salud.

Este proyecto tiene como objetivo diseñar y fabricar una cámara de prueba que permita evaluar y calibrar monitores de material particulado en un ambiente controlado con conectividad inalámbrica a un ordenador utilizando una interfaz gráfica basada en Python. Se realizaron pruebas para garantizar la transferencia de datos, asegurando que los archivos no contengan errores. Además, se realizaron pruebas de calibración utilizando dos sensores personales de material particulado SENSIRION SPS30 y dos sensores personales de material particulado PMS5003. Se utilizó de referencia el sensor Prana Air PAS-OUT-01, y una fuente de contaminación con un monodispersor basado en nebulización de partículas de  $0.46\mu$  y  $3\mu$  de látex poliestireno. La calibración se realizó utilizando regresión lineal para obtener los coeficientes de calibración y corregir las lecturas por medio del código de cada sensor. Los sensores PMS5003 obtuvieron correlaciones de Pearson ( $r$ ) de A: 0.9870 y B: 0.9898 en comparación a sus correlaciones sin calibrar de A: 0.9828 y B: 0.9863, por otra parte, un sensor SPS30 (A) sin calibrar presentó una correlación de .9939, que después de calibrarlo arrojó una correlación de 0.9917, mientras que el otro sensor SPS30 (B) presentó una correlación de 0.9715 en contraste de la correlación del sensor sin calibrar de 0.9422.

***Palabras clave*— Calibración de Sensores PM, Cámara de Medición PM, Sistema de Control por Python, Interfaz gráfica, Conectividad Inalámbrica.**

## **ABSTRACT**

One of the most relevant air pollutants today is particulate matter (PM), which exists in different sizes ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{1.0}$ ) and is made up of different substances from construction sites, unpaved urban spaces, agricultural fields, combustion processes, power plants, industries and automobiles. The study and monitoring of particulate matter in the environment is of vital importance because of the adverse implications for human health. According to the World Health Organization, from 2016 to 2021, air pollution caused 12 million deaths annually worldwide. To monitor these particles, it is necessary to use small, low-cost, easy-to-calibrate monitors with sufficient accuracy to detect these pollutants and avoid continuous exposure. Currently, calibration processes represent a challenge in terms of process complexity, procedure time, high costs, and this procedure must be performed periodically (usually every year). For these reasons calibration is a constraint in monitoring real environments and approaching solutions to problems involved in air pollution and its effects on health.

This project aims to design and manufacture a test chamber that allows the evaluation and calibration of particulate matter monitors in a controlled environment with wireless connectivity to a computer using a Python-based graphical interface. Tests were carried out to guarantee data transfer, ensuring that the files are error-free. In addition, calibration tests were performed using two SENSIRION SPS30 personal particulate matter sensors and two PMS5003 personal particulate matter sensors. The Prana Air PAS-OUT-01 sensor was used as a reference, and a contamination source with a monodisperser based on  $0.46\mu$  and  $3\mu$  latex polystyrene particle atomization was used. Calibration was performed using linear regression to obtain the calibration coefficients and correct the readings by the code of each sensor. The PMS5003 sensors obtained Pearson correlations ( $r$ ) of A: 0.9870 and B: 0.9898 compared to their uncalibrated correlations of A: 0.9828 and B: 0.9863, on the other hand, an uncalibrated SPS30 (A) sensor had a correlation of .9939, which after calibration showed a correlation of 0.9917, while the other SPS30 sensor (B) showed a correlation of 0.9715 in contrast to the uncalibrated sensor's correlation of 0.9422.

**Keywords- PM Sensor Calibration, PM Measurement Chamber, Python Control System, Graphic Interface, Wireless Connectivity.**

# ÍNDICE TEMÁTICO

AGRADECIMIENTOS.....	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	v
ÍNDICE TEMÁTICO.....	vi
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 CONTEXTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	3
1.3 HIPÓTESIS.....	3
1.4 OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN.....	3
1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	3
1.5 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.6 CONTRIBUCIÓN DE LA TESIS.....	5
1.7 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.....	5
CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES.....	7
2.1 Las Primeras Evidencias del Riesgo de la Contaminación del Aire a la Salud Humana y de los Ecosistemas.....	7
2.2 Los Inicios del Monitoreo del Material Particulado.....	7
2.3 La Situación Actual del Monitoreo de Material Particulado.....	8
2.4 Tendencias y Futuro del Monitoreo de Material Particulado.....	9
2.5 Estado del Arte.....	9
2.6 Propuesta de proyecto.....	12
CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO.....	14
3.1 Conceptos fundamentales para el conteo de partículas.....	14
3.1.1 Dispersión de luz.....	14
3.1.1.1 Dispersión de Rayleigh.....	15
3.1.1.2 Dispersión de Mie.....	16
3.1.2 Separadores de partículas.....	17
3.1.2.1 Separador ciclónico.....	17
3.1.2.2 Impactadores.....	19
3.2 Módulos y placas de control hardware para manipular las condiciones ambientales.....	20
3.2.1 Plataforma de código abierto Arduino.....	20
3.2.2 Plataforma de código abierto Raspberry Pi.....	22

3.2.3 Control de ventiladores de bajo ruido.....	23
3.2.3.1 Modulo <i>motor shield</i> Arduino L293d.....	23
3.2.3.2 Puente H.....	23
3.2.4 Modulo GY-39.....	25
3.3 Protocolos de comunicación.....	26
3.3.1 Interface I <sup>2</sup> C.....	26
3.3.2 Protocolo UART.....	26
3.4 Transmisión de datos y conectividad.....	27
3.4.1 Conectividad Bluetooth.....	27
3.4.2 Conectividad Wifi.....	28
3.4.2.1 <i>Tipos de redes inalámbricas Wifi</i> .....	29
3.5 Estándares de calibración.....	30
3.5.1 Estándar ISO-21501.....	30
3.5.1.1 <i>Procedimientos de prueba y calibración</i> .....	31
3.5.2 Norma Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012.....	32
3.5.3 Estándares de trazabilidad NIST.....	34
CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA.....	35
4.1 Open-Source Hardware.....	35
4.1.1 Sistema de monodispersión de material particulado.....	35
4.1.2 Red de control de la ventilación.....	36
4.1.3 Sensores y dispositivos de monitoreo.....	37
4.1.3.1 <i>Sensor de material particulado SENSIRION SPS30</i> .....	37
4.1.3.2 <i>Sensor Prana Air PAS-OUT-01</i> .....	38
4.1.3.4 <i>Sensor Plantower PMS5003</i> .....	38
4.1.3.4 <i>Sensor ambiental GY-39</i> .....	39
4.1.4 Sistema de extracción de partículas.....	40
4.2 Open-Source Software.....	41
4.2.1 Estructura del software y programación en Python.....	42
4.2.1.1 <i>Librerías/Módulos de Python</i> .....	42
4.2.2 Arquitectura del software.....	44
4.2.3 Funcionalidades del software.....	44
4.2.3.1 <i>Sistema de extracción de material particulado</i> .....	44

4.2.3.2	<i>Sensores ambientales y dispositivos de monitorización</i>	45
4.2.3.3	<i>Red de control de ventilación</i>	45
4.2.3.4	<i>Comprobación del COM del sensor o dispositivo</i>	45
4.2.3.5	<i>Configuración del muestreo</i>	45
4.2.3.6	<i>Botones auxiliares y de almacenamiento</i>	46
4.2.4	Graficar datos	46
4.3	Calibración de los sensores SENSIRION SPS30 y PMS5003	47
<b>CAPÍTULO 5: RESULTADOS</b>		<b>51</b>
5.1	Resultados de las etapas modulares	51
5.1.1	Sistema de monodispersión de material particulado	51
5.1.2	Red de control de la ventilación	51
5.1.3	Sensores y dispositivos de monitoreo	51
5.1.3.1	<i>Sensor Laser de Polvo Prana Air PAS-OUT-01</i>	51
5.1.3.2	<i>Sensor ambiental GY-39</i>	52
5.1.3.3	<i>Sensor de calidad del aire Plantower PMS5003</i>	52
5.1.3.4	<i>Sensor de partículas en suspensión SENSIRION SPS30</i>	52
5.1.4	Sistema de extracción de partículas	53
5.2.1	Interfaz gráfica con Python	53
5.3	Pruebas de transferencia de datos	53
5.4	Pruebas de calibración de los dispositivos de material particulado	54
5.4.1	Pruebas utilizando el sensor Prana Air PAS-OUT-01 y dos sensores SENSIRION SPS30 sin calibración	54
5.4.2	Pruebas utilizando el sensor Prana Air PAS-OUT-01, el sensor SPS30 A calibrado y el sensor SPS30 B sin calibración	57
5.4.3	Pruebas utilizando el sensor Prana Air PAS-OUT-01 y ambos sensores SENSIRION SPS30 calibrados	59
5.4.4	Pruebas utilizando el sensor Prana Air PAS-OUT-01 y dos sensores PMS5003 sin calibrar	61
5.4.5	Pruebas utilizando el sensor Prana Air PAS-OUT-01, el sensor PMS5003 A calibrado y el sensor PMS5003 B sin calibración	64
5.4.6	Pruebas utilizando el sensor Prana Air PAS-OUT-01 y ambos sensores PMS5003 calibrados	65
5.5	Presupuesto	67
<b>CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>		<b>69</b>
6.1	Comparación de las lecturas entre el sensor Prana Air PAS-OUT-01 y los sensores SENSIRION SPS30	70
6.2	Comparación de las lecturas entre el sensor Prana Air PAS-OUT-01 y los sensores PMS5003	70
<b>CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES</b>		<b>72</b>

REFERENCIAS .....	73
ANEXOS.....	76
A. Códigos para los dispositivos controlados por Arduino.....	76
A1. Código para el sistema de extracción de partículas.....	76
A2. Código para el control de la Red de Ventilación.....	77
A3. Código para el control del sensor ambiental GY-39.....	81
A4. Código para el control del sensor de polvo PMS5003. ....	81
A5. Código para el control del sensor de polvo SENSIRION SPS30. ....	84
B. Código del software de control para la cámara de pruebas con interfaz gráfica (GUI).....	85

## Índice de Tablas

Tabla 1. Tabla comparativa de artículos científicos sobre cámaras de pruebas o calibración.....	10
Tabla 2. Librerías de Python utilizadas en el programa.....	41
Tabla 3. Mediciones del sensor y los dispositivos de monitoreo de PM. ....	54
Tabla 4. Presupuesto del proyecto.....	68

## Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama del sistema de control de la cámara de pruebas.....	12
Figura 2. Diagrama de la cámara de calibración para PM.....	13
Figura 3. Diagrama de la dispersión de Rayleigh. La imagen fue modificada para traducir su contenido a español. (Fuente: Pearson Education, inc.).....	15
Figura 4. Diagrama de la dispersión de Mie. La imagen fue modificada para traducir su contenido a español. (Fuente: Thomas Higher Education.).....	16
Figura 5. Diagrama de un separador ciclónico. La imagen fue modificada para traducir su contenido a español. (Fuente: energyeducation.ca.).....	18
Figura 6. Estructura del impactador. (Fuente: Airmet).....	20
Figura 7. Diagrama de la placa Arduino Uno. (Fuente: Arduino.).....	21
Figura 8. Diagrama de la placa Raspberry Pi 5. (Fuente: hackatronic.com/).....	22
Figura 9. Motor Shield Arduino L293d.....	23
Figura 10. Diagrama de la topología del Puente H. A) puente H conectado para girar hacia adelante, B) puente H conectado para girar en reversa. (Fuente: Vincent Sieben).....	24
Figura 11. Diagrama de la modulación del ancho de pulso usado para el control del motor. (Fuente: Vincent Sieben).....	25
Figura 12. Sensor GY-39.....	26
Figura 13. Diagrama de conexión entre dispositivos para comunicación UART.....	27
Figura 14. Diagrama de comunicación entre el módulo HC-06 y un ordenador (PC).....	28
Figura 15. Diagrama del generador de partículas monodispersas.....	36
Figura 16. Diagrama de la red de control de la ventilación.....	36
Figura 17. Diagrama del sensor SENSIRION SPS30.....	37
Figura 18. Diagrama de conexión del sensor Prana Air PAS-OUT-01.....	38
Figura 19. Diagrama de conexión del sensor Plantower PMS5003.....	39
Figura 20. Diagrama de conexión del sensor ambiental GY-39.....	40
Figura 21. Diagrama del sistema de extracción de partículas.....	41
Figura 22. Interfaz gráfica del software de control de la cámara de pruebas: a) módulo del sistema de extracción de PM, b) módulo de botones auxiliares y almacenamiento, c) módulo de la red de ventilación, d) módulo de sensores, e) módulo de conexiones COMs, f) módulo de configuración, f) módulo de apariencia, y g) pantalla de información.....	44
Figura 23. Función de datos gráficos: a) menú y opciones de visualización de datos gráficos, b) visualización de gráficos.....	46
Figura 24. Fotografía de las perlititas de poliestireno de 0.46µm.....	47
Figura 25. Fotografía del microscopio utilizado para visualizar las perlititas de poliestireno.....	48
Figura 26. Prototipo de cámara de calibración dentro de la campana de extracción.....	49

Figura 27. Sistema de monodispersión.....	50
Figura 28. Gráfica de lectura de los sensores SPS30 sin calibrar y Prana Air PAS-OUT-01.....	55
Figura 29. Gráfica de la regresión lineal entre el sensor SPS30 A y el sensor Prana Air PAS-OUT-01.....	56
Figura 30. Gráfica de la regresión lineal entre el sensor SPS30 B y el sensor Prana Air PAS-OUT-01.....	56
Figura 31. Gráfica de correlación de Pearson (r) entre el sensor SPS30 A y el sensor Prana Air PAS-OUT-01.....	56
Figura 32. Gráfica de correlación de Pearson (r) entre el sensor SPS30 B y el sensor Prana Air PAS-OUT-01.....	57
Figura 33. Gráfica de prueba de los sensores con el sensor SPS30 A calibrado.....	58
Figura 34. Gráfica de correlación de Pearson (r) entre el sensor SPS30 A calibrado y el sensor Prana Air PAS-OUT-01.....	58
Figura 35. Gráfica de prueba con ambos sensores SPS30 calibrados.....	59
Figura 36. Gráfica de correlación de Pearson (r) del sensor SPS30 A y el sensor Prana Air PAS-OUT-01.....	60
Figura 37. Gráfica de correlación de Pearson (r) del sensor SPS30 B y el sensor Prana Air PAS-OUT-01.....	60
Figura 38. Gráfica de prueba de los sensores PMS5003 sin calibrar y el sensor Prana Air PAS-OUT-01.....	61
Figura 39. Gráfica de calibración del sensor PMS5003 A.....	62
Figura 40. Gráfica de calibración del sensor PMS5003 B.....	62
Figura 41. Gráfica de correlación de Pearson (r) del sensor PMS5003 A y el sensor Prana Air PAS-OUT-01.....	63
Figura 42. Gráfica de correlación de Pearson (r) del sensor PMS5003 B y el sensor Prana Air PAS-OUT-01.....	63
Figura 43. Gráfica de la prueba de los sensores con el sensor PMS5003 A calibrado.....	64
Figura 44. Gráfica de correlación de Pearson (r) del sensor PMS5003 A y el sensor Prana Air PAS-OUT-01.....	65
Figura 45. Gráfica de prueba con ambos sensores PMS5003 calibrados y el sensor Prana Air PAS-OUT-01.....	66
Figura 46. Gráfica de correlación de Pearson (r) del sensor PMS5003 A calibrado y el sensor Prana Air PAS-OUT-01.....	66
Figura 47. Gráfica de correlación de Pearson (r) del sensor PMS5003 B calibrado y el sensor Prana Air PAS-OUT-01.....	67

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1 CONTEXTO DEL PROBLEMA

Actualmente el uso de vehículos de transporte que utilizan motores de combustión interna, dispositivos y herramientas eléctricas, así como el uso de electricidad en el hogar dependen principalmente de plantas energéticas no renovables (carbón, gas natural y petróleo) [1] los cuales son fundamentales para la sustentabilidad de nuestra sociedad actual. Sin embargo, estas tecnologías producen residuos dañinos que se introducen a la atmósfera causando efectos adversos en la salud y al medio ambiente [2]. La contaminación atmosférica se produce por una mezcla de sustancias contaminantes procedentes de fuentes naturales, como son los incendios forestales, volcanes y tormentas de arena, y las fuentes antropogénicas como son la producción de energía a partir de combustibles fósiles, contaminación industrial y quemas agrícolas [1,3,4]. Lo anteriormente mencionado, constituye una de las mayores amenazas mundiales para la prosperidad y la salud humanas, y afecta a todos los países independientemente de su nivel de ingresos. En 2019, 4.2 millones de muertes prematuras en todo el mundo fueron asociadas a la contaminación atmosférica en exteriores, mientras que 6.7 millones fueron asociadas tanto a la contaminación atmosférica en exteriores y doméstica en interiores, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud [1,3]. Los contaminantes atmosféricos más comunes con mayor evidencia de impacto en la salud pública son: el material particulado (PM); que incluyen  $PM_{10}$  (diámetro aerodinámico  $\leq 10$  micrómetros) y  $PM_{2.5}$  (diámetro aerodinámico  $\leq 2,5$  micrómetros), monóxido de carbono (CO), ozono ( $O_3$ ), dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) y dióxido de azufre ( $SO_2$ ) [5].

Las PM consisten en partículas que contienen gotas microscópicas sólidas o líquidas de diversos tamaños y formas que están compuestas por cientos de sustancias químicas diferentes. Algunas fuentes de PM suelen originarse directamente en procesos de combustión (por ejemplo, incendios forestales e incendios agrícolas), carreteras sin asfaltar y obras de construcción. Sin embargo, la mayoría de las partículas se forman en la atmósfera a través de complejas reacciones químicas en las que intervienen otros contaminantes, como es el caso del  $SO_2$  y los  $NO_x$  [6]. Las PM se suelen dividir en dos medidas básicas de partículas para garantizar una gestión y regulación adecuadas, que son  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , también conocidas como partículas finas [7]. El tamaño de estas partículas está directamente asociado con el

potencial de causar problemas de salud en las personas que están expuestas y han inhalado las partículas [8]. Las  $PM_{10}$  pueden penetrar en los pulmones, causando inflamación y provocando problemas cardiovasculares, mientras que las  $PM_{2.5}$  pueden penetrar aún más en los pulmones, depositándose en las regiones alveolares, donde pueden ser absorbidas por el torrente sanguíneo y desarrollar problemas cardiovasculares. Además, las PM pueden afectar a causar problemas en el sistema nervioso autónomo, aumentando la incidencia de arritmias cardíacas y la morbilidad y mortalidad cardiovascular [9]. En [10] se descubrió que los adolescentes y los niños corren un mayor riesgo que los adultos cuando se exponen a contaminantes debido a que sus cuerpos siguen en desarrollo. Mientras tanto, los adultos mayores, debido al deterioro causado por el envejecimiento, y las personas que sufren trastornos cardiorrespiratorios corren un riesgo elevado debido a la inflamación y a las complicaciones respiratorias derivadas de la contaminación atmosférica [10,11].

La necesidad de monitorear la contaminación y los niveles de PM es de vital importancia para determinar el tipo de acción necesaria en la región, así como realizar constantes monitoreos para determinar la calidad del aire para cuidar la salud de sus habitantes y el medio ambiente. Esto quiere decir que la exactitud y precisión de los sensores o dispositivos de monitoreo para PM es esencial para poder monitorear el aire. Un ejemplo de las nuevas tecnologías que están transformando el estudio del medio ambiente y salud ambiental son los sensores de bajo costo (LCS) los cuales se han vuelto muy populares debido a su utilidad y accesibilidad, pero suelen presentarse problemas de validación por lo que es necesario realizar una calibración.

El objetivo de este trabajo es diseñar una cámara de pruebas para la calibración de sensores de partículas en condiciones ambientales controladas con conectividad inalámbrica. Se ha desarrollado una cámara de calibración con diferentes etapas que permiten controlar el ambiente dentro de la cámara con conectividad inalámbrica Bluetooth, para evitar la exposición de los usuarios a PM durante la calibración.

## **1.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN**

¿Cómo pueden controlarse las condiciones ambientales (humedad relativa, temperatura, luminosidad, altura y presión atmosférica) para favorecer / permitir el proceso calibración de monitores personales de material particulado?

## **1.3 HIPÓTESIS**

Las condiciones ambientales (temperatura, luminosidad, humedad relativa, presión atmosférica y altura) controladas por un conjunto de hardware en un entorno delimitado para la calibración favorecerá / permitirá realizar el proceso de calibración de monitores personales de material particulado.

## **1.4 OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN**

### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar una cámara para calibración de monitores de material particulado en un ambiente controlado, con conectividad inalámbrica e interfaz gráfica basada en Python.

### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Fabricar una cámara de prueba con controladores del flujo de aire y material particulado, filtros de humedad y monitoreo de temperatura.
- Realizar una interfaz gráfica en Python para controlar el sistema por conectividad inalámbrica.

- Validar el funcionamiento de la cámara con sensores portables comerciales SENSIRION SPS30, PMS5003 y Prana Air PAS-OUT-01, y partículas de dimensiones conocidas.

## 1.5 JUSTIFICACIÓN

Las PM son uno de los contaminantes atmosféricos más peligrosos, que se compone de partículas de varios tamaños y formas de diferentes químicos [12, 13]. El tamaño de estas partículas está directamente relacionado con el potencial de causar problemas de salud a las personas expuestas y que las han inhalado [7]. Las PM pueden causar problemas como irritación en los ojos, nariz, garganta, causar problemas en el sistema nervioso central, causar enfermedad pulmonar obstructiva crónica, generar problemas adversos en el sistema reproductivo, desarrollar problemas cardiovasculares y desarrollar cáncer pulmonar [14, 15].

Según la EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos) el material particulado puede ser transportado a través de largas distancias por medio del viento para posteriormente introducirse en el suelo o agua. Dependiendo de su composición química, el material particulado puede, al sedimentarse, provocar acidez en los lagos y arroyos, modificar el balance nutricional en aguas costeras y en grandes cuencas fluviales, reducir la cantidad de nutrientes en el suelo, provocar efectos adversos en bosques y cultivos agrícolas, efectos adversos sobre los ecosistemas, y contribuye a los efectos de la lluvia ácida [16].

Debido a la problemática anteriormente mencionada, existe la necesidad de monitorear estas partículas que se encuentran en el aire para conocer los niveles de contaminación, alertar y apoyar al sector de salud para evitar la exposición y reducir los efectos negativos que estos generan en la salud, así como muertes asociadas. Por lo que, debido al gran impacto medioambiental y de salud pública, es necesario realizar un constante monitoreo de materia particulada en el ambiente con ayuda de sensores precisos y accesibles. El impacto de salud que provocan estos contaminantes atmosféricos ha generado una tendencia en el diseño y manufactura de dispositivos de monitoreo de material particulado portátiles, personales y estacionarios con el fin de prevenir la exposición a contaminantes

atmosféricos. Actualmente los procesos de calibración representan un desafío de complejidad del proceso, tiempo del procedimiento, altos costos, y este procedimiento debe realizarse periódicamente (usualmente cada año). Por estas razones la calibración es una limitante en el monitoreo de entornos reales y planteamiento de soluciones a problemas involucrados en la contaminación del aire y sus efectos en la salud.

## **1.6 CONTRIBUCIÓN DE LA TESIS**

El proyecto de investigación busca generar un sistema innovador que permita realizar pruebas, calibración y validación de sensores de PM en condiciones de un ambiente controlado que posea una conectividad inalámbrica manipulable por medio de una interfaz gráfica de usuario (GUI) basada en Python. Además, los resultados de este estudio proporcionarán un prototipo que podrá someterse a un registro de propiedad intelectual.

## **1.7 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS**

La estructura de esta investigación está organizada en 7 capítulos:

**Capítulo 1:** Este capítulo aborda la introducción y estructura del protocolo de investigación en el cual se incluye el contexto del problema, pregunta de investigación, objetivos de la tesis, justificación y contribuciones de la tesis.

**Capítulo 2:** En este capítulo se presentan los antecedentes relacionados con este trabajo en el cual se muestran las primeras evidencias del riesgo de la contaminación del aire a la salud humana y de los ecosistemas, los inicios del monitoreo del material particulado, su situación actual, tendencias a futuro, y trabajos que se han realizado sobre el desarrollo de cámaras para la calibración de dispositivos o sensores de PM en la comunidad científica (estado del arte).

**Capítulo 3:** El tercer capítulo presenta el marco teórico en el cual se presentan los conceptos y términos fundamentales del monitoreo de la calidad del aire, los efectos adversos a la exposición de PM, el funcionamiento de un sensor de PM, la normativa para la calibración de dispositivos o sensores de PM.

**Capítulo 4:** En este capítulo se presenta la metodología del procedimiento experimental del proyecto con el cual se desarrolló un prototipo de una cámara de calibración de sensores y dispositivos para el monitoreo de material particulado de bajo costo y con conectividad inalámbrica.

**Capítulo 5:** Este capítulo aborda los resultados obtenidos al realizar la metodología y la obtención de las lecturas de los sensores de PM y dispositivos para el monitoreo de PM, la comparación entre los sensores de PM y los dispositivos para el monitoreo de PM (previamente calibrados y certificados) utilizados como referencia, etc.

**Capítulo 6:** El sexto capítulo presenta la discusión de los resultados obtenidos en la metodología, así como las observaciones y aprendizajes obtenidos a partir del análisis de los resultados.

**Capítulo 7:** El último capítulo aborda las conclusiones, contribuciones y trabajo futuro.

## **CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES**

### **2.1 Las Primeras Evidencias del Riesgo de la Contaminación del Aire a la Salud Humana y de los Ecosistemas**

La concienciación sobre la contaminación del aire se remonta a la antigua Grecia, donde Hipócrates (durante los 400 a.C.) documentó las repercusiones sanitarias de la calidad del aire, señalando que las ciudades expuestas a vientos húmedos sufrían de aire inmundo y enfermedades relacionadas a estos eventos. Además, escritores romanos como Séneca y Frontino también reconocieron los efectos perjudiciales del humo, donde Séneca describió cómo escapar de la atmósfera contaminada de Roma mejoraba su salud [17].

En China, en la dinastía Song (durante los años 961 a 1279 d.C.), los escritos de Shen Kuo recogían la preocupación por la contaminación atmosférica provocada por la combustión del carbón. A lo largo de la Edad Media, la comprensión de la contaminación atmosférica se estancó, ya que persistió la teoría miasmática, que atribuía las enfermedades al aire contaminado y a los malos olores sin base científica [17].

