

**ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE SENSORES ÓPTICOS DE POLVO DE BAJO
COSTO UTILIZANDO EL INTERNET DE LAS COSAS**

NESTOR DAVID ARIZA OSMA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2019

**ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE SENSORES ÓPTICOS DE POLVO DE BAJO
COSTO UTILIZANDO EL INTERNET DE LAS COSAS**

NESTOR DAVID ARIZA OSMA

Trabajo de grado para optar al título de: Ingeniero Electrónico

Director

JAIME GUILLERMO BARRERO PÉREZ

Magíster en Potencia Eléctrica

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2019

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN	13
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	14
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	15
1.3 OBJETIVOS.....	16
1.3.1 Objetivo general.....	16
1.3.2 Objetivos específicos	16
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	17
2.1 MATERIAL PARTICULADO.....	17
2.1.1 PM2.5.....	18
2.1.2 PM10.....	19
2.1.3 Efectos del PM en la salud.....	19
2.1.4 Regulación internacional.....	20
2.1.5 Panorama en Colombia	20
2.2 SENSORES DE POLVO.....	22
2.2.1 Opacidad.....	22
2.2.2 Efecto triboeléctrico.	23
2.2.3 Atenuación Beta.....	24
2.2.4 Dispersión de Luz.	25
2.3 INTERNET DE LAS COSAS (IOT)	28
3. MONTAJE E IMPLEMENTACIÓN	30
3.1 HARDWARE	30
3.1.1 Placa de desarrollo	30
3.1.2 Sensores.....	35

3.1.3 Dispositivos Adicionales.....	47
3.2 MONTAJE.....	48
3.2.1 PCB	48
3.2.2 Fuente.....	49
3.2.3 Estructura del prototipo.....	49
3.3 SOFTWARE.....	51
3.3.1 Entorno de programación.....	51
3.3.2 Plataforma IoT.	55
3.4 DESARROLLO DE PRUEBAS	57
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60
5. CONCLUSIONES	69
6. OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES.....	70
BIBLIOGRAFÍA.....	71
ANEXOS.....	77

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Dimensión del material particulado	18
Figura 2. Instrumento medidor de opacidad	23
Figura 3. Instrumento Triboeléctrico	23
Figura 4. Monitor de Atenuación Beta.....	25
Figura 5. Dispersión de Rayleigh y MIE	26
Figura 6. Arriba: Instrumento que funciona bajo retrodispersión. Abajo: Funcionamiento de la retrodispersión	26
Figura 7. Arriba: Instrumento que funciona bajo dispersión frontal. Abajo: Funcionamiento de la dispersión frontal [21]	27
Figura 8. Partes básicas del Internet de las Cosas [22].....	29
Figura 9. Placa de desarrollo ESP32 [23]	30
Figura 10. Caracterización del ADC.....	33
Figura 11. Placa de desarrollo ESP32 [23]	37
Figura 12. Tensión de salida vs Concentración de PM.....	38
Figura 13. Diseño del sensor GP2Y1010AU0F.....	39
Figura 14. Intervalos de tiempo requerido para el funcionamiento	39
Figura 15. Esquema de conexión con los elementos necesarios para controlar el pulso del LED.....	40
Figura 16. Sensor SDS011	41
Figura 17. Circuito del sensor SDS011	42
Figura 18. Sensor PMS5003.....	43
Figura 19. Definición de los pines.....	44
Figura 20. Sensor OPC-N2 [34]	45
Figura 21. Interior del sensor OPC-N2.....	46

Figura 22. Módulo SD	47
Figura 23. Esquema PCB diseñada.....	48
Figura 24. Estructura para el uso de los sensores.....	49
Figura 25. Diseño de la estructura	50
Figura 26. Vista frontal de la estructura	50
Figura 27. Visualización de datos en Thingspeak.....	55
Figura 28. Prototipo en ambiente de pruebas.....	58
Figura 29. Esquema para la segunda prueba	59
Figura 30. Resultados PM2.5. Prueba 1 con datos a) “crudos”, b) promediados cada minuto, c) promediados cada 5 minutos, d) promediados cada 10 minutos.	61
Figura 31. Ilustración Resultados PM10. Prueba 1 con datos a) “crudos”, b) promediados cada minuto, c) promediados cada 5 minutos, d) promediados cada 10 minutos.	63
Figura 32. Resultados PM2.5 Prueba con humo de cigarrillo	65
Figura 33. Resultados PM10. Prueba con humo de cigarrillo	67

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Valores máximos de PM establecidos por WHO [9], EU [10] y USA (EPA) [11].....	20
Tabla 2. Niveles de PM establecidos en Colombia.....	21
Tabla 3. Características de la tarjeta de desarrollo ESP32 [24].....	31
Tabla 4. Resultado de la caracterización y ajuste del ADC de la ESP-32	33
Tabla 5. Resumen de las características de los sensores utilizados en el trabajo e grado.....	36
Tabla 6. Conexiones GP2Y1010AU0F y ESP32.....	40
Tabla 7. Conexiones sensor SDS011 a la ESP32	42
Tabla 8. Conexiones del sensor PMS5003 a la ESP32	44
Tabla 9. Conexiones OPC-N2 a la ESP32.....	46
Tabla 10. Conexiones módulo SD a la ESP32	48
Tabla 11. Resultados de la prueba 1 para PM2.5.....	62
Tabla 12. Resultados de la prueba 1 para PM10.....	64
Tabla 13. Resultados de la prueba con humo de cigarrillo para PM2.5.....	66
Tabla 14. Resultados de la prueba con humo de cigarrillo para PM10.....	67

LISTA DE ANEXOS

Pág.

ANEXO A. Código completo	77
--------------------------------	----

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE SENSORES ÓPTICOS DE POLVO DE BAJO COSTO UTILIZANDO EL INTERNET DE LAS COSAS*

AUTOR: NÉSTOR DAVID ARIZA OSMA**

PALABRAS CLAVE: MATERIAL PARTICULADO, SENSORES DE POLVO, INTERNET DE LAS COSAS, MÓDULO WIFI, DISPERSIÓN DE LUZ.

DESCRIPCIÓN:

En el presente trabajo de investigación se realizó el estudio de tres sensores ópticos de polvo de bajo costo: GP2Y1010AU0F, SDS011, PMS5003, se dividió en dos pruebas: la primera en ambiente interior y la segunda exponiendo los sensores a cantidades elevadas de material particulado (humo de cigarrillo), llevándolos al máximo de su capacidad con el fin de establecer una comparación con el sensor de referencia OPC-N2. Se midió tanto PM2.5 como PM10 según lo permitiera el dispositivo. Los datos fueron analizados “crudos”, promediados cada minuto, cada 5 minutos y cada 10 minutos, evidenciando que a medida que se promedió, se obtuvo una mejor correlación entre cada sensor y la referencia. Los resultados arrojan que el sensor SDS011 es la opción más viable en cuanto a PM2.5 pues alcanzó un coeficiente de determinación $R^2=0.95$, por otra parte, en cuanto a PM10, los sensores obtienen coeficientes de determinación moderado para PMS5003 ($R^2=0.71$) y un coeficiente fuerte de $R^2=0.91$ para el SDS011. Adicional a esto, el documento presenta de manera detallada la forma en que se integraron los sensores al módulo WiFi, desde su conexión hasta el código de programación utilizado, de la misma forma se muestra la manera en la que se enviaron los datos inalámbricamente.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de telecomunicaciones. Director, Jaime Guillermo Barrero Pérez, Mg en Potencia Eléctrica.

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS AND COMPARISON OF LOW-COST OPTICAL DUST SENSORS USING THE INTERNET OF THE THINGS*

AUTHOR: NESTOR DAVID ARIZA OSMA**

KEY WORDS: PARTICLE MATTER, DUST SENSORS, INTERNET OF THE THINGS, WIFI MODULE, LIGHT SCATTERING.

DESCRIPTION:

In the current research work was carried out the study of three low cost optical dust sensors: GP2Y1010AU0F, SDS011, PMS5003, it was divided in two tests: the first one was on indoor environment and the second one exposing the sensors to high amounts of particle matter (cigarette smoke), taking them to their maximum capacity in order to establish a comparison with the reference sensor OPC-N2. Both PM2.5 and PM10 were measured as permitted by the device. The data was analyzed "raw", averaged each minute, each 5 minutes and each 10 minutes, showing that as the data was averaged, a better correlation was obtained between each sensor and the reference. The results reveal that the SDS011 sensor is the most viable option for PM2.5 as it reached a coefficient of determination $R^2 = 0.95$, on the other hand, for PM10 the sensors obtained coefficients of determination moderate for PMS5003 ($R^2 = 0.71$) and a strong coefficient of $R^2 = 0.91$ for the SDS011. In addition to this, the document presents in greater detail how the sensors were integrated with the WiFi module, since their connection to the programming code used, likewise it is shown the manner in which the data was sent wirelessly.

* Undergraduate dissertation

** Physical-Mechanical Engineering Faculty. Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering School. Director, Jaime Guillermo Barrero Pérez, Mg in Electric Power.

INTRODUCCIÓN

Se ha establecido a través de varios estudios, que el material particulado (PM) representa un gran peligro para la salud de las personas, ya que es el causante de múltiples enfermedades respiratorias y un alto índice de víctimas fatales. Según la Organización Mundial de la Salud, una de cada ocho muertes en el mundo se debe a la mala calidad del aire. En Colombia el Departamento Nacional de Planeación estimó que en el 2015 alrededor de 10.527 muertes y 67,8 millones de reportes de enfermedades fueron asociadas a esta problemática. A parte de esto se generan unos gastos en materia ambiental que van aumentando considerablemente a través de los años llegando a representar 1,93% del PIB en el 2015.¹

Hace algunos años, en la ciudad de Bucaramanga, las autoridades competentes no contaban con muchas estaciones, por su alto costo, para reportar oportunamente sobre la calidad del aire,². Es por esto que la Alcaldía inició una investigación en conjunto con la Universidad Industrial de Santander que tuvo como objetivo implementar varias estaciones de bajo costo para el monitoreo de calidad del aire (MCA) a lo largo de la ciudad, estas estaciones se implementaron, para medir MP, con sensores OPC-N2 con un costo cercano a U\$ 550.

El presente proyecto busca apoyar dicha investigación, ofreciendo como alternativa el uso de un sensor de polvo de menor costo que permita incrementar el número de unidades de monitoreo con el mismo presupuesto que ya se tenía destinado para ello. Para esto se evaluó el desempeño de tres sensores ópticos de polvo, comparando sus datos con el instrumento patrón, el sensor OPC-N2 de Alphasense.³

¹ IDEAM. Contaminación atmosférica [en línea]. Disponible en <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/calidad-del-aire>.

² ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA, et al. Calidad del aire - Área metropolitana de Bucaramanga. [En línea]. 2017. Disponible en http://www.amb.gov.co/downloads/Documentos/sub_ambiental/informe_calidad_de_l_aire_marzo_2017.pdf

³ ALPHASENSE. Alphasense user manual opc-n2 optical particle counter. [en línea]. 2015 Disponible en http://stg-uneplive.unep.org/media/aqm_document_v1/Blue%20Print/Components/Microcomputer%20and%20sensors/B.%20Dust%20Sensor%20Specifications/B.1%20Alphasense%20OPC%20N1/072-0300%20OPC-N2%20manual%20issue%203.pdf

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El ser humano y su existencia, biológicamente se encuentra adaptada a la calidad de capas, propiedades, minerales, etc. que el planeta tierra genera de manera natural. Y por ello, dentro de sus necesidades inmutables para la supervivencia se encuentra el consumo de agua limpia, el descanso de por lo menos 6 horas diarias y la respiración de aire puro.⁴

El tema que a nuestra investigación concierne, desde hace aproximadamente 20 años se ha convertido en una problemática de orden nacional e internacional, pues factores como la transformación de procesos económicos, políticas económicas con sus tendencias de inversión y desarrollo del mercado, han ocasionado que la estabilidad ambiental de la población haya sido afectada.

Como respuesta a estos daños, surge por parte de la OMS un límite permitido para la contaminación en el aire de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sin embargo, estos niveles varían según la política de Estado y a lo que sus actividades económicas se ajusten; de manera que en Colombia el Ministerio de Ambiente – entidad reguladora, permite una cifra de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y específicamente en Bucaramanga tenemos material particulado superiores a $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estos datos permiten entender la necesidad de adoptar medidas para no sobrepasar o disminuir estos niveles.

Teniendo en cuenta lo planteado sobre la calidad del aire y siendo el PM uno de los principales contaminantes, beneficioso es tanto para los ciudadanos como para los

⁴ MINSALUD. Plan Decenal de Salud Pública, 2012-2021. 2013. p. 65-66

inversionistas, determinar si es posible que un sensor de bajo costo sea utilizado de manera confiable para registrar en tiempo real las cantidades de material particulado en las estaciones meteorológicas que la Alcaldía va a implementar en la ciudad de Bucaramanga.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El material particulado PM, es causado principalmente por actividades humanas, estas incluyen la combustión de combustibles fósiles y los residuos de operaciones industriales. Así mismo, es el causante de enfermedades respiratorias graves, por lo que monitorear esta problemática se ha vuelto de vital importancia. Nuestra ciudad va incrementando cada vez más estudios en monitoreo de la calidad del aire, un claro ejemplo es la investigación que adelantó la Alcaldía de Bucaramanga junto con la UIS universidad Industrial de Santander y el apoyo de Colciencias y el sector privado para ofrecer una red de estaciones meteorológicas para MCA. La dependencia tanto temporal como espacial de las concentraciones de material particulado exige que existan varios puntos en donde se monitoree la actividad, debido a esto, utilizar un instrumento de alto costo para esta tarea sería algo impráctico. Esto trajo consigo la necesidad de crear sensores con nuevas tecnologías que reduzcan sustancialmente tanto el costo como el tamaño.

Es por esto que el presente proyecto estudia qué tan viable es utilizar un sensor de bajo costo en una red de estaciones meteorológicas que mantendrán informados a los ciudadanos en lo que a calidad del aire respecta.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general. Comparar los datos obtenidos por tres sensores de polvo (PM 2.5) distintos para determinar qué tan confiables son, todo esto entorno al Internet de las Cosas (IoT).

1.3.2 Objetivos específicos. Para dar cumplimiento al objetivo general de este trabajo, se realizan los siguientes objetivos específicos:

- Realizar la conexión de los tres sensores de polvo (PM2.5) a un sistema digital con conectividad “WI-FI”.
- Programar un sistema digital con WI-FI (el módulo ESP32) para enviar los datos leídos de los sensores a través de WI-FI tanto a un computador como a un dispositivo móvil.
- Realizar el análisis de datos en el PC, para determinar qué tan válidas son las mediciones obtenidas por los sensores y concluir sobre la confiabilidad de los sensores.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En el presente capítulo se introducirán los conceptos claves acerca del PM, su normativa tanto a nivel nacional como internacional, los principios de medición de PM y finalmente una descripción de IoT.

