



**Implementación de una red inalámbrica
de sensores
de CO2 usando IoT como sistema de
alerta ante una ventilación
deficiente frente al Covid-19 en aulas de
clase**

**Diego Armando Quiroga Barrios
10561823031**

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá, Colombia

2023

Implementación de una red inalámbrica de sensores de CO2 usando IoT como sistema de alerta ante una ventilación deficiente frente al Covid-19 en aulas de clase

Diego Armando Quiroga Barrios

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Biomédico

Director (a):

Ph.D. Sergio Andrés Díaz Salas

Codirector (a):

Ph.D. Homero Fernando Pastrana

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá, Colombia

2023

(Dedicatoria)

A mis queridos padres, quienes siempre me han apoyado incondicionalmente a lo largo de mi carrera y han hecho posible que pueda culminar este trabajo de grado. Su amor, dedicación y apoyo han sido fundamentales en mi camino académico, y les estoy profundamente agradecido por todo lo que han hecho por mí. Su constante aliento y confianza en mis capacidades han sido mi motivación para seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.

A mi querida hermana, mi mejor amiga y fuente de inspiración. Tú has sido mi confidente y mi apoyo incondicional a lo largo de mi vida. Tu aliento y consejos han sido invaluable en mi camino profesional. Agradezco por tener tu presencia a mi lado, y por ser mi motivación para alcanzar mis objetivos.

Agradecimientos

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mis amigos, especialmente a Nicolás y Juan, quienes han sido un apoyo constante y una compañía invaluable durante toda mi carrera. Su amistad, aliento y apoyo han hecho que mi experiencia universitaria sea más significativa y memorable.

Agradezco de manera especial a mi tutor, el Ingeniero Sergio Andrés Díaz Salas, por su acogida en esta investigación y por su constante apoyo y orientación en cada etapa del trabajo. Sus conocimientos, experiencia y dedicación han sido fundamentales para el desarrollo de este proyecto, y estoy agradecido por la oportunidad de aprender de él.

También quiero agradecer a los Ingenieros Victor Ricardo Guerrero Valencia y Andrés Felipe Ordóñez Jimenez, quienes no solo han sido mis instructores académicos, sino también colegas en momentos retadores durante mi formación profesional. Agradezco su apoyo constante, sus valiosos consejos y amistad. Su influencia positiva ha sido significativa en mi crecimiento como profesional.

Agradezco a la Universidad Antonio Nariño por financiar este proyecto de investigación y brindarme los recursos necesarios para llevarlo a cabo. Su apoyo ha sido fundamental para el desarrollo exitoso de esta tesis.

Finalmente, quiero expresar mi gratitud a todas las personas que, de alguna u otra manera, han contribuido en mi formación académica y personal. Su apoyo, aliento y confianza han sido valiosos en mi camino y me han impulsado a seguir adelante para alcanzar mis objetivos.

Resumen

La COVID-19 fue identificada en Wuhan, China en diciembre de 2019, y a la fecha, ha causado una pandemia global devastadora [1] El patógeno responsable de la Covid-19 es transmitido principalmente a través de gotículas de aerosol exhaladas por individuos infectados, las cuales permanecen suspendidas en el aire de los espacios cerrados hasta por 8 horas [2]. Por lo tanto, el monitoreo de la calidad del aire en espacios cerrados cobró relevancia con el fin de intentar reducir el contagio.

En esta tesis se presenta el diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores de CO₂ que utiliza IoT como sistema de alerta ante una ventilación deficiente frente al COVID-19 en aulas de clase. El objetivo es identificar los niveles de CO₂ que representan un riesgo para la transmisión del virus y alertar al usuario para que tome medidas preventivas. El dispositivo electrónico consta principalmente de un sensor de CO₂, un sensor de material particulado y un módulo Wifi. El dispositivo se conecta a una red inalámbrica de tipo malla formada por nodos retransmisores que envían los datos a un servidor en la nube. El servidor utiliza Node-RED para procesar los datos y ThingSpeak para visualizarlos. El sistema de alarmas se basa en umbrales dinámicos de concentraciones de CO₂ que se ajustan según la actividad realizada en el aula. Los resultados obtenidos en diferentes aulas de la universidad Antonio Nariño sede Sur, muestran que el dispositivo es capaz de medir con precisión las variables ambientales y alertar sobre una ventilación deficiente. A partir de esto, se concluye que el dispositivo es una herramienta útil para alertar sobre un posible caso de contagio de COVID-19 en aulas de clase.

Palabras clave: Red inalámbrica de sensores, MQTT, Calidad del aire interior, Gotículas, COVID-19.

Abstract

COVID-19 was identified in Wuhan, China in December 2019, and to date, has caused a devastating global pandemic [1]. The pathogen responsible for COVID-19 is mainly transmitted through aerosol droplets exhaled by infected individuals, which can remain suspended in the air of indoor spaces for up to 8 hours [2]. Therefore, monitoring the air quality in indoor spaces became relevant in order to try to reduce the contagion.