En el siglo XVII se produjo un cambio de conciencia, sobre todo gracias a la publicación de John Evelyn *Fumifugium* de 1661, que describía la contaminación atmosférica de Londres y proponía trasladar las industrias contaminantes fuera de la ciudad. Contemporáneos como John Graunt correlacionaron las tasas de mortalidad con los niveles de contaminación, especialmente durante las condiciones de niebla. Aunque carecían de capacidad de análisis químico, estos escritos ilustraban los graves riesgos para la salud que planteaba la contaminación atmosférica [17].

### **2.2 Los Inicios del Monitoreo del Material Particulado**

En los inicios del monitoreo del material particulado se utilizaban los métodos gravimétricos. Estos métodos consisten de forma general en determinar la cantidad proporcionada de un elemento, radical o compuesto que se encuentra en alguna muestra, removiendo todas las sustancias no deseadas, permitiendo a la composición o compuesto definido poder pesarse [18]. Estos métodos continúan siendo la piedra angular de la detección

y el control de las PM, especialmente en los centros de control de la calidad del aire. Estos métodos son fundamentales para validar las mediciones de otras técnicas debido a su alta sensibilidad para detectar incluso las masas de partículas más pequeñas. Existen varias adaptaciones de los métodos gravimétricos, incluidas las mediciones directas de masa y otros enfoques como la absorción de ondas electromagnéticas, la extinción, la dispersión y los cambios de frecuencia de resonancia [19].

Entre los instrumentos más comunes de esta categoría se encuentran el monitor de atenuación beta, este dispositivo mide la atenuación de la radiación beta por partículas, y los muestreadores dicotómicos de aerosoles, que utilizan etapas de impactación para separar las partículas y recogerlas en filtros. A pesar de su eficacia, estos sistemas suelen ser grandes y costosos, lo que los hace poco prácticos para la vigilancia de la exposición personal. En consecuencia, sirven principalmente para calibrar sensores más pequeños en lugar de controlar directamente la exposición individual [19].

### **2.3 La Situación Actual del Monitoreo de Material Particulado**

La detección de PM en la actualidad ha pasado en gran medida a los dispositivos basados en la dispersión de la luz, que utilizan los principios de dispersión de Rayleigh o de Mie en función del tamaño de las partículas. Una de las ventajas de estos dispositivos es que son más fáciles de transportar debido a su diseño (tamaño y peso), y rentables que los detectores gravimétricos tradicionales y pueden montarse en postes, utilizarse en ordenadores de sobremesa o llevarse en la mano. Sin embargo, requieren calibración con instrumentos de referencia, son propensos a las desviaciones y dependen de suposiciones sobre el tipo de partícula y el índice de refracción. Para mejorar la precisión, estos dispositivos pueden incorporar controles de entrada para segregar las partículas antes de que entren en la cámara de detección [19].

A pesar de que el monitoreo de PM actual se centra en las partículas finas debido a sus implicaciones para la salud, las técnicas de dispersión de la luz presentan retos al momento de detectar estas partículas más pequeñas (partículas finas), ya que dispersan menos

luz, lo que genera señales más débiles. Esto ha creado una demanda de avances en las lecturas electrónicas para mejorar los límites de detección [19].

## **2.4 Tendencias y Futuro del Monitoreo de Material Particulado**

Actualmente se puede observar que el desarrollo de sensores miniaturizados para la monitorización de la calidad del aire es un campo en rápido crecimiento, impulsado por la necesidad de soluciones integrales y asequibles que se incorporen fácilmente a los dispositivos del Internet de Todo (IoE) para la monitorización de la salud de los usuarios. Entre los diversos contaminantes, la detección de  $PM_{2.5}$  ha experimentado avances significativos a través de métodos como la acústica, la detección eléctrica y la microfluídica. Sin embargo, los componentes electrónicos de estos métodos de detección aún requieren una mayor miniaturización [19].

Los sensores actuales de PM utilizan principalmente técnicas de impedancia y acústicas, con la posibilidad de integrar eficazmente métodos predictivos como la lógica difusa y las redes neuronales recurrentes. Estos enfoques pueden mejorar la utilidad de los datos obtenidos de los sensores, permitiendo un control más preciso de la calidad del aire [19].

## **2.5 Estado del Arte**

Se realizó una investigación en el estado del arte con la finalidad de analizar y comparar los trabajos realizados y sus alcances en relación con la propuesta en el proyecto, como se puede observar en la Tabla 1.

**Tabla 1. Tabla comparativa de artículos científicos sobre cámaras de pruebas o calibración.**

Nombre del trabajo	Año de publicación	Mide PM	Extrae las partículas de la cámara	Cuenta con un sistema de monodispersión	Incorpora una comunicación inalámbrica
A Low-Cost Calibration Method for Temperature, Relative Humidity, and Carbon Dioxide Sensors Used in Air Quality Monitoring Systems [20]	2023	No	Si	No	No
Low cost CO <sub>2</sub> sensing: A simple microcontroller approach with calibration and field use [21]	2020	No	Si	No	No
System for performance evaluation and calibration of low-cost gas sensors applied to air quality monitoring [22]	2023	No	Si	No	No
In chamber calibration and performance evaluation of air quality low-cost sensors [23]	2024	Si	Si	Si	No
New Calibration System for Low-Cost Suspended Particulate Matter Sensors with Controlled Air Speed, Temperature and Humidity [24]	2021	Si	No	Si	No
Numerical and experimental investigation on the performance of a ventilated chamber for low-cost PM sensor calibration [25]	2021	Si	Si	Si	No
Development of an environmental chamber for evaluating the performance of low-cost air quality sensors under controlled conditions [26]	2017	Si	Si	Si	No
Design, calibration, and testing of a mobile sensor system for air pollution and built environment data collection: The urban scanner platform [27]	2022	Si	Si	No	Si
Development of a calibration chamber to evaluate the performance of low-cost particulate matter sensors [28]	2019	Si	No	Si	No
Practical Particulate Matter Sensing and Accurate Calibration System Using Low-Cost Commercial Sensors [29]	2021	Si	No	No	Si
Calibration of low-cost particulate matter sensors for coal dust monitoring [30]	2023	Si	No	Si	No

En los trabajos de [20, 21, 22] se desarrollaron cámaras de calibración para otros contaminantes (por ejemplo, CO<sub>2</sub>, humedad, SO<sub>2</sub>, etc.), requiriendo cada una de ellas una metodología diferente y especializada. En los trabajos [20-27] los actuadores involucrados en el mantenimiento de las condiciones ambientales para realizar la calibración no tienen control inmediato programable, operando de forma automatizada. En el trabajo [28], se realizó una simulación para el desarrollo de una cámara de pruebas de calibración de PM; la simulación se realizó, aunque, no se implementó, y no se hizo mención de una interfaz gráfica o tipo de conectividad. Además, en el trabajo [23] implementó un sistema de recirculación que filtra el aire y lo recircula (aire limpio) de nuevo a la cámara, mientras que en las cámaras de calibración en los trabajos [24, 29, 30], no se incluye ningún sistema de extracción de partículas. Este sistema que se utiliza para limpiar la cámara de PM antes y después de un muestreo es necesario debido a que la presencia de PM residual puede afectar las mediciones y comprometer los resultados. Con respecto a la forma en que se introducen las partículas de material particulado a la cámara de calibración, en los trabajos [20, 21, 22, 27, 29] no se incorporaron sistemas de monodispersión, el trabajo [20] utilizó jeringas para introducir las partículas a la cámara, el trabajo [21] mide las partículas que se producen en un canal de agua, el trabajo [22] utiliza un sistema generador de Ozono (O<sub>3</sub>), el trabajo [27] incorpora la cámara de pruebas a un vehículo con el fin de monitorear distintas partes de la ciudad donde se lleva a cabo el proyecto, en el trabajo [24] utilizan un tubo que se encuentra conectado a la cámara de pruebas donde colocan una vela dentro de otra cámara para introducir las partículas. Mientras que en los trabajos [23-26,28,30] se incorporaron sistemas de monodispersión. Finalmente, en los trabajos de [20-26] la comunicación se realiza mediante conectividad serie, ya sea directamente desde los dispositivos o a través de un microcontrolador, mientras que [27 - 29] se utiliza conectividad inalámbrica, donde [27, 28] emplean conectividad Wifi y [29] conectividad Bluetooth.

## 2.6 Propuesta de proyecto

El objetivo de este trabajo es diseñar una cámara de pruebas para la calibración de sensores de partículas en condiciones ambientales controladas con conectividad inalámbrica. Se ha desarrollado una cámara de calibración con diferentes etapas que permiten controlar el ambiente dentro de la cámara. La cámara de calibración fue equipada con conectividad inalámbrica Bluetooth, para evitar la exposición de los usuarios a PM durante la calibración y no exponer al riesgo de exposición al material particulado. Además, se desarrolló un programa de control de monitorización de la calidad del aire que interactúa con los dispositivos de monitorización del aire, los sensores ambientales y dispositivos de control de condiciones ambientales (ventiladores, motores, dispositivos de extracción de aire, y los actuadores del monodispersor), utilizando la conectividad Bluetooth para comunicarse con el sistema de control (véanse la Figura 1 y 2). Además, el programa permite el uso de cualquier sensor o dispositivo conectado a través de una conexión Bluetooth al ordenador, permitiendo actualizar los dispositivos o sensores a conveniencia del usuario. El programa guarda los datos de cada dispositivo en un archivo de código de verificación seguro (CSV), junto con la información de fecha y hora de cada medición realizada por el dispositivo de control o sensor ambiental.

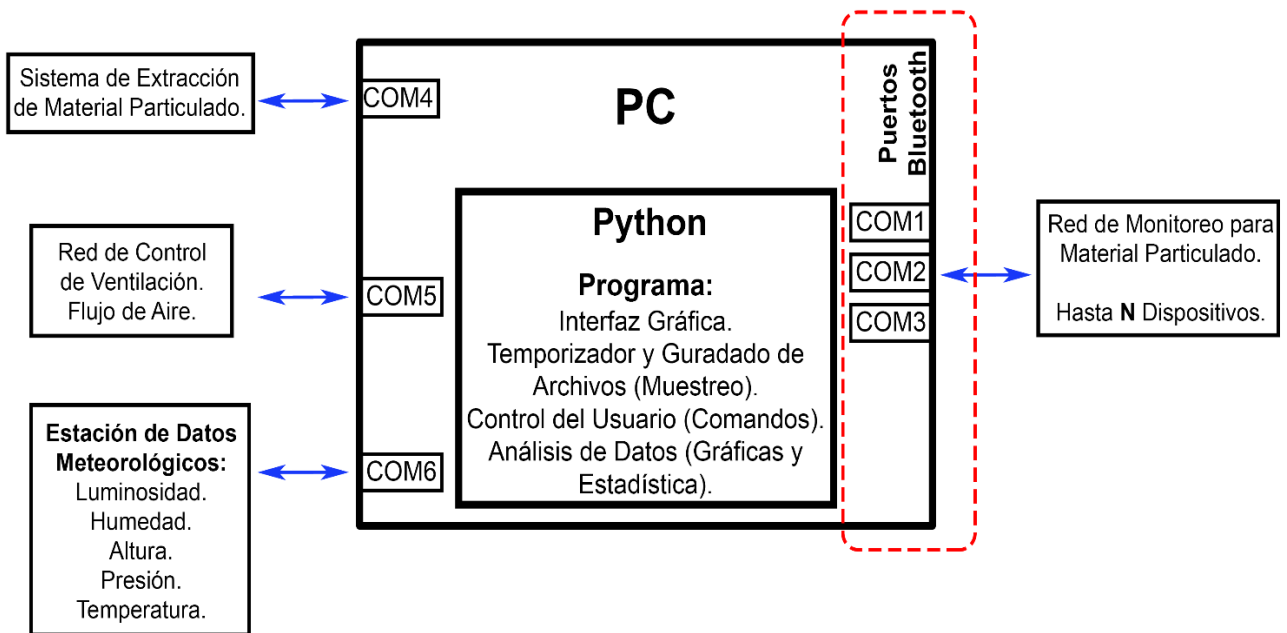


Figura 1. Diagrama del sistema de control de la cámara de pruebas.

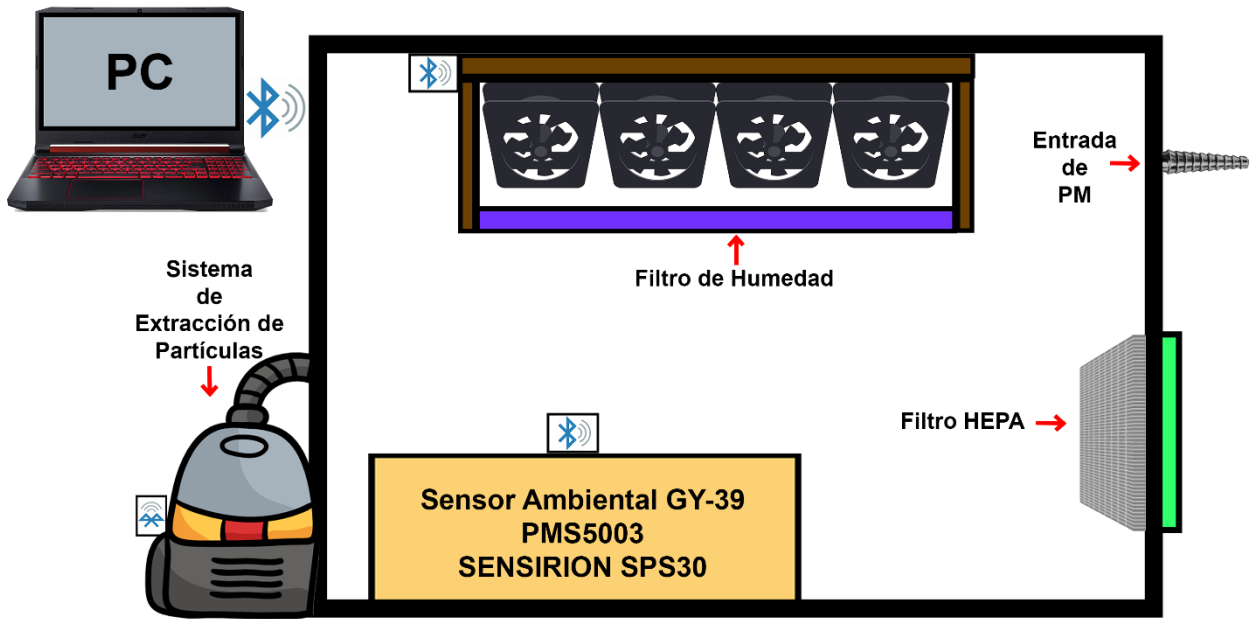


Figura 2. Diagrama de la cámara de calibración para PM.

## CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO

### 3.1 Conceptos fundamentales para el conteo de partículas

#### 3.1.1 Dispersión de luz

La dispersión de la luz, a diferencia de los procesos de absorción y luminiscencia de emisiones, no requiere de la transición electrónica entre los niveles cuantificados de energía en átomos o moléculas. En su lugar, ocurre una aleatorización de las direcciones de la radiación de luz, donde las partículas pequeñas al ser comparadas a la longitud de onda de la radiación óptica dan lugar a la dispersión de Rayleigh, la cual se puede observar en todos los átomos y moléculas. Sin embargo, si las partículas son más grandes que la longitud de onda de la radiación óptica, el mecanismo de dispersión es el de la dispersión de Mie (donde la intensidad de la dispersión de la radiación está relacionada a la concentración de las partículas dispersas) [31].

Durante los últimos años, se han aplicado diversos métodos continuos para medir la concentración de la combustión de aerosoles, incluidas partículas minerales y el hollín. Ejemplos de estos métodos son el medidor beta, la opacidad, la dispersión de la luz, el método electrostático y la microbalanza. De los métodos anteriormente mencionados, la dispersión de luz es uno de los métodos preferidos por sus ventajas de alta resolución temporal, el ser no invasivo y por su gran precisión a bajas concentraciones [32].

La luz dispersada (por partícula) puede correlacionarse ya sea con una partícula o una nube de partículas a la vez, ejemplos de esto son los contadores de una sola partícula en sus siglas en inglés *single-particle counters* (SPCs) y la dispersión de luz en conjunto en sus siglas en inglés *electrophoretic light scattering* (ESL). Los SPCs suelen incorporarse a volúmenes pequeños de muestras en la instrumentación para medir una sola partícula a la vez, lo que nos indica la concentración de partícula del tamaño de partícula y el número de registros. Una problemática del SPC es que este método requiere que las partículas pasen a través del volumen de una muestra de uno en uno, lo que hace que el límite superior de concentración se encuentre por debajo del de la atmosfera, por lo que casi no es empleado para el monitoreo continuo donde existen altos niveles de contaminación de partículas. A diferencia del método ELS, el cual mide la dispersión de luz de una nube de partículas, lo

que está estrechamente relacionado con la concentración de PM. Además, el método ELS tiene ventajas de ser de bajo costo y que puede emplearse para medir las partículas de ambientes hostiles (altos niveles de partículas), por lo que es utilizado como un método para el monitoreo continuo de masa [32].

### 3.1.1.1 Dispersión de Rayleigh

La dispersión de Rayleigh es la dispersión elástica de partículas pequeñas como son los átomos o moléculas, las cuales dan como resultado radiación dispersa que ocurre hacia todas las direcciones de forma uniforme. Este tipo de dispersión es dependiente de la longitud de ondas cortas (siendo estas longitudes de onda corta más dispersas). Además, el mecanismo de la dispersión de Rayleigh puede observarse en la dispersión de las moléculas en la atmosfera que dan el color azul característico presente durante el día. Lo anteriormente mencionado se debe a que la luz azul proveniente de los rayos solares choca con la atmosfera superior generando una dispersión aproximadamente 10 veces mayor que la luz roja, por lo que la luz azul se dispersa ante el observador mientras que la luz roja en su mayoría no es dispersada y termina regresando al espacio (ver Figura 3) [33].



**Figura 3.** Diagrama de la dispersión de Rayleigh. La imagen fue modificada para traducir su contenido a español. (Fuente: Pearson Education, inc.)

### 3.1.1.2 Dispersión de Mie

La dispersión de Mie consiste en un mecanismo elástico de dispersión que ocurre debido a partículas o moléculas relativamente grandes con dimensiones comparables o mayores a la longitud de onda de la radiación incidente, además, la dispersión de la radiación resultante es no uniforme y su efecto no es tan dependiente de la longitud de onda como es el caso de la dispersión de Rayleigh. Un ejemplo de este fenómeno se puede observar en la luz blanca dispersa en las nubes o neblina [31]. A pesar de que la teoría de Mie da resultados precisos para una dispersión esférica, los resultados también son de relevancia cualitativa para dispersiones de otros tipos de formas [34].

Una diferencia significativa entre la dispersión de Rayleigh y Mie es que, en el caso de la dispersión de Rayleigh, mientras que el dispersor aumenta de tamaño, la preponderancia relativa de las longitudes de onda más pequeñas en la radiación dispersada se iguala gradualmente hasta que el tamaño es de 10 a 100 veces la longitud de onda, donde todas las longitudes de onda se dispersan por igual. Lo anteriormente mencionado explica el color blanco de las nubes, donde todos los componentes de la luz solar son dispersados por igual (debido a las moléculas de agua en las nubes) como se puede observar en la Figura 4 [34].



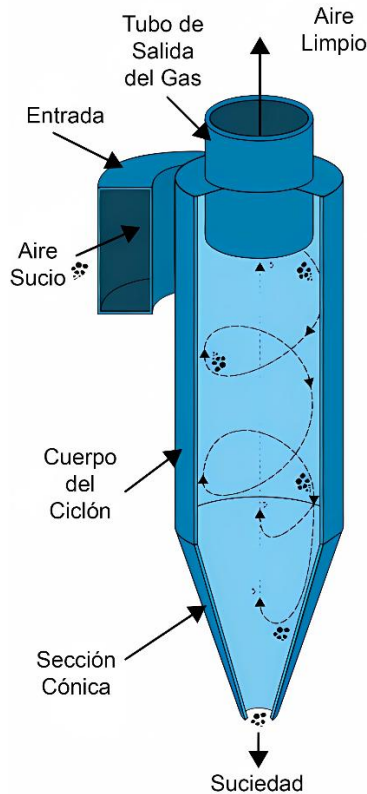
**Figura 4.** Diagrama de la dispersión de Mie. La imagen fue modificada para traducir su contenido a español. (Fuente: Thomas Higher Education.)

## **3.1.2 Separadores de partículas**

### **3.1.2.1 Separador ciclónico**

Los separadores ciclónicos, también llamados simplemente ciclones, son dispositivos separadores (depuradores en seco) que funcionan a partir del principio de inercia con el fin de remover material particulado de gases de combustión. Los ciclones son uno de diversos dispositivos de control para la contaminación del aire, estos son conocidos como prefiltros debido a que generalmente remueve piezas más grandes de material particulado. Lo anteriormente mencionado previene que partículas más grandes interfieran con métodos que requieran filtración fina. Además, existen varios separadores ciclónicos que pueden operar en paralelo, a este sistema se le conoce como multiciclónico [37].

Los separadores ciclónicos funcionan como una centrifuga, pero con un flujo continuo de entrada de aire contaminado el cual es introducido a una cámara (dentro del ciclón). El interior de la cámara se crea un vórtice en espiral, la formación de la espiral y la separación de las partículas se puede observar en la Figura 5. Los componentes más ligeros del gas tienen menos inercia, por lo que es más sencillo para ellas que sean afectados por el vórtice y así subir. Por otra parte, los componentes más grandes de material particulado tienen mayor inercia y no son fácilmente afectados por el vórtice. Debido a lo anteriormente mencionado, las partículas grandes tienen dificultad para seguir el espiral de alta velocidad del gas y el vórtice, por lo que las partículas chocan con las paredes internas del contenedor y caen hacia el depósito [37].



**Figura 5.** Diagrama de un separador ciclónico. La imagen fue modificada para traducir su contenido a español. (Fuente: energyeducation.ca.)

Los separadores ciclónicos son generalmente capaces de eliminar entre el 50% y el 99% de todas las partículas presentes en los gases de combustión. La capacidad de los separadores ciclónicos para separar (eliminar) estas partículas dependen en su mayoría del tamaño de las mismas. En el caso de que se encuentren una gran cantidad de partículas más ligeras, se podrán separar menos. Debido a lo anteriormente mencionado, los separadores ciclónicos funcionan de forma más eficiente con gases de combustión, los cuales contienen una mayor cantidad de partículas grandes [37].

Existen varias ventajas y desventajas del uso de separadores ciclónicos. Como ventajas, los separadores ciclónicos son fáciles de instalar y baratos de mantener, esto debido a que no poseen partes móviles. Otra ventaja es que el material particulado removido es depositado en seco, lo que lo vuelve sencillo de manejar. Además, los ciclones ocupan muy poco espacio. Sin embargo, las desventajas de los separadores ciclónicos son que los modelos estándar no son capaces de recolectar material particulado que es menor de 10 micrómetros efectivamente y son incapaces de manejar materiales que sean pegajosos [37].

### 3.1.2.2 Impactadores

Los impactadores, también conocidos como monitor personal ambiental (PEM), muestreador o impactadores de partículas paralelas (PPIs) son dispositivos portátiles diseñados para la recolección de partículas en el aire interior para determinar la exposición personal a contaminantes como el PM<sub>10</sub> o PM<sub>2.5</sub>. Los impactadores se emplean en diversas áreas, como los estudio sobre asma infantil, certificación de edificios ecológicos, estudios de calidad del aire interior (IAQ), investigaciones en zonas escolares, entre otros [38, 39].

El mecanismo básico de funcionamiento de un impactador consiste en la aceleración de aire con partículas a través de una boquilla hacia una placa ubicada a cierta distancia. Este cambio brusco de dirección en el flujo de aire hace que las partículas pequeñas sigan el flujo y permanezcan en suspensión, mientras que las más grandes impactan en la placa. El punto de corte del impactador es el tamaño de partícula que se recolecta con un 50% de eficiencia; las partículas más grandes se recolectan con mayor eficiencia, y las más pequeñas, con menor [39].

Los impactadores están compuesto por tres partes principales que permiten la recolección de partículas en el aire: la tapa (*cap*), el conjunto del anillo de impacto (*impaction ring assembly*) y la base (*base*). La tapa contiene las boquillas por donde se acelera el flujo de aire con partículas. El conjunto del anillo de impacto está ubicado debajo de las boquillas, donde se retienen estas partículas mayores al punto de corte. Finalmente, la base sostiene un filtro de 37 mm que recolecta las partículas más pequeñas que atraviesan el sistema y se conecta al sistema de succión. También incluye un soporte del filtro (*pad*), una placa base con salida al sistema de bombeo, un clip de sujeción y una tapa protectora para evitar la contaminación cuando no está en uso, ver Figura 6 [38].



Figura 6. Estructura del impactador. (Fuente: Airmet)

El flujo de muestreo del impactador varía según el modelo, pero existen de 2 L/min, 4 L/min o 10 L/min, cada uno optimizado para la recolección de  $PM_{10}$  o  $PM_{2.5}$ . El tiempo de muestreo depende del objetivo del estudio y puede ir desde unas horas hasta un día completo. La velocidad de muestreo, es la velocidad con la que el aire fluye a través del dispositivo. La bomba de muestra es la bomba personal que impulsa el aire, y muestra media es el medio de recolección, en este caso, el filtro de 37 mm [39].

## 3.2 Módulos y placas de control hardware para manipular las condiciones ambientales.

### 3.2.1 Plataforma de código abierto Arduino

Arduino es una familia de placas para el prototipado que sigue la tendencia en el desarrollo tecnológico sobre hardware y software libres. Este incorpora un microcontrolador reprogramable y una serie de pines que permiten establecer conexiones entre el microcontrolador y diferentes actuadores y/o sensores de forma sencilla. Además, estas placas son de bajo costo y bajo consumo energético, por lo que las placas Arduino son

accesibles tanto para estudiantes como para profesores o investigadores, así como la ventaja de tener aportaciones de la comunidad de usuarios que integran una gran cantidad de herramientas, librerías, interfaces gráficas, etc.

Para este trabajo se utilizó la placa Arduino Uno, la cual utiliza el microcontrolador ATmega328P (con un voltaje de operación de 5V) con un resonador cerámico (reloj) de 16MHz. Además, cuenta con 14 pines digitales para entradas/salidas (de las cuales 6 pueden utilizarse como salidas PWM), 6 entradas analógicas, conexión USB, una toma de alimentación (de 7 a 12V), un cabezal ICSP y un botón de reinicio (ver Figura 7) [40].