2.1 MATERIAL PARTICULADO

El material particulado (PM) es el término que se le atribuye a la mezcla de partículas sólidas o líquidas que son lo suficientemente pequeñas para quedar suspendidas en el aire. Algunas de ellas son el polvo, la suciedad, el humo y el hollín. Su tamaño variable permite que pueda ser apreciada a simple vista como también que solo se pueda ver con un microscopio.⁵

Se caracteriza generalmente según sus características físicas. La figura 1 muestra un ejemplo para comprender el tamaño del PM teniendo como referencia el diámetro de un cabello humano que suele ser de aproximadamente 70 micrómetros y por otra parte las concentraciones de PM que posteriormente serán explicadas.

⁵ EPA. Particulate matter (pm) pollution. [en línea]. 2015. Disponible en <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>

Figura 1. Dimensión del material particulado



Fuente: EPA. Particulate matter (pm) pollution. 2015. [en línea]. Disponible en <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>

2.1.1 PM2.5. El PM2.5 es considerado como una concentración de partículas con diámetro de 2.5 micrómetros o menos. Es conocido como polvo fino, partículas finas o material particulado respirable.

Las principales fuentes de PM2.5 según un estudio son las partículas secundarias que hacen referencia a sulfatos que provienen del dióxido de azufre que es emitido por industrias por lo general productoras de energía o nitratos que surgen de emisiones de óxidos de nitrógeno que provienen también de plantas generadoras de energía y vehículos que funcionan con combustibles fósiles, así mismo la combustión primaria y el suelo son las demás fuentes que generan PM2.5.⁶

⁶ KOISTINEN J, Kimmo, et al. Source apportionment of pm2.5 in personal exposures and residential indoor, outdoor and workplace microenvironments in the Helsinki phase of the EXPOLIS study. 2004. p36–46

2.1.2 PM10. El PM10 hace referencia a la concentración de partículas que tienen un diámetro de 10 micrómetros o menos (2.5-10 μm), son visibles para el ojo y está compuesto esencialmente por polvo. Se le conoce también como partículas gruesas.

Las fuentes de PM10 incluyen actividades donde se rompe o se muele material por ejemplo sitios de construcción o minas y el polvo de las carreteras siendo una concentración que se transporta a través de largas distancias.⁷

2.1.3 Efectos del PM en la salud. La exposición tanto a PM2.5 como a PM10 causa efectos nocivos en la salud ya que estas partículas son lo suficientemente pequeñas como para viajar por el sistema respiratorio hasta llegar a los bronquios y pulmones, sin embargo en el caso de PM10 algunas partículas son filtradas por las cavidades mucosas por lo que el riesgo al exponerse a PM10 es menor que al PM2.5, pero esto no es una excepción para que el PM10 sea un indicativo de calidad del aire pues a la larga ambos factores van a causar enfermedades respiratorias graves.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) el PM es causante de morbilidad respiratoria y cardiovascular agravando enfermedades como el asma, también se evidencia riesgo de mortalidad cardiovascular y respiratoria, inclusive cáncer de pulmón. Las personas con problemas respiratorios ya existentes como también personas mayores y niños son los más vulnerables, por ejemplo, el PM puede contribuir a que los pulmones de un niño no se desarrollen como deberían, afectando así, su funcionamiento a largo plazo. Lastimosamente no se cuenta con evidencia de un nivel seguro donde la exposición al PM no genere efectos adversos para la salud, pero sí está claro que es mejor prevenir ya que efectivamente si va aumentando los riesgos de enfermedades.⁸

⁷ ZHU, Lei, et al. Transport pathway and potential source of pm10 in Beijing. Atmospheric Environment. 2011. p594– 604

⁸ WORLD HEALTH ORGANIZATION. Policy implications for countries in eastern Europe, Caucasu and central Asia

2.1.4 Regulación internacional. Existen varias características que hay que tener en cuenta para monitorear PM, como por ejemplo su composición química, distribución de partículas según su tamaño, variaciones diarias con sus valores pico y número de concentración de partículas. Sin embargo, la más importante debido a que es la más relacionada a los efectos en la salud es la que tiene que ver con el tamaño de las partículas. En la tabla 1 se pueden apreciar algunas regulaciones que se han establecido a nivel mundial.

Tabla 1. Valores máximos de PM establecidos por WHO, EU y USA (EPA)

	Class	Maximum permitted
WHO	Pm2.5	10ug/m ³ (annual mean)
		25ug/m ³ (24-hour mean)
	PM10	20ug/m ³ (annual mean)
		50ug/m ³ (24-hour mean)
EU	PM10	40ug/m ³ (annual mean)
		50ug/m ³ (24-hour mean)
USA	PM2.5	15ug/m ³ (annual mean)
		35ug/m ³ (24-hour mean)
	PM10	150ug/m ³ (24-hour mean)

Fuente: WORLD HEALTH ORGANIZATION. WHO air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. [en línea]. 2005. Disponible en http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf, EUROPEAN COMMISSION. Air quality standards. [en línea]. Disponible en <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>, EPA. National ambient air quality standards. [en línea]. 2006. Disponible en <http://www.epa.gov/air/criteria.html>

2.1.5 Panorama en Colombia. En nuestro país tan solo hasta este año entró en vigor la resolución 2254 de 2017 donde se establecen los niveles máximos de PM, estos se pueden observar en la tabla 2. Se espera que para el año 2030 se tenga una concentración de 30 µg/m³ y 15 µg/m³ respectivamente para el periodo anual.⁹

⁹ SOSTENIBLE, M. D. A. D. Resolución 2254. [en línea]. Disponible en <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/96-res%202254%20de%202017.pdf>

Tabla 2. Niveles de PM establecidos en Colombia

Contaminante	Nivel máximo permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de exposición
PM10	50	Anual
	75	24 horas
Pm2.5	25	Anual
	37	24 horas

Fuente: SOSTENIBLE, M. D. A. D. Resolución 2254. [en línea]. Disponible en <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/96-res%202254%20de%202017.pdf>

En Colombia se han hecho varios estudios sobre los niveles de PM en las principales ciudades del país. En el año 2006, en Santa Marta estudios arrojan cifras superiores a los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en cuanto a Partículas Suspendidas Totales (PST)¹⁰. En el año 2009, en Bogotá se estudiaron los niveles de PM10 de 4 colegios distritales ubicados en cercanías a vías de alto tráfico vehicular, donde se obtuvieron concentraciones en rangos de 55 a $91 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ¹¹. En ese mismo año en el Valle de Aburrá, Antioquia, se reportaron niveles de PM10 que superan los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ¹². En el 2014 la OMS reportó en su base de datos los siguientes valores de concentración promedio anual de PM10 y PM 2.5 respectivamente: Para nuestra ciudad Bucaramanga 47 y $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$, cifras que en comparación con ciudades como Cochamba (Bolivia) 60 y $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Santiago de Chile 64 y $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ parecen ser alentadoras, pero de igual forma ya están por encima de los niveles recomendados por la OMS.

¹⁰ GARCÍA, Francisco, et al. Distribución espacial y temporal de la concentración de material particulado en Santa Marta, Colombia. Revista Facultad Nacional de Salud Pública. [en línea]. 2006. Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=12024208>

¹¹ FRANCO, Juan Felipe, et al. Niveles de material particulado en colegios distritales ubicados en vías con alto tráfico vehicular en la ciudad de Bogotá: estudio piloto. [en línea]. 2009. Disponible en http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302009000300010

¹² BEDOYA, Julián; MARTÍNEZ, Elkin. Validad del aire en el valle de aburrá Antioquia –Colombia. Dyna. Universidad Nacional de Colombia. p7-15

Respecto a Bucaramanga, encontramos que en un periodo de tres años no se reportó oficialmente este agente contaminante, tan solo hasta marzo de 2017 el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB) en conjunto con la Universidad Pontificia Bolivariana, reportaron valores que alcanzan los $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10.

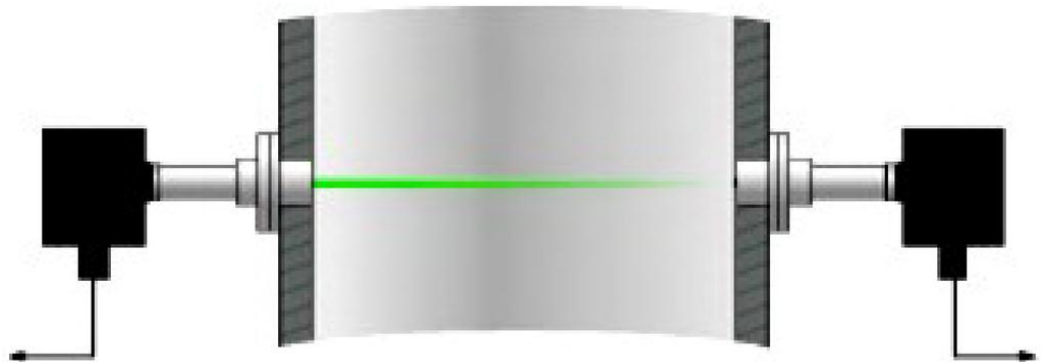
2.2 SENSORES DE POLVO

Muchos de los dispositivos utilizados para sensor polvo son calibrados a través de técnicas gravimétricas con el fin de obtener una concentración de material particulado en unidades $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para estos instrumentos existen varios mecanismos de sensado, a continuación, se describirán algunos de ellos.

2.2.1 Opacidad. El principio básico de funcionamiento de los instrumentos medidores de opacidad (figura 2), consiste en un rayo de luz visible que viaja a través de un compartimiento que posee un receptor óptico, el cual se encarga de medir la atenuación en la intensidad de la luz debido a la absorción y la dispersión que ocurre cuando el rayo de luz se encuentra con una partícula.

Este mecanismo depende de muchos factores como el tamaño de la partícula, su composición química, color, forma e índice de reflexión y esto conlleva a que necesite muchos procesos de calibración por lo que tiene como desventaja que no es lo suficientemente preciso para medir pequeños cambios de concentración.

Figura 2. Instrumento medidor de opacidad



Fuente: CASTELLANI, Beatrice, et al. Comparative análisis of monitoring devices for particulate content in exhaust gases. [en línea]. 2014. Disponible en <https://www.mdpi.com/2071-1050/6/7/4287/htm>

2.2.2 Efecto triboeléctrico. El efecto triboeléctrico es un fenómeno por el cual un material es cargado eléctricamente debido al contacto con otro.

Presenta ciertas desventajas, depende mucho de la velocidad de las partículas que viajan a través del sistema y del mismo flujo en sí, es decir, si el aire tiene partículas líquidas o si las partículas tienen carga variable. Los dispositivos basados en este principio son muy sensibles a bajas concentraciones de PM y deben ser calibrados en cada sitio en el que se vaya a utilizar.

Figura 3. Instrumento Triboeléctrico



Fuente: IBERFLUID. Detector de partículas. [En línea]. Disponible en <http://www.iberfluid.com/es/producto/187-detector-de-particulas>

2.2.3 Atenuación Beta. Es el mecanismo que se aprovecha de la atenuación de partículas Beta que no son más que electrones moviéndose rápidamente, es decir, cuando un rayo beta colisiona con un material, su energía puede ser absorbida o reflejada, y esa atenuación es proporcional a la cantidad de partículas por las que atraviesa.

La tecnología de Atenuación Beta está compuesta por dos partes, la primera es una fuente de rayos beta que no son perjudiciales para la salud, por lo general es de Carbono-14 y la otra parte es el receptor, donde se suele usar dispositivo fotodetector.

La ventaja que poseen los instrumentos basados en este principio es que, por su naturaleza, su medida de concentración de PM no depende ni de composición química, tamaño o color de las partículas.¹³

En la figura 4 se aprecia un Monitor de Atenuación Beta (BAM) donde el aire es transportado por un tubo hasta una banda transportadora que se encarga de mover la muestra desde el filtro hasta la fuente de rayos beta. Debido a la naturaleza del proceso, los sistemas basados en este principio no pueden entregar una respuesta rápida, su medida en un solo punto puede no ser representativa y su banda transportadora es propensa a problemas de mantenimiento.

¹³ THERMOFISHER. Beta Attenuation Technology for Particulate Matter Measurement. [en línea]. Disponible en <https://www.thermofisher.com/co/en/home/industrial/environmental/environmental-learning-center/air-quality-analysis-information/beta-attenuation-technology-particulate-matter-measurement.html>

Figura 4. Monitor de Atenuación Beta



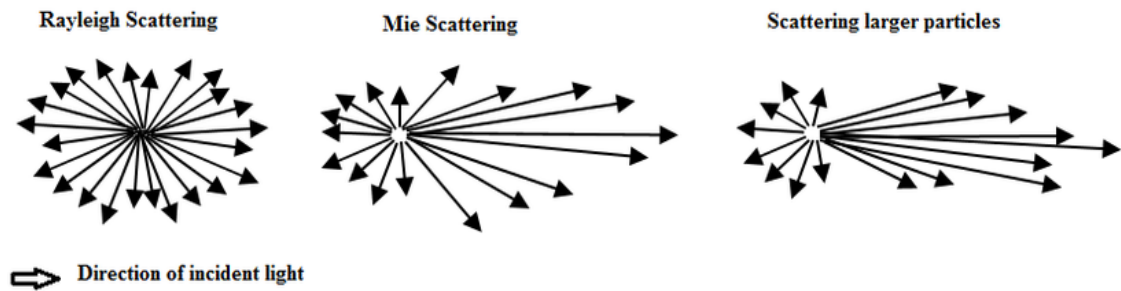
Fuente: ALTECH USA. Beta 5M. [en línea]. Disponible en <http://altechusa.com/beta-5m-beta-attenuation-particulate-monitor.html>

2.2.4 Dispersión de Luz. Los instrumentos basados en este principio miden la cantidad de luz que se refleja o se refracta de una fuente al chocar con una partícula. Dicha fuente se utiliza en forma de pulsos lo que ayuda a que haya poca interferencia ya que la muestra solo se tomará mientras la fuente de luz esté encendida, además de esto hay una medición paralela de la intensidad de la luz para estar al tanto de la degradación de la fuente misma.

A diferencia de los dispositivos anteriores, este requiere un instrumento extra para poder visualizar sus lecturas.

Este principio se basa fundamentalmente en dos teorías, cuando la longitud de onda de la luz es mayor que el radio de la partícula ocurre lo que se conoce como dispersión de Rayleigh y cuando la longitud de onda es similar al radio de la partícula se da la dispersión de MIE tal y como se aprecia en la figura 5.