In this thesis, the design and implementation of a wireless network of CO₂ sensors that uses IoT as an alert system for poor ventilation against COVID-19 in classrooms is presented. The objective is to identify the CO₂ levels that represent a risk for virus transmission and alert the user to take preventive measures. The electronic device consists mainly of a CO₂ sensor, a particulate matter sensor and a Wi-Fi module. The device connects to a wireless mesh network formed by relay nodes that send the data to a cloud server. The server uses Node-RED to process the data and ThingSpeak to visualize them. The alarm system is based on dynamic thresholds of CO₂ concentrations that adjust according to the activity performed in the classroom. The results obtained in different classrooms of the Antonio Nariño University South campus show that the device is capable of accurately measuring environmental variables and alerting about poor ventilation. From this, it is concluded that the device is a useful tool to alert about a possible case of COVID-19 contagion in classrooms.

Keywords: Wireless sensor network, MQTT, Indoor air quality, Aerosol droplets, COVID-19.

Tabla de contenido

	Pág.
Resumen.....	VII
Lista de figuras.....	XI
Lista de tablas.....	XIV
Introducción	15
1. Planteamiento del problema.....	16
1.1 Estado del arte.....	16
1.2 Problemática.....	19
1.3 Justificación.....	21
1.4 Objetivos	22
1.4.1 Objetivo General	22
1.4.2 Objetivos específicos	22
1.5 Alcance.....	23
2. Marco teórico.....	25
2.1 Agentes contaminantes en espacios cerrados.....	25
2.1.1 Agentes contaminantes de origen bacteriano	27
2.1.2 Agentes contaminantes de origen viral	27
2.1.3 Agentes contaminantes de origen fúngico.....	30
2.2 Infección respiratoria aguda	31
2.3 Coronavirus	32
2.3.1 SARS-CoV-2.....	32
2.4 Sistemas en chip.....	33
2.5 Sensores de dióxido de carbono.....	34
2.5.1 Sensores de infrarrojo no dispersivo	34
2.5.2 Sensores electroquímicos	34
2.5.3 Sensores de óxidos metálicos semiconductores	35
2.6 Sensores de material particulado.....	35
2.6.1 Sensores ópticos basados en láser	35
2.6.2 Sensores gravimétricos basados en filtros.....	36
2.7 Internet de las cosas	36
2.7.1 Modelo estandarizado	37
2.7.2 Protocolos de comunicación.....	39
2.8 Redes inalámbricas de sensores	41
3. Metodología	43

3.1	Identificar los niveles de CO2 que representan un riesgo para la transmisión de COVID-19 según las características del aula de clases	43
3.2	Construcción de dispositivo electrónico que a partir de mediciones de CO2 alerte al usuario sobre una ventilación deficiente	46
3.2.1	Selección de componentes	49
3.3	Diseño del circuito impreso	54
3.4	Diseño 3D de las carcasas en Fusion 360	56
3.5	Implementación de la red inalámbrica de sensores con Painlessmesh.....	60
4.	Resultados.....	67
4.1	Medición de CO2 y material particulado en aulas de clase	68
4.2	Efectividad de las alarmas.....	74
4.3	Desempeño del prototipo	76
5.	Conclusiones	80
5.1	Conclusiones	80
5.2	Trabajos futuros	81
	Bibliografía	83

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1: Retención de aerosoles en diferentes partes del tracto respiratorio; tomado y adaptado de [35].	28
Figura 2-2: Reflejo de cierre y el reflejo de la tos; tomado de [41].	31
Figura 2-3: Modelo de siete capas presentado por Cisco; tomado y adaptado de [56].	38
Figura 2-4: Arquitectura publicador/suscriptor utilizada por MQTT; tomado de [57].	40
Figura 2-5: Arquitectura publicador/suscriptor utilizada por AMQP; tomado de [62].	41
Figura 3-1: Procesos de exhalación e inhalación de SARS-CoV-2 en interiores y su relación con CO ₂ ; tomado de [13].	44
Figura 3-2: Disposición externa de los componentes del dispositivo electrónico, a) Vista frontal b) Vista lateral izquierda c) Vista posterior d) Vista lateral derecha; elaboración propia.	47
Figura 3-3: Disposición interna de los componentes del dispositivo electrónico; elaboración propia.	47
Figura 3-4: Disposición externa de los componentes del dispositivo electrónico, a) Vista frontal b) Vista lateral derecha c) Vista posterior d) Vista lateral izquierda; elaboración propia.	48
Figura 3-5: Disposición interna de los componentes del dispositivo electrónico; elaboración propia.	48
Figura 3-6: ESP32; tomado de [66].	49
Figura 3-7: Sensor SEN0219; tomado de [68].	50
Figura 3-8: Sensor PMSA003I; tomado de [70].	51
Figura 3-9: Sensor INA219; tomado de [72].	51
Figura 3-10: Batería de polímero de litio 105080; tomado de [73].	52
Figura 3-11: Pololu 5V U1V11F; tomado de [74].	52
Figura 3-12: TP4056; tomado de [76].	53
Figura 3-13: LCD de 20x4; tomado de [78].	53
Figura 3-14: Módulo indicador de batería de litio SPBKBS-10-5; tomado de [79].	53