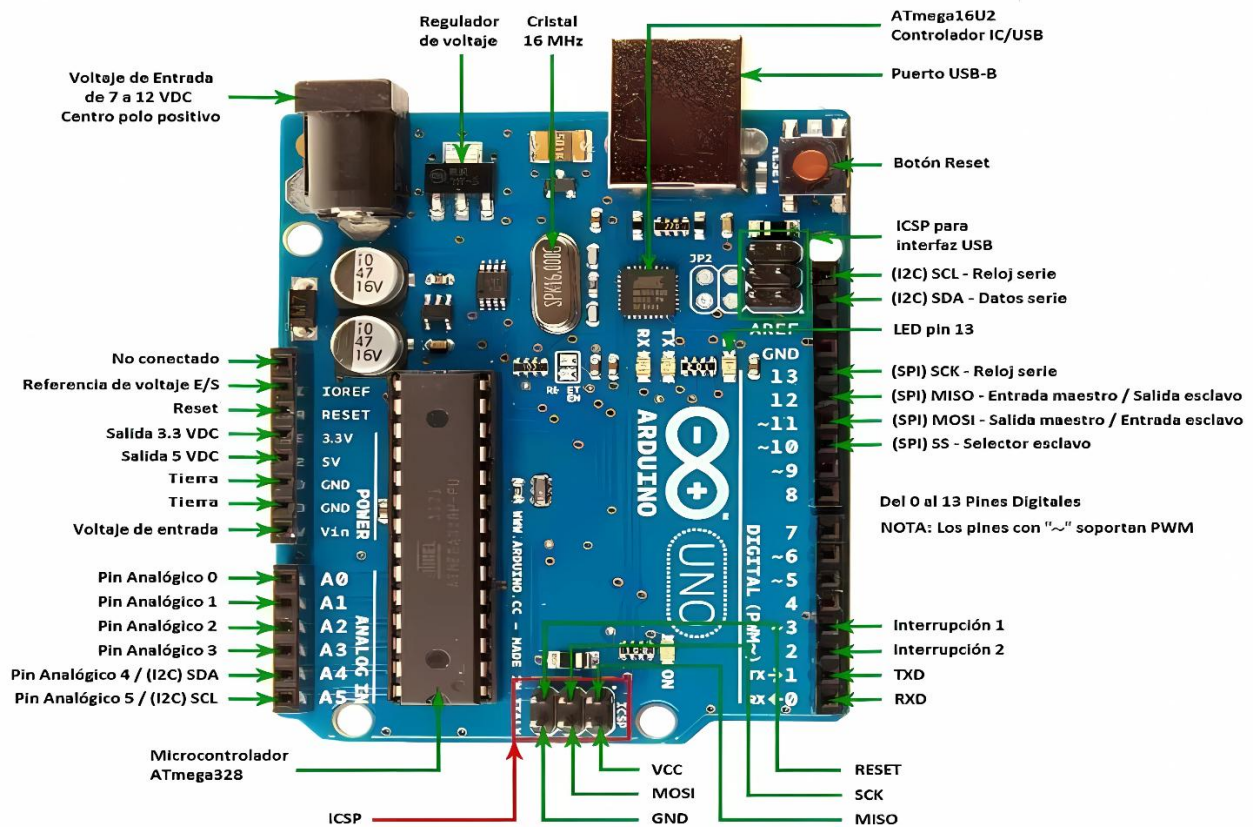


Figura 7. Diagrama de la placa Arduino Uno. (Fuente: Arduino.)

### 3.2.2 Plataforma de código abierto Raspberry Pi

La Raspberry Pi es una computadora pequeña y de bajo costo, este dispositivo puede ser conectado a un monitor en conjunto de un teclado y mouse [41]. El dispositivo corre un sistema operativo Linux y suele incorporar lenguajes de programación como Scratch y Python [42]. Además de ser capaz de realizar la mayoría de las tareas típicas de un ordenador de escritorio (ej., navegar en internet, reproducción de audios y videos de alta resolución, etc.) tiene la capacidad de interactuar con el mundo exterior, para aplicaciones dedicadas al entretenimiento como reproductores de música y video hasta proyectos complejos como estaciones meteorológicas [41].

En este proyecto utilizamos el dispositivo Raspberry Pi 5 de 8 GB de memoria RAM (ver Figura 8), este modelo cuenta con un procesador BCM2712 quad-core Broadcom Arm Cortex A76 con 2.4GHz de frecuencia, volviéndolo tres veces más rápido que el dispositivo de la generación anterior [40]. Además, cuenta con entradas USB 3.0 para mayor ancho de banda total, para conseguir velocidades de transferencia más altas, así como conexión M.2 SSD, permitiendo un arranque y transferencia de datos más rápidos [43].

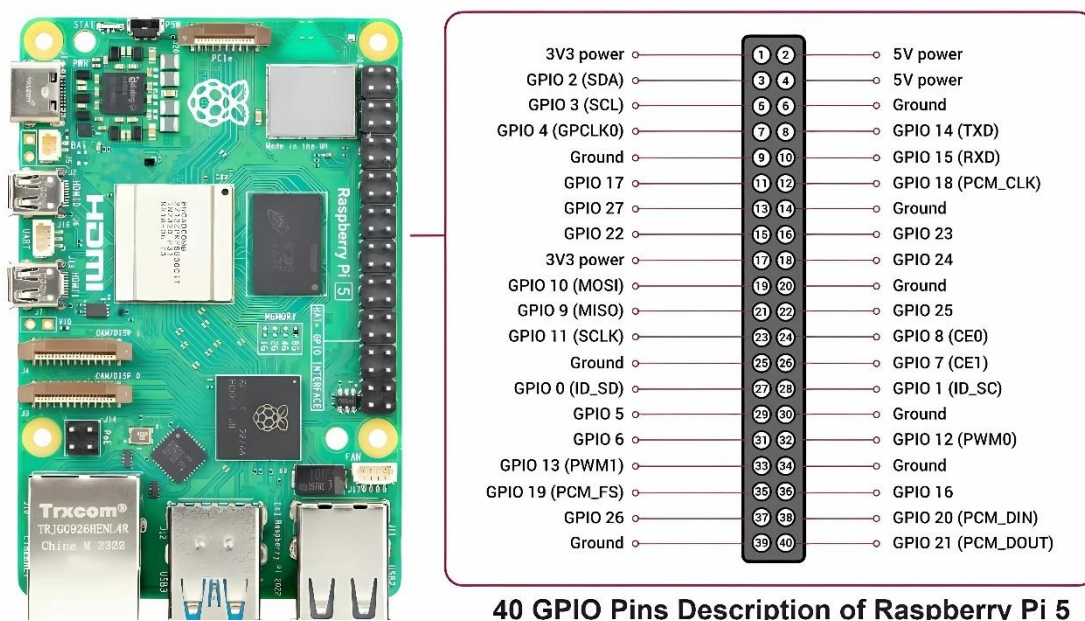


Figura 8. Diagrama de la placa Raspberry Pi 5. (Fuente: hackatronic.com/)

### 3.2.3 Control de ventiladores de bajo ruido

#### 3.2.3.1 Modulo *motor shield* Arduino L293d

El circuito integrado L293D funciona como un puente H para el control bidireccional de cargas inductivas como motores, es decir, permite seleccionar la dirección de la corriente eléctrica en la salida del módulo que se conecta a la carga [44].

El circuito cuenta con 4 canales de salida y se habilitan en pares, es decir, los canales 1 y 2 se habilitan juntos, y los canales 3 y 4 se habilitan también juntos independientemente de los canales 1 y 2 (ver Figura 9) [44].

El voltaje mínimo de operación del circuito es de 4.5 V, mientras que el voltaje máximo es de 36V [44]

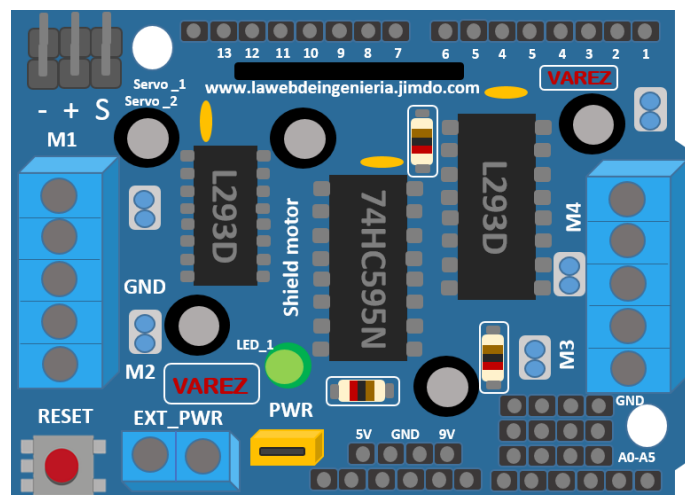
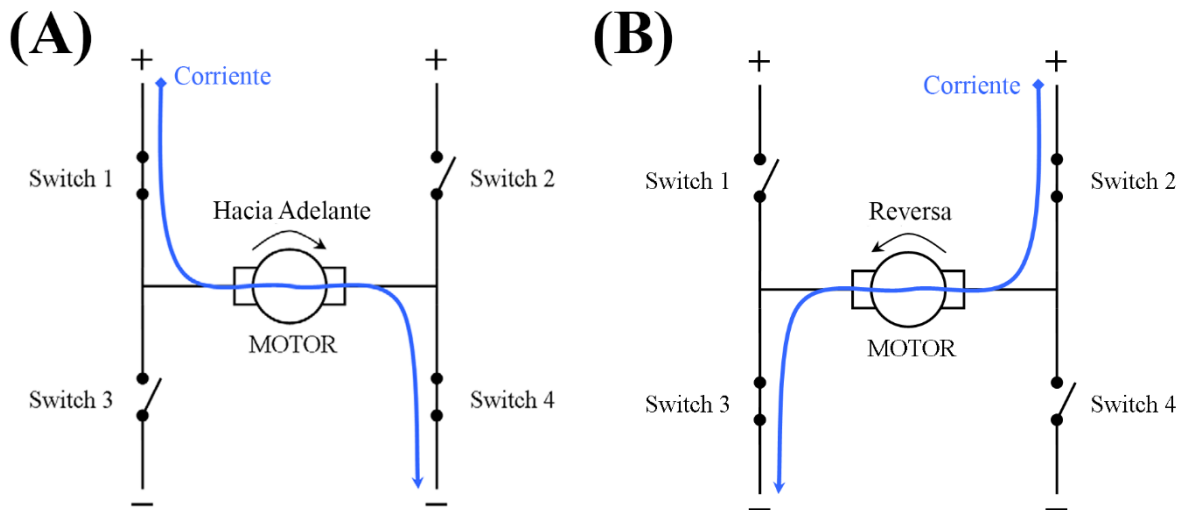


Figura 9. Motor Shield Arduino L293d.

#### 3.2.3.2 Puente H

Un puente H es un circuito electrónico de potencia que controla la velocidad y dirección de un motor. Usualmente se utilizan micro controladores con el fin de proveer las instrucciones al motor en conjunto con el puente H, amplificando la potencia. El puente H recibe una señal eléctrica pequeña y la convierte en una alta potencia de salida para alimentar al motor [45].

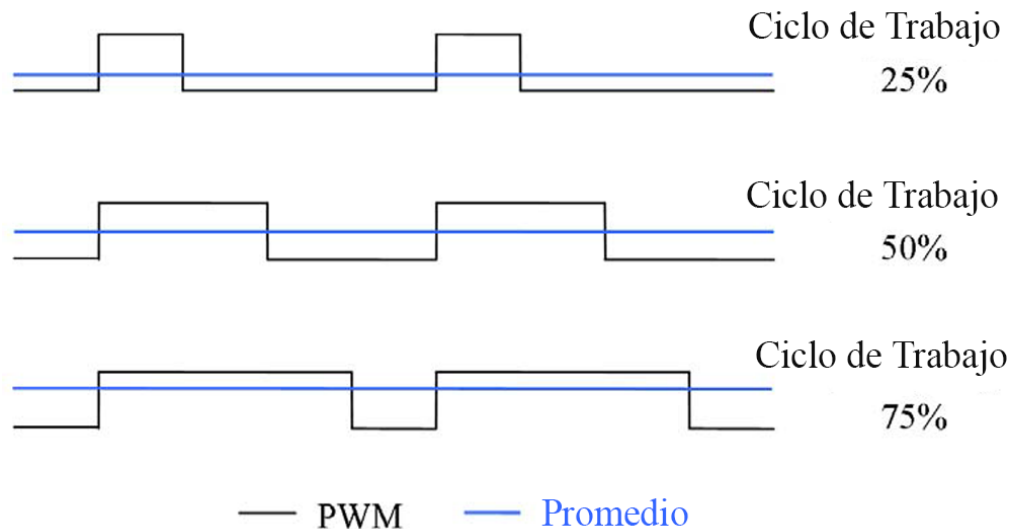
Los motores de corriente directa (DC) suelen rotar en dos direcciones según la polarización con la que se alimente. Por lo que si quieres rotar el motor en otra dirección necesitas cambiar las conexiones de la batería que alimenta al motor. El puente H tiene la capacidad de hacer que el motor rote en ambas direcciones con una señal lógica de bajo nivel, cambiando las polaridades como se puede observar en la Figura 10 [45].



**Figura 10.** Diagrama de la topología del Puente H. A) puente H conectado para girar hacia adelante, B) puente H conectado para girar en reversa. (Fuente: Vincent Sieben)

Considerando el ejemplo del diagrama de la Figura 8 que se mostró anteriormente, al encender el switch 1 y 4 el motor girará a su máxima velocidad, mientras si se cierra el switch 1 el motor se va a detener. Por lo que, según el ejemplo anteriormente mencionado, para poder correr el motor a la mitad de su velocidad máxima se necesita encender el switch 1 por la mitad del tiempo y apagarlo por el resto del tiempo, para lograr esto se debe tomar en cuenta dos factores, la frecuencia y el ciclo de trabajo. Utilizando el ejemplo del switch, la frecuencia representa la velocidad en que se enciende y apaga el switch. Si la frecuencia es muy baja, el motor al encenderse va girar a su máxima velocidad, mientras que al apagarse el motor se va a detener. Si la frecuencia es muy alta, el switch puede fallar mecánicamente. En realidad, no existen de forma física estos switches, en su lugar esta una placa electrónica llamada puente H que enciende y apaga el motor. Finalmente, el ciclo de trabajo está relacionado al tiempo que el switch 1 (del ejemplo anterior) permanece encendido como porcentaje del tiempo total de activación. En general, representa el promedio de cuanta potencia se va a suministrar al motor. En la figura 11 se muestran ejemplos de ciclos de

trabajo que harían que el motor funcione a  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  y  $\frac{3}{4}$  de la velocidad máxima respectivamente [45].



**Figura 11.** Diagrama de la modulación del ancho de pulso usado para el control del motor. (Fuente: Vincent Sieben)

### 3.2.4 Modulo GY-39

GY-39 es un sensor de presión de aire, temperatura, humedad, e intensidad luminosa de bajo costo que funciona bajo una alimentación de 3 a 5 voltios. El sensor puede comunicarse con una computadora por medio de uno de dos protocolos disponibles: IIC y UART a una tasa de transferencia de 9600 o 115200 baudios por segundo (ver Figura 12) [46].

El sensor GY-39 presenta dos modos de operación: modo continuo y modo por demanda. Además, cuenta con una aplicación para dispositivos móviles que permite visualizar información medida por el sensor y se puede acceder al mismo por medio de una red local mediante wifi [46].

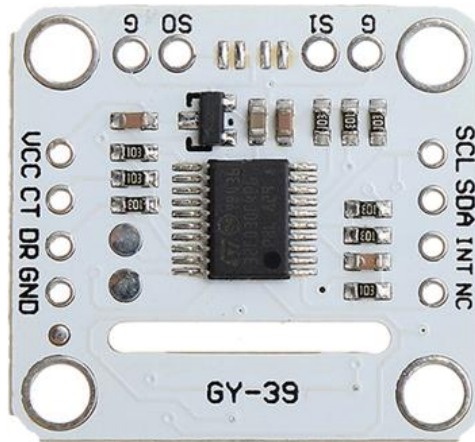


Figura 12. Sensor GY-39.

### 3.3 Protocolos de comunicación.

#### 3.3.1 Interface I<sub>2</sub>C

Los bus I<sub>2</sub>C son interfaces estándar bidireccionales que utilizan un controlador, el cual es conocido como maestro, para comunicarse con dispositivos esclavos. El dispositivo esclavo no podrá transmitir datos a menos que sea autorizado por el dispositivo maestro. Además, cada dispositivo que se encuentre en la interface del bus I<sub>2</sub>C posee una dirección específica con el objetivo de diferenciar entre los dispositivos que se encuentran conectados en el mismo bus I<sub>2</sub>C. Los dispositivos esclavos suelen requerir una configuración antes de iniciar la comunicación para establecer el comportamiento que va llevar a cabo el dispositivo, este proceso se lleva a cabo cuando el dispositivo maestro accede a los mapas de los registros internos del dispositivo esclavo. Un dispositivo puede tener uno o múltiples registros donde se guardan, escriben o leen los datos [42].

#### 3.3.2 Protocolo UART

El protocolo UART (*Universal Asynchronous Receiver Transmitter*) es un protocolo de comunicación que consiste en enviar información desde un transmisor (TX) hacia un

receptor (RX). Dos dispositivos se comunican a través de sus terminales RX y TX conectados con las terminales TX y RX respectivos del otro dispositivo (ver Figura 13) [47].

La velocidad de transferencia es configurable y se envían bits de uno por uno comenzando por el bit menos significativo. Dependiendo de los dispositivos, los niveles de voltaje de las señales pueden ser, entre otros, TTL, RS-232, o RS-485 [47].

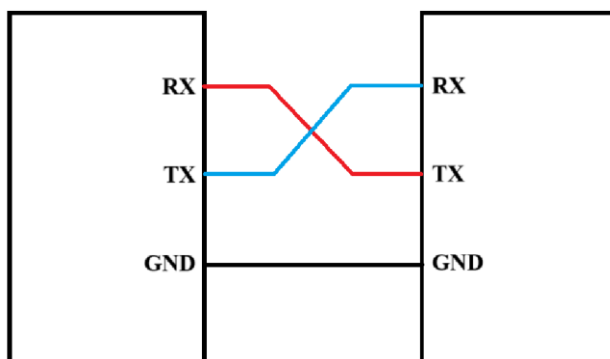


Figura 13. Diagrama de conexión entre dispositivos para comunicación UART.

### 3.4 Transmisión de datos y conectividad

#### 3.4.1 Conectividad Bluetooth

La tecnología inalámbrica de corto alcance, Bluetooth, permite la conectividad entre dos dispositivos sin necesidad de una infraestructura de red (por ejemplo, un enrutador inalámbrico para la conectividad Wifi), como se puede observar en la Figura 14. El rango aproximado de conectividad efectiva del dispositivo es de 10 y 100 metros entre ambos dispositivos (emisor y receptor). Las limitaciones de la conectividad inalámbrica por Bluetooth dependen de su ubicación y las condiciones circundantes al dispositivo. La conectividad inalámbrica Bluetooth funciona en el espectro de 2.4 GHz, por lo que se pueden presentar interferencias con otros dispositivos que funcionan en el mismo espectro como son las PCs, tabletas, teléfonos y redes Wifi más antiguas. La tecnología Bluetooth se utiliza principalmente para paquetes de datos pequeños y comunicaciones de baja latencia basadas en impulsos, por lo que, considerando lo anteriormente mencionado, no es una tecnología

utilizada para transferencias de archivos grandes debido a su tasa limitada de datos de 2Mbps [48].

La comunicación inalámbrica Bluetooth se comunica enviando mediante el puerto serie Rx y Tx del microcontrolador al Rx y Tx del módulo Bluetooth, enviando de forma inalámbrica para recibirlos por medio del dispositivo receptor Bluetooth del dispositivo receptor. En este proyecto utilizamos el módulo HC-06 Bluetooth esclavo, el cual tiene como propósito principal establecer conexiones seriales entre dispositivos [48].



Figura 14. Diagrama de comunicación entre el módulo HC-06 y un ordenador (PC).

### 3.4.2 Conectividad Wifi

La tecnología inalámbrica Wifi (de su contracción del término en inglés Wireless Fidelity) es una tecnología de redes inalámbricas que permite a los dispositivos electrónicos una conectividad entre sí de forma fluida a una red utilizando frecuencias de radio. Para conectar diversos dispositivos a internet, como son los smartphones, ordenadores, tables, entre otros dispositivos electrónicos, se utilizan las redes inalámbricas de área local llamadas WLAN por su acrónimo en inglés *Wireless Local Area Network*. Además, las redes WLAN tienen la capacidad de comunicar los dispositivos conectados a ella entre sí, de la misma forma que se conectan los dispositivos utilizando cables físicos al utilizar puertos Ethernet [49]. Los dispositivos utilizados para configurar la comunicación se les denominan routers, estos dispositivos funcionan como centros de transmisión los cuales configuran la comunicación inalámbrica de los dispositivos e internet. Las redes inalámbricas Wifi poseen un mecanismo de comunicación bidireccional, esto quiere decir que tienen una comunicación

en dos direcciones entre el dispositivo electrónico que se conecta a la red y el router, la forma en que se comunican consiste en la emisión de un mensaje desde el dispositivo electrónico (conocido como solicitud de sondeo), la cual busca las redes disponibles que se encuentren cerca, mientras que el router funciona como un punto de acceso, el cual recibe la solicitud y posteriormente responde con su propio mensaje (conocido como baliza) que contiene el nombre de la red conocido por sus siglas en inglés *Service Set Identifier* (SSID), el tipo de cifrado que utiliza (en caso de poseer uno, debido a que las redes libres no poseen cifrados) y la fuerza de la señal de sus siglas en inglés *Received Signal Strength Indicator* (RSSI). Posteriormente, tras recibir la baliza del punto de acceso, el dispositivo electrónico se conecta a la red después de enviar una solicitud de autenticación, finalmente, el punto de acceso verifica las credenciales del dispositivo electrónico (ej., la clave de la red Wifi) y se le asigna una dirección IP [49].

Usualmente los rangos de frecuencias para la comunicación Wifi, se agrupan en rangos de 2.4 GHz, 5 GHz y 6 GHz. Además, en general las velocidades altas se comunican en mayores frecuencias. Sin embargo, un problema con los routers que se comunican en frecuencias mayores es que sus señales viajan a menores distancias [49].

Los protocolos de conexión utilizados en las redes Wifi son estándares desarrollados por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), estos protocolos tienen como finalidad determinar las especificaciones de WLAN. Las características que las diferencia entre si son sus rangos de frecuencia de operación, la tasa máxima de datos y las técnicas de modulación [49].

#### **3.4.2.1 Tipos de redes inalámbricas Wifi**

Las redes inalámbricas Wifi se dividen en cuatro tipos: WAN, LAN, MAN y PAN. Cada tipo de red inalámbrica Wifi se caracteriza por tener sus propios rangos y requisitos de conectividad [49].

La red inalámbrica de área amplia (WAN), de sus siglas en inglés: “Wide Area Network”, es una red inalámbrica que posee un largo alcance y se utilizan para cubrir áreas

muy grandes, como pueden ser: regiones, estados o países. Este tipo de redes inalámbricas se suelen utilizar en redes celulares y comunicaciones satelitales, además, suelen contener múltiples redes LAN y MAN para brindar acceso directo a internet [49].

La red inalámbrica de área local (LAN), también conocida como WLAN (de sus siglas en inglés: “Wireless Local Area Network”), son redes que presentan altas velocidades, pero con un rango limitado [49].

La red inalámbrica de área metropolitana (MAN), de sus siglas en inglés: “Metropolitan Area Network”, son usualmente utilizadas con el fin de asegurar una cobertura amplia (ej., los campus universitarios, centros comerciales, etc.). Sin embargo, las redes MAN tienen una menor velocidad en comparación a otras redes como las WLAN [49].

La red inalámbrica de área personal (PAN), de sus siglas en inglés: “Personal Area Network”, son redes que tienen como finalidad conectarse con una cantidad mínima de dispositivos electrónicos y con un área de cobertura pequeña (de una habitación aproximadamente). Este tipo de red inalámbrica es de gran utilidad en aplicaciones que necesiten un bajo consumo de energía y que no requiera de un largo alcance [49].

### **3.5 Estándares de calibración**

Estos estándares en general se centran en la calibración de instrumentos de medición de partículas. Establecen los requisitos que los dispositivos contadores de partículas en el aire deben seguir. Lo anteriormente mencionado se realiza con el fin de garantizar que los contadores de partículas sean precisos y confiables.

#### **3.5.1 Estándar ISO-21501**

El estándar ISO-21501 se enfoca principalmente en la calibración y verificación de métodos utilizados con el fin de asegurar el tamaño del contador de partículas y contar partículas con exactitud, utilizando un instrumento de referencia que sea trazable [50].

### ***3.5.1.1 Procedimientos de prueba y calibración***

Para el procedimiento de prueba y calibración se requieren cumplir determinados requisitos relacionados a las partículas utilizadas (trazabilidad), el instrumento de referencia utilizada, y el reporte de la prueba y resultados de la calibración [50]. Los siguientes puntos presentan los requisitos para la calibración de un dispositivo:

- A) La partícula esférica monodispersa con una media de tamaño de la partícula certificada, donde el tamaño de dicha partícula certificada es rastreable al sistema internacional de unidades (SI), con una incertidumbre estándar relativa igual o menor de 2.5%, y con un índice refractivo de aproximadamente 1.59 a una longitud de onda de 589 nm.
- B) Para la calibración, la calibración del LSAPC (del inglés: “Light Scattering Airborne Particle Counter”) de referencia debe haberse realizado en un intervalo igual o menor a un año. Este requisito debe cumplirse durante el intervalo de la calibración del equipo que se desea calibrar.
- C) Realizar un reporte de prueba y resultados sobre la calibración. El reporte debe contener por lo menos los siguientes puntos registrados:
  - a. Día en el cual se realizó la prueba/calibración.
  - b. Describir las partículas utilizadas en la prueba/calibración.
  - c. Presentar los resultados para los siguientes parámetros:
    - i. Error en los ajustes del tamaño.
    - ii. Eficiencia de conteo.
    - iii. Error de flujo del muestreo realizado.
    - iv. El tamaño de resolución, considerando el tamaño de partícula utilizado.
    - v. Los falsos recuentos.
  - d. Los valores umbrales de tensión o canales del PHA (de sus siglas en inglés: “Pulse Height Analyser”) incorporados correspondientes a los ajustes de tamaño.
  - e. Presentar una declaración del método de prueba/calibración utilizada (ej., ISO 21501-4).