Figura 5. Dispersión de Rayleigh y MIE

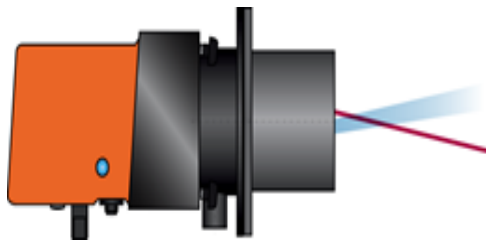


Fuente: ALKHOLIDI G, Abdulsalam; SAEED A, Khaleel. Free Space Optical Communications – Theory and Practices. 2014. p159-212

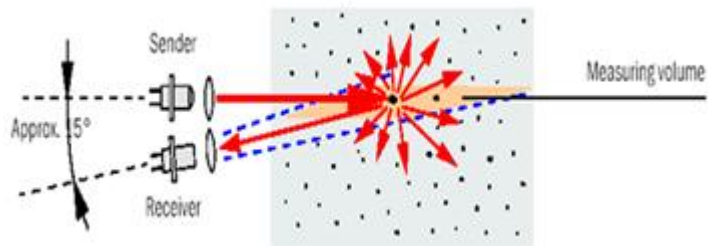
Existen dos formas en las que se utiliza este fenómeno:

- Retrodispersión: Hace referencia al proceso en el cual la luz es reflejada hacia la fuente (Figura 6 Arriba). Suele utilizarse midiendo la luz en ángulos pequeños (Figura 6 Abajo) debido a que le da más capacidad de penetrar las concentraciones de partículas, pero tiene como desventaja que lo hace menos sensible a las partículas de PM2.5¹⁴.

Figura 6. Arriba: Instrumento que funciona bajo retrodispersión. Abajo: Funcionamiento de la retrodispersión



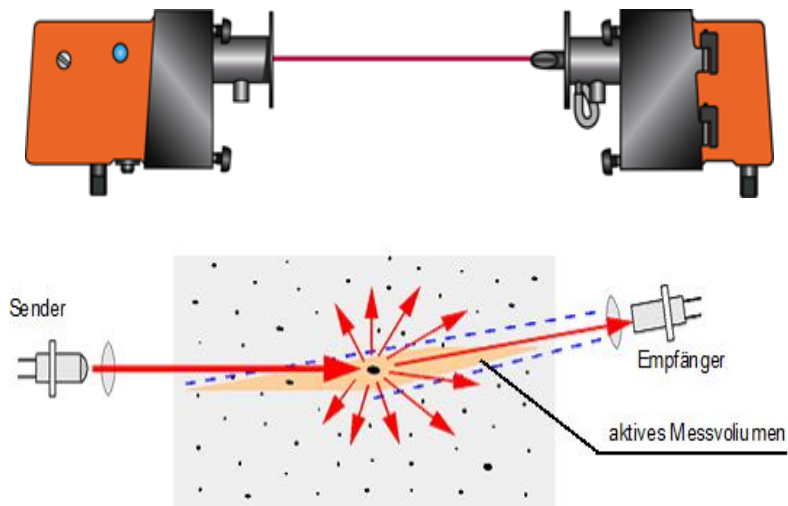
¹⁴ CEMTEK ENVIRONMENT. Particulate matter monitoring technologies and detection principles. [en línea]. 2011. Disponible en <https://slideplayer.com/slide/5264610/>



Fuente: CEMTEK ENVIRONMENT. Particulate matter monitoring technologies and detection principles. [en línea]. 2011. Disponible en <https://slideplayer.com/slide/5264610/>

Dispersión Frontal: Sucede cuando la luz en su mayoría termina viajando en la misma dirección en la que se emitió. A diferencia de la retrodispersión, en la dispersión frontal su elemento receptor se ubica generalmente frente a la fuente emisora (Figura 7 Arriba) y se mide la cantidad de luz que atraviesa a la muestra (Figura 7 Abajo)

Figura 7. Arriba: Instrumento que funciona bajo dispersión frontal. Abajo: Funcionamiento de la dispersión frontal



Fuente: CEMTEK ENVIRONMENT. Particulate matter monitoring technologies and detection principles. [en línea]. 2011. Disponible en <https://slideplayer.com/slide/5264610/>

Los sensores diseñados bajo este principio presentan ciertas limitaciones a la hora de su funcionamiento. Por lo general las fuentes emisoras de luz poseen baja vida

útil lo que va afectando en cierta medida la confiabilidad del sensor. Otra de sus limitaciones es que la longitud de onda medida depende mucho del ángulo en el que se haga, esto hace que este tipo de sensores dependa mucho de la aplicación en la que se va a utilizar.

2.3 INTERNET DE LAS COSAS (IOT)

El Internet de las Cosas más allá de un concepto fantasioso o de una tendencia, es una manera real y práctica de monitorear en tiempo real un objeto físico o un proceso a través de la conexión a internet.

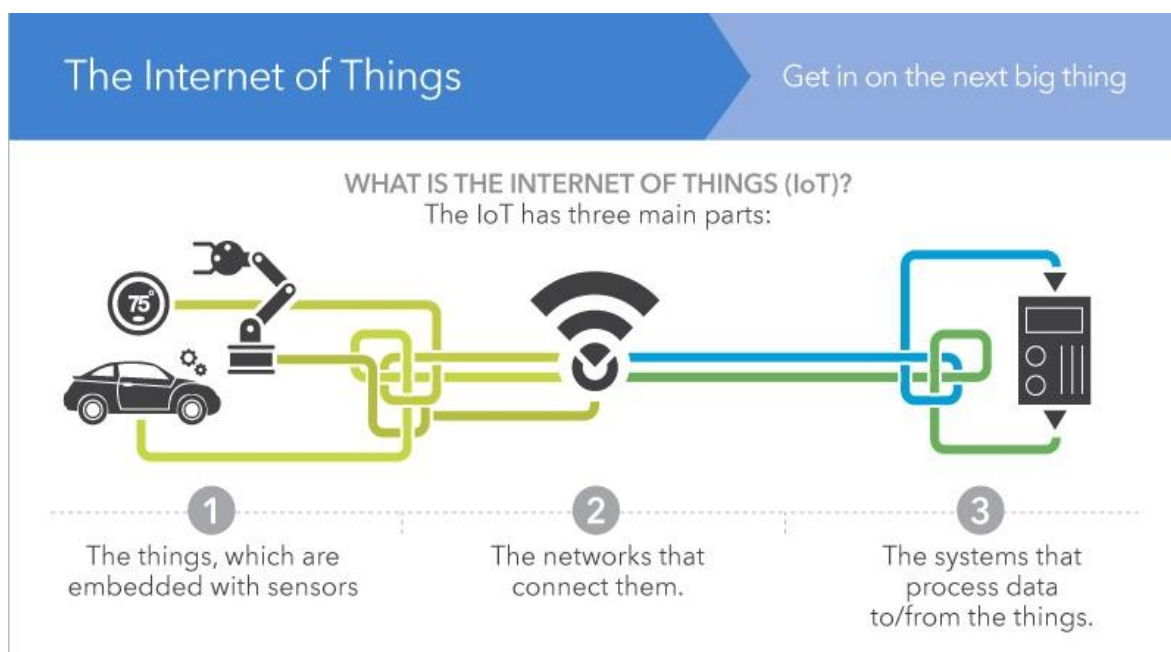
Una vez se tenga el objeto con su sistema embebido, sensores y conectividad, se necesita un protocolo de comunicación IoT para enlazar los dispositivos al sistema que procesará los datos. Estos protocolos se agrupan en dos categorías:

- **Cliente/Servidor:** En este modelo el dispositivo funciona como el cliente que se conecta al servidor que posee la información y responde a las solicitudes realizadas por dicho cliente. El protocolo que más destaca en este grupo es HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*), el cual tiene como ventaja que los mensajes que se envían pueden contener grandes cantidades de información. Se recomienda usar cuando la aplicación posee una infraestructura conocida, por ejemplo, el conocer que un servidor tiene una dirección IP (*Internet Protocol*) específica y está conectado a un puerto determinado, en ese caso el cliente puede acceder y realizar sus peticiones.
- **Publicar/Subscribir:** En este protocolo los dispositivos se conectan a un “tópico” provisto por un intermediario en el cual se publican los datos. En este conjunto resalta el protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*), el cual se

encarga de utilizar un *broker* como el servidor intermediario que controla los datos. Se recomienda usar cuando el ancho de banda es limitado y cuando la infraestructura del sistema es desconocida, por ejemplo, el caso de un dispositivo remoto que cambia de redes.

Finalmente, en la figura 8 se observan las partes cruciales de todo sistema IoT, tal y como se explicó anteriormente.

Figura 8. Partes básicas del Internet de las Cosas



Fuente: KOCHNAR, Rajat. Internet of Things (IoT) for Dummies. [en línea]. 2016. Disponible en <https://www.netmanias.com/en/post/blog/10873/iot/internet-of-things-iot-for-dummies>

3. MONTAJE E IMPLEMENTACIÓN

En el presente capítulo se describe de manera detallada la forma como se realizó el trabajo de grado, esto implica la explicación tanto del hardware utilizado (tarjeta de desarrollo, sensores y dispositivos adicionales) como también del software que se utilizó para el desarrollo del proyecto.

3.1 HARDWARE

A continuación, se describe el hardware utilizado detallando las cosas más importantes, como por ejemplo las conexiones y en el caso de los sensores su principio básico de funcionamiento.

3.1.1 Placa de desarrollo

Figura 9. Placa de desarrollo ESP32



Fuente: DOIT. ESP32 DevKit V1. [en línea]. 2016. Disponible en https://es.aliexpress.com/store/product/ESP32-ESP-32-ESP-32S-Development-Board-WiFi-Bluetooth-Ultra-Low-Power-Consumption-Dual-Cores-ESP32/2778022_32829400260.html

La placa de desarrollo con conectividad WiFi seleccionada es la ESP32 DevKit V1 (figura 9) debido a que cumple con las necesidades que son:

- Conectividad WiFi para la transmisión de datos.
- ADC integrado para la lectura de señales analógicas.
- Interfaz UART y SPI.
- Bajo costo.
- Bajo consumo eléctrico.
- Tamaño reducido.

Esta tarjeta posee un microprocesador de doble núcleo, permitiendo que uno de ellos se dedique exclusivamente para la comunicación inalámbrica lo que le da más robustez en proyectos de IoT. Sus características principales se listan en la tabla 3.

Tabla 3. Características de la tarjeta de desarrollo ESP32 [24]

Características	ESP32
Procesador	Tensilica Xtensa LX6 32 bit Dual-Core a 160 MHz(hasta 240 MHz)
RAM	520 kB
Memoria Flash	Hasta 16 MB
ROM	448 kB
Alimentación	2.2 a 3.6 V
Consumo de corriente	80 mA (promedio) 225 mA máximo
Consumo en modo Deep Sleep	2.5 uA (10 uA RTC + memoria RTC)
WiFi	802.11 b/g/n (hasta +20 dBm) WEP, WPA
Bluetooth	v4.2 BR/EDR y BLE
UART/I2C/SPI/I2S	3/2/4/2
ADC	18 (12 bit)

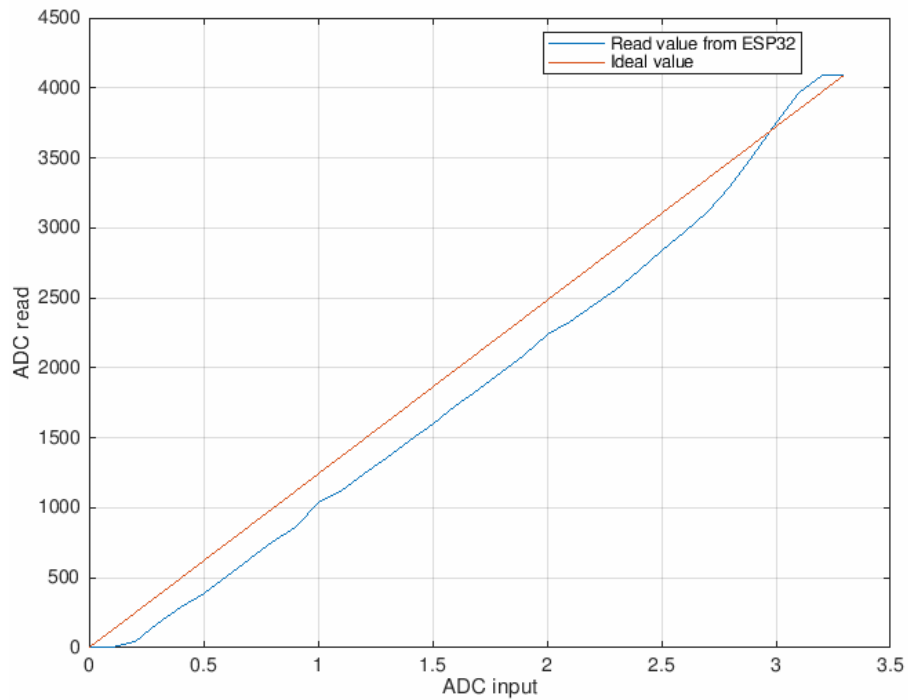
Características	ESP32
DAC	2 (8 bit)
Encriptación por hardware	Sí (AES,SHA,RSA,ECC)
Arranque seguro	Sí

Fuente: GONZÁLEZ, Oscar. Comparativa y análisis completo de los módulos Wifi ESP8266 Y ESP32. [en línea]. 2017. Disponible en <https://blog.bricogeek.com/noticias/electronica/comparativa-y-analisis-completo-de-los-modulos-wifi-esp8266-y-esp32/>

La ESP-32 tiene tres modos de funcionamiento en cuanto su conectividad inalámbrica, puede funcionar como AP (*Access Point*) sirviendo de módem inalámbrico para que otros dispositivos se conecten a la tarjeta y obtengan internet, puede funcionar también en modo *Station* donde la ESP-32 actúa como cliente inalámbrico conectándose a un router para conseguir conexión a la red e inclusive puede funcionar como AP y *Station* al mismo tiempo. Para el caso del proyecto la ESP-32 es utilizada en modo *Station* conectándose a internet gracias a que posee WiFi integrado y de esta forma puede enviar o recibir datos. Funcionando como *Station* para la transmisión de datos, la ESP32 alcanza un consumo de 250mA que, si bien puede parecer alto, lo puede recompensar alternando su funcionamiento con el modo *Deep Sleep* el cual consiste en apagar su núcleo principal, la mayor parte de la RAM y los periféricos, manteniendo solo el co-procesador de bajo consumo y la memoria RTC (*Real Time Clock*), esto hace que se consuman como máximo 15[uA].

Debido a que se tiene un sensor de PM analógico fue necesario analizar el comportamiento del ADC de la ESP-32 que se va a utilizar, con el fin de obtener una medida más confiable. En la figura 10 se observa una comparación gráfica entre los valores que lee el ADC respecto al tester de referencia.