- f. Información de la identificación del reporte/certificado, la ubicación de prueba/calibración, título e identificación de la prueba/calibración del proveedor incluyendo la firma y la fecha en que se realizó.
  - g. Identificar el cliente y su dispositivo sometido a prueba, además, debe incluir información de cómo se presentó u obtuvo el resultado para la eficiencia de conteo (por ejemplo, de forma análoga, pantalla o de una salida digital).
- D) El certificado de calibración también debe contener la siguiente información:
- a. Identificación y, de ser posible, presentar la trazabilidad metrológica de todos los equipos de referencia y partículas de calibración utilizadas.
  - b. Todas las condiciones medioambientales relevantes en las que se realizó la calibración (por ejemplo, temperatura, presión atmosférica, humedad relativa, etc.).
  - c. Presentar la incertidumbre especificada para cada resultado de los parámetros de la calibración con su referencia al método de cálculo (por ejemplo, Guía ISO/CEI 98-3).
  - d. Delimitar el conteo falso especificándolo con un límite de confianza del 95%.

### **3.5.2 Norma Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012**

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) son regulaciones técnicas obligatorias emitidas por autoridades especializadas. Su propósito es definir las características que deben cumplir los procesos o servicios para evitar riesgos a la seguridad o la salud de las personas. También abarcan aspectos como terminología y los procedimientos para garantizar su cumplimiento.

Esta norma establece los requisitos para realizar una calibración de algún dispositivo de monitoreo de calidad del aire. Dentro de los puntos, se hace referencia a otros estándares que validen las lecturas y material utilizado para su adecuada calibración [51].

- A) Los instrumentos de medición que se desean calibrar deberán utilizar los métodos de referencia, de acuerdo a la normatividad vigente (referente a las normas oficiales mexicanas ambientales), en caso que aplique, o a las especificaciones del fabricante del dispositivo.
- B) Se debe elaborar un programa de calibración de instrumentos y equipos de soporte, el cual deberá incluir lo siguiente:
- a. Frecuencia de calibración por instrumento.
  - b. Una verificación de la precisión de los equipos.
  - c. Ubicación y responsables de la calibración de los instrumentos de medición.
- C) Crear una bitácora y/o formato preestablecido, los cuales deben contener los datos y los cálculos realizados referente a la calibración (deben incluirse al expediente del instrumento).
- D) Para la calibración de los instrumentos de medición, se utilizarán gases de calibración (material particulado y aire) y estándares de transferencia, con trazabilidad a materiales de referencia y, en caso de aplique, patrones nacionales mantenidos en el Centro Nacional de Metrología.
- E) Se deben realizar en el laboratorio las calibraciones, pruebas de desempeño, y mantenimiento preventivo y correctivo, de los instrumentos de medición.
- F) El laboratorio deberá contar con:
- a. Sistemas de calibración que sean acordes con los parámetros que miden en un sistema de monitoreo de calidad del aire. Como pueden ser los contaminantes gaseosos, partículas (por ejemplo, material particulado) y variables meteorológicas.
  - b. Deberá contar con ventilación en las zonas en las que se desfogan los gases de calibración en exceso.
  - c. La energía y temperatura deberán encontrarse reguladas y controladas.
  - d. Se deberá contar con materiales de referencia (en caso que aplique).
  - e. Deberá contar con estándares de transferencia.

### **3.5.3 Estándares de trazabilidad NIST**

Los estándares de trazabilidad NIST, de sus siglas en inglés *National Institute of Standards and Technology*, certifican que los laboratorios o fabricantes se encuentran capacitados y equipados para calibrar los equipos, cumpliendo los estándares del NIST y, además, que los productos de ese fabricante concuerdan con los estándares de medición mantenidos por NIST. Al utilizar productos con trazabilidad NIST, cualquier medición realizada con un instrumento certificado asegura una correcta medición con incertidumbres conocidas y documentadas [52].

Los estándares trazables del tamaño de partícula proveen un certificado de trazabilidad, asegurando que se utilizaron materiales de referencia con incertidumbres conocidas. Existen distintos estándares trazables de partículas NIST (por ejemplo, NIST 1690, 1692 y 1961) los cuales validan la exactitud y trazabilidad de los métodos de calibración utilizados para transferir la dimensión del diámetro medio calibrado del producto [53].

## CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA

En este capítulo se abordará la metodología utilizada para construir la cámara de pruebas y la experimentación de este trabajo de tesis. Como se observó en el diagrama de la [Figura 1](#), el prototipo se divide en 5 módulos, los cuales son: el sistema de extracción de partículas, la red de control de la ventilación, la estación de datos meteorológicos (sensor ambiental), la red de monitoreo de material particulado y el programa de control (software con interfaz gráfica), que se encuentran encargadas de controlar los actuadores y dispositivos de monitoreo (monitoreo de PM y condiciones ambientales).

Además, se realizaron pruebas de medición de partículas de los sensores de PM, así como calibraciones de dispositivos portátiles de monitoreo de PM. Para realizar lo anteriormente mencionado, se utilizaron los manuales de los dispositivos y sensores como referencia para realizar la calibración. Ambas pruebas se realizaron con dispositivos y sensores con características similares (características técnicas), y una fuente de contaminación con un monodispersor basado en nebulización de partículas de  $0.46\mu$  y  $3\mu$  de latex poliestireno, para evitar errores de precisión y resolución que pueden presentarse entre los monitores de material particulado.

### 4.1 Open-Source Hardware

En esta sección se presentan las placas (módulos), los componentes y como se utilizaron en el prototipo, presentando sus diagramas de conexión y describiendo su funcionamiento.

#### 4.1.1 Sistema de monodispersión de material particulado

Un sistema de monodispersión tiene como característica principal el uso de partículas de un tamaño y forma específico, cuyo objetivo es dispersar las partículas.

El sistema utilizado para introducir el material particulado dentro de la cámara es un sistema de monodispersión, el cual emplea un compresor de aire junto con varios filtros para obtener aire limpio, asegurando que la PM introducida en la cámara es la misma que se introduce en el nebulizador, evitando así la contaminación. Además, al sistema de monodispersión se le incorporó una válvula de tres vías controlada por una placa Arduino

Uno con conectividad inalámbrica utilizando un módulo Bluetooth HC-06 (véase la Figura 15).



Figura 15. Diagrama del generador de partículas monodispersas.

#### 4.1.2 Red de control de la ventilación

Se utilizó un *motor shield* Arduino L293d (puente H) en conjunto de la placa Arduino Uno (montándolo en la parte superior de la placa Arduino Uno) para controlar cada ventilador dentro de la red por separado (véase la Figura 16), programando el Arduino para recibir comandos de funcionamiento desde el ordenador, lo que se logró a través de una conexión Bluetooth con el ordenador.

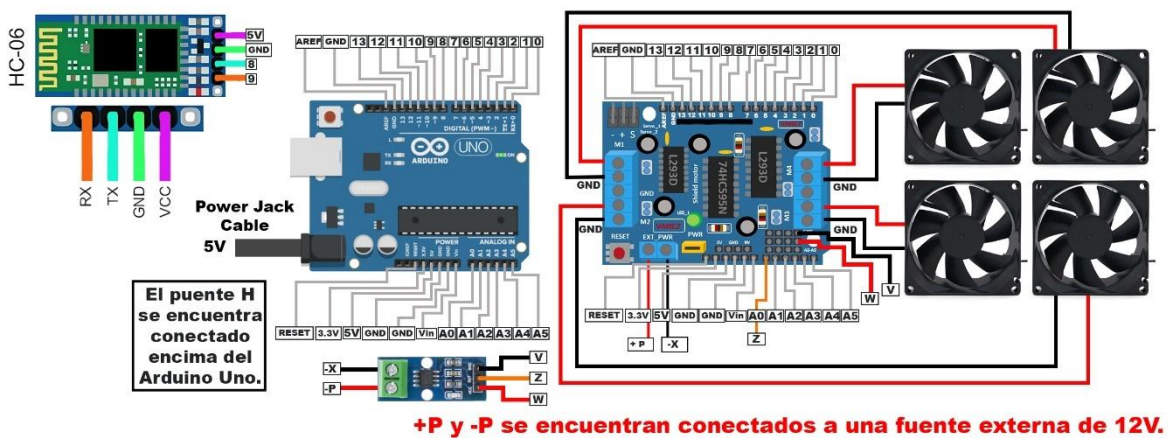


Figura 16. Diagrama de la red de control de la ventilación.

### 4.1.3 Sensores y dispositivos de monitoreo

Este apartado abarca la información sobre cómo se implementaron todos los sensores o dispositivos de monitoreo de material particulado que fueron utilizados en el prototipo. Se describen las conexiones, diagramas, control y comunicación con el software de control.

#### 4.1.3.1 Sensor de material particulado SENSIRION SPS30

Para el dispositivo SENSIRION SPS30, se utilizó el código recomendado por el fabricante para operar el dispositivo con una placa Arduino Uno (véase la figura 17). El funcionamiento del código inicializa el dispositivo enviando la información de cada lectura a una frecuencia de 9600 baudios (configurada en el código), y en caso de cualquier error dentro del dispositivo, se enviará información sobre el error en mensajes de texto indicando el tipo de error (por ejemplo, error de conexión del cableado). La comunicación se realizó mediante conexión Bluetooth utilizando un módulo HC-06.

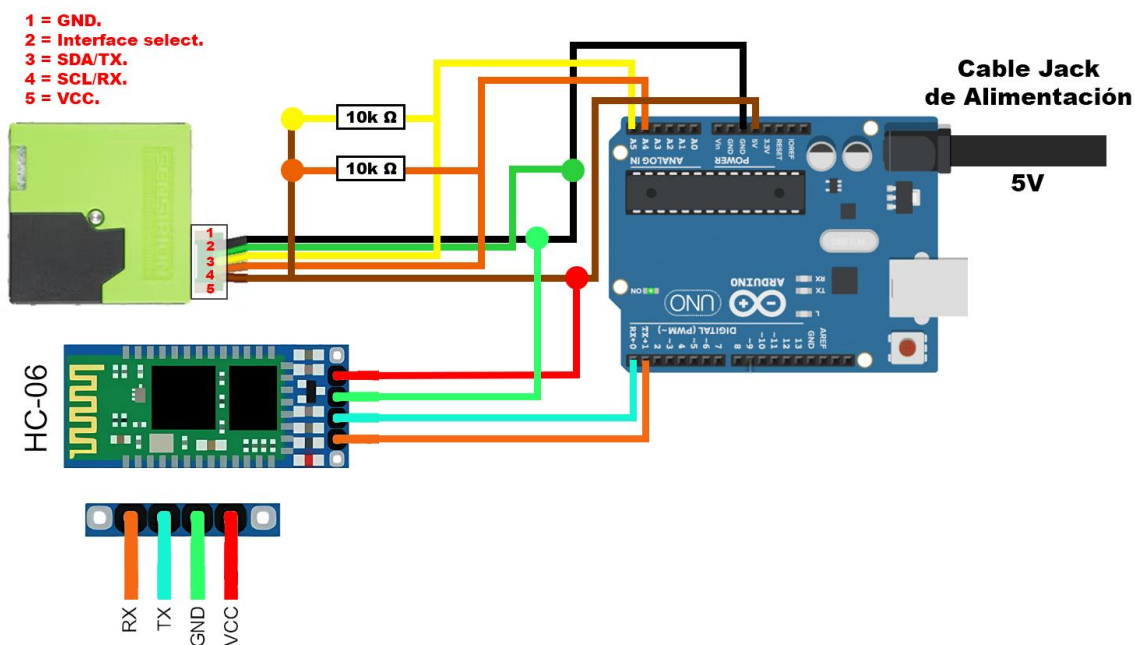


Figura 17. Diagrama del sensor SENSIRION SPS30.

#### 4.1.3.2 Sensor Prana Air PAS-OUT-01

Para el sensor PAS-OUT-01, se adaptó el código de la hoja de datos del fabricante para operar el dispositivo, se adaptaron los comandos para una placa Arduino Uno (véase la figura 18). El funcionamiento del código inicializa el dispositivo enviando la información de cada lectura a una frecuencia de 9600 baudios (configurada en el código), y en caso de cualquier error dentro del dispositivo, se enviará información sobre el error en mensajes de texto indicando el tipo de error (por ejemplo, error de conexión del cableado). La comunicación se realizó mediante conexión Bluetooth utilizando un módulo HC-06.

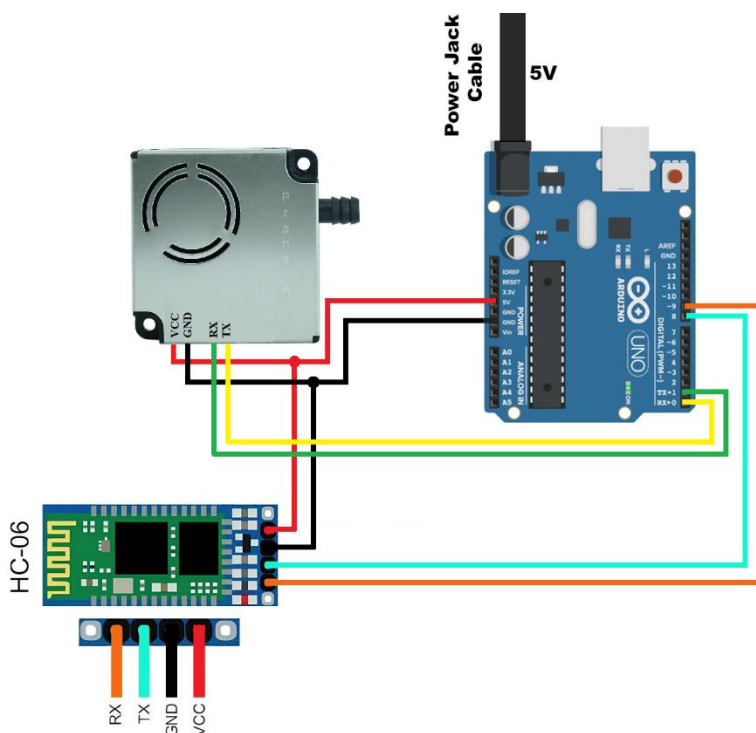
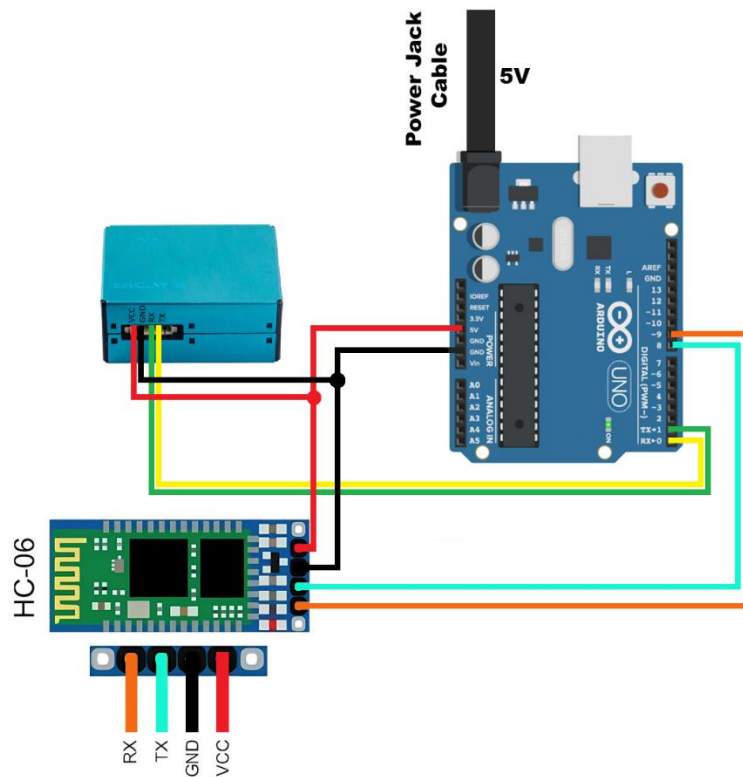


Figura 18. Diagrama de conexión del sensor Prana Air PAS-OUT-01.

#### 4.1.3.4 Sensor Plantower PMS5003

Para el sensor Plantower PMS5003, se adaptó el código de la librería de Arduino del sensor para operar el dispositivo, se adaptó el código para medir  $PM_{2.5}$  ambiental utilizando una placa Arduino Uno (véase la figura 19). El funcionamiento del código inicializa el dispositivo enviando la información de cada lectura a una frecuencia de 9600 baudios (configurada en el código), y en caso de cualquier error dentro del dispositivo, se enviará

información sobre el error en mensajes de texto indicando el tipo de error (por ejemplo, error de conexión del cableado). La comunicación se realizó mediante conexión Bluetooth utilizando un módulo HC-06.



**Figura 19.** Diagrama de conexión del sensor Plantower PMS5003.

#### **4.1.3.4 Sensor ambiental GY-39**

El sensor ambiental GY-39 es controlado por una placa Arduino Uno (véase la Figura 20), el sensor tiene capacidad para controlar la temperatura (Celsius), la humedad relativa (%), la presión atmosférica (hPa), la altitud (m) y la luminosidad (lux). Se requirió integrar al dispositivo un filtro digital *watch dog* en el código de Arduino para garantizar que el dispositivo pudiera tomar lecturas a largo plazo (lecturas durante más de 1 día), evitando interrupciones imprevistas por mal funcionamiento.

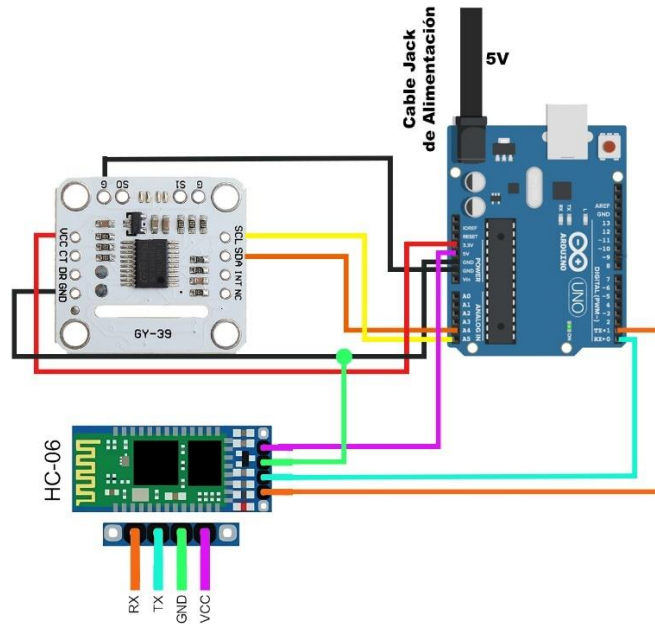


Figura 20. Diagrama de conexión del sensor ambiental GY-39.

#### 4.1.4 Sistema de extracción de partículas

El sistema de extracción de partículas está controlado por una placa Arduino Uno, esta placa está programada para controlar la potencia de extracción de una aspiradora Koblenz Centauri YCA-1300, utilizando un servomotor que controla un *encoder* del módulo de un *Dimmer* (véase la Figura 21). El control se realiza a través de comandos desde un ordenador con valores predeterminados de los niveles de intensidad: bajo, medio y máximo del equipo. Para comunicar el Arduino a un ordenador se utilizó un módulo de conexión inalámbrica Bluetooth módulo HC-06.

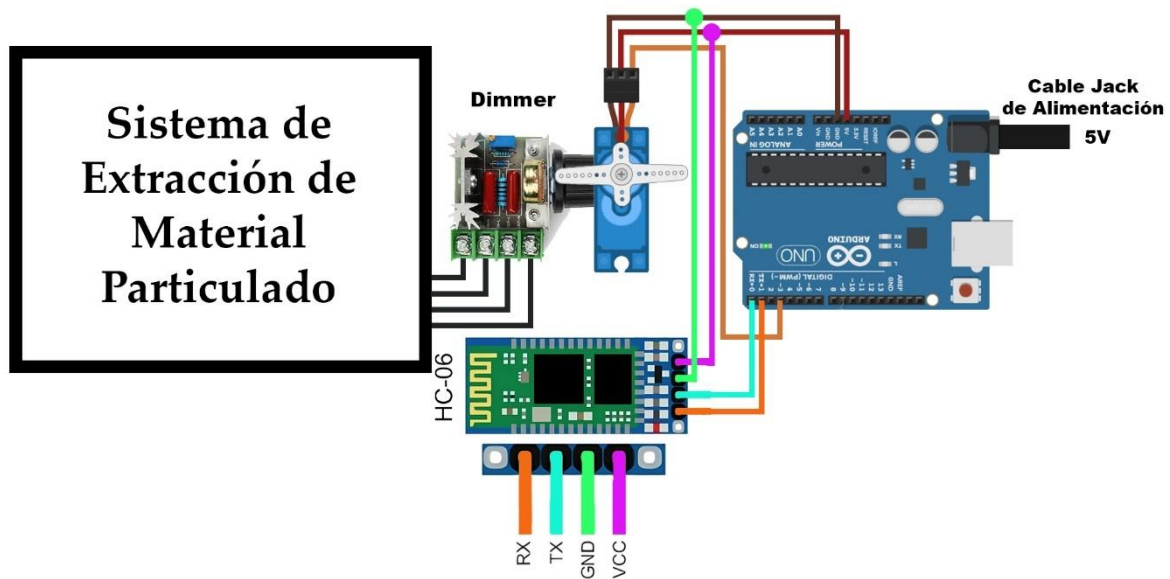


Figura 21. Diagrama del sistema de extracción de partículas.

## 4.2 Open-Source Software

Se desarrolló un software de monitorización de PM en el aire con interfaz gráfica, para manipular y monitorear los actuadores y dispositivos dentro de la cámara. El monitoreo de PM se consiguió manipulando los sensores y dispositivos de monitorización en un entorno controlado en tiempo real, utilizando actuadores para modular la entrada de PM y aire limpio dentro de la cámara, el flujo dentro de la cámara utilizando una red de ventilación y la extracción de partículas de PM.

El software se desarrolló utilizando el lenguaje de programación Python versión 3.10.2 y las librerías listadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Librerías de Python utilizadas en el programa.

Librerías	Descripción	Versión
tkinter	El paquete tkinter (interfaz Tk) es la interfaz estándar de Python para el conjunto de herramientas GUI Tcl/Tk. Tanto Tk como tkinter están disponibles en la mayoría de plataformas Unix, incluido macOS, así como en sistemas Windows [54].	8.6
serial (pySerial)	Este módulo proporciona backends para Python corriendo en Windows, OSX, Linux, BSD y IronPython. El módulo nombrado serial selecciona automáticamente el backend apropiado [55].	3.5

customtkinter	CustomTkinter es una biblioteca de interfaz de usuario Python basada en tkinter, que proporciona widgets nuevos, modernos y totalmente personalizables [56].	5.0.3
winsound	Este módulo proporciona acceso a los sonidos básicos proporcionados por las plataformas Windows [57].	N/A
csv	Este módulo implementa clases para leer y escribir datos tabulares en formato CSV [58].	N/A
time	Este módulo ofrece varias funciones relacionadas con el tiempo, como son las funciones gmtime() o localtime() los cuales muestran la hora ya sea en UTC (traducido al español, tiempo universal coordinado) o local [59].	N/A
math	Este módulo proporciona acceso a las funciones matemáticas definidas por el estándar en C (referente al lenguaje de programación en C) [60].	N/A
os	Este módulo proporciona una forma portátil de utilizar la funcionalidad dependiente del sistema operativo [61]	N/A
sys	Permite operar sobre el intérprete ya que proporciona acceso a las variables y funciones que interactúan fuertemente con el intérprete [62].	N/A
serial.tools.list_ports (pySerial)	Este módulo puede ejecutarse para obtener una lista de los dispositivos activos conectados a los puertos de la computadora [63].	3.5
Pywin32	Desde Pywin32(win32api) importamos la librería GetSystemMetrics para recuperar métricas del sistema especificadas o ajustes de configuración del sistema [64].	308

Nota: “N/A” significa “no aplicable”.

## 4.2.1 Estructura del software y programación en Python

Como se mencionó anteriormente, se utilizó la versión 3.10.2 de Python para crear el software del proyecto, implementando una GUI con CustomTkinter (librería personalizada basada en Tkinter). El programa empleó las librerías/módulos mencionados anteriormente en la Tabla 2 permitiendo monitorizar, tomar medidas y guardar la información en formato CSV según la frecuencia de muestreo deseada que el usuario haya seleccionado previamente. En esta subsección se explorará la información de la librería/módulo y el código para la placa Arduino Uno, así como el desarrollo del código en Python.

### 4.2.1.1 Librerías/Módulos de Python

Se utilizaron diferentes librerías/módulos, los cuales ya fueron presentados en la Tabla 2. Estas librerías/módulos se utilizaron en el software para controlar el muestreo y las

lecturas de los sensores ambientales y de PM, la red de ventilación y el sistema de extracción de PM a través de la computadora.

La interfaz de usuario utiliza una librería de GUI personalizada basada en la interfaz Tkinter llamada CustomTkinter. Se ha elegido esta biblioteca debido al moderno diseño de la interfaz y a la fiable estructura GUI de Tkinter. Además, para controlar y gestionar ciertos aspectos de la GUI también hemos utilizado la librería Tkinter.

El módulo pySerial se utilizó para la comunicación con las placas Arduino y los dispositivos de monitorización, para la conexión inalámbrica Bluetooth y para obtener una lista de todos los puertos conectados en el ordenador. Este módulo enlaza las variables del dispositivo en el programa con el número del COM (de sus siglas en inglés, *Component Object Model*) correspondiente, la tasa de baudios del dispositivo, así como el tamaño en bytes, la paridad, el tiempo de espera y los bits de parada. Para comunicarse con ellos (placas Arduino, sensores PM y dispositivo de monitorización PM), también se utiliza el submódulo `serial.tools.lists_ports` del módulo pySerial que recupera información sobre todos los puertos conectados (COMs).

El módulo winsound se utiliza para realizar alarmas, utilizando sonidos básicos obtenidos de la plataforma de Windows, para alertar cuando se produce un error o cuando un temporizador ha expirado.