Figura 10. Caracterización del ADC



Para reducir errores, se realizó una regresión con ayuda de MATLAB y se encontró que con el siguiente ajuste polinomial de grado 3 se redujo el error considerablemente.

$$V = -0.00000001252 V_o^3 + 0.00001357 V_o^3 + 1.095V_o + 144.1;$$

Los resultados antes y después del ajuste se sintetizaron en la tabla 4.

Tabla 4. Resultado de la caracterización y ajuste del ADC de la ESP-32

Tensión de entrada	Valor inicial Del ADC	Valor real del ADC	Error [%]	ADC con ajuste	Error [%]
0.2	48	248.18	80.66	196.69	20.75
0.3	176	372.27	52.72	319.6	14.15

Tensión de entrada	Valor inicial Del ADC	Valor real del ADC	Error [%]	ADC con ajuste	Error [%]
0.4	288	496.36	41.98	460.29	7.27
0.5	393	620.45	36.66	583.47	5.96
0.6	507	744.55	31.90	697.38	6.33
0.7	633	868.64	27.13	850.03	2.14
0.8	755	992.73	23.95	971.42	2.15
0.9	866	1116.82	22.46	1109.68	0.64
1	1041	1240.91	16.11	1234.6	0.51
1.1	1113	1365.00	18.46	1375.32	0.76
1.2	1248	1489.09	16.19	1504.03	1.00
1.3	1356	1613.18	15.94	1634.98	1.35
1.4	1479	1737.27	14.87	1762.53	1.45
1.5	1600	1861.36	14.04	1887.26	1.39
1.6	1732	1985.45	12.77	2012.8	1.38
1.7	1843	2109.55	12.64	2127.866	0.87
1.8	1966	2233.64	11.98	2255.38	0.97
1.9	2095	2357.73	11.14	2371.1	0.57
2	2238	2481.82	9.82	2489.54	0.31
2.1	2325	2605.91	10.78	2605.98	0.00
2.2	2445	2730.00	10.44	2718.72	0.41
2.3	2559	2854.09	10.34	2825.26	1.01
2.4	2694	2978.18	9.54	2940.73	1.26
2.5	2841	3102.27	8.42	3070.12	1.04
2.6	2965	3226.36	8.10	3188.79	1.16
2.7	3120	3350.45	6.88	3326.31	0.72
2.8	3292	3474.55	5.25	3451.56	0.66
2.9	3517	3598.64	2.27	3597.11	0.04
3	3759	3722.73	0.97	3754.68	0.86
3.1	3967	3846.82	3.12	3905.64	1.53
3.2	4095	3970.91	3.12	3995.94	0.63
3.3	4095	4095	0.00	4095	0.00

Para conectar los sensores que utilizan protocolo UART, la ESP32 posee tres puertos de comunicación serial, el primero de ellos (UART0) es usado generalmente para la programación y durante el reset de la tarjeta, el segundo puerto (UART1) es utilizado por la *SPI Flash* y finalmente el tercer puerto (UART2) se puede utilizar libremente. Afortunadamente, la ESP32 está diseñada como un arreglo de pines matricial permitiendo reasignar los pines de tal forma que se puedan usar sin ningún problema.

En el caso de los puertos SPI sucede algo diferente, la ESP32 dispone de 4 puertos que utilizan este protocolo, sin embargo, los dos primeros (SPI0, SPI1) son dedicados para el caché que utiliza la *SPI Flash* y no se pueden utilizar, los dos restantes (*VSPI*, *HSPI*) se pueden usar sin ningún inconveniente.

Como todo sistema digital, la ESP32 corre el riesgo de bloquear su funcionamiento, esta situación ya se encuentra bajo control, debido a que se implementó un *watchdog*, que no es más que un contador que reinicia el sistema cuando llega a su valor máximo y el ciclo de procesos no ha comenzado nuevamente.

3.1.2 Sensores. Los sensores seleccionados para este proyecto fueron los siguientes:

- GP2Y1010AU0F (Sharp): Dispersión de luz, A/D
- SDS011 (Nova Fitness): Dispersión de luz, UART
- PMS5003 (Plantower): Dispersión de luz, UART
- OPCN2 (Alphasense): Dispersión de luz, SPI (Patrón)

Estos sensores fueron escogidos principalmente por su bajo costo y tamaño reducido, además de esto, todos se alimentan a 5[V] y puede conectarse directamente a la tarjeta de desarrollo.

El sensor que se utilizó como referencia fue el OPC-N2 pues es un dispositivo que tiene propiedades de calidad y goza de buena fama a nivel internacional, debido a que fue evaluado en laboratorio y pruebas de campo, presentando una buena correlación frente a equipos certificados.^{15, 16}

Los cuatro sensores constan básicamente de una pequeña cámara de medición donde se posiciona una fuente de luz ya sea un diodo emisor o un láser, un elemento fotorreceptor y un conjunto de lentes de enfoque, por ende, su principio de funcionamiento es la dispersión de luz (*light scattering*). Los sensores cuentan con un pequeño ventilador que permite que el flujo de aire fluya UNIFORME ...a través de ellos, a excepción del sensor GP2Y1010AU0F.

La tabla 5 presenta un resumen de las características de los sensores comerciales utilizados en el trabajo de grado: GP2Y1010AU0F (Sharp Electronics Co., Japón), SDS011 (Nova Fitness Co., China), PMS5003 (Beijing Plantower Co., China) y OPC-N2 (Alphasense, UK).

Tabla 5. Resumen de las características de los sensores utilizados en el trabajo de grado.

	GP2Y1010AU0F	SDS011	PMS5003	OPC-N2
Dimensiones[mm]	46x30x18	71x70x23	50x38x21	75x63.5x60
Tensión de alimentación [V]	3.3-7	4.7-5.3	4.5-5.5	4.8-5.2
Corriente en funcionamiento [mA]	11	70	≤100	175

¹⁵ AQ-SPEC. Field evaluation Alphasense OPC-N2 sensor. [en línea]. 2015. Disponible en <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/alphasense-opc-n2---field-evaluation.pdf>

¹⁶ AQ-SPEC. Laboratory evaluation Alphasense OPC-N2 PM sensor. [en línea]. 2015. Disponible en <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/alphasense-opc-n2---lab-evaluation.pdf?sfvrsn=2>

	GP2Y1010AU0F	SDS011	PMS5003	OPC-N2
Rango de tamaño de medida [um]	1.0-2.5	0.3-10	0.3-10	0.38-17
Rango de concentración [ug/m^3]	0-467	0-999 (for PM2.5)	Rango efectivo: 0-500 Máximo rango: 1000 (for PM2.5)	0.01-1500x10^3 (for PM10)
PMx Estimado	PM2.5	PM2.5, PM10	PM1, PM2.5, PM10	PM1, PM2.5, PM10
Precio aproximado [U\$]	7	17	16	500

3.1.2.1 Sensor GP2Y1010AU0F

Figura 11. Placa de desarrollo ESP32



Fuente: SPARKFUN. Sensor GP2Y1010AU0F. [en línea]. 2015. Disponible en <https://www.sparkfun.com/products/9689>

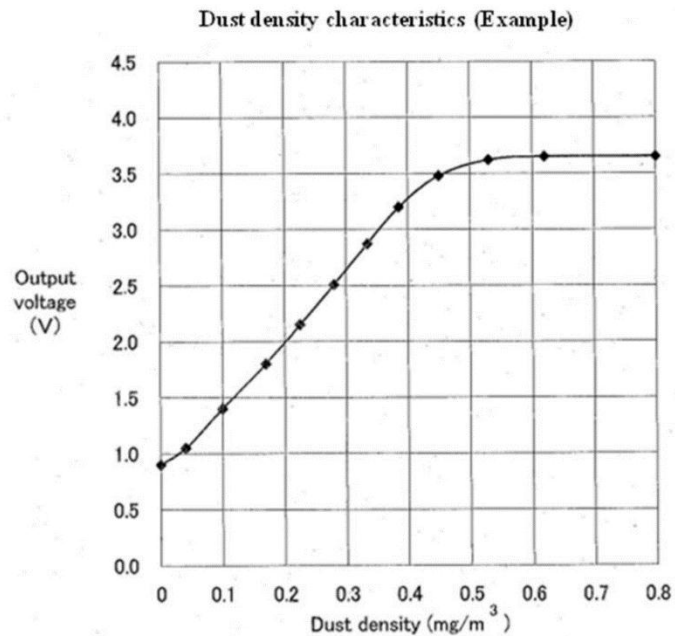
El sensor GP2Y1010AU0F (figura 11) entrega una tensión analógica en función de la lectura de PM que lleva a cabo (figura 12), esa tensión se puede convertir a

concentración de PM 2.5 gracias a unas pruebas realizadas por Chris Nafis en 2012.

17

$$\text{Densidad de polvo} = [(0.172 * V_{\text{leído}}) - 0.0999] * 1000 \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right] \quad (1)$$

Figura 12. Tensión de salida vs Concentración de PM

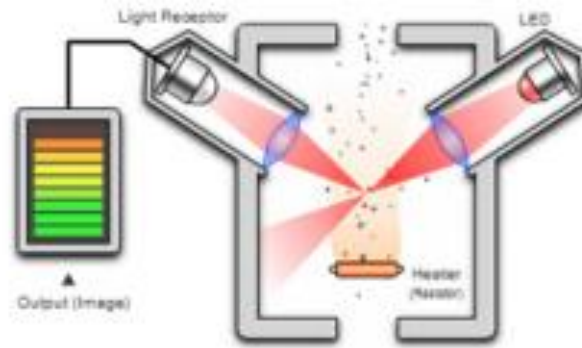


Fuente: SHARP. Application note of Sharp dust sensor GP2Y1010AU0F. [en línea]. 2005. Disponible en http://www.sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y1010au_appl_e.pdf

En la figura 13 se observa su principio físico de funcionamiento, conocido como dispersión de luz (sección 2.2.4), también se muestra cómo se crea una corriente ascendente gracias a su resistencia de calentamiento; la fuente de luz y su elemento receptor se disponen de forma cruzada en la cámara de medición.

¹⁷ NAFIS, Chris. Air quality monitoring. [en línea]. 2012. Disponible en <http://www.howmuchsnow.com/arduino/airquality/>

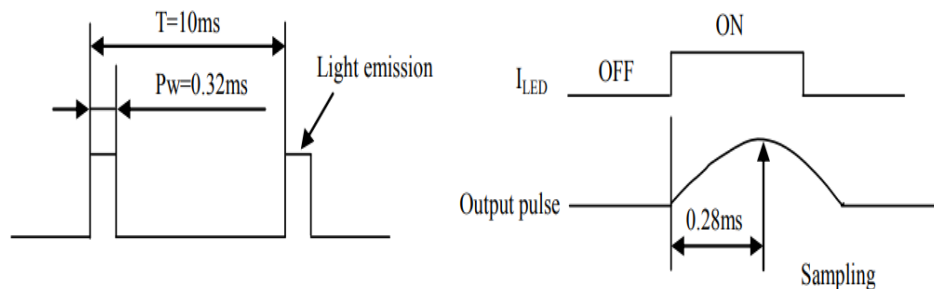
Figura 13. Diseño del sensor GP2Y1010AU0F



Fuente: BUDDE, Matthias, et al. Investigating the use of commodity dust sensors for embedded measurement of particulate matter. Karlsruhe Institute of Technology. 2012

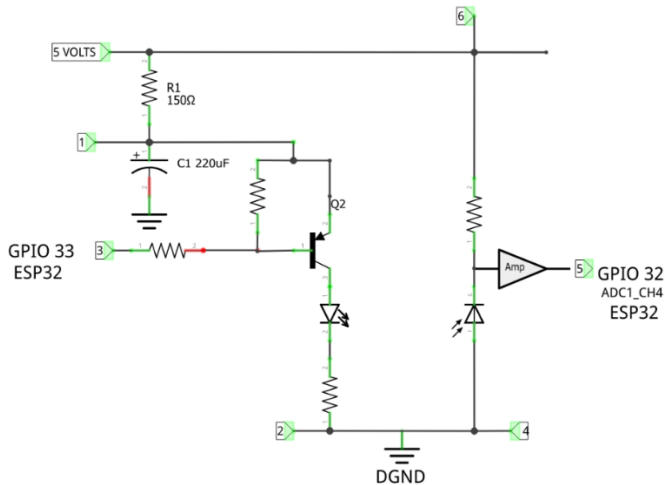
Para el correcto funcionamiento del sensor, el fabricante recomienda tanto la excitación del LED como la lectura del elemento fotorreceptor se realicen en intervalos de tiempo establecidos como se observa en la figura 14. Además, su configuración de fábrica requiere el uso de un capacitor de 220[uF] y una resistencia de 150[Ω] (ver figura 15).

Figura 14. Intervalos de tiempo requerido para el funcionamiento



Fuente: SHARP. Application note of Sharp dust sensor GP2Y1010AU0F. [en línea]. 2005. Disponible en http://www.sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y1010au_appl_e.pdf

Figura 15. Esquema de conexión con los elementos necesarios para controlar el pulso del LED



En este orden de ideas, en la tabla 5 se indican las conexiones realizadas con la tarjeta de desarrollo.

Tabla 6. Conexiones GP2Y1010AU0F y ESP32

Sensor GP2Y1010AU0F	ESP32
Tensión del LED (Pin 1)	Entre R y C.
Tierra del LED (Pin 2)	GND
LED (Pin 3)	GPIO 33
Tierra (Pin 4)	GND
Tensión de salida (Pin 5)	GPIO 32 (ADC1_CHANNEL4)
Tensión de alimentación (Pin 6)	5V

3.1.2.2 Sensor SDS011

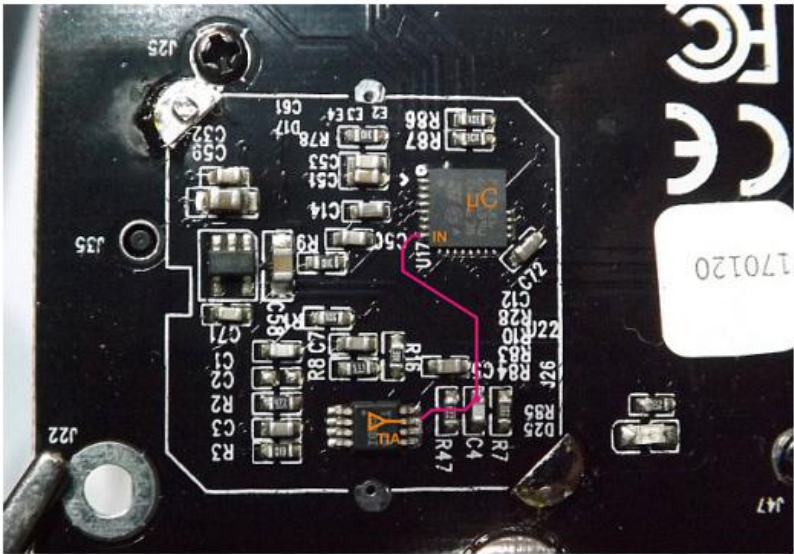
Figura 16. Sensor SDS011



Fuente: NOVA FITNESS. Nova Fitness SDS011 Air Quality Sensor. [En línea]. 2015. Disponible en <https://es.aliexpress.com/item/32814589166.html>

El sensor SDS011 (figura 16) funciona bajo el principio de dispersión de luz (sección 2.2.4), donde un amplificador de transimpedancia se encarga de transformar la cantidad de luz que ha sido dispersa en una señal de intensidad variable que posteriormente es analizada por un microprocesador de 8 bit tal como se ve en la figura 17.