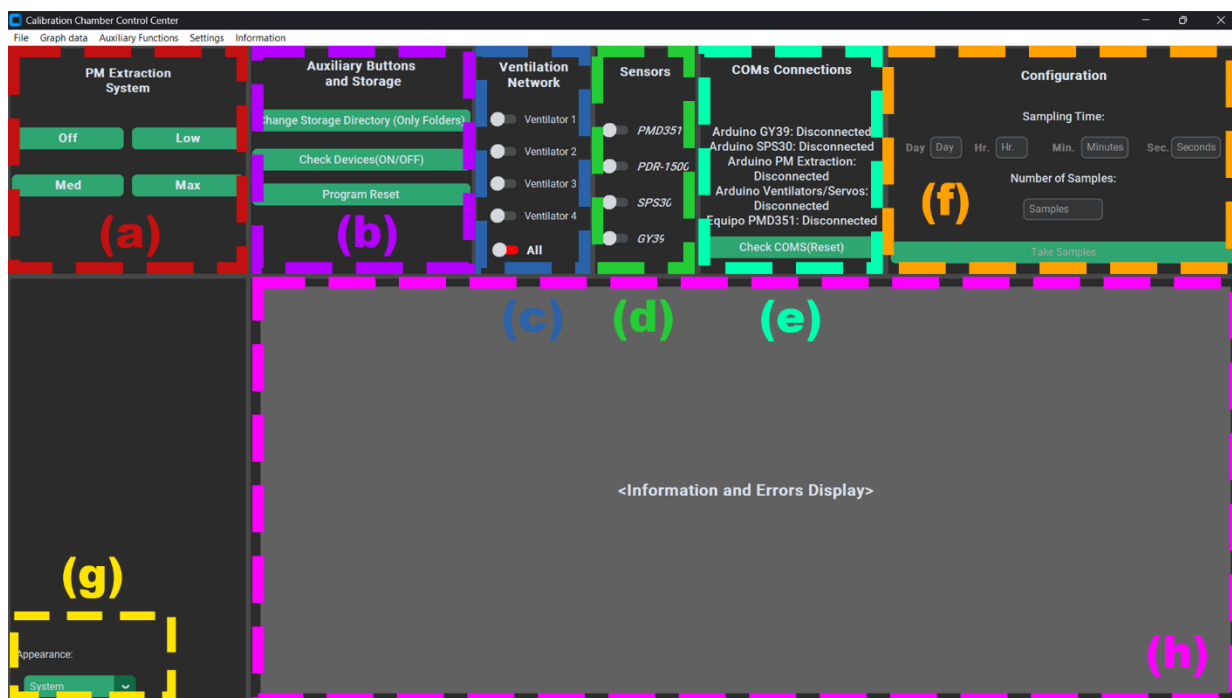
El módulo CSV se utilizó para escribir datos tabulares en formato csv, mientras que el módulo time se utilizó para crear temporizadores para ayudar con el muestreo y para cargar dispositivos.

El módulo math usando la función *math.trunc(x)* de su librería, se utilizó para eliminar los decimales del código del temporizador.

Las librerías `os` y `sys` se emplearon para reiniciar todo el software en caso de que fuera necesario por alguna falla del software o los actuadores. El comando “`os.path.abspath()`” se utiliza para recuperar la ruta del programa.

## 4.2.2 Arquitectura del software

El software está formado por diferentes librerías y módulos para el control de sensores (PMS5003 y SPS30), actuadores (red de ventilación, sistema de extracción de partículas, dispositivos de monitorización y sensores ambientales), botones auxiliares y de almacenamiento, configuración de la apariencia del entorno gráfico, conexiones COMs de sensores y dispositivos, configuración del muestreo y visualización de la información. La Figura 22 muestra el entorno gráfico.



**Figura 22.** Interfaz gráfica del software de control de la cámara de pruebas: a) módulo del sistema de extracción de PM, b) módulo de botones auxiliares y almacenamiento, c) módulo de la red de ventilación, d) módulo de sensores, e) módulo de conexiones COMs, f) módulo de configuración, f) módulo de apariencia, y g) pantalla de información.

## 4.2.3 Funcionalidades del software

En la siguiente subsección se ofrece una visión general del software y de las funciones de cada uno de los módulos que se presentan a continuación (véase la Figura 22 para visualizar los botones de control de cada módulo).

### 4.2.3.1 Sistema de extracción de material particulado

Este módulo se encarga de remover el material particulado dentro de la cámara de pruebas. El control, como se observa en la Figura 16, se divide en intensidad máxima, media,

baja y apagado (se presentan escritos en inglés de la siguiente forma: *Off, Low, Med, Max*). Este módulo se comunica de forma inalámbrica por medio de Bluetooth con un Arduino Uno, como se describe en el apartado de 4.1.4 Sistema de extracción de partículas.

#### **4.2.3.2 Sensores ambientales y dispositivos de monitorización**

Este módulo se encarga de encender y apagar los sensores y dispositivos ambientales y de monitoreo de PM. El código incorpora un retardo con un temporizador para esperar a que los dispositivos que requieren ser encendidos o apagados mediante un servomotor se inicialicen correctamente, evitando errores de conexión con el código. Mientras se inicializa el dispositivo de monitorización, el código desactiva todos los interruptores de cada sensor y dispositivo, evitando que se presenten problemas durante el encendido del dispositivo.

#### **4.2.3.3 Red de control de ventilación**

Este módulo puede controlar los cuatro ventiladores de forma individual o todos a la vez. Encima de una placa Arduino Uno se conecta un puente H motor-shield L293d que controla la potencia y dirección de cada ventilador. La velocidad de los ventiladores no se modula, por lo que la velocidad de los ventiladores permanece constante. Además, la placa motor-shield L293d también controla servomotores montados en dispositivos de monitorización que requieren que se pulse un botón para encenderse.

#### **4.2.3.4 Comprobación del COM del sensor o dispositivo**

Este módulo muestra todos los dispositivos y sensores indicando si están conectados mostrando su número COM o si se encuentran desconectados, el proceso de escaneo se realiza al iniciar el software. Este módulo también dispone de un botón *Check COMs* que vuelve a escanear los dispositivos y sensores y el número COM correspondiente en el ordenador, así como si están desconectados (mostrando la información de la etiqueta en pantalla).

#### **4.2.3.5 Configuración del muestreo**

Este módulo controla la frecuencia de muestreo (muestras/tiempo) establecida por el usuario en el software, configurando el número de muestras y sus intervalos. En este módulo la frecuencia mínima de muestreo es de 1 muestra por segundo. Además, desactiva el número de muestras y las entradas de tiempo de muestreo durante la toma de muestras.

#### 4.2.3.6 Botones auxiliares y de almacenamiento

El objetivo de este módulo es de brindar más herramientas para ayudar al usuario cuando se encuentre con problemas dentro del software o hardware, adicionalmente presenta un botón para seleccionar la carpeta donde se guardarán los documentos en formato CSV para cada dispositivo o sensor. El botón *Change Storage Directory (Folders Only)* selecciona la carpeta donde se guardarán los documentos. El botón *Check Devices (ON/OFF)* verifica de nuevo que los dispositivos de monitorización que requieren servomotores para encenderse o apagarse, se han apagado o encendido correctamente, corrigiendo el error en caso de producirse. Además, un botón etiquetado como *Program Reset*, reinicia el software del centro de control de la cámara de calibración.

#### 4.2.4 Graficar datos

Esta función se encuentra en la barra de herramientas con la etiqueta “Graph Data”. Permite graficar los archivos CVS de los muestreos realizados por el programa. Esta función permite comparar diferentes parámetros, lecturas de sensores y es capaz de guardar el gráfico en formato PDF, el gráfico y las opciones de la función se pueden ver en la Figura 23.

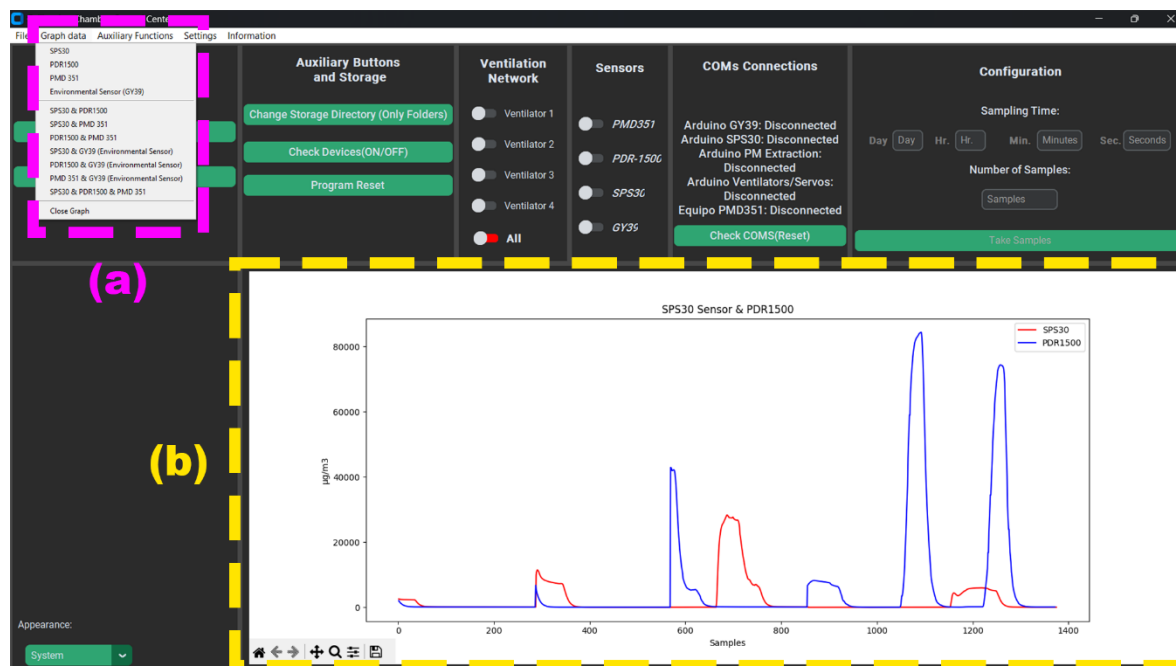
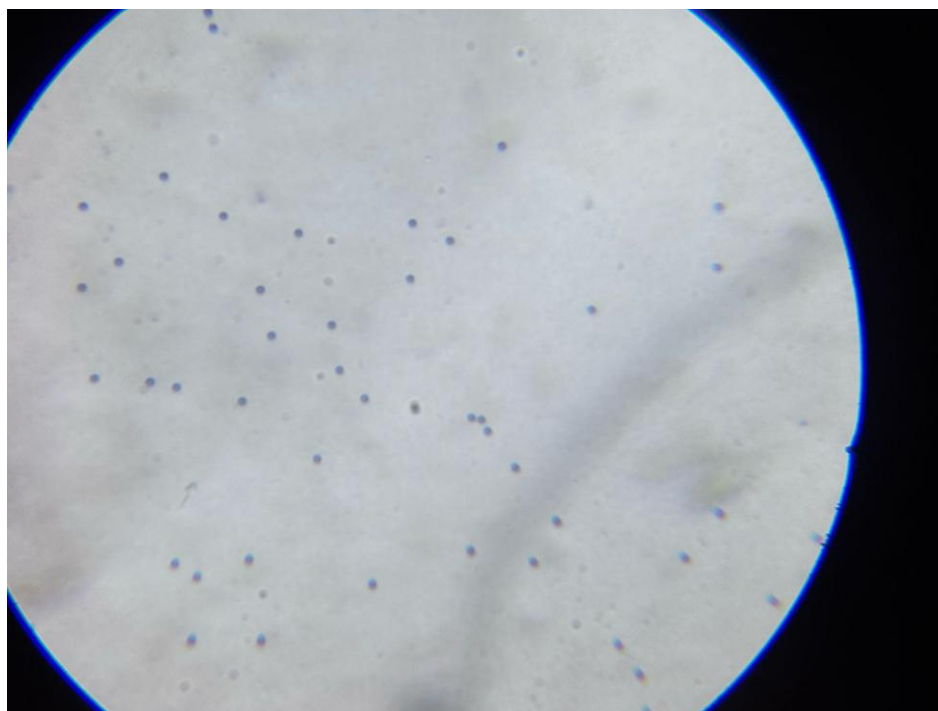


Figura 23. Función de datos gráficos: a) menú y opciones de visualización de datos gráficos, b) visualización de gráficos.

### 4.3 Calibración de los sensores SENSIRION SPS30 y PMS5003

Para la calibración de los sensores se utilizó como referencia el sensor Prana Air PAS-OUT-01. Como contaminante se utilizaron las perlitas de poliestireno de  $0.46\mu\text{m}$  de tamaño concentradas en solución acuosa. En la Figura 24, se puede observar la perla de poliestireno bajo un microscopio con lentes de  $10\times/0.25$ ,  $2\times$  y  $25\times$  (ver Figura 25). Se tomaron  $50\mu\text{l}$  del concentrado de partículas y se diluyeron en 1 litro de agua destilada. Estas partículas se introdujeron a la cámara de pruebas por medio del sistema de monodispersión utilizando un nebulizador para su suspensión en el aire.



**Figura 24.** Fotografía de las perlitas de poliestireno de  $0.46\mu\text{m}$ .



**Figura 25.** Fotografía del microscopio AmScope B490 utilizado para visualizar las perlititas de poliestireno.

Se realizaron 2 calibraciones de dos sensores SENSIRION SPS30 y dos sensores PMS5003, estos dispositivos solamente pueden calibrarse por medio del código que utilizan para realizar sus lecturas. Ambas calibraciones se dividen en 3 etapas:

- 1) Prueba con sensores sin calibrar: En esta prueba se busca obtener información para, posteriormente, realizar una regresión lineal que servirá como corrección (calibración). Además, se obtienen las correlaciones de Pearson ( $r$ ) para ambos sensores no calibrados.
- 2) Prueba con un sensor calibrado: Esta prueba consiste en observar el cambio de la calibración en contraste al otro sensor no calibrado. Se realiza una correlación de Pearson ( $r$ ) para el sensor calibrado con el fin de observar su cambio.
- 3) Prueba con ambos sensores calibrados: Esta prueba consiste en presentar ambos sensores calibrados y el sensor de referencia. Se realiza una correlación de Pearson ( $r$ ) a ambos sensores.

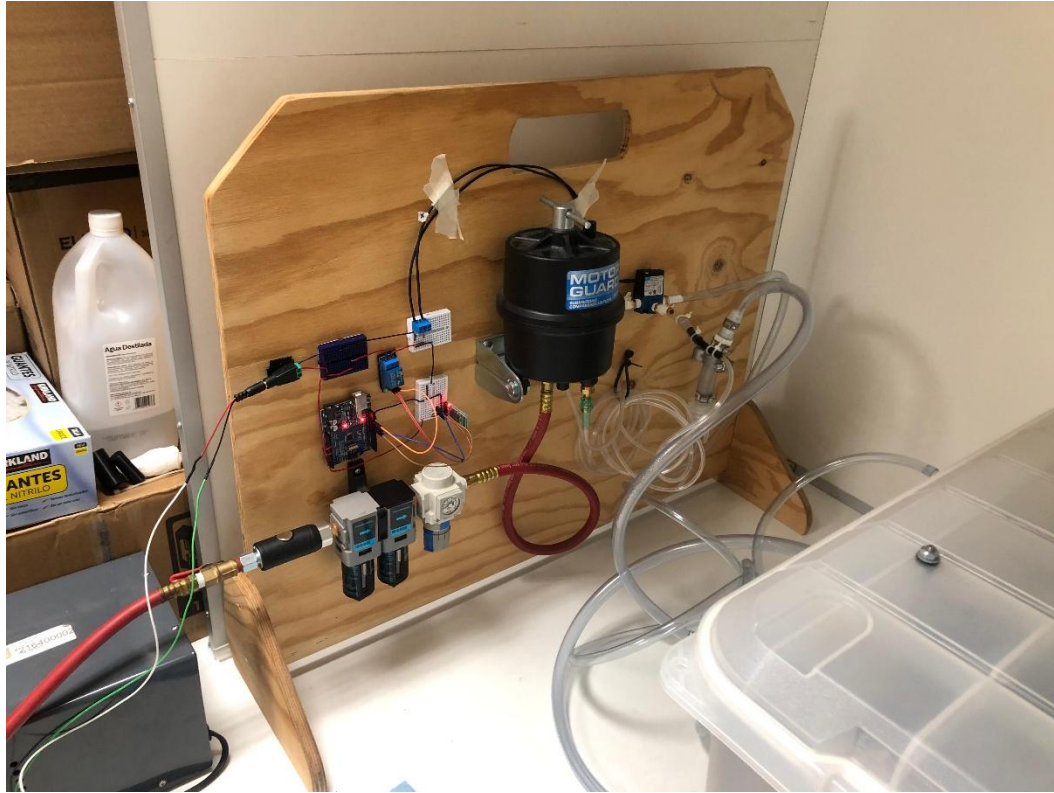
El proceso para llevar a cabo la prueba consiste en los siguientes pasos:

- a) Encender la campana de extracción (ver Figura 26) y utilizar equipo de seguridad (guantes y máscara kn95) para evitar exponerte a las PM.



**Figura 26.** Prototipo de cámara de calibración dentro de la campana de extracción.

- b) Encender todos los dispositivos y actuadores.
- c) Iniciar el software de control (interfaz gráfica), asegurándote que todos los dispositivos y actuadores se conecten al ordenador.
- d) Con precaución, verter las PM dentro del nebulizador en el monodispersor.
- e) Encender la bomba de aire para introducir las partículas a la cámara de calibración (ver Figura 27). El sistema de monodispersión se ajustó a 10PSI con un flujo de 2 LPM (litros por minuto).



**Figura 27.** Sistema de monodispersión.

- f) Encender la red de ventilación, para que circulen las partículas de PM por la cámara.
- g) Esperar 3 minutos antes de empezar a tomar muestras, esto con el fin de que la cámara se llene de PM. El muestreo se realizó durante 10 minutos, tomando 200 muestras.
- h) Una vez terminado el muestreo, activar la válvula de tres vías en el monodispersor para dejar de introducir PM a la cámara y, en su lugar, introducir aire limpio.
- i) Esperar 3 minutos y posteriormente apagar la bomba de aire. (Nota: recuerda que se debe apagar la válvula de aire una vez que se apague la bomba de aire).
- j) Encender el sistema de extracción de partículas. Suele demorarse de 2 a 3 minutos para extraer todas las partículas dentro de la cámara de calibración.

## **CAPÍTULO 5: RESULTADOS**

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas realizadas en las distintas etapas de este trabajo, así como pruebas finales de calibración con distintos sensores para material particulado, como son: los sensores SENSIRION SPS30, los sensores PMS5003 y el sensor Prana Air PAS-OUT-01, utilizando la cámara de calibración controlada por medio de un ordenador utilizando el software con ambiente gráfico vía conectividad inalámbrica Bluetooth.

### **5.1 Resultados de las etapas modulares**

#### **5.1.1 Sistema de monodispersión de material particulado**

El sistema de monodispersión se utilizó empleando una presión de 10 PSI y se midió un flujo de 2 litros por minuto (LPM), el cual se introdujo a la cámara de pruebas. Además, se incorporó una válvula de tres vías que ayudó a controlar el tipo de aire (particulado o limpio) que se introdujo a la cámara de pruebas, controlando a distancia por medio del módulo Bluetooth HC-06.

#### **5.1.2 Red de control de la ventilación**

La red de ventilación se programó para encender individualmente cada ventilador a su máxima potencia, debido a que, por las dimensiones de la caja, presentó mejor desempeño controlar el nivel de circulación dentro de la caja controlando cada ventilador que controlar la potencia de cada uno.

#### **5.1.3 Sensores y dispositivos de monitoreo**

Este apartado abarca el comportamiento de los sensores al implementarse dentro de la cámara de pruebas y sobre su capacidad de mandar información al ordenador.

##### **5.1.3.1 Sensor Laser de Polvo Prana Air PAS-OUT-01**

El sensor PAS-OUT-01 se utilizó como referencia para calibrar otros sensores de partículas debido a que es un sensor nuevo en el mercado y se adquirió hace menos de un año, por lo que se encontraba calibrado de fábrica, dando mayor fiabilidad para ser la referencia en las pruebas. El inconveniente de este sensor es el tiempo que demora en mandar información, debido a que suele mandar paquetes incompletos que, al filtrarse, retardan la transferencia de datos con el ordenador.

### **5.1.3.2 Sensor ambiental GY-39**

El sensor ambiental GY-39 presentó problemas de estabilidad al iniciar comunicación y enviar datos al ordenador, por ello se implementó un código que reinicia al dispositivo Arduino cada que el dispositivo no responde durante el tiempo de envío de datos (cada segundo).

Durante las pruebas de calibración de los sensores SENSIRION SPS30 y PMS5003, los valores promedio que presentó el sensor GY-39 fueron:

- Temperatura: 34.06°C.
- Presión Atmosférica: 989.88 hPa.
- Humedad Relativa: 36.66%.
- Luminiscencia: 22.50 lux.
- Altura: 47.66 m.

### **5.1.3.3 Sensor de calidad del aire Plantower PMS5003**

El sensor PMS5003 no presentó ninguna inconveniencia con respecto a estabilidad y transferencia de datos. Logró enviar datos por segundo sin presentar algún inconveniente o error. Para medir las PM<sub>2.5</sub> se programó la opción de leer las partículas ambientales en lugar de la lectura estándar de partículas debido a que presentaba un mejor desempeño al monitorear partículas. Este sensor laser se seleccionó para las pruebas de calibración por su similitud con el sensor PAS-OUT-01 y el sensor SPS30.

### **5.1.3.4 Sensor de partículas en suspensión SENSIRION SPS30**

El sensor SENSIRION SPS30 puede enviar datos por segundo y no presento ningún problema de estabilidad al monitorear por largos periodos de tiempo. Este sensor es un sensor laser similar a los anteriores PMS5003 y PAS-OUT-01, por lo que se seleccionó para las pruebas de calibración que posteriormente se describirá.

#### **5.1.4 Sistema de extracción de partículas**

El sistema de extracción de partículas logró limpiar la cámara de pruebas en alrededor de 2 a 3 minutos, sin embargo, los niveles de intensidad de extracción no fueron necesarios debido a que el nivel que presentó mejores resultados fue el nivel bajo.

#### **5.2.1 Interfaz gráfica con Python**

El control de nuestra cámara de calibración se implementó mediante una interfaz gráfica desarrollada con Python, esta interfaz se registró en el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR) de México con número de registro 03-2024-112810290200-01. Esta interfaz nos permite controlar los parámetros ambientales de la cámara de calibración y los dispositivos de monitoreo de PM, todos los módulos funcionaron de forma exitosa sin presentar errores de estabilidad. Solo el módulo Bluetooth HC-06 presentaba problemas de congelamiento o de conexión que se resolvían reiniciando los módulos y reiniciando la conexión. Esta interfaz se realizó en varias versiones, incorporando en esta última versión opciones para graficar los datos y generar archivos de reportes con los resultados de cada una de las secciones, así como las mediciones de los sensores y los parámetros de control de la cámara de calibración permitiendo capturar un registro completo de toda la información de las pruebas realizadas con nuestro dispositivo.

#### **5.3 Pruebas de transferencia de datos.**

Este prototipo mide y registra datos durante largos periodos de tiempo, lo que suele provocar errores en los registros y puede presentar pérdidas de datos, a esto se le conoce como “datos perdidos”. Además, otro problema que se produce durante el muestreo son los *datos* “no válidos”, que incluyen valores registrados como espacios vacíos o caracteres aleatorios. Para mitigar los datos erróneos o faltantes, el programa incluye códigos que actúan como filtro para evitar que se produzcan. En este trabajo se han realizado 50 pruebas de medición para garantizar que los archivos no contienen errores. Para determinar la eficacia de las lecturas en términos de datos no válidos, se calcularon los porcentajes de datos no válidos para cada variable medida por cada dispositivo de control o sensor (véase la tabla 3).