Figura 17. Circuito del sensor SDS011



Fuente: LAQUAI, Bernd. Assessment of Measurement Uncertainties for a SDS011 low-cost PM sensor from the Electronic Signal Processing Perspective. 2017

El sensor utiliza el protocolo de comunicación UART permitiendo una fácil integración con la tarjeta de desarrollo ya que ambos dispositivos manejan tensión de 3.3 [V] en su lógica. Las conexiones realizadas para tener el sensor en funcionamiento se observan en la tabla 6.

Tabla 7. Conexiones sensor SDS011 a la ESP32

SDS011	ESP32
NC (Pin 1)	No conectado
1um (Pin 2)	No conectado
Tensión de alimentación(Pin 3)	5 V
2.5um (Pin 4)	No conectado
Tierra (Pin 5)	GND

SDS011	ESP32
RX del UART (Pin 6)	No conectado
TX del UART (Pin 7)	GPIO 16 (RX UART 2)

3.1.2.3 Sensor PMS5003

Figura 18. Sensor PMS5003



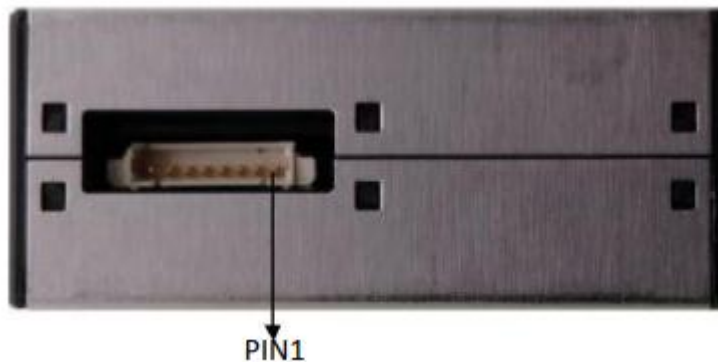
El sensor PMS5003 (figura 18) también se basa en el principio de dispersión de luz, más específicamente en la dispersión de MIE (sección 2.2.4), midiendo la cantidad de luz dispersa en cierto ángulo¹⁸ para que finalmente un microprocesador reciba esa señal y pueda dar una respuesta de forma digital.

De igual forma que el sensor SDS011, el PMS5003 posee el protocolo de comunicación UART con tensión de 3.3 [V] en su lógica. En la figura 19 se observa la orientación de los pines indicada para hacer la conexión y posteriormente en la

¹⁸ PLANTOWER. PMS5003 series data manual. [En línea]. 2016. Disponible en http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/resources-page/plantower-pms5003-manual_v2-3.pdf

tabla 7, se muestra la conexión utilizada para emplear el sensor con la tarjeta ESP32.

Figura 19. Definición de los pines



Fuente: PLANTOWER. PMS5003 series data manual. [En línea]. 2016. Disponible en http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/resources-page/plantower-pms5003-manual_v2-3.pdf

Tabla 8. Conexiones del sensor PMS5003 a la ESP32

PMS5003	ESP32
Tensión de alimentación (Pin 1)	5V
Tierra (Pin 2)	GND
SET (Pin 3)	No conectado
RX del UART (Pin 4)	No conectado
TX del UART (Pin 5)	GPIO 25 (RX UART1)
RESET (Pin 6)	No conectado
NC (Pin 7/8)	No conectado

El sensor posee los siguientes modos:

- *Active/Passive*: El modo por defecto después de encenderse es active, tiene dos sub-modos: estable y rápido, en el modo estable envía datos en intervalos de 2.3s y en el modo rápido envía datos en intervalos de 200-800 ms. Por otra parte, en el modo *passive* solo envía datos si se le pregunta.
- *Sleeping/awaken*: Con el pin de SET se configuran estos modos que permiten controlar el consumo de corriente encendiendo y apagando el ventilador del sensor.

En el proyecto de grado se utilizó el modo *pasive* ya que no existe la necesidad de enviar dato tras dato consumiendo más corriente, sino únicamente cuando sea necesario.

3.1.2.4 Sensor OPC-N2

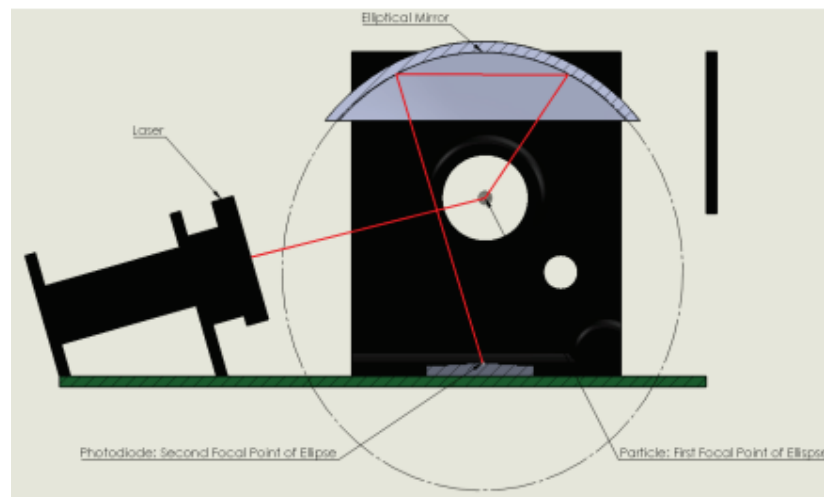
Figura 20. Sensor OPC-N2 [34]



Fuente: ALPHASENSE. Particle Counter. [En línea]. 2013. Disponible en <http://www.alphasense.com/index.php/products/optical-particle-counter/>

El sensor OPC-N2 (figura 20) aprovecha el fenómeno de la dispersión de luz para su funcionamiento (sección 2.2.4), gracias a un espejo elíptico que se ubica en la parte superior encargada de enviar la luz dispersa al fotorreceptor, lo descrito anteriormente se puede sintetizar de una manera más práctica en la figura 21.

Figura 21. Interior del sensor OPC-N2



Fuente: BLANCHARD, Jared Todd, Uncertainty in optical particulate counting sensors Tesis de honor. Universidad Brigham Young. 2018
https://scholarsarchive.byu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1010&context=studentpub_uht

Este sensor utiliza el protocolo de comunicación SPI, trabajando en un rango de 300 a 750 [kHz] y no es tolerante a 5 [V] en sus líneas lógicas según su manual de uso. En la tabla 8 se listan las conexiones realizadas.

Tabla 9. Conexiones OPC-N2 a la ESP32

OPC-N2	ESP32
Tensión de alimentación (Pin 1)	Vin
CLK (Pin 2)	GPIO 18

OPC-N2	ESP32
MISO (Pin 3)	GPIO 19 MISO
MOSI (Pin 4)	GPIO 23 MOSI
CS (Pin 5)	GPIO 5
Tierra (Pin 6)	GND

3.1.3 Dispositivos Adicionales

3.1.3.1 Módulo SD

Figura 22. Módulo SD



Fuente: MÓDULO SD. Módulo slot SD. [En línea]. 2018. Disponible en https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-482078850-modulo-slot-sd-para-arduino-_JM

El módulo SD de la figura 22 fue pensado como respaldo para poder almacenar los datos en caso de que la conexión a internet se pierda. Utiliza protocolo de comunicación SPI y tiene la posibilidad de ser alimentado con 3.3 ó 5 [V]. Se integró a la ESP32 a través de las conexiones que se observan en la tabla 9.

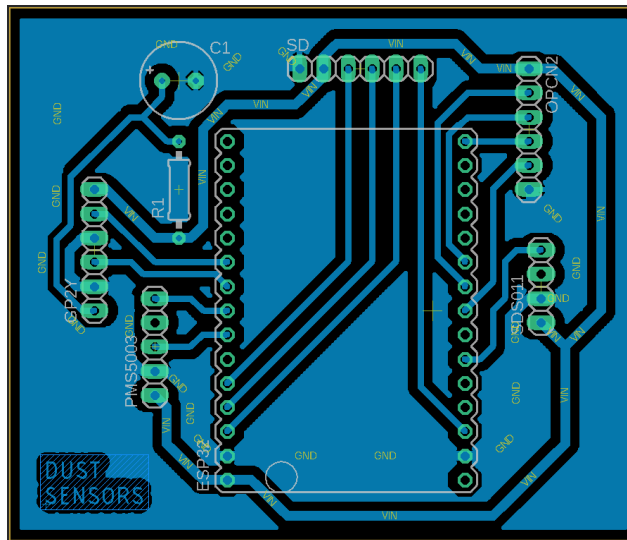
Tabla 10. Conexiones módulo SD a la ESP32

Módulo SD	ESP32
Tierra (Pin 1)	No conectado
3.3 [V] (Pin 2)	No conectado
5 [V] (Pin 3)	VIN
CS (Pin 4)	GPIO 15
MOSI (Pin 5)	GPIO 13 MOSI
CLK (Pin 6)	GPIO 14
MISO (Pin 7)	GPIO 27 MISO
Tierra (Pin 8)	GND

3.2 MONTAJE

3.2.1 PCB

Figura 23. Esquema PCB diseñada



Se diseñó el circuito impreso de la figura 23 con el fin de agrupar de una manera más compacta las conexiones y que de esta forma se puedan hacer pruebas en un ambiente externo con más confiabilidad.

3.2.2 Fuente. El equipo se alimenta por medio de un conector tipo “barril” con polaridad positiva y tensión de 5V a 1A (ESP32 260mA, GP2Y1010AU0F 11mA, SDS011 70mA, OPC-N2 175mA, PMS5003 100mA), de manera que se tomó un cable USB y se le adaptó un conector DC en su extremo con el fin de poder energizar el sistema utilizando la red o empleando un *power bank*. En este orden de ideas, usando una batería de 2.5 A-h, el sistema podría funcionar por más de 3 horas.

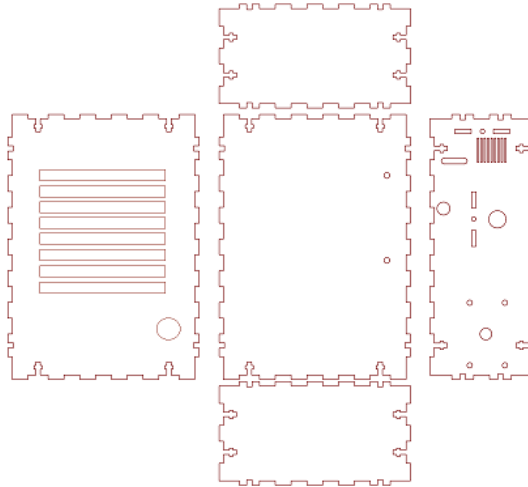
3.2.3 Estructura del prototipo. Para realizar las pruebas de los sensores se propuso la estructura de la figura 24.

Figura 24. Estructura para el uso de los sensores



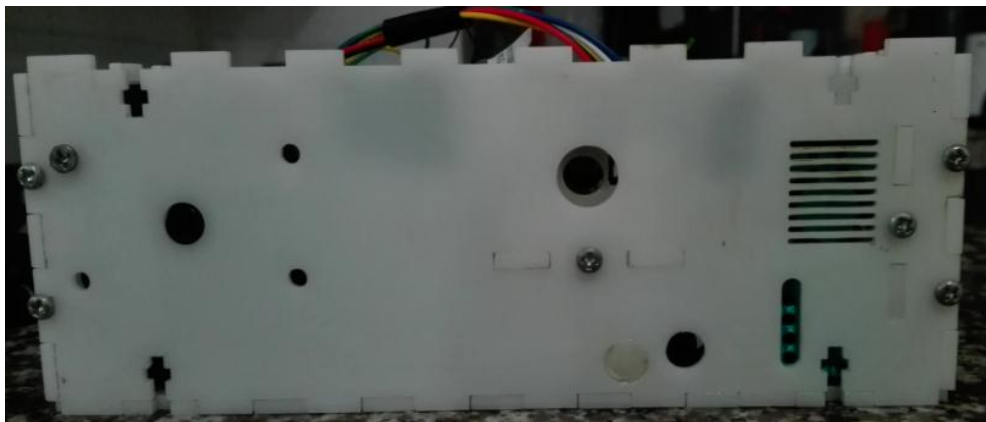
El diseño fue realizado en SolidWorks de tal forma que sea desarmable en su totalidad, esto permite que en caso de ser necesario algún cambio de cualquier tipo, solo se necesite cambiar una cara y no la estructura completa tal como se ve en la figura 25.

Figura 25. Diseño de la estructura



Se realizó teniendo en cuenta el flujo de aire, el prototipo permite la entrada de aire para que pase de manera uniforme por todos los sensores (figura 26). La estructura soporta fácilmente los 500 gramos del hardware, así que en caso de añadir un *power bank*, no habría afectación alguna en la rigidez del modelo, el espesor de sus láminas es de 4mm en una mezcla de acrílico y plástico.

Figura 26. Vista frontal de la estructura



3.3 SOFTWARE

3.3.1 Entorno de programación. Inicialmente la ESP32 fue desarrollada para ser programada en lenguaje C, pero posteriormente fue adaptada para programarse con otras opciones como por ejemplo Python o la IDE de Arduino que está basada en C++.

Para el desarrollo del trabajo de grado, se utilizó la IDE de Arduino ya que es un entorno muy fácil de usar, existe amplia documentación y soporte en la internet.

A continuación, se muestran las librerías que se utilizaron y los respectivos fragmentos de código necesarios para obtener la lectura de los sensores y el envío de datos a la plataforma IoT.