**Tabla 3. Mediciones del sensor y los dispositivos de monitoreo de PM.**

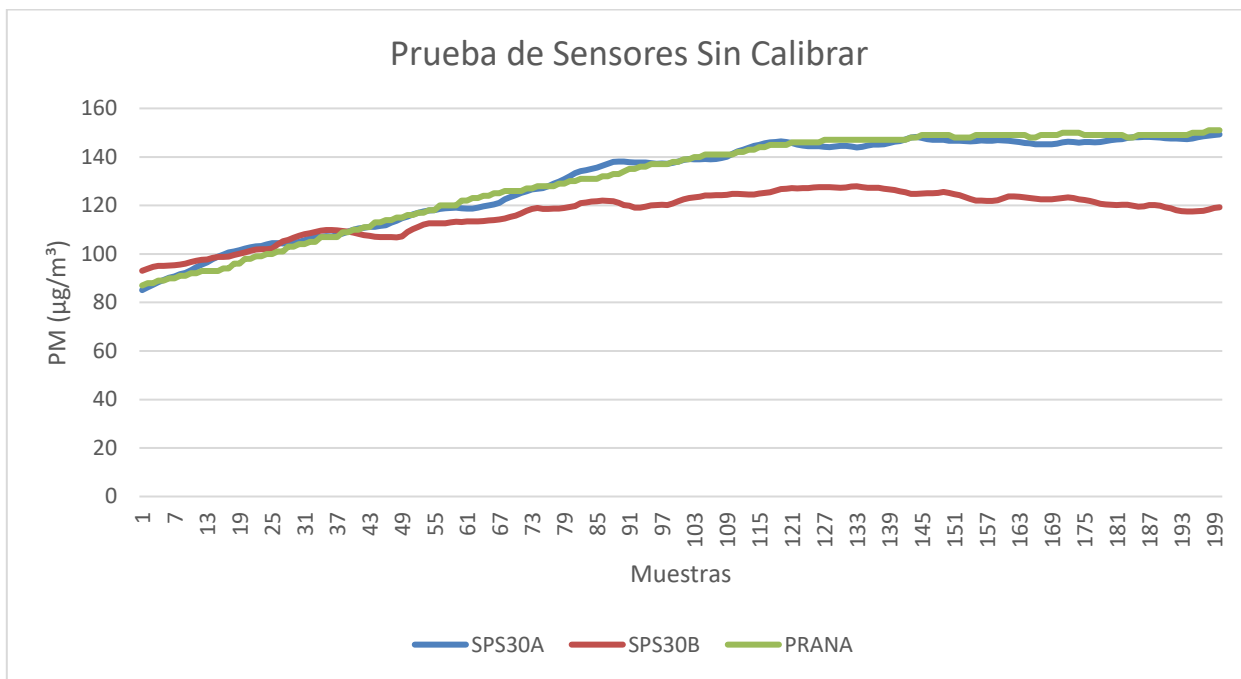
Dispositivo	VARIABLES MEDIDAS	Promedio de los datos medidos con éxito
PMS5003	PM <sub>2.5</sub> .	100%
PAS-OUT-01	PM <sub>2.5</sub> .	100%
SENSIRION SPS30	PM <sub>2.5</sub> .	100%
Sensor ambiental GY-39	Presión, temperatura, humedad relativa, luminiscencia, altura.	100%

## 5.4 Pruebas de calibración de los dispositivos de material particulado

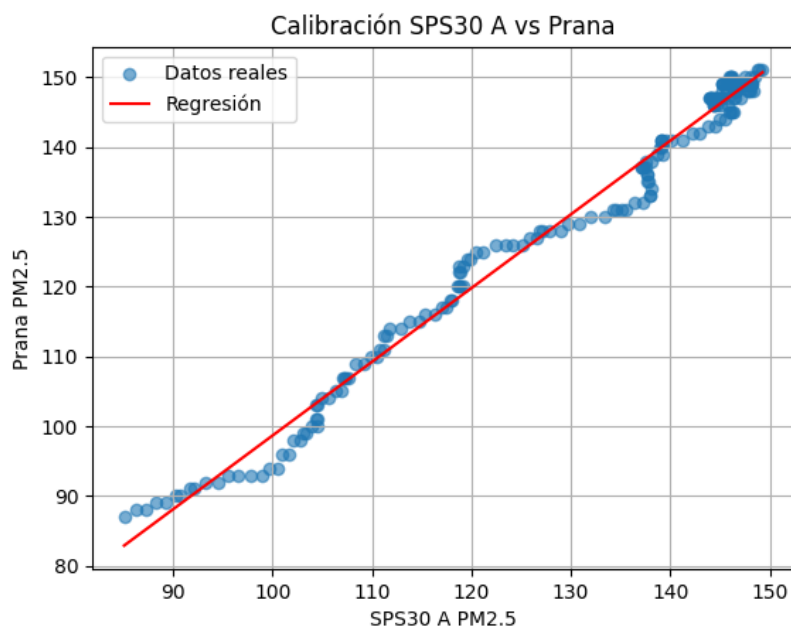
### 5.4.1 Pruebas utilizando el sensor Prana Air PAS-OUT-01 y dos sensores SENSIRION SPS30 sin calibración

Se utilizó el sensor Prana Air PAS-OUT-01 como referencia para validar la precisión del sensor SENSIRION SPS30. Anteriormente se realizaron pruebas de validación de sensores y dispositivos de monitoreo de partículas utilizando incienso y papel quemado como contaminante, sin embargo, en esta prueba se introdujeron partículas de poliestireno de 0.46µm utilizando el monodispersor durante 10 minutos. Podemos observar en la Figura 28 el comportamiento de los sensores en relación con el material particulado. Posteriormente, a partir de esta prueba, se realizaron regresiones lineales para los dos sensores SPS30 con respecto al sensor de referencia PAS-OUT-01, utilizando Python para determinar la ecuación de corrección para cada sensor SPS30 (ver Figura 29 y Figura 30). La ecuación consiste en la forma  $y = ax + b$ , donde “y” representa la corrección y “x” la lectura del sensor. La ecuación de corrección para el sensor SPS30 A fue de  $y = 1.056X + (-6.961)$ , mientras que la ecuación de corrección para el sensor SPS30 B fue de  $y = 2.017X + (-104.680)$ . Además, se realizaron pruebas de correlación de Pearson (r) por medio de Python, para ambos sensores

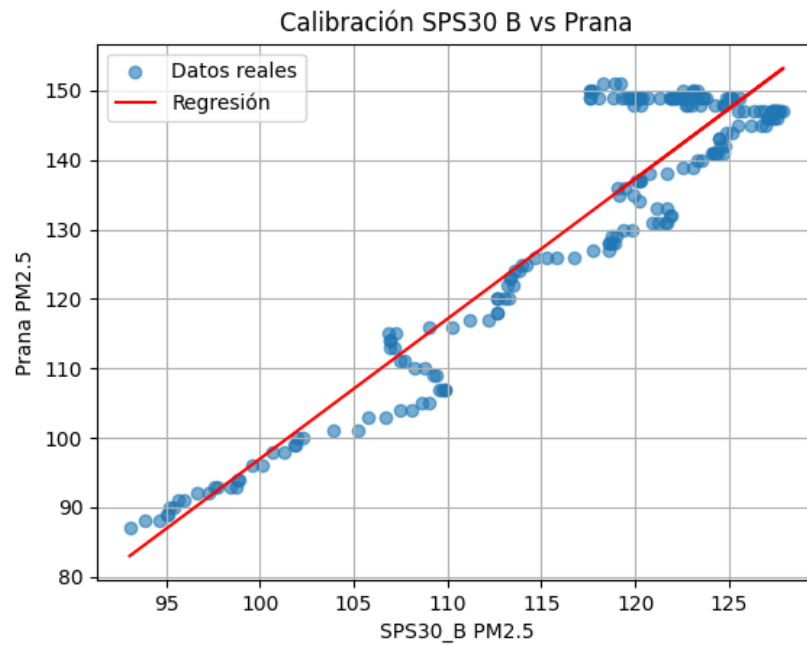
SPS30 en relación con el sensor Prana Air PAS-OUT-01. El sensor SPS30 A dio una correlación de 0.9939 (ver Figura 31), mientras que el sensor SPS30 B arrojó una correlación de 0.9422 (ver Figura 32).



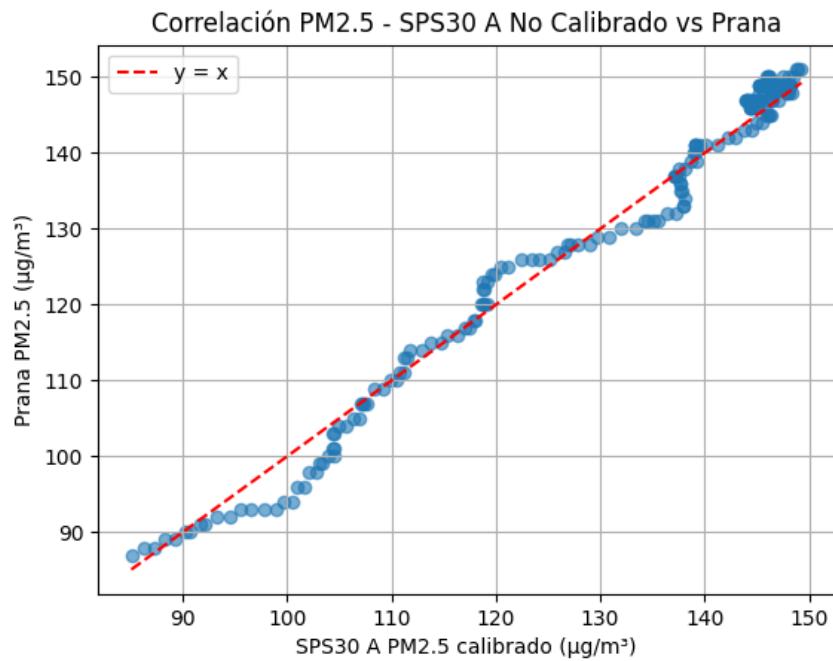
**Figura 28.** Gráfica de lectura de los sensores SPS30 sin calibrar y Prana Air PAS-OUT-01.



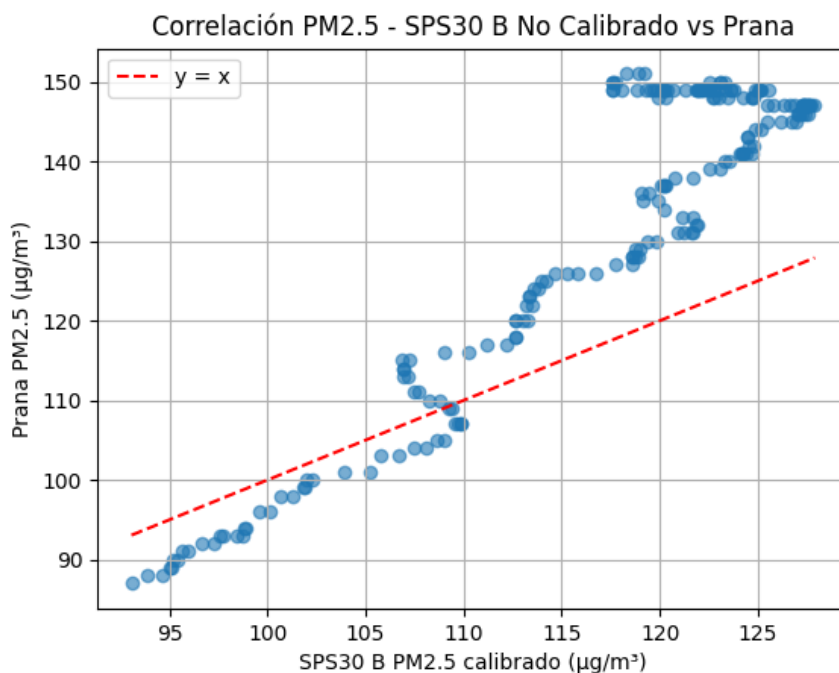
**Figura 29.** Gráfica de la regresión lineal entre el sensor SPS30 A y el sensor Prana Air PAS-OUT-01.



**Figura 30.** Gráfica de la regresión lineal entre el sensor SPS30 B y el sensor Prana Air PAS-OUT-01.



**Figura 31.** Gráfica de correlación de Pearson (r) entre el sensor SPS30 A y el sensor Prana Air PAS-OUT-01.



**Figura 32.** Gráfica de correlación de Pearson ( $r$ ) entre el sensor SPS30 B y el sensor Prana Air PAS-OUT-01.

#### 5.4.2 Pruebas utilizando el sensor Prana Air PAS-OUT-01, el sensor SPS30 A calibrado y el sensor SPS30 B sin calibración

Para esta prueba se repitió el proceso de la prueba anterior incorporando la corrección (calibración) en el sensor SPS30 A, mientras que el sensor SPS30 B continúa descalibrado, como se puede observar en la Figura 33. Para esta prueba se realizó una correlación de Pearson ( $r$ ) para el sensor SPS30 A calibrado y el sensor Prana Air PAS-OUT-01 que dio una correlación de 0.9907 (ver Figura 34).

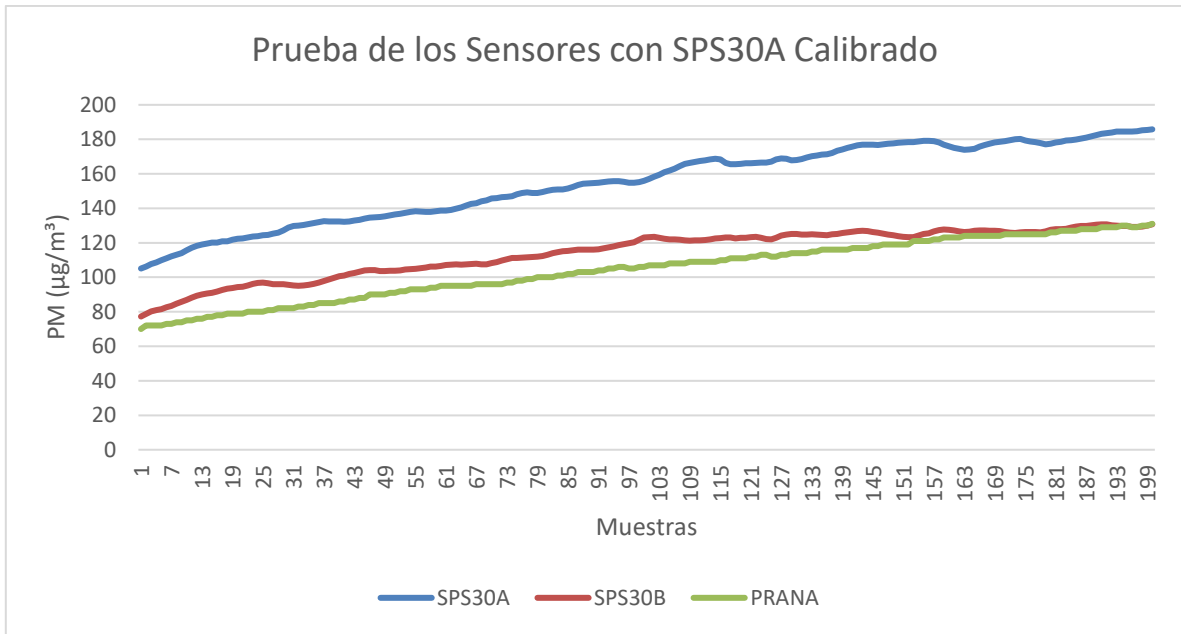


Figura 33. Gráfica de prueba de los sensores con el sensor SPS30 A calibrado.

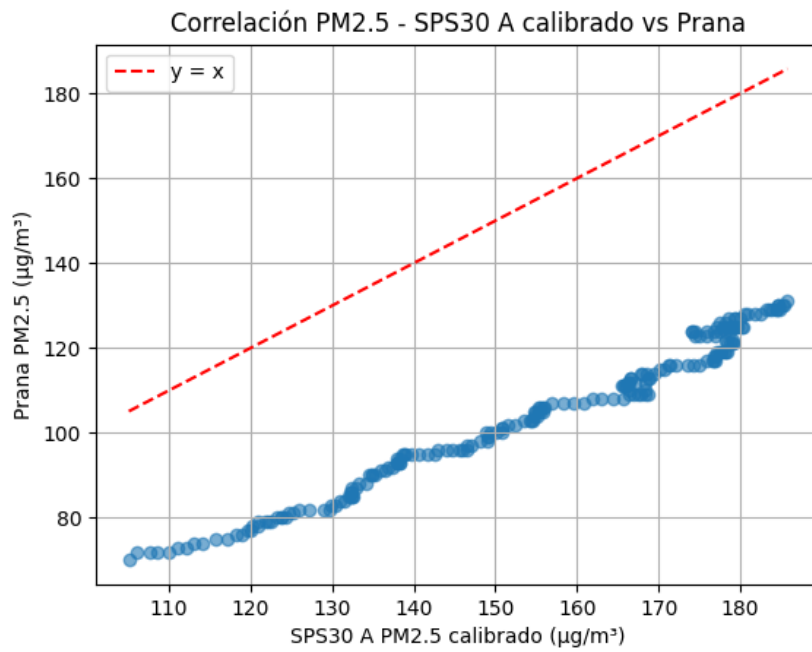


Figura 34. Gráfica de correlación de Pearson (r) entre el sensor SPS30 A calibrado y el sensor Prana Air PAS-OUT-01.

### 5.4.3 Pruebas utilizando el sensor Prana Air PAS-OUT-01 y ambos sensores SENSIRION SPS30 calibrados

En esta prueba se utilizaron ambos sensores SPS30 calibrados y se les realizó una prueba de correlación de Pearson (r) en relación al sensor Prana Air PAS-OUT-01 (ver Figura 35). El sensor SPS30 A presentó una correlación de 0.9917 (ver Figura 36), mientras que el sensor SPS30 B presentó una correlación de 0.9715 (ver Figura 37).

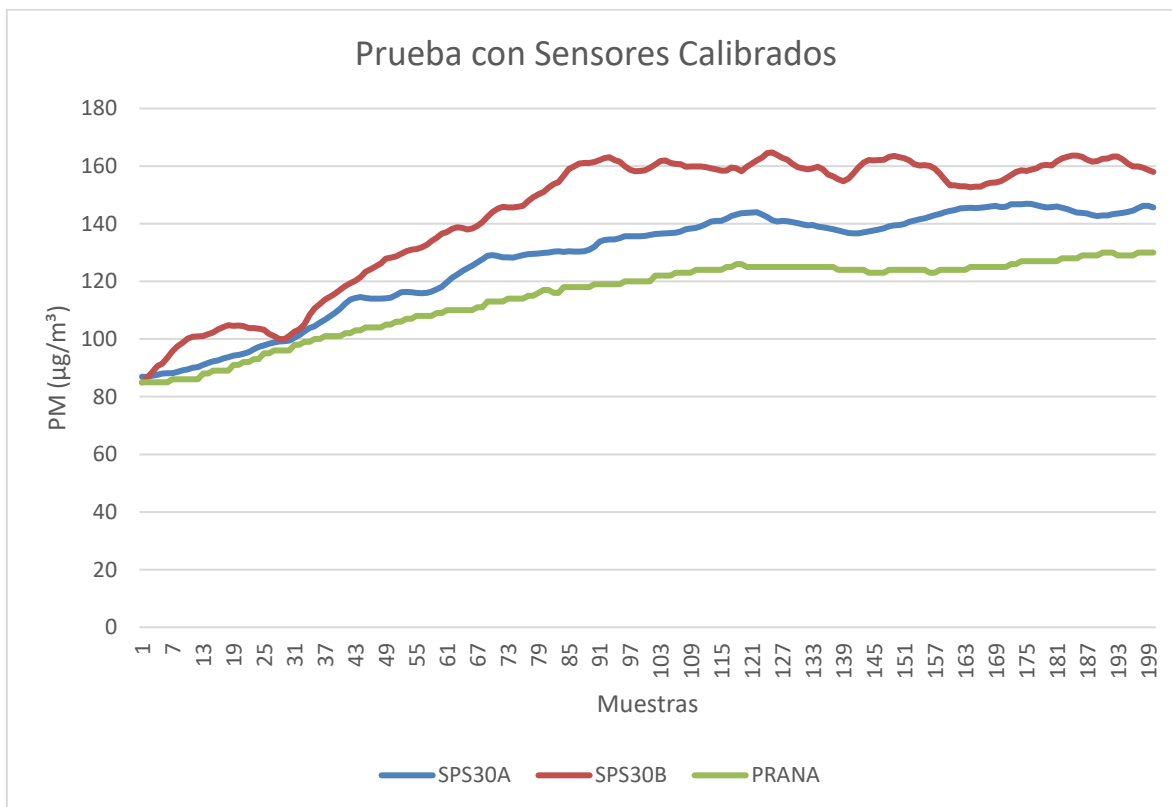


Figura 35. Gráfica de prueba con ambos sensores SPS30 calibrados.

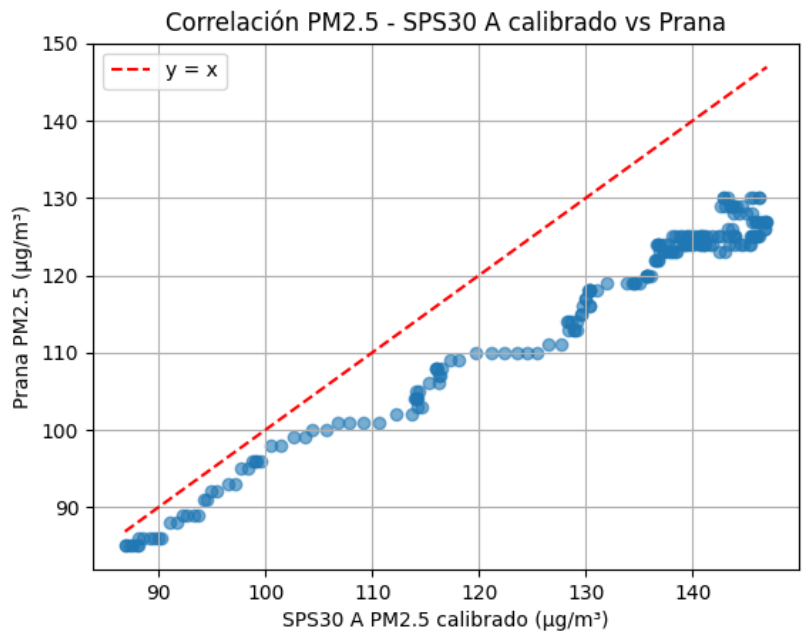


Figura 36. Gráfica de correlación de Pearson (r) del sensor SPS30 A y el sensor Prana Air PAS-OUT-01.

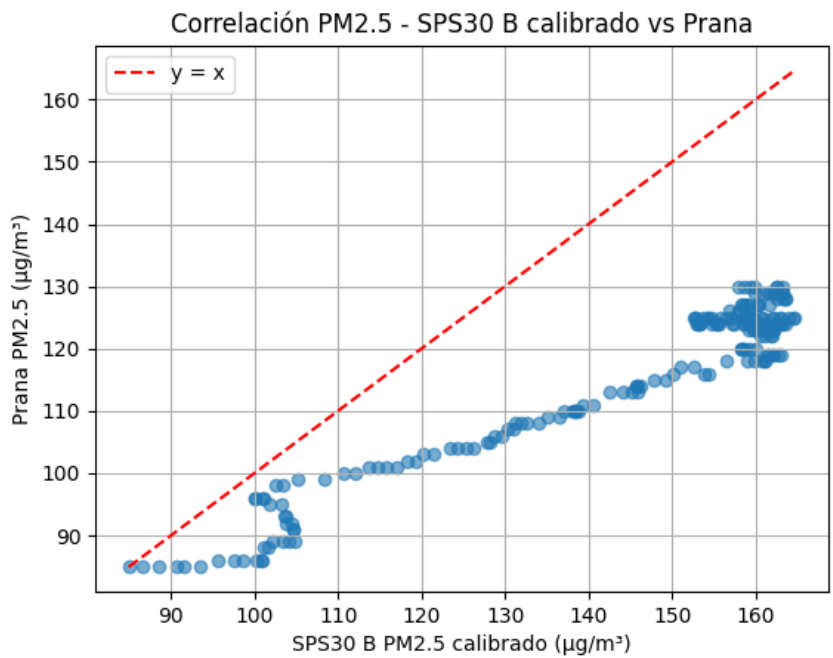


Figura 37. Gráfica de correlación de Pearson (r) del sensor SPS30 B y el sensor Prana Air PAS-OUT-01.

#### 5.4.4 Pruebas utilizando el sensor Prana Air PAS-OUT-01 y dos sensores PMS5003 sin calibrar

Al igual que las pruebas anteriores, se utilizó el sensor Prana Air PAS-OUT-01 como referencia para validar la precisión del sensor PMS5003. Se introdujeron las partículas de poliestireno de  $.47\mu\text{m}$  utilizando el monodispersor durante 10 minutos. Podemos observar en la Figura 38 el comportamiento de los sensores en relación con el material particulado. Posteriormente, a partir de esta prueba, se realizaron regresiones lineales para los dos sensores PMS5003 con respecto al sensor de referencia PAS-OUT-01, utilizando Python para determinar la ecuación de corrección para cada sensor SPS30 (ver Figura 39 y Figura 40). La ecuación consiste en la forma  $y = ax + b$ , donde “y” representa la corrección y “x” la lectura del sensor. La ecuación de corrección para el sensor PMS5003 A fue de  $y = 1.143X + 10.216$ , mientras que la ecuación de corrección para el sensor PMS5003 B fue de  $y = 1.146X + 5.510$ . Además, se realizaron pruebas de correlación de Pearson (r) por medio de Python, para ambos sensores PMS5003 en relación con el sensor Prana Air PAS-OUT-01. El sensor PMS5003 A dio una correlación de 0.9828 (ver Figura 41), mientras que el sensor PMS5003 B arrojó una correlación de 0.9863 (ver Figura 42).

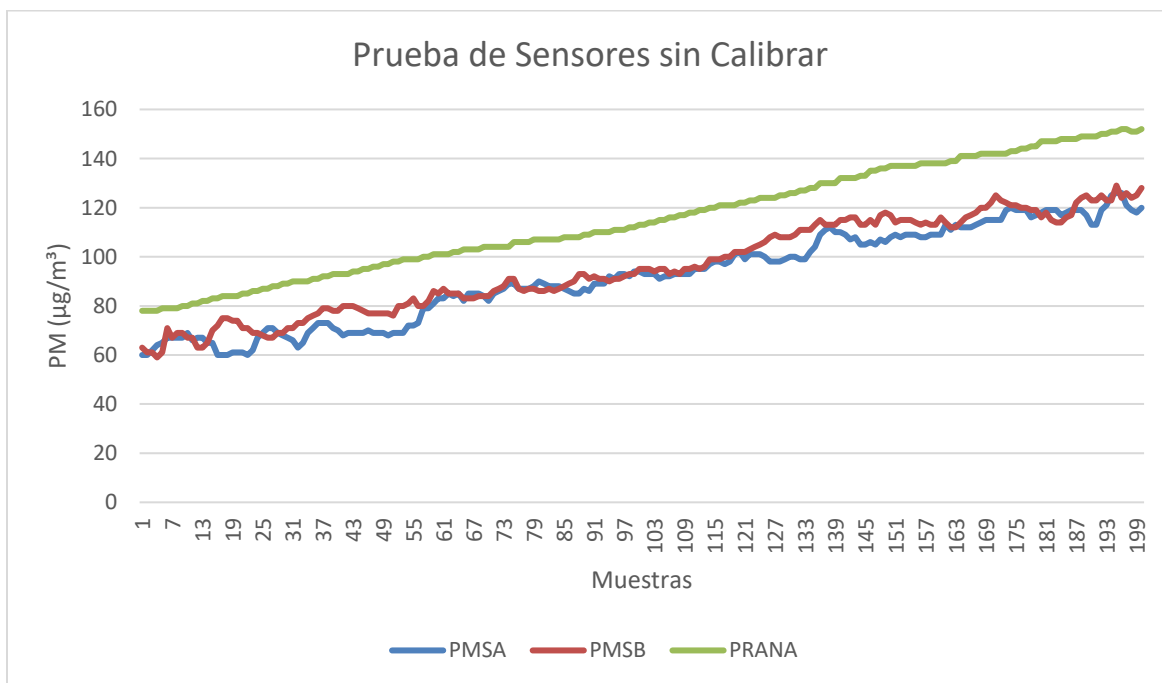
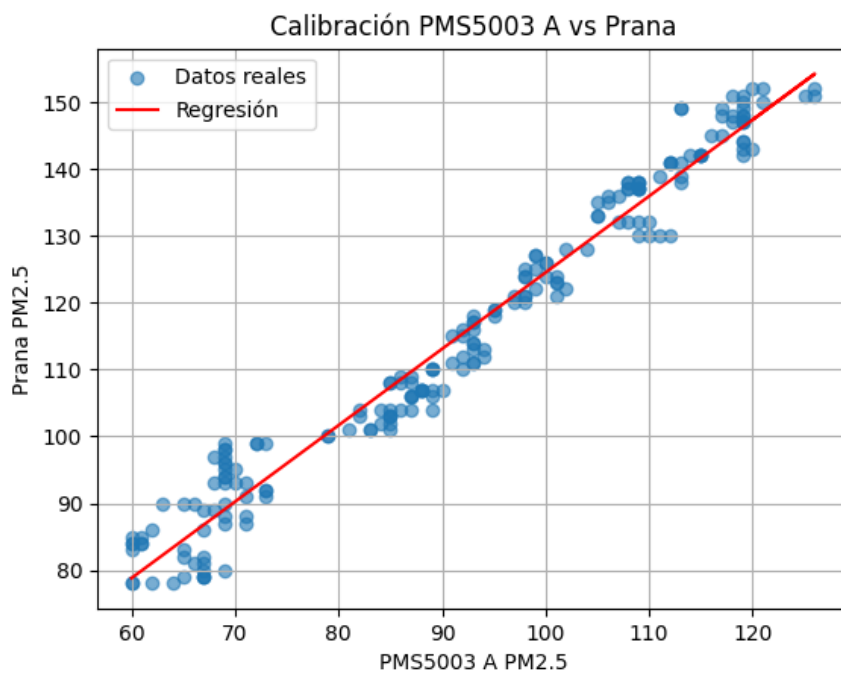
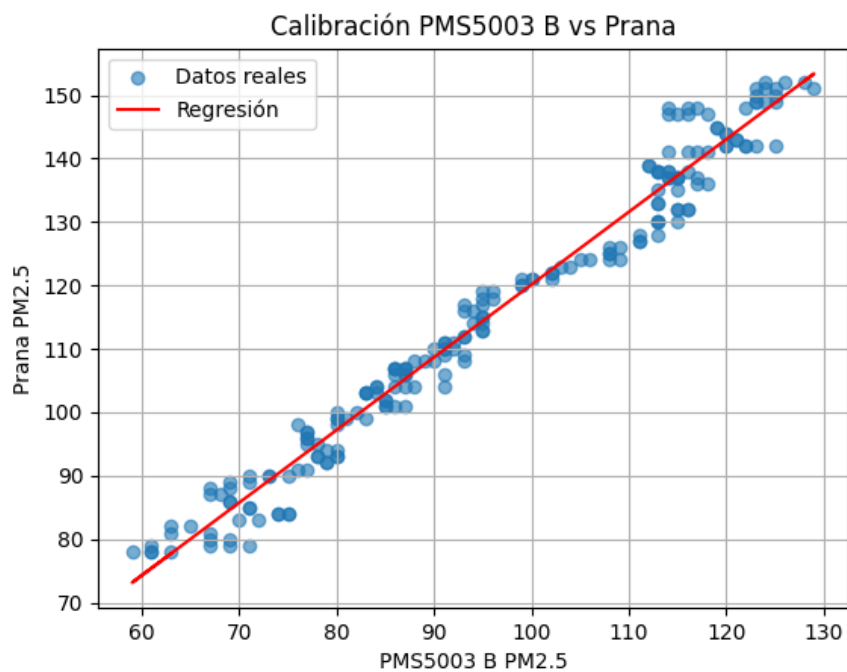


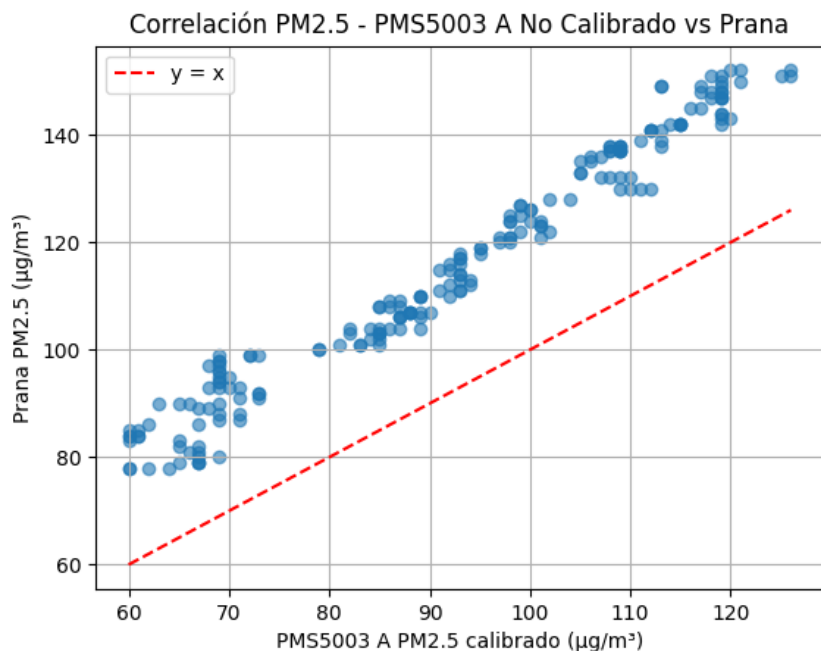
Figura 38. Gráfica de prueba de los sensores PMS5003 sin calibrar y el sensor Prana Air PAS-OUT-01.



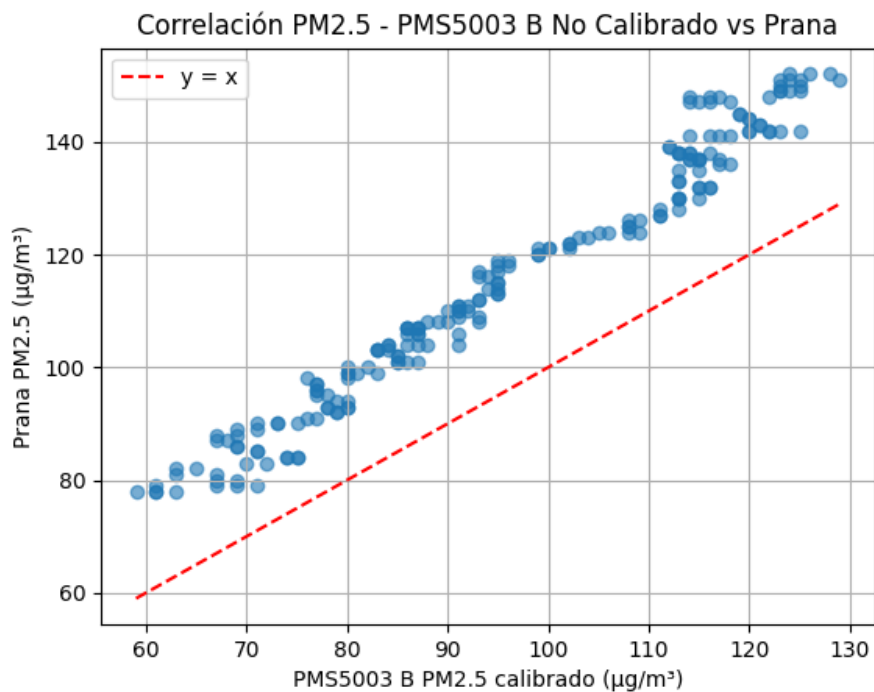
**Figura 39.** Gráfica de calibración del sensor PMS5003 A.



**Figura 40.** Gráfica de calibración del sensor PMS5003 B.



**Figura 41.** Gráfica de correlación de Pearson ( $r$ ) del sensor PMS5003 A y el sensor Prana Air PAS-OUT-01.



**Figura 42.** Gráfica de correlación de Pearson ( $r$ ) del sensor PMS5003 B y el sensor Prana Air PAS-OUT-01.

### 5.4.5 Pruebas utilizando el sensor Prana Air PAS-OUT-01, el sensor PMS5003 A calibrado y el sensor PMS5003 B sin calibración

Esta prueba incorpora la corrección (calibración) en el sensor PMS5003 A, mientras que el sensor PMS5003 B continúa descalibrado, como se puede observar en la Figura 43. Para esta prueba se realizó una correlación de Pearson ( $r$ ) para el sensor PMS5003 A calibrado y el sensor Prana Air PAS-OUT-01 que dio una correlación de 0.9870 (ver Figura 44).

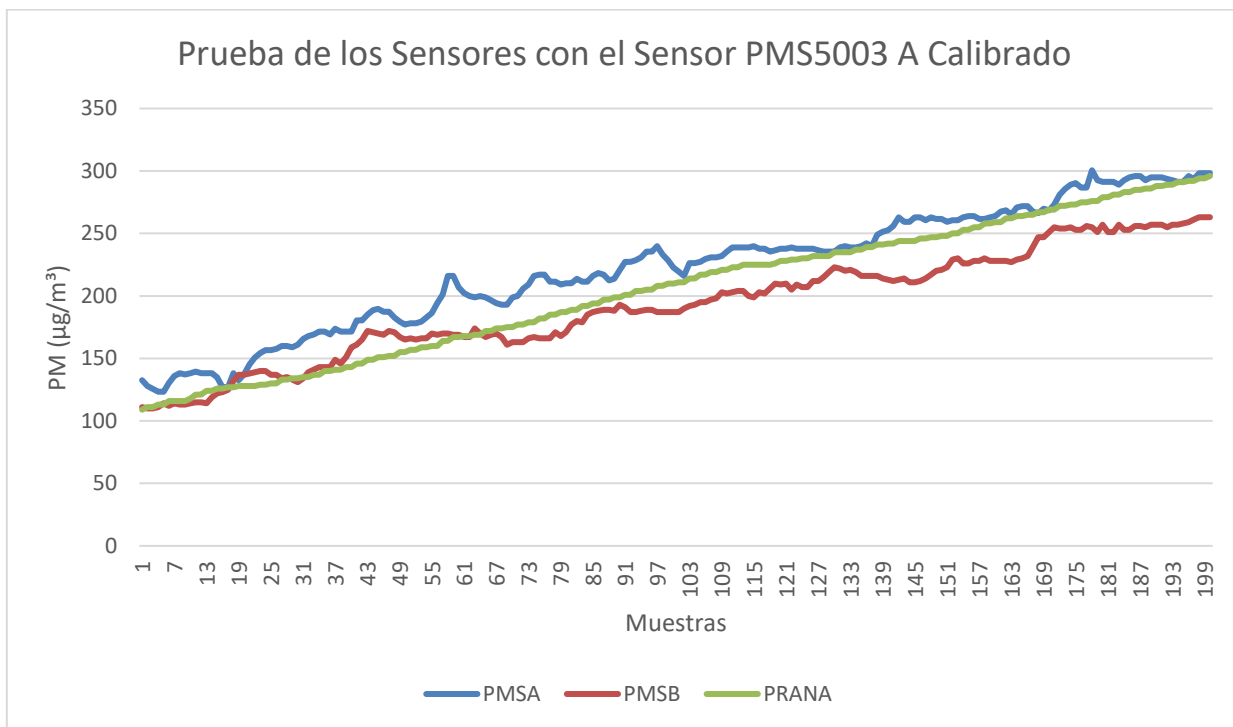
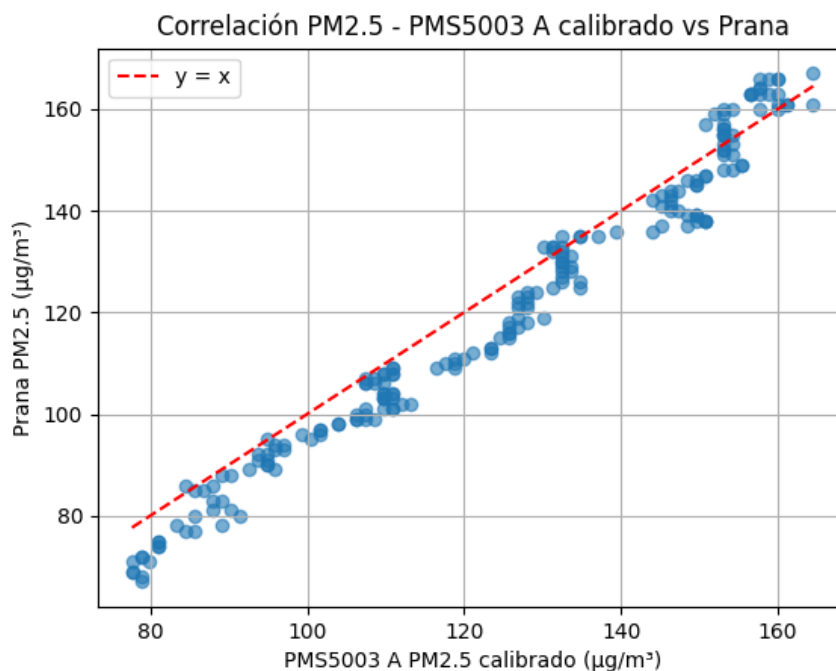


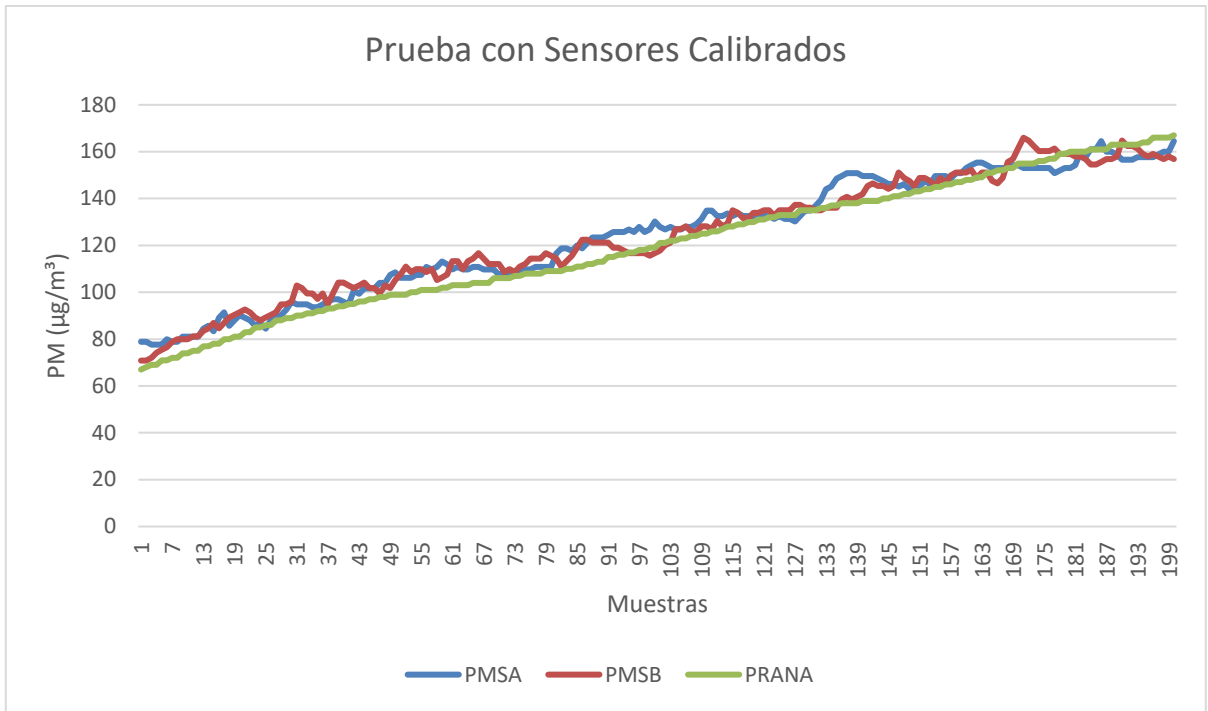
Figura 43. Gráfica de la prueba de los sensores con el sensor PMS5003 A calibrado.



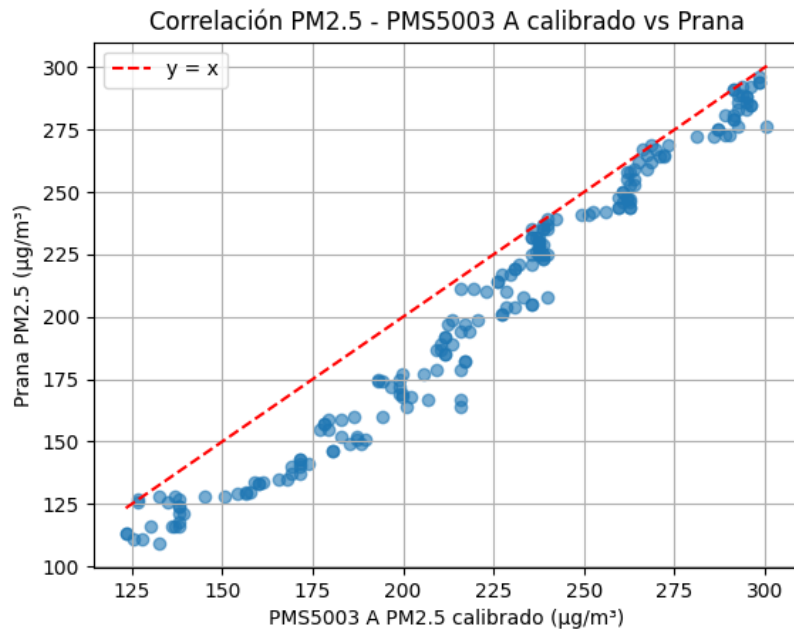
**Figura 44.** Gráfica de correlación de Pearson ( $r$ ) del sensor PMS5003 A y el sensor Prana Air PAS-OUT-01.

#### 5.4.6 Pruebas utilizando el sensor Prana Air PAS-OUT-01 y ambos sensores PMS5003 calibrados

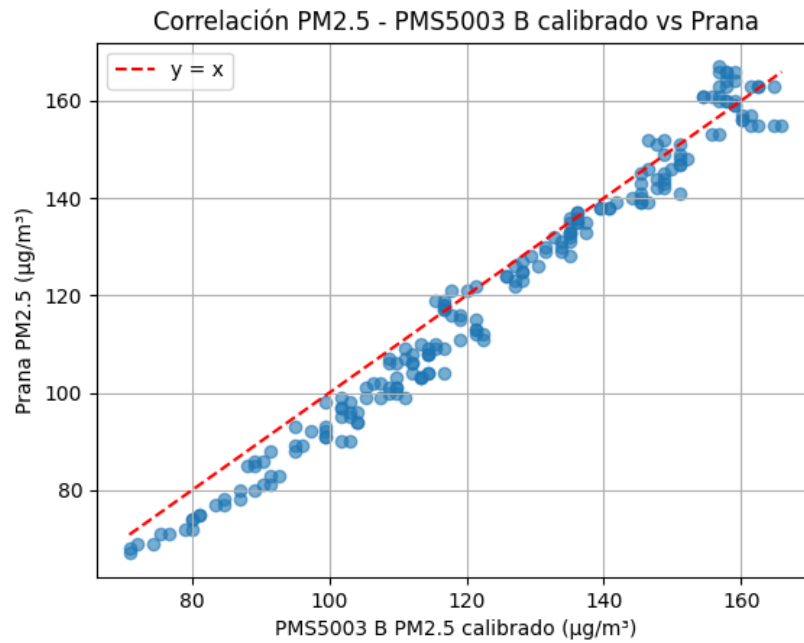
En esta prueba se utilizaron ambos sensores PMS5003 calibrados y se les realizó una prueba de correlación de Pearson ( $r$ ) en relación al sensor Prana Air PAS-OUT-01 (ver Figura 45). El sensor PMS5003 A presentó una correlación de 0.9846 (ver Figura 46), mientras que el sensor PMS5003 B presentó una correlación de 0.9898 (ver Figura 47).



**Figura 45.** Gráfica de prueba con ambos sensores PMS5003 calibrados y el sensor Prana Air PAS-OUT-01.



**Figura 46.** Gráfica de correlación de Pearson (r) del sensor PMS5003 A calibrado y el sensor Prana Air PAS-OUT-01.



**Figura 47.** Gráfica de correlación de Pearson ( $r$ ) del sensor PMS5003 B calibrado y el sensor Prana Air PAS-OUT-01.

## 5.5 Presupuesto

Esta sección presenta el presupuesto del prototipo. Uno de los objetivos de este trabajo es crear una cámara de pruebas de bajo costo, en la tabla 4 se muestran los costos del proyecto.

**Tabla 4. Presupuesto del proyecto.**

PRESUPUESTO	1 <sup>ER</sup> AÑO (PESOS MEXICANOS)
CONGRESO NACIONAL/PUBLICACIÓN CIENTÍFICA.	\$6,000
CALIBRACIÓN MONITOR PERSONAL THERMO SCIENTIFIC PDR-1500.	\$11,900
CALIBRACIÓN MONITOR PERSONAL TEMTOP PMD 351.	\$11,900
SENSOR SENSIRION SPS30.	\$1,071
FILAMENTOS Y MATERIALES PARA PIEZAS DE LA CÁMARA Y ACCESORIOS.	\$1,000
FABRICACIÓN DE CIRCUITOS IMPRESOS (10 USD X PCB, CONSIDERANDO 10PCS).	\$1,750
SENSOR AMBIENTAL GY-39	\$357
VENTILADORES ROSEWILL (12 USD X VENTILADOR, CONSIDERANDO 4 PIEZAS)	\$857
CAJA DE PLÁSTICO.	\$1,071
PAQUETE DE 1280 TORNILLOS M3 MÉTRICOS DE ACERO INOXIDABLE 304 CON CABEZA HEXAGONAL, TORNILLOS, TUERCAS, ARANDELAS.	\$600
HOJAS DE MADERA (3 PIEZAS).	\$600
ARDUINO UNO R3 (4 PIEZAS).	\$2,320
ASPIRADORA KOBLENZ BAGLESS HIGH SUCTION	\$2,011
ARDUINO MOTOR SHIELD PUENTE H CONTROLADORA MOTORES L293D 293	\$125
SENSOR DE CORRIENTE.	\$81
BROCA DE CONO PARA CARPINTERIA DE 0.6 PULGADAS.	\$500
REGULADOR DE PRESIÓN SMC AR25-N02E-Z-B	\$541
CONSUMIBLES VARIOS (TUBOS DE PLÁSTICO, ACCESORIOS DE NEBULIZADOR, ETC.).	\$1,000
MOTOR GUARD M-60 1/2 NPT SUB-MICRONIC FILTRO DE AIRE COMPRIMIDO Y - 23118789 108-11 SOPORTE DE MONTAJE PARA EL FILTRO MODELO M-30	\$1,606
F08-02-SK00B, WILKERSON F08 PARTICULATE FILTER (2 PIEZAS)	\$1,428
COMPRESOR DE AIRE.	EN EXISTENCIA

## CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta la discusión sobre los resultados obtenidos en las pruebas realizadas con los sensores de material particulado y su proceso de calibración. Además, se realizó un análisis de los resultados entre la correlación cuando el sensor se encuentra calibrado y cuando no está calibrado. Inicialmente se realizaron pruebas para observar el comportamiento de los sensores de partículas, utilizando incienso y papel quemado como fuentes contaminantes. Mientras que para las pruebas de calibración se utilizaron las partículas que cumplen con el estándar NIST, de un tamaño promedio de  $0.46\mu\text{m}$ .

Este prototipo proporciona una alternativa a los desafíos causados por la calibración de los monitores personales de PM debido al proceso complicado y costoso, el cual implica un técnico especializado, así como instalaciones con sistemas de control de los parámetros ambientales, el tiempo de duración de este proceso puede variar entre 3-5 semanas. Nuestro prototipo incorporó una red de ventilación con el fin de proporcionar un flujo de aire y material particulado dentro de la cámara de pruebas para que los dispositivos y sensores entren en contacto y realicen las mediciones. Se decidió incorporar conectividad inalámbrica Bluetooth debido a su bajo costo, sencillo uso y para proporcionarle al usuario más seguridad durante las pruebas, permitiendo que manipule los actuadores a distancia evitando que se exponga a PM. En el estado del arte se observó que de los 11 artículos mencionados en la introducción [20-30], sólo 2 tienen conectividad inalámbrica [27, 29], además, solo [27] cuenta con un sistema de extracción de partículas. Ambos trabajos presentan un sistema que funciona de forma automática sin interrupciones en el proceso de calibración, mientras nuestro prototipo propuesto tiene la capacidad de realizar lecturas de los contaminantes mientras que cada etapa de los actuadores funciona de forma independiente, permitiendo al usuario actuar o detener el proceso en caso de algún inconveniente.

## **6.1 Comparación de las lecturas entre el sensor Prana Air PAS-OUT-01 y los sensores SENSIRION SPS30**

En lo que respecta a las mediciones realizadas por el sensor Prana Air PAS-OUT-01 y los sensores de polvo SENSIRION SPS30, es indispensable realizar una prueba de verificación para saber el “Estado” del dispositivo que se quiere calibrar. En la primera prueba con los sensores sin calibrar, se observó un fenómeno interesante en el cual para el sensor SENSIRION SPS30 A, que ya contaba con una correlación elevada  $\geq 0.99$ , el proceso de calibración tiene un efecto negativo disminuyendo su índice de correlación en pruebas realizadas antes y después de la calibración. En las pruebas iniciales donde el sensor SPS30 A (antes de calibrar) mostró una correlación de 0.9939 con respecto al sensor PRANA Air PAS-OUT-01. En la Figura 28 se puede ver un comportamiento muy similar en ambos sensores. Mientras que después de realizar la calibración (ver Figura 33) el valor disminuyó a 0.9907, lo que representa un efecto negativo en él.

Por otra parte, el sensor SPS30 B en las pruebas iniciales sin calibración presentó un índice menor de correlación de Pearson, y tras calibrarlo, las pruebas de correlación presentaron una mejora, pasando de una correlación de 0.9422 por una de 0.9715. Además, aunque se puede observar en la Figura 34 que las lecturas del sensor SPS30 B están más alejadas de las lecturas del sensor PAS-OUT-01, en comparación con la figura 34 donde ya se realizó el proceso de calibración.

## **6.2 Comparación de las lecturas entre el sensor Prana Air PAS-OUT-01 y los sensores PMS5003**

En estas pruebas ambos sensores PMS5003 presentaron resultados positivos, considerando que, en la primera prueba, donde los sensores no se encuentran calibrados, los sensores PMS5003 presentaron índices de correlación menores a 0.99, que, aunque son significativos pueden mejorarse. En la Figura 44 se puede observar de forma clara el resultado de la calibración de los sensores, al compararse con la Figura 37 de los sensores sin calibrar.

Finalmente, el tamaño de la cámara de calibración presenta una limitante debido a que, algunos dispositivos robustos requieren de una simulación de un ambiente que necesita de un mayor flujo de partículas sin saturar la cámara de PM. Otra limitante es el introducir la solución de PM en el nebulizador de forma manual, cuando podría evitarse incorporando un sistema que se encargue de cargar el nebulizador con una reserva de la solución de PM, evitando que el usuario tenga que llenar la reserva constantemente. La falta de control de temperatura pudiese ser una limitante, sin embargo, al controlar la humedad dentro de la cámara, utilizando gel de sílice, además de filtrar el aire que viene del compresor, removiendo posibles partículas y humedad del aire que se introduce a la cámara de calibración.