- Para el sensor GP2Y1010AU0F fue necesario programar el encendido del LED que se encuentra representado en la figura 13 y hacer la lectura del ADC respectivo para posteriormente pasarlo a concentración de PM con la aproximación realizada por Chris Nafis¹⁹.

```
// Definición de los pines
#define DUST 32
#define LED 33

// Variables de control del pulso del LED
int samplingTime = 280;
int sleepTime = 9620;

// Variables
float voMeasured = 0;
float voltage = 0;
float dustDensity = 0;
float dustVoltage = 0;
const int samples = 4;
```

¹⁹ NAFIS, Op. Cit.

```

void setup() {

//ADC por defecto 12 bits - 0 a 3.3 V

// Se establece el LED como salida
pinMode(LED,OUTPUT);
}

void loop() {

    for(int i=0; i<samples; i++){
// Se enciende el LED poniendo el pin en BAJO
digitalWrite(LED,LOW);

// Se espera 0.28ms antes de tomar la lectura
delayMicroseconds(samplingTime);

// Se lee la tensión de salida del sensor
int vo = analogRead(DUST);

float Vout += vo;

dustVoltage = Vout/samples;
}

// Se apaga el LED
digitalWrite(LED,HIGH);

// Se espera el tiempo restante para el ciclo
delayMicroseconds(sleepTime);

// Ajuste del ADC
float voMeasured = -
0.00000001252*pow(dustVoltage,3)+0.00001357*pow(dustVoltage,2)+(1.
095*dustvoltage)+144.1;

// Se convierte el valor entero en tensión
voltage += voMeasured / 4095 * 3.3;

// Se convierte a PM a través de la ecuación lineal Chris Nafis
(c) 2012
dustDensity = (0.172 * voltage - 0.0999)*1000;

}

```

- Para el sensor SDS011 se utilizó una librería existente, creada por Rajko Zschiegner²⁰, inicialmente fue elaborada para arduino, pero después se le agregó soporte para Hardware Serial por lo que actualmente se puede usar con la ESP32

```
// Se incluye la librería del sensor SDS011
#include <SDS011.h>

// Se define la comunicación serial
HardwareSerial sds011(2);

// Se declaran las variables de PM
float p10, p25;
int Lectura;

// Se inicializa la librería
SDS011 my_sds;

void setup() {

// Se inicia la comunicación serial
    my_sds.begin(&sds011);
}

void loop() {

// Se realiza la lectura de datos
    Lectura = my_sds.read(&p25, &p10);
    delay(1000);
}
```

- Para el sensor PMS5003 se utiliza la librería creada por Rafal Magda²¹, permitiendo trabajar con facilidad los distintos modos en los que puede funcionar el sensor.

```
// Se incluye la librería del sensor PMS5003
#include <PMS.h>

// Se define la comunicación serial
HardwareSerial dust(2); // 16,17
```

²⁰ ZSCHIEGNER, Rajko. Arduino library for SDS011 dust sensor. [En línea]. 2016. Disponible en <https://github.com/ricki-z/SDS011>

²¹ MAGDA, Rafal. ESP32 – pms5003. [En línea]. 2018. Disponible en <https://github.com/rafalmag/ESP32-pms5003>

```

// Se inicializa la librería
PMS pms(dust);
PMS::DATA data;
pms5003 pms

void setup() {

// Se inicia la comunicación serial
dust.begin(9600);

// Se activa el modo pasivo del sensor
pms.passiveMode(); // Se eligió el modo pasivo
}

void loop() {

// Función para la lectura de datos
pms.requestRead();
}

```

- Para el sensor OPC-N2 se utilizó la librería hecha por Marcelo Yungaicela²² escrita en C++ para ser usada en Arduino, pero que puede ser utilizada con la ESP32 a través de comunicación SPI.

```

//Se incluyen las librerías para el sensor OPC-N2
#include <SPI.h>
#include "opcn2m.h"

// Se define pin de control SPI
#define SD_CS 15
// Se inicializa la librería
OPCN2 alpha(CS);
HistogramData hist;

void setup() {

// Se establece el pin de control como salida
pinMode(CS, OUTPUT);

// Función para encender el sensor
alpha.on();
delay(2000);
}

```

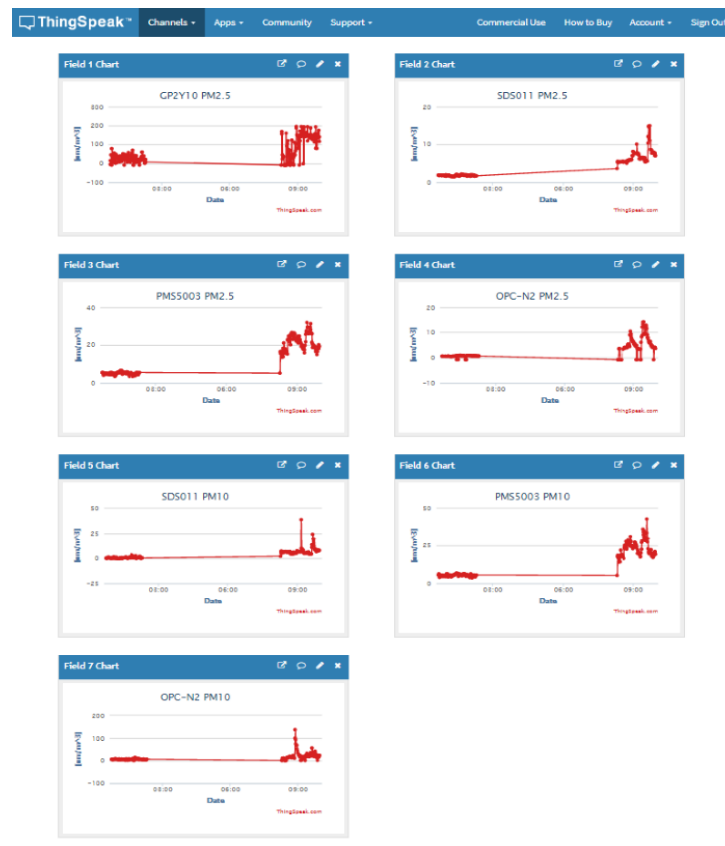
²² YUNGAICELA, Marcelo. C++ Library for the Alphasense OPC-N2 particle counter-Arduino. [En línea] 2017. Disponible en <https://github.com/MarcelloYung/opcn2-Arduino>

```
void loop() {

// Función para la lectura de los datos
  hist = alpha.read_histogram();
}
```

3.3.2 Plataforma IoT. Se optó por trabajar con la plataforma Thingspeak de MathWorks los creadores de MATLAB y Simulink. En su versión gratuita almacena hasta 8000 datos y tiene un tiempo mínimo de subida de 15 segundos. Su compatibilidad con MATLAB permite que además de almacenar y visualizar datos, se puedan analizar y actuar sobre ellos. Los datos se ordenan en canales y dentro de los canales se ubican en campos (*fields*) tal y como se aprecia en la figura 27.

Figura 27. Visualización de datos en Thingspeak



Para realizar la conexión entre Thingspeak y la ESP-32 se puede usar tanto HTTP como MQTT, pero para el caso de este proyecto es más conveniente usar HTTP (ver sección 2.3) dada su naturaleza de únicamente realizar solicitudes para enviar datos al servidor cada cierto tiempo, además de esto, la compañía ofrece una librería que facilita enormemente este proceso.

Para la conexión a internet y a la plataforma IoT (Thingspeak) se utilizan las siguientes librerías y funciones. Para ver el código completo ver anexo 1.

```
// Se incluye la librería para la comunicación con Thingspeak
#include "ThingSpeak.h"

// Se incluye la librería para la conexión WiFi
#include <WiFi.h>
// Definición credenciales WiFi
char ssid[] = "*****";
char password[] = "*****";
int status = WL_IDLE_STATUS;

// Definición cliente WiFi
WiFiClient client;

// Credenciales conexión con Thingspeak
unsigned long myChannelNumber = 763487;
const char* myWriteAPIKey = "87TJ0Z3DBRTKXYXR";

void setup() {

// Se inicia la conexión WiFi
  WiFi.begin(ssid, password);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println("");
  Serial.println("WiFi connected.");

//Se inicia la conexión con Thingspeak
  ThingSpeak.begin(client);
}
```

```

void loop() {

// Se preparan y envían los datos a Thingspeak
  ThingSpeak.setField(1,dustDensity);
  ThingSpeak.setField(2,p25);
  ThingSpeak.setField(3,pm.pm2);
  ThingSpeak.setField(4,hist.pm25);
  ThingSpeak.setField(5,p10);
  ThingSpeak.setField(6,pm.pm10);
  ThingSpeak.setField(7,hist.pm10);
  ThingSpeak.setField(8,vin);

// Se escriben los datos en los canales
  ThingSpeak.writeFields(myChannelNumber, myWriteAPIKey);
}

```

3.4 DESARROLLO DE PRUEBAS

Para el desarrollo de las pruebas, la caja con los sensores fue ubicada de tal forma que el flujo de aire pase lo más uniformemente posible por todos los sensores, también se tuvo en cuenta el precalentamiento de los sensores de un minuto para su correcto funcionamiento.

Se realizaron varias tomas de datos en distintos lugares, pero las documentadas en el trabajo de grado fueron realizadas en ambiente interior, ya que tuvieron periodos de registro más largos debido a que no se dependía de la cantidad de energía suministrada por un *battery pack*. En la figura 28 se observa el prototipo en el ambiente donde se realizaron las pruebas.

Figura 28. Prototipo en ambiente de pruebas.



Los sensores fueron puestos en marcha tal y como vienen de fábrica.

La primera prueba fue realizada en Piedecuesta, de tal forma que la estructura con los sensores fuese expuesta tan sólo a las corrientes de aire provenientes del medio ambiente que pudiesen llegar hasta su ubicación. Para esta prueba se tuvieron las siguientes consideraciones:

Los datos se registraron en intervalos de aproximadamente 20 segundos.

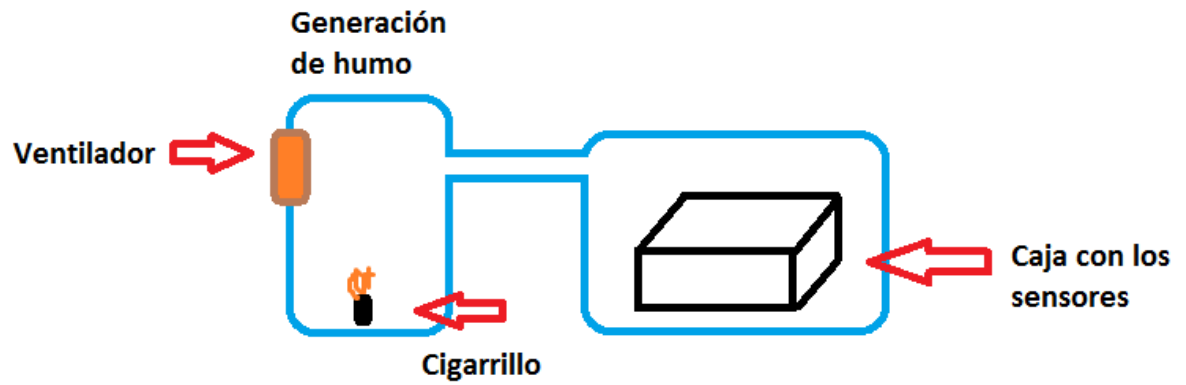
Las pruebas se realizaron en periodos de 24 horas.

La segunda prueba se realizó excitando los sensores en un recipiente cerrado con humo de cigarrillo proporcionado con ayuda de un ventilador. Se realizó con este contaminante ya que sus partículas tienen un diámetro entre 100 y 700 nm²³. La figura 29 muestra el esquema para la prueba que sigue la siguiente consideración:

²³ LI, Wei; HOPKE, P. K. Initial size distributions and hygroscopicity of indoor combustion aerosol particles. *Aerosol Science and Technology*. 2007. p305-316

Los datos se registraron en intervalos de 20 segundos con el fin de poder obtener el comportamiento de los sensores tras la excitación.

Figura 29. Esquema para la segunda prueba



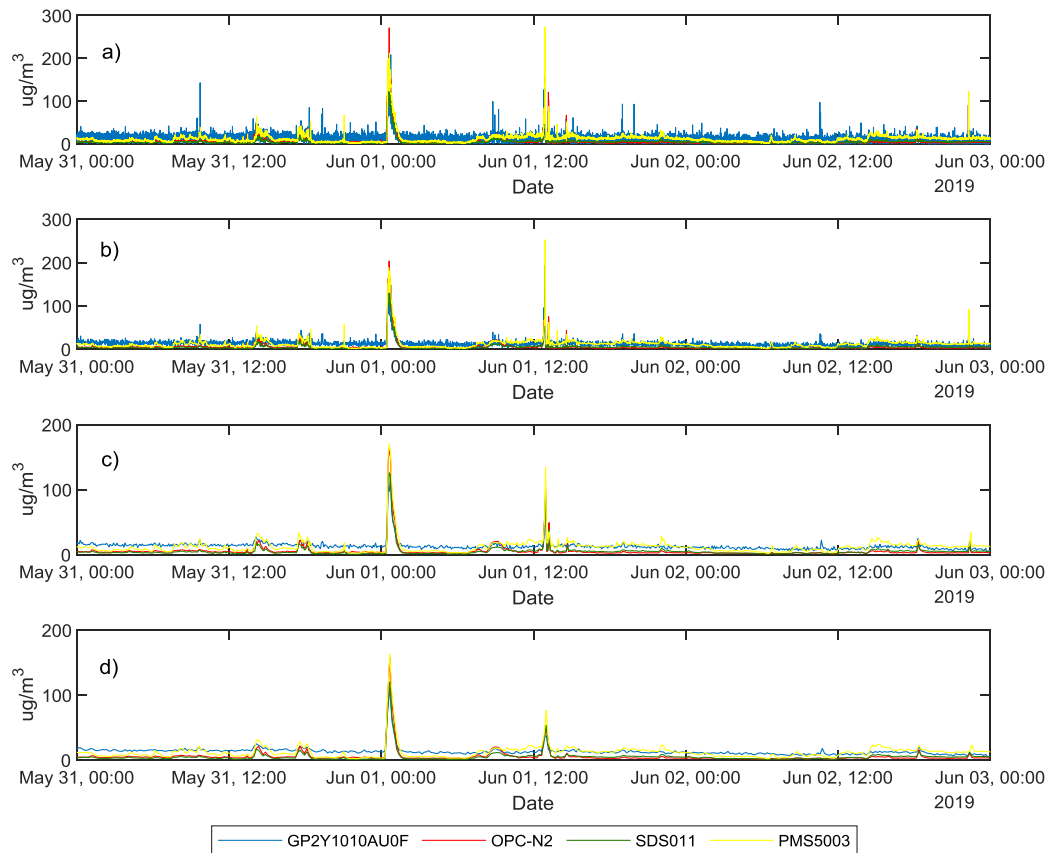
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la primera prueba, se analizaron los datos “crudos” y los datos promediados con el fin de estudiar si a medida que se promedia, se puede obtener una mejor respuesta. El análisis se hizo tanto para PM2.5 como para PM10. En este caso, los episodios de elevadas concentraciones de PM están claramente asociados a actividades caceras tales como cocinar y barrer. Cabe resaltar que todas las mediciones fueron realizadas en ambiente no controlado por lo que las variables meteorológicas varían de manera independiente.

En la figura 30 se pueden ver los resultados que corresponden a la primera prueba en cuanto a PM2.5 (Piedecuesta) tanto con los datos “crudos” como con los datos promediados. De entrada, se ve que el sensor GP2Y1010AU0F presenta mucho ruido a pesar de que su respuesta ya ha sido promediada. El sensor PMS5003 sigue la tendencia del sensor de referencia, pero con un *offset* elevado. Esto nos permite considerar que el sensor SDS011 es el que mejor sigue el comportamiento del sensor OPC-N2.

Se utilizó regresión lineal para encontrar la relación entre cada sensor y el elemento de referencia obteniendo la respectiva correlación entre los datos.

Figura 30. Resultados PM2.5. Prueba 1 con datos a) “crudos”, b) promediados cada minuto, c) promediados cada 5 minutos, d) promediados cada 10 minutos.



El periodo donde se obtuvieron valores de correlación más altos fue en el caso del promediado cada 10 minutos, el sensor GP2Y1010AU0F mejora considerablemente su correlación (de $R^2=0.44$ a $R^2=0.85$); el sensor PMS5003 tiene una correlación fuerte, sin embargo, el sensor SDS011 los supera pues obtuvo un coeficiente $R^2=0.95$ en dicho periodo mencionado. En la tabla 11 se presenta un resumen de los resultados obtenidos para cada todos los casos durante la prueba 1.

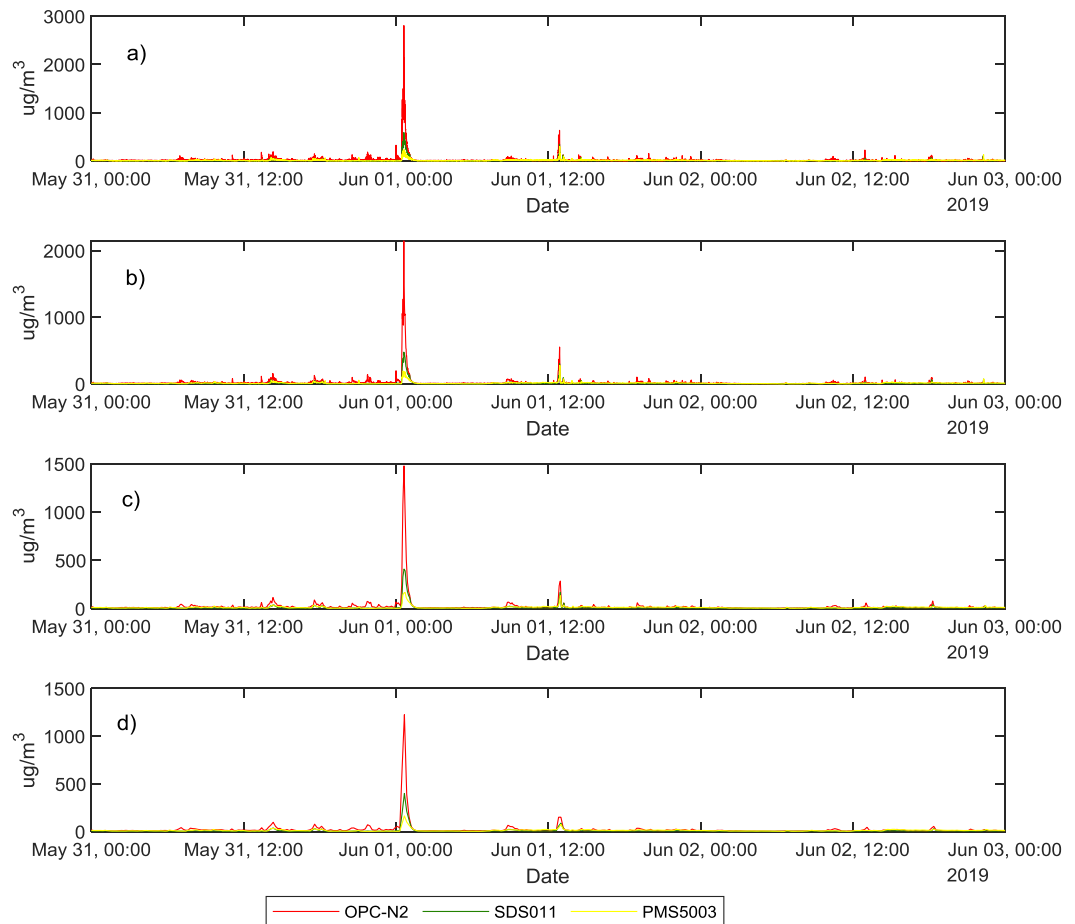
Tabla 11. Resultados de la prueba 1 para PM2.5(RECM: Raíz del Error Cuadrático Medio, EMA: Error Medio Absoluto, DE: Desviación Estándar)

		GP2Y1010AU0F	SDS011	PMS5003
Datos Crudos	R ²	0.44	0.93	0.71
	p(x)	y=0.595x+9.963	y=0.788x+0.7325	y=0.952x+6.873
	RECM	8.035	2.439	7.219
	EMA	9.273	1.950	7.066
	DE	10.79	9.845	13.602
Datos promediados cada minuto	R ²	0.68	0.94	0.75
	p(x)	y=0.6095x+9.882	y=0.792x+0.708	y=0.980x+6.718
	RECM	4.993	2.266	6.622
	EMA	8.710	1.926	6.965
	DE	8.786	9.720	13.441
Datos promediados cada 5 minutos	R ²	0.85	0.95	0.85
	p(x)	y=0.613x+9.857	y=0.786x+0.742	y=1.033x+6.424
	RECM	2.965	2.012	4.988
	EMA	8.524	1.890	6.757
	DE	8.786	9.287	12.915
Datos promediados cada 10 minutos	R ²	0.87	0.95	0.85
	p(x)	y=0.621x+9.812	y=0.772x+0.819	y=1.026x+6.469
	RECM	2.524	1.888	4.722
	EMA	8.444	1.886	6.696
	DE	7.168	8.55	12.042

De igual forma se realizó el análisis de los resultados de PM10 para la prueba 1. Los resultados se observan en la figura 31. En esta ocasión, los sensores PMS5003

y SDS011 tienen un comportamiento que no se puede distinguir a simple vista, por lo que es necesario la realización del análisis de correlación.

Figura 31. Ilustración Resultados PM10. Prueba 1 con datos a) “crudos”, b) promediados cada minuto, c) promediados cada 5 minutos, d) promediados cada 10 minutos.



Para el caso de PM10 en la prueba 1, el sensor PMS5003 presenta un coeficiente de determinación moderado menor que el del sensor SDS011 el cual posee un coeficiente fuerte. Los resultados se resumen en la tabla 12.

Tabla 12. Resultados de la prueba 1 para PM10.

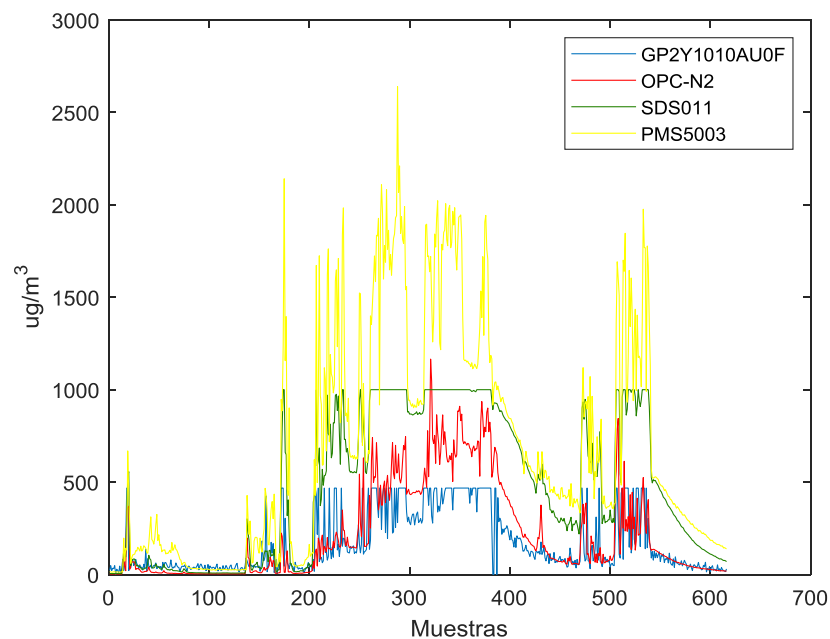
		SDS011	PMS5003
Datos Crudos	R²	0.85	0.52
	p(x)	y=0.315x+1.880	y=0.123x+9.610
	RECM	10.49	9.581
	EMA	13.217	14.069
	DE	27.883	13.955
Datos promediados cada minuto	R²	0.87	0.58
	p(x)	y=0.322x+1.721	y=0.128x+9.500
	RECM	9.663	8.801
	EMA	13.040	13.389
	DE	27.690	13.602
Datos promediados cada 5 minutos	R²	0.91	0.68
	p(x)	y=0.332x+1.503	y=0.137x+9.311
	RECM	8.099	7.243
	EMA	12.988	12.689
	DE	27.073	12.911
Datos promediados cada 10 minutos	R²	0.93	0.71
	p(x)	y=0.340x+1.344	y=0.139x +9.264
	RMSE	6.755	6.524
	MAE	12.9713	12.415
	DE	25.704	12.109

Los resultados de la primera prueba permiten apreciar que los sensores reaccionan de manera sobresaliente, más sin embargo, el sensor SDS011 llega a alcanzar un coeficiente de determinación de $R^2= 0.95$, lo cual es bastante bueno para un sensor que no se ha calibrado, por otra parte, los resultados arrojan que en las mediciones

de PM10, si bien los sensores tienen un buen coeficiente de determinación, los errores y su desviación estándar son más altos disminuyendo la confiabilidad en esta medida. La pendiente de $p(x)$ por debajo de 1 indica subestimación en la cantidad de PM por parte de los sensores que fueron estudiados.

Para analizar los rangos de medición los sensores se llevó a cabo la segunda prueba. No se realizó análisis de datos promediados ya que estas pruebas fueron en periodos de toma de datos más cortos. Los resultados de PM2.5 para esta prueba se muestran en la figura 32 donde se lleva al máximo el rango de los sensores. Cabe aclarar que la figura representa el comportamiento en el tiempo de los sensores.

Figura 32. Resultados PM2.5 Prueba con humo de cigarrillo



Con el fin de evaluar la exactitud de los sensores se realiza un análisis de regresión lineal y correlación. Los resultados se sintetizan en la tabla 13.

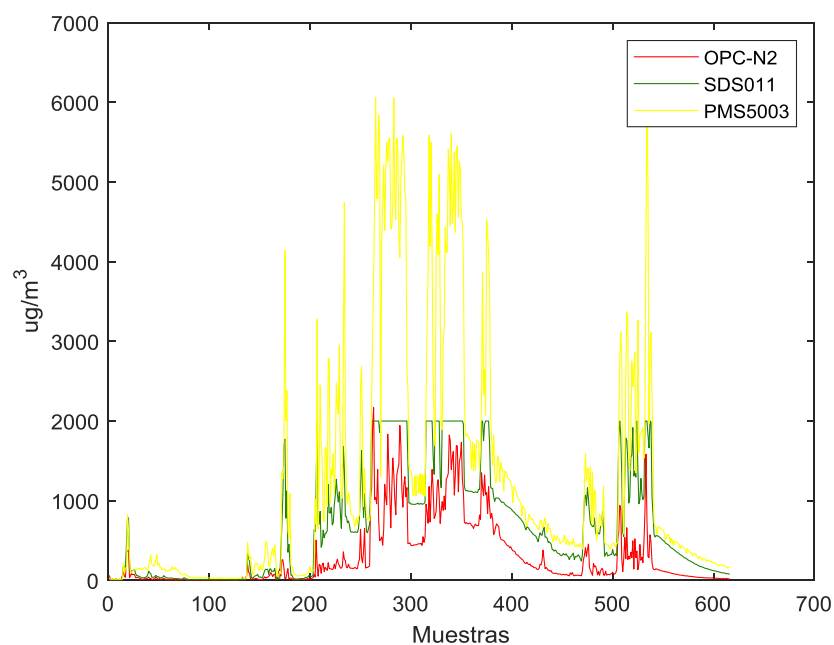
Tabla 13. Resultados de la prueba con humo de cigarrillo para PM2.5

		GP2Y1010AU0F	SDS011	PMS5003
Prueba 2 PM2.5	R ²	0.68	0.72	0.68
	p(x)	y=0.886x+89.060	y=1.325x+186.4	y=2.006x+247.800
	RMSE	153.100	203.600	343
	MAE	102.193	257.590	466.606
	SD	270.85	391.236	610.971

Según los resultados obtenidos tras el análisis de regresión y correlación para PM2.5 se observa que los sensores SDS011 y PMS5003 presentan el coeficiente R² inferior en comparación con la prueba 1, además, los errores y la desviación estándar son demasiado elevados para los tres sensores. Para el sensor PMS5003 los valores de PM se sobreexceden, esto se aprecia en la pendiente de $p(x) \approx 2$.

El mismo análisis se hizo para PM10, en la figura 33 se observa el comportamiento de los sensores en estudio junto con el sensor de referencia.

Figura 33. Resultados PM10. Prueba con humo de cigarrillo



De la misma forma se realiza un análisis de regresión y correlación para evaluar la respectiva exactitud de los sensores, en este caso midiendo PM10. Los resultados se observan en la tabla 13.

Tabla 14. Resultados de la prueba con humo de cigarrillo para PM10

		SDS011	PMS5003
Prueba 2 PM10	R ²	0.76	0.72
	p(x)	1.42x+249.5	y=3.071x+288.1
	RMSE	329.6	781
	MAE	377.555	911.713
	SD	677.855	1.5*10 ⁵

Ambos sensores desmejoraron su desempeño en comparación con la prueba 1, nuevamente el sensor PMS5003 tuvo sobre exceso en la medición inclusive más alto que en el caso de PM2.5, pues la pendiente de $p(x)$ es de 3.071.

En la prueba dos, tanto para PM2.5 como para PM10 y en cada uno de los sensores, se observa que los parámetros estadísticos que se tuvieron en cuenta son demasiado altos, esto se debe a que en el caso de los sensores SDS011 y GP2Y1010AU0F se saturan muy rápido y en el caso del sensor PMS5003 no se satura, pero su medición se sobreexcede demasiado, lo anterior traduce una cantidad significativa de valores dentro de la regresión lineal que van a estar muy separados de la línea de tendencia.

5. CONCLUSIONES

- Se ha logrado integrar los sensores al módulo WiFi de forma exitosa permitiendo el envío de datos de forma inalámbrica.
- Se recomienda usar el sensor SDS011 en las estaciones meteorológicas para medir tanto PM2.5 como PM10 pues en las pruebas fue el sensor que alcanzó los máximos valores de correlación.
- La plataforma Thingspeak presenta una ventaja ante las demás plataformas IoT y es que, gracias a su integración con MATLAB, se tienen unas plantillas disponibles para visualizar y actuar sobre los datos almacenados.
- Con un ajuste y/o calibración se recomienda usar el sensor GP2Y1010AU0F en aplicaciones de alta concentración de PM.
- Se deja una herramienta base para futuros trabajos comparativos en el área de estudio de sensores

6. OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

- Se ha realizado la comparación de los datos más sin embargo el proceso de calibración se deja para trabajo futuro.
- Se recomienda tener otra unidad de cada sensor para poder evaluar su repetitividad.
- Se le recomienda a la UIS adquirir equipos de MP para poder realizar más estudios en materia ambiental que cada día toma más importancia.