## **CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES**

Este trabajo contribuye al desarrollo y solución sobre los problemas asociados con los dispositivos de monitoreo de material particulado personales y portables, donde uno de sus principales inconvenientes es la calibración de los dispositivos de monitoreo comerciales, esto debido a que la calibración es un proceso que requiere tiempo, debido al traslado del equipo o sensor, además de su alto costo.

La cámara de calibración está diseñada para eliminar el riesgo de exposición del usuario a las PM durante las pruebas gracias a su conectividad inalámbrica Bluetooth. Esta contribución es importante para reducir la exposición potencial de PM a los usuarios que operan el prototipo (por ejemplo, fugas dentro de la cámara que contaminen la zona donde se encuentra el prototipo).

En este trabajo, a pesar de no controlar la temperatura, al filtrar la humedad con filtros de gel de sílice, y controlando las condiciones internas de la cámara de calibración se puede calibrar exitosamente sensores y dispositivos de PM.

Para trabajo futuro, se considerará incorporar una cámara de calibración más grande que permita flujos constantes de PM para calibrar dispositivos que cuenten con mayor robustez. Se considerará incorporar un sistema de llenado para el nebulizador. Donde se cuente con una reserva del material particulado de interés que llene de forma automática el nebulizador. Además, podría extenderse el prototipo para calibrar otro tipo de gases como pueden ser los gases de efecto invernadero, entre otros gases de interés e impacto ambiental.

## REFERENCIAS

- [1] Monthly Electric Statistics. Disponible en línea: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/monthly-electricity-statistics> (accedido el 01 noviembre 2024).
- [2] A. I. Tiotiu et al., “Impact of air pollution on asthma outcomes,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 17, p. 6212, Aug. 2020. doi:10.3390/ijerph17176212.
- [3] Ambient (outdoor) air pollution. Disponible en línea: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (accedido el 01 noviembre 2024).
- [4] Air Pollution and Your Health. Disponible en línea: <https://www.niehs.nih.gov/health/topics/agents/air-pollution> (accedido el 01 noviembre 2024).
- [5] Air quality, energy and health. Disponible en línea: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/health-impacts/types-of-pollutants> (accedido el 01 noviembre 2024).
- [6] Particulate Matter (PM) Basics. Disponible en línea: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM> (accedido el 01 noviembre 2024).
- [7] M. U. Ali et al., “A systematic review on Global Pollution Status of particulate matter-associated potential toxic elements and health perspectives in urban environment,” *Environmental Geochemistry and Health*, vol. 41, no. 3, pp. 1131–1162, Oct. 2018. doi:10.1007/s10653-018-0203-z.
- [8] Health and Environmental Effects of Particulate Matter (PM). Disponible en línea: <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm> (accedido el 01 noviembre 2024).
- [9] A. Fiordelisi et al., “The mechanisms of air pollution and particulate matter in cardiovascular diseases,” *Heart Failure Reviews*, vol. 22, no. 3, pp. 337–347, Mar. 2017. doi:10.1007/s10741-017-9606-7.
- [10] O. K. Kurt, J. Zhang, and K. E. Pinkerton, “Pulmonary health effects of air pollution,” *Current Opinion in Pulmonary Medicine*, vol. 22, no. 2, pp. 138–143, Mar. 2016. doi:10.1097/mcp.0000000000000248.
- [11] Gilbert SF. *Developmental Biology*. 6th edition. Sunderland (MA): Sinauer Associates; 2000. Aging: The Biology of Senescence. Disponible en línea: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK10041/>.
- [12] “Types of pollutants,” World Health Organization, <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/health-impacts/types-of-pollutants> (accedido: feb. 1, 2025).
- [13] “Particulate Matter (PM) Basics,” EPA, <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM> (accedido: feb. 1, 2025).
- [14] Y. Du, X. Xu, M. Chu, Y. Guo, and J. Wang, “Air particulate matter and cardiovascular disease: The epidemiological, biomedical and clinical evidence,” *Journal of thoracic disease*, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4740122/> (accessed Feb. 1, 2025).
- [15] “How Air Pollution Affects Our Health,” European Environment Agency’s home page, <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/air-pollution/eow-it-affects-our-health> (accedido: feb. 1, 2025).
- [16] O. A. Us Epa, “Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medioambiente,” 2018.
- [17] D. Fowler et al., “A chronology of Global Air Quality,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 378, no. 2183, p. 20190314, Sep. 2020. doi:10.1098/rsta.2019.0314.
- [18] M. de los A. Benitez Romero and H. Karim García, DETERMINACION DEL CONTENIDO DE PROTEINAS TOTALES EN CLARA DE HUEVOS POR MÉTODOS GRAVIMETRICOS Y ESPECTROFOTOMETRICOS, <http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/bitstream/123456789/6015/1/222956.pdf> (accedido: abr. 29, 2025).
- [19] L. Occhipinti and P. Oluwasanya, “Particulate matter monitoring: Past, present and future,” *International Journal of Earth & Environmental Sciences*, vol. 2, no. 2, Dec. 2017. doi:10.15344/2456-351x/2017/144.
- [20] R. A. González Rivero et al., “A low-cost calibration method for temperature, relative humidity, and carbon dioxide sensors used in air quality monitoring systems,” *Atmosphere*, vol. 14, no. 2, p. 191, Jan. 2023. doi:10.3390/atmos14020191.
- [21] S. L. Brown, C. S. Goulsbra, M. G. Evans, T. Heath, and E. Shuttleworth, “Low cost CO2 sensing: A simple microcontroller approach with calibration and field use,” *HardwareX*, vol. 8, Oct. 2020. doi:10.1016/j.ohx.2020.e00136.

- [22] V. S. Gamboa, É. J. Kinast, and M. Pires, "System for performance evaluation and calibration of low-cost gas sensors applied to air quality monitoring," *Atmospheric Pollution Research*, vol. 14, no. 2, p. 101645, Feb. 2023. doi:10.1016/j.apr.2022.101645.
- [23] D. Agrawal, A. K. Saini, A. C. Rai, and P. Kala, "In chamber calibration and performance evaluation of air quality low-cost sensors," *Atmospheric Pollution Research*, vol. 15, no. 12, p. 102299, Dec. 2024. doi:10.1016/j.apr.2024.102299.
- [24] Z. Nieckarz and J. A. Zoladz, "New calibration system for low-cost suspended particulate matter sensors with controlled air speed, temperature and humidity," *Sensors*, vol. 21, no. 17, p. 5845, Aug. 2021. doi:10.3390/s21175845.
- [25] H. Zhang, R. Ruan, S. Choudhary, H. Tan, and P. Biswas, "Numerical and experimental investigation on the performance of a ventilated chamber for low-cost PM sensor calibration," *Journal of Aerosol Science*, vol. 151, p. 105680, Jan. 2021. doi:10.1016/j.jaerosci.2020.105680.
- [26] V. Papapostolou, H. Zhang, B. J. Feenstra, and A. Polidori, "Development of an environmental chamber for evaluating the performance of low-cost air quality sensors under controlled conditions," *Atmospheric Environment*, vol. 171, pp. 82–90, Dec. 2017. doi:10.1016/j.atmosenv.2017.10.003.
- [27] A. Ganji et al., "Design, calibration, and testing of a mobile sensor system for air pollution and Built Environment Data Collection: The urban scanner platform," *Environmental Pollution*, vol. 317, p. 120720, Jan. 2023. doi:10.1016/j.envpol.2022.120720.
- [28] T. Sayahi et al., "Development of a calibration chamber to evaluate the performance of low-cost particulate matter sensors," *Environmental Pollution*, vol. 255, p. 113131, Dec. 2019. doi:10.1016/j.envpol.2019.113131.
- [29] H. Cho and Y. Baek, "Practical particulate matter sensing and accurate calibration system using low-cost commercial sensors," *Sensors*, vol. 21, no. 18, p. 6162, Sep. 2021. doi:10.3390/s21186162.
- [30] N. A. Amoah, G. Xu, A. R. Kumar, and Y. Wang, "Calibration of low-cost particulate matter sensors for Coal Dust Monitoring," *Science of The Total Environment*, vol. 859, p. 160336, Feb. 2023. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.160336.
- [31] "Types of light scattering," Oxford Instruments, <https://andor.oxinst.com/learning/view/article/scattering-of-light-an-overview-of-the-various-forms-of-light-scattering> (accedido: nov. 23, 2024).
- [32] Dong Chen et al., "Measurements of particulate matter concentration by the light scattering method: Optimization of the detection angle," *Fuel Processing Technology*, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382018308075> (accedido: nov. 23, 2024).
- [33] "Rayleigh scattering," *Rayleigh Scattering - an overview | ScienceDirect Topics*, <https://www.sciencedirect.com/topics/medicine-and-dentistry/rayleigh-scattering> (accedido: nov. 23, 2024).
- [34] "Mie scattering," *Mie Scattering - an overview | ScienceDirect Topics*, <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/mie-scattering> (accedido: nov. 23, 2024).
- [35] S. O'Connor, P. F. O'Connor, H. A. Feng, and K. Ashley, "Gravimetric analysis of particulate matter using air samplers housing internal filtration capsules," *Gefahrstoffe, Reinhaltung der Luft = Air quality control*, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4587562/> (accedido: nov. 23, 2024).
- [36] PDR-1500 - user manual, <https://tools.thermofisher.com/content/sfs/manuals/EPM-manual-PDR1500.pdf> (accedido: nov. 24, 2024).
- [37] "Cyclone Separator," *Cyclone separator - Energy Education*, [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Cyclone\\_separator](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Cyclone_separator) (accedido: nov. 23, 2024).
- [38] Disposable parallel particle impactors (ppis), <https://www.airmet.com.au/assets/documents/product/airsampling/disposable-parallel-particle-impactor-datasheet.pdf> (accedido: mayo 23, 2025).
- [39] "Personal Environmental Monitor (PEM)," *Alenium.es*, <https://alenium.es/wp-content/uploads/2024/08/132-PEM.pdf> (accedido: mayo 23, 2025).
- [40] "Arduino Uno REV3," *Arduino Official Store*, [https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3?srsId=AfmB0oqhnb2DR9geO6DAEwongEVqyHbpltChhFSIvGsdXg\\_nT3C5JrzX](https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3?srsId=AfmB0oqhnb2DR9geO6DAEwongEVqyHbpltChhFSIvGsdXg_nT3C5JrzX) (accedido: nov. 23, 2024).
- [41] "¿Que es Raspberry Pi?," *Raspberry Pi*, 14-Feb-2019. [Online]. Available: <https://raspberrypi.cl/que-es-raspberry/> (accedido: abr. 28, 2025).
- [42] Understanding the I<sub>2</sub>C Bus, [https://www.ti.com/lit/an/slva704/slva704.pdf?ts=1744389871214&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/an/slva704/slva704.pdf?ts=1744389871214&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F) (accedido: abr. 1, 2025).

- [43] Buy A raspberry pi 5 – raspberry pi, <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-5/> (accedido: abr. 28, 2025).
- [44] L293x Quadraple Half-H Drivers, [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/l293d.pdf?ts=1747874267741&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252Fes-mx%252FL293D](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/l293d.pdf?ts=1747874267741&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252Fes-mx%252FL293D). (accedido: abr. 28, 2025)
- [45] V. Sieben, "A High Power H-Bridge", ARVP-Autonomous Robotic Vehicle Project, 2003.
- [46] GY-39 v1.0, <https://cdn.compacttool.ru/downloads/GY39.pdf> (accedido: mayo 24, 2025).
- [47] A new approach to realize UART | IEEE Conference publication | IEEE Xplore, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6023602/> (accedido: mayo 24, 2025).
- [48] "¿Qué es la tecnología bluetooth®?," Intel, <https://www.intel.la/content/www/xl/es/products/docs/wireless/what-is-bluetooth.html> (accedido: nov. 23, 2024).
- [49] "¿Qué es el wifi? - tipos de conexiones wifi y seguridad: Proofpoint es," Proofpoint, <https://www.proofpoint.com/es/threat-reference/wifi> (accedido: mar. 6, 2025).
- [50] International standard ISO 21501-4, <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/58073/06af596223fe469880f50fccc23e63a5/ISO-21501-4-2018.pdf> (accedido: mar. 11, 2025).
- [51] "Norma Oficial mexicana nom-156-SEMARNAT-2012, Establecimiento y Operación de Sistemas de Monitoreo de la Calidad del Aire," DOF, [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5259464&fecha=16%2F07%2F2012](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5259464&fecha=16%2F07%2F2012) (accedido: ene. 11, 2025).
- [52] ¿Qué son los estándares con trazabilidad NIST?, <https://www.beckman.mx/support/faq/industry-standards/nist-traceable-standards> (accedido: mar. 12, 2025).
- [53] NIST - traceable particle size standards, <https://www.bangslabs.com/sites/default/files/imce/docs/SS%20NIST%20Web.pdf> (accedido: mar. 12, 2025).
- [54] "Tkinter - Python interface to TCL/TK," Python documentation, <https://docs.python.org/3/library/tkinter.html> (accessed Jan. 7, 2025).
- [55] "Pyserial¶," pySerial, <https://pyserial.readthedocs.io/en/latest/pyserial.html> (accessed Jan. 7, 2025).
- [56] TomSchimansky, "Tomschimansky/customtkinter: A modern and customizable python UI-library based on Tkinter," GitHub, <https://github.com/TomSchimansky/CustomTkinter> (accessed Jan. 7, 2025).
- [57] "Winsound - sound-playing interface for Windows," Python documentation, <https://docs.python.org/3/library/winsound.html> (accessed Jan. 7, 2025).
- [58] "CSV - csv file reading and writing," Python documentation, <https://docs.python.org/3/library/csv.html> (accessed Jan. 7, 2025).
- [59] "Time - Time Access and conversions," Python documentation, <https://docs.python.org/3/library/time.html> (accessed Jan. 7, 2025).
- [60] "Math - mathematical functions," Python documentation, <https://docs.python.org/3/library/math.html> (accessed Jan. 7, 2025).
- [61] "OS - miscellaneous operating system interfaces," Python documentation, <https://docs.python.org/3/library/os.html> (accessed Jan. 7, 2025).
- [62] "Sys - system-specific parameters and functions," Python documentation, <https://docs.python.org/3/library/sys.html> (accedido: abr. 28, 2025).
- [63] "Tools¶," Tools - pySerial 3.4 documentation, <https://pyserial.readthedocs.io/en/latest/tools.html> (accessed Jan. 7, 2025).
- [64] "Pywin32," PyPI, <https://pypi.org/project/pywin32/> (accessed Jan. 7, 2025).

# ANEXOS

## A. Códigos para los dispositivos controlados por Arduino

### A1. Código para el sistema de extracción de partículas.

```
#include <SoftwareSerial.h>
#include <Servo.h>
Servo perilla;
SoftwareSerial HC06(0,1);

String teclado = "";
int valorAnterior = 0, valorActual = 0, valorDeseado = 0;

void setup(){
  HC06.begin(9600);
  perilla.attach(3);
  perilla.write(0);
}

void loop(){

  if(HC06.available()){

    //Recibimos los valores desde el Serial o Python
    teclado= HC06.readString();
    valorDeseado = teclado.toInt();

    //Verificamos que el valor ingresado esté dentro del rango de movimiento del servomotor
    if(valorDeseado >= 0 && valorDeseado <= 135){

      //Identificamos si se aumentará o disminuirá la potencia del vacum
      if (valorDeseado > valorAnterior){
        //Es una aumento de potencia
        //Aumentamos gradualmente la potencia hasta el valor deseado
        for (int i = valorAnterior; i <= valorDeseado; i++){
          HC06.println(i);
          perilla.write(i);
          valorActual= i;
          delay(50);
        }
      } else {
```

```

//Es una disminución de potencia
//Disminuimos gradualmente la potencia hasta el valor deseado
for (int i = valorAnterior; i >= valorDeseado; i--){
  HC06.println(i);
  perilla.write(i);
  valorActual= i;
  delay(50);
}
}
//Guardamos el valor actual de la potencia del vacum
valorAnterior = valorActual;
//Serial.println("Fin de movimiento");
}
}
}

```

## A2. Código para el control de la Red de Ventilación.

```

//Ahora controlaremos los 4 ventiladores utilizando Python y el motor shield
#include <SoftwareSerial.h>
#include <AFMotor.h>
#include <Servo.h>

//Servo motores para encender los dispositivos de medición para PMs (PDR1500 y PMD351)
Servo servoPMD351;
Servo servoPDR1500;
SoftwareSerial HC06(0, 1);

//Se utilizó 1 slot de Motor para conectar 2 ventiladores
//Sólo se necesitó Motor1 y Motor2
AF_DCMotor fan1(1, MOTOR12_8KHZ);
AF_DCMotor fan2(2, MOTOR12_8KHZ);

//En caso de utilizar los otros slots se utilizarían éstos
AF_DCMotor fan3(3, MOTOR34_8KHZ);
AF_DCMotor fan4(4, MOTOR34_8KHZ);

void setup(){
  HC06.begin(9600);
  //Turn ON servo motors
  servoPMD351.attach(9);

```

```

servoPDR1500.attach(10);
servoPMD351.write(0);
servoPDR1500.write(0);

}

String cad = ""; //Recibe instrucción desde Python
int velocidad = 250; //Controlar la velocidad de cada estado
//Pueden cambiar el porcentaje en el que trabaje en cada estado
int velBaja = velocidad * 0.35, velMedia = velocidad * 0.65, velAlta = velocidad * 1;

void loop(){
  if(HC06.available()){

    cad = HC06.readStringUntil('\n');

    if (cad.equals("PMD351")){
      servoPMD351.write(45);
      delay(4000);
      servoPMD351.write(0);
      cad = "";
    }
    else if (cad.equals("PDR1500"))
    {
      servoPDR1500.write(45);
      delay(6000);
      servoPDR1500.write(0);
      cad = "";
    }
    else if (cad.equals("PMD351_Off"))
    {
      servoPMD351.write(45);
      delay(3000);
      servoPMD351.write(0);
      cad = "";
    }
    else if (cad.equals("PDR1500_Off"))
    {
      servoPDR1500.write(45);
      delay(3000);
      servoPDR1500.write(0);
      cad = "";
    }
  }
}

```

```

    }

if (cad.toInt() == 0){
    HC06.println("M1, M2, M3 y M4 apagados");
    fan1.run(RELEASE);
    fan2.run(RELEASE);

    fan3.run(RELEASE);
    fan4.run(RELEASE);
}

if (cad.toInt() == 1){

    HC06.println("M1 encendido");
    //Hacemos este aumento de velocidad para darle arranque al M1
    fan1.setSpeed(velAlta);
    fan1.run(FORWARD);
}
if (cad.toInt() == 11){

    HC06.println("M1 Apagado");
    //Hacemos este aumento de velocidad para darle arranque al M1
    fan1.run(RELEASE);
}

if (cad.toInt() == 2){

    HC06.println("M2 encendido");
    //Hacemos este aumento de velocidad para darle arranque al M1
    fan2.setSpeed(velAlta);
    fan2.run(FORWARD);
}

if (cad.toInt() == 22){

    HC06.println("M2 apagado");
    fan2.run(RELEASE);
}

if (cad.toInt() == 3){

```

```

    HC06.println("M3 encendido");
    //Hacemos este aumento de velocidad para darle arranque al M1
    fan3.setSpeed(velAlta);
    fan3.run(FORWARD);
}

if (cad.toInt() == 33){

    HC06.println("M3 apagado");
    fan3.run(RELEASE);
}

if (cad.toInt() == 4){

    HC06.println("M4 encendido");
    //Hacemos este aumento de velocidad para darle arranque al M1
    fan4.setSpeed(velAlta);
    fan4.run(FORWARD);
}

if (cad.toInt() == 44){

    HC06.println("M4 apagado");
    fan4.run(RELEASE);
}

if (cad.toInt() == 5){
    HC06.println("M1, M2, M3 y M4 encendidos");
    fan1.setSpeed(velAlta);
    fan1.run(FORWARD);
    fan2.setSpeed(velAlta);
    fan2.run(FORWARD);
    fan3.setSpeed(velAlta);
    fan3.run(FORWARD);
    fan4.setSpeed(velAlta);
    fan4.run(FORWARD);
}
}
}

```

### A3. Código para el control del sensor ambiental GY-39.

```
#include <Adafruit_BME280.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include "Arduino.h"
#include <SPI.h>
#include <Wire.h>
#include <avr/wdt.h>
#include <MAX44009.h>
#define SEALEVELPRESSURE_HPA (1013.25)//< Average sea level pressure is 1013.25 hPa
MAX44009 light;
Adafruit_BME280 bme; // I2C Define BME280
SoftwareSerial HC06(0, 1);
MAX44009 sensor;
unsigned long delayTime;

void setup() {
  HC06.begin(9600);      // set up Serial library at 9600 bps

  if (!bme.begin(0x76)) {
    HC06.println("Could not find a valid BME280 sensor, check wiring!");
    while (1);
  }
  wdt_enable(WDTO_1000MS);
}

void loop()
{
  wdt_reset();
  HC06.print(bme.readPressure() / 100.0F);
  HC06.print(",");
  HC06.print(bme.readTemperature());
  HC06.print(",");
  HC06.print(bme.readHumidity());
  HC06.print(",");
  HC06.print(sensor.get_lux());
  HC06.print(",");
  HC06.print(bme.readAltitude(SEALEVELPRESSURE_HPA));
  HC06.println();
}
```

### A4. Código para el control del sensor de polvo PMS5003.

```
#include <SoftwareSerial.h>
```

```

SoftwareSerial pmsSerial(2,3);
SoftwareSerial HC06(0,1);

void setup() {
  // our debugging output
  HC06.begin(9600);

  // sensor baud rate is 9600
  pmsSerial.begin(9600);
}

struct pms5003data {
  uint16_t framelen;
  uint16_t pm10_standard, pm25_standard, pm100_standard;
  uint16_t pm10_env, pm25_env, pm100_env;
  uint16_t particles_03um, particles_05um, particles_10um, particles_25um, particles_50um, particles_100um;
  uint16_t unused;
  uint16_t checksum;
};

struct pms5003data data;

void loop() {
  if (readPMSdata(&pmsSerial)) {
    float corrected;
    // reading data was successful!
    corrected = 1.146*(data.pm25_env)+5.510;
    HC06.print("PM2.5: "); HC06.print(corrected);
    //HC06.print("PM2.5: "); HC06.print(data.pm25_env);
    HC06.println();
  }
}

boolean readPMSdata(Stream *s) {
  if (! s->available()) {
    return false;
  }

  // Read a byte at a time until we get to the special '0x42' start-byte
  if (s->peek() != 0x42) {
    s->read();
    return false;
  }
}

```

```

}

// Now read all 32 bytes
if (s->available() < 32) {
    return false;
}

uint8_t buffer[32];
uint16_t sum = 0;
s->readBytes(buffer, 32);

// get checksum ready
for (uint8_t i=0; i<30; i++) {
    sum += buffer[i];
}

/* debugging
for (uint8_t i=2; i<32; i++) {
    Serial.print("0x"); Serial.print(buffer[i], HEX); Serial.print(", ");
}
Serial.println();
*/

// The data comes in endian'd, this solves it so it works on all platforms
uint16_t buffer_u16[15];
for (uint8_t i=0; i<15; i++) {
    buffer_u16[i] = buffer[2 + i*2 + 1];
    buffer_u16[i] += (buffer[2 + i*2] << 8);
}

// put it into a nice struct :)
memcpy((void *)&data, (void *)buffer_u16, 30);

if (sum != data.checksum) {
    Serial.println("Checksum failure");
    return false;
}
// success!
return true;
}

```

## A5. Código para el control del sensor de polvo SENSIRION SPS30.

```
#include <sps30.h>
#include <SoftwareSerial.h>

SoftwareSerial HC06(0, 1);

void setup() {
  int16_t ret;
  uint8_t auto_clean_days = 4;
  uint32_t auto_clean;

  //Serial.begin(9600);
  HC06.begin(9600);
  delay(10);

  sensirion_i2c_init();

  while (sps30_probe() != 0) {
    HC06.print("SPS sensor probing failed\n");
    delay(500);
  }

#ifdef PLOTTER_FORMAT
  //Serial.print("SPS sensor probing successful\n");
#endif /* PLOTTER_FORMAT */

  ret = sps30_set_fan_auto_cleaning_interval_days(auto_clean_days);
  if (ret) {
    HC06.print("error setting the auto-clean interval: ");
    HC06.println(ret);
  }

  ret = sps30_start_measurement();
  if (ret < 0) {
    HC06.print("error starting measurement\n");
  }

#ifdef PLOTTER_FORMAT
  //Serial.print("measurements started\n");
#endif /* PLOTTER_FORMAT */
  delay(10);
```

```

}

void loop() {
  struct sps30_measurement m;
  char serial[SPS30_MAX_SERIAL_LEN];
  float corrected;
  uint16_t data_ready;
  int16_t ret;

  do {
    ret = sps30_read_data_ready(&data_ready);
    if (ret < 0) {
      HC06.print("error reading data-ready flag: ");
      HC06.println(ret);
    } else if (!data_ready)
      HC06.print("data not ready, no new measurement available\n");
    else
      break;
    delay(100); /* retry in 100ms */
  } while (1);

  ret = sps30_read_measurement(&m);
  if (ret < 0) {
    HC06.print("error reading measurement\n");
  } else {

#ifdef PLOTTER_FORMAT
    corrected = (2.017)*(m.mc_2p5)+(-104.680);
    HC06.println("PM2.5: " + String(corrected));
    //HC06.println("PM2.5: " + String(m.mc_2p5));
  }

  delay(1000);
}

```

## B. Código del software de control para la cámara de pruebas con interfaz gráfica (GUI)

Enlace para acceder al código:

- [https://drive.google.com/file/d/1wZP3zlw7IDn12bU9xmU6WTbCI4HEs3y8/view?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/file/d/1wZP3zlw7IDn12bU9xmU6WTbCI4HEs3y8/view?usp=drive_link)
- [https://drive.google.com/file/d/1fq1szwUn\\_1KwSnLJN3EWLyI7nel66pSU/view?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/file/d/1fq1szwUn_1KwSnLJN3EWLyI7nel66pSU/view?usp=drive_link)