BIBLIOGRAFÍA

ALKHOLIDI G, Abdulsalam; SAEED A, Khaleel. Free Space Optical Communications – Theory and Practices. 2014. p159-212.

ALPHASENSE. Alphasense user manual opc-n2 optical particle counter. [en línea]. 2015 Disponible en http://stg-uneplive.unep.org/media/aqm_document_v1/Blue%20Print/Components/Microcomputer%20and%20sensors/B.%20Dust%20Sensor%20Specifications/B.1%20Alphasense%20OPC%20N1/072-0300%20OPC-N2%20manual%20issue%203.pdf

ALPHASENSE. Particle Counter. [En línea]. 2013. Disponible en <http://www.alphasense.com/index.php/products/optical-particle-counter/>

ALTECH USA. Beta 5M. [en línea]. Disponible en <http://altechusa.com/beta-5m-beta-attenuation-particulate-monitor.html>

AQ-SPEC. Field evaluation Alphasense OPC-N2 sensor. [en línea]. 2015. Disponible en <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/alphasense-opc-n2---field-evaluation.pdf>

AQ-SPEC. Laboratory evaluation Alphasense OPC-N2 PM sensor. [en línea]. 2015. Disponible en <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/alphasense-opc-n2---lab-evaluation.pdf?sfvrsn=2>

ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA, et al. Calidad del aire - Área metropolitana de Bucaramanga. [En línea]. 2017. Disponible en http://www.amb.gov.co/jdownloads/Documentos/sub_ambiental/informe_calidad_del_aire_marzo_2017.pdf.

BEDOYA, Julian; MARTÍNEZ, Elkin. Validad del aire en el valle de aburrá Antioquia –Colombia. Dyna. Universidad Nacional de Colombia. p7-15.

CASTELLANI, Beatrice, et al. Comparative análisis of monitoring devices for particulate content in exhaust gases. [en línea]. 2014. Disponible en <https://www.mdpi.com/2071-1050/6/7/4287/htm>

BLANCHARD, Jared Todd, Uncertainty in optical particulate counting sensors Tesis de honor. Universidad Brigham Young. 2018 https://scholarsarchive.byu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1010&context=studentpub_uht

BUDDE, Matthias, et al. Investigating the use of commodity dust sensors for embedded measurement of particulate matter. Karlsruhe Institute of Technology. 2012

CEMTEK ENVIRONMENT. Particulate matter monitoring technologies and detection principles. [en línea]. 2011. Disponible en <https://slideplayer.com/slide/5264610/>

DOIT. ESP32 DevKit V1. [en línea]. 2016. Disponible en https://es.aliexpress.com/store/product/ESP32-ESP-32-ESP-32S-Development-Board-WiFi-Bluetooth-Ultra-Low-Power-Consumption-Dual-Cores-ESP32/2778022_32829400260.html

EPA. National ambient air quality standards. [en línea]. 2006. Disponible en <http://www.epa.gov/air/criteria.html>

EPA. Particulate matter (pm) pollution. [en línea]. 2015. Disponible en <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>

EUROPEAN COMMISSION. Air quality standards. [en línea]. Disponible en <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>

FRANCO, Juan Felipe, et al. Niveles de material particulado en colegios distritales ubicados en vías con alto tráfico vehicular en la ciudad de Bogotá: estudio piloto. [en línea]. 2009. Disponible en http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302009000300010

GARCÍA, Francisco, et al. Distribución espacial y temporal de la concentración de material particulado en Santa Marta, Colombia. Revista Facultad Nacional de Salud Pública. [en línea]. 2006. Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=12024208>.

GONZÁLEZ, Oscar. Comparativa y análisis completo de los módulos Wifi ESP8266 Y ESP32. [en línea]. 2017. Disponible en <https://blog.bricogeek.com/noticias/electronica/comparativa-y-analisis-completo-de-los-modulos-wifi-esp8266-y-esp32/>

IBERFLUID. Detector de partículas. [En línea]. Disponible en <http://www.iberfluid.com/es/producto/187-detector-de-particulas>

IDEAM. Contaminación atmosférica [en línea]. Disponible en <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/calidad-del-aire>.

KOCHNAR, Rajat. Internet of Things (IoT) for Dummies. [en línea]. 2016. Disponible en <https://www.netmanias.com/en/post/blog/10873/iot/internet-of-things-iot-for-dummies>

KOISTINEN J, Kimmo, et al. Source apportionment of pm2.5 in personal exposures and residential indoor, outdoor and workplace microenvironments in the Helsinki phase of the EXPOLIS study. 2004. p36–46.

LAQUAI, Bernd. Assessment of Measurement Uncertainties for a SDS011 low-cost PM sensor from the Electronic Signal Processing Perspective. 2017.

LI, Wei; HOPKE, P. K. Initial size distributions and hygroscopicity of indoor combustion aerosol particles. Aerosol Science and Technology. 2007. p305-316.

MAGDA, Rafal. ESP32 – pms5003. [En línea]. 2018. Disponible en <https://github.com/rafalmag/ESP32-pms5003>

MINSALUD. Plan Decenal de Salud Pública, 2012-2021. 2013. p65-66.

MÓDULO SD. Módulo slot SD. [En línea]. 2018. Disponible en https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-482078850-modulo-slot-sd-para-arduino-_JM

NAFIS, Chris. Air quality monitoring. [en línea]. 2012. Disponible en <http://www.howmuchsnow.com/arduino/airquality/>

NOVA FITNESS. Nova Fitness SDS011 Air Quality Sensor. [En línea]. 2015. Disponible en <https://es.aliexpress.com/item/32814589166.html>

PLANTOWER. PMS5003 series data manual. [En línea]. 2016. Disponible en http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/resources-page/plantower-pms5003-manual_v2-3.pdf

SHARP. Application note of Sharp dust sensor GP2Y1010AU0F. [en línea]. 2005. Disponible en http://www.sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y1010au_appl_e.pdf

SOSTENIBLE, M. D. A. D. Resolución 2254. [en línea]. Disponible en <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/96-res%202254%20de%202017.pdf>

SPARKFUN. Sensor GP2Y1010AU0F. [en línea]. 2015. Disponible en <https://www.sparkfun.com/products/9689>

THERMOFISHER. Beta Attenuation Technology for Particulate Matter Measurement. [en línea]. Disponible en <https://www.thermofisher.com/co/en/home/industrial/environmental/environmental-learning-center/air-quality-analysis-information/beta-attenuation-technology-particulate-matter-measurement.html>

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Policy implications for countries in eastern Europe, Caucasu and central Asia.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. WHO air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. [en línea]. 2005. Disponible en http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf.

YUNGAICELA, Marcelo. C++ Library for the Alphasense OPC-N2 particle counter-Arduino. [En línea] 2017. Disponible en <https://github.com/MarcelloYung/opcn2-Arduino>

ZHU, Lei, et al. Transport pathway and potential source of pm10 in Beijing. Atmospheric Environment. 2011. p594– 604.

ZSCHIEGNER, Rajko. Arduino library for SDS011 dust sensor. [En línea]. 2016.
Disponible en <https://github.com/ricki-z/SDS011>

ANEXOS

ANEXO A. Código completo

```
// Librería para plataforma IoT
#include "ThingSpeak.h"

// Librería para el sensor PMS5003
#include "PMS.h"

// Librerías para el módulo SD
#include "FS.h"
#include "SD.h"

// Librería para el OPC-N2
#include "opcn2m.h"

// Librería para la conexión SPI
#include "SPI.h"

// Librería para la conexión WiFi
#include <WiFi.h>

// Librería para el sensor SDS011
#include <SDS011.h>

// Definición comunicación UART sensor SDS011
HardwareSerial sds011(2);
SDS011 my_sds;

// Definición variables del sensor SDS011
float p10, p25;
int Lectura;

// Definición pin CS del sensor OPC-N2
#define CS 5

// Definición variables del sensor OPC-N2
OPCN2 alpha(CS);
HistogramData hist;

// Definición pines del sensor GP2Y1010
#define DUST 32
#define LED 33

// Definición variables del sensor GP2Y1010
int samplingTime = 280;
int sleepTime = 9620;
```

```

float voMeasured = 0;
float voltage = 0;
float dustDensity = 0;
float dustVoltage = 0;
const int samples = 4;

// Definición comunicación UART sensor PMS5003
HardwareSerial dust(1); // 25,27

// Definición variables del sensor PMS5003
PMS pms(dust);
PMS::DATA data;

// Definición del SPI para el módulo SD
SPIClass spiSD(HSPI);

// Definición pin CS para el módulo SD
#define SD_CS 15

// Variable para almacenar los datos
String dataMessage;

// Definición credenciales WiFi
char ssid[] = "SILVIA";
char password[] = "91346833";
int status = WL_IDLE_STATUS;

// Definición cliente WiFi
WiFiClient client;

// Credenciales conexión con Thingspeak
unsigned long myChannelNumber = 763487;
const char* myWriteAPIKey = "87TJ0Z3DBRTKKYXR";

void setup() {

// Se inicia la comunicación UART del sensor SDS011
my_sds.begin(&sds011);

// Se inicializa la conexión SPI para el módulo SD
spiSD.begin(14,27,13,15); // CLK, MISO, MOSI, SS
if(!SD.begin( SD_CS, spiSD)){
  Serial.println("Card Mount Failed");
  return;
}

// Se inicializa el módulo SD
SD.begin(SD_CS);
if(!SD.begin(SD_CS)) {
  Serial.println("Card Mount Failed");
return ;
}
uint8_t cardType = SD.cardType();

```

```

        if(cardType == CARD_NONE) {
            Serial.println("No SD card attached");
            return;
        }
        Serial.println("Initializing SD card...");
        if (!SD.begin(SD_CS)) {
            Serial.println("ERROR - SD card initialization failed!");
            return;
        }
    }

    // Crea el archivo .txt y escribe las columnas
    File file = SD.open("/data.txt");
    if(!file) {
        Serial.println("File doesn't exist");
        Serial.println("Creating file...");
        writeFile(SD, "/data.txt", "GP2.5, SDS2.5, PMS2.5, OPC2.5, SDS10,
PMS10, OPC10, Vin \r\n");
    }
    else {
        Serial.println("File already exists");
    }
    file.close();

    // Se Inicializa pin CS de OPC-N2 como salida
    pinMode(CS, OUTPUT);

    // Se inicializa el LED del sensor GP2Y1010 como salida
    pinMode(LED, OUTPUT);

    // Se inicia la comunicación UART del sensor PMS5003 en modo pasivo
    dust.begin(9600);
    pms.passiveMode();

    // Encendido del sensor OPC-N2
    alpha.on();
    delay(1000);

    // Conexión WiFi

    WiFi.begin(ssid, password);
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(500);
        Serial.print(".");
    }
    Serial.println("");
    Serial.println("WiFi connected.");

    // Conexión con servidor IoT Thingspeak
    ThingSpeak.begin(client);
}

// Definición estructura de datos del sensor PMS5003
struct pms5003
{

```

```

    float pm1, pm2, pm10;
};

pms5003 pm;

}

void loop(){

    delay(4000);
    Serial.print("\nSampling Period:\t"); Serial.println(hist.period);
    // Se inicia la lectura de datos del sensor OPC-N2
    hist = alpha.read_histogram();

    // Se inicia la lectura de datos del sensor SDS011
    Lectura = my_sds.read(&p25, &p10);

    // Se inicia la lectura de datos del sensor GP2Y1010

    for(int i=0; i<samples; i++){

        // Se enciende el LED
        digitalWrite(LED, LOW);
        //
        ////Se da el tiempo del pulso
        delayMicroseconds(samplingTime);

        // Se lee el valor analógico
        int vo = analogRead(DUST);

        float Vout += vo;

        dustVoltage = Vout/samples;
    }

    // Se apaga el LED
    digitalWrite(LED, HIGH);

    // Se espera el tiempo restante para el ciclo
    delayMicroseconds(sleepTime);

    // Ajuste del ADC
    float voMeasured = -
    0.00000001252*pow(dustVoltage,3)+0.00001357*pow(dustVoltage,2)+(1.095*dus
    tvoltage)+144.1;

    // Se convierte el valor entero en tensión
    voltage += voMeasured / 4095 * 3.3;

    // Se convierte a PM a través de la ecuación lineal Chris Nafis (c) 2012
    dustDensity = (0.172 * voltage - 0.0999)*1000;
    if (dustDensity<0) dustDensity=0;

```

```

// Se realiza la lectura de datos del sensor PMS5003
bool status = updatePmReads();

// Se preparan y envían los datos a Thingspeak
ThingSpeak.setField(1,dustDensity);
ThingSpeak.setField(2,p25);
ThingSpeak.setField(3,pm.pm2);
ThingSpeak.setField(4,hist.pm25);
ThingSpeak.setField(5,p10);
ThingSpeak.setField(6,pm.pm10);
ThingSpeak.setField(7,hist.pm10);
ThingSpeak.setField(8,vin);
ThingSpeak.writeFields(myChannelNumber, myWriteAPIKey);

// Se llama la función para almacenar en la SD
logSDCard();
delay(15000);

}

// Función para escribir las lecturas de los sensores en el módulo SD
void logSDCard() {
    dataMessage = String(dustDensity) + "," + String(p25) + "," +
String(pm.pm2) + "," + String(hist.pm25)
                + "," + String(p10) + "," + String(pm.pm10) + "," +
String(hist.pm10) + "," + String(vin) + "\r\n";
    Serial.print("Save data: ");
    Serial.println(dataMessage);
    appendFile(SD, "/data.txt", dataMessage.c_str());
}

// Función que abre un archivo y escribe (No se modifica)
void writeFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * message) {
    Serial.printf("Writing file: %s\n", path);
    File file = fs.open(path, FILE_WRITE);
    if(!file) {
        Serial.println("Failed to open file for writing");
        return;
    }
    if(file.print(message)) {
        Serial.println("File written");
    } else {
        Serial.println("Write failed");
    }
    file.close();
}

// Función que abre un archivo y añade texto (No se modifica)
void appendFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * message) {
    Serial.printf("Appending to file: %s\n", path);
    File file = fs.open(path, FILE_APPEND);
    if(!file) {
        Serial.println("Failed to open file for appending");
    }

```

```
        return;
    }
    if(file.print(message)) {
        Serial.println("Message appended");
    } else {
        Serial.println("Append failed");
    }
    file.close();
}
```