Figura 3-15:	Circuito esquemático del dispositivo; elaboración propia.	54
Figura 3-16:	Diseño PCB del nodo sensor; elaboración propia.....	55
Figura 3-17:	Diseño del circuito esquemático de los nodos retransmisores de la red inalámbrica de sensores (ESP32/ESP8266); elaboración propia.....	56
Figura 3-18:	Diseño PCB de los nodos retransmisores de la red inalámbrica de sensores (ESP32/ESP8266); elaboración propia.....	56
Figura 3-19:	Diseño 3D de la carcasa inferior del nodo sensor; elaboración propia.	57
Figura 3-20:	Diseño 3D de la tapa del nodo sensor; elaboración propia.	58
Figura 3-21:	Diseño 3D carcasa completa del nodo sensor; elaboración propia.	58
Figura 3-22:	Diseño 3D de la tapa del nodo retransmisor utilizado en la inalámbrica de sensores; elaboración propia.....	59
Figura 3-23:	Diseño 3D de la carcasa inferior del nodo retransmisor utilizado en la inalámbrica de sensores; elaboración propia.	59
Figura 3-24:	Diseño 3D carcasa completa del nodo retransmisor utilizado en la inalámbrica de sensores; elaboración propia.	60
Figura 3-25:	Estructura de red utilizada para la implementación de la red inalámbrica de sensores; elaboración propia.	61
Figura 3-26:	Interfaz gráfica de Node-RED utilizada para la conexión y configuración de los canales de ThingSpeak utilizados para visualizar los datos en tiempo real; elaboración propia.	62
Figura 3-27:	Gráfica de los datos recolectados por los nodos sensores y configuración de la alarma en tiempo real en ThingSpeak (canal de CO ₂ interior del aula); elaboración propia.	62
Figura 3-28:	Alerta enviada al correo electrónico del propietario del canal desde ThingSpeak; elaboración propia.....	63
Figura 3-29:	Alerta enviada a Twitter desde ThingSpeak; elaboración propia.	64
Figura 4-1:	Diferencia de la concentración de CO ₂ dentro y fuera de las aulas ($CO_{2interior}CO_{2exterior}$) para diferentes tipos de actividades; elaboración propia.....	69
Figura 4-2:	Probabilidad de infección por COVID-19 por partícula de exceso de CO ₂ exceso ($P_{per\ ppm}$) y el nivel de referencia de exceso de CO ₂ (ΔcCO_2^*) para diferentes tipos de actividades; elaboración propia.....	70
Figura 4-3:	Concentración promedio de CO ₂ interior en cada aula ($CO_{2interior}$) y la probabilidad de infección de COVID-19 para una persona susceptible (P) para diferentes tipos de actividades; elaboración propia.....	71

Figura 4-4: Concentración promedio de CO ₂ interior en cada aula (<i>CO₂interior</i>) y probabilidad de infección de COVID-19 para una persona susceptible (<i>P</i>) para diferentes tipos de actividades; elaboración propia.....	72
Figura 4-5: Concentración promedio de CO ₂ interior en cada aula (<i>CO₂interior</i>) y probabilidad de infección de COVID-19 para una persona susceptible (<i>P</i>) en función del tipo de actividad, número de estudiantes y cantidad de ventanas abiertas.....	73
Figura 4-6: Concentración promedio de PM _{2.5} y para diferentes horas del día; elaboración propia.	74
Figura 4-7: Umbral de concentración de CO ₂ en el aire interior y la concentración promedio de CO ₂ interior en cada aula (<i>CO₂interior</i>) para diferentes tipos de actividades; elaboración propia ..	75
Figura 4-8: Latencia promedio en la red inalámbrica de sensores en función del número de enlaces; elaboración propia.	76
Figura 4-9: Impacto del número de enlaces en la pérdida de paquetes en una red inalámbrica de sensores; elaboración propia.	77
Figura 4-10: Medición del RSSI en la red inalámbrica de sensores a diferentes distancias del nodo raíz al punto de acceso; elaboración propia.	78
Figura 4-11: Comportamiento de corriente, voltaje y tiempo de descarga del dispositivo (nodo sensor) ; elaboración propia.	79

Lista de tablas

Pág.

Tabla 2-1: Fuentes comunes de contaminación en ambientes interiores y exteriores con sus contaminantes principales; tomado y adaptado de [30].	26
Tabla 2-2: Tiempos de sedimentación desde una altura de 1.5 metros para diámetros específicos; tomado y adaptado de [34].	29
Tabla 2-3: Gotículas y aerosoles generados por actividades respiratorias humanas; tomado y adaptado de [36].	29
Tabla 4-1: Parámetros de entrada utilizados en el modelo descrito en la ecuación (3.1.2).	67

Introducción

La COVID-19 fue identificada por primera vez en diciembre de 2019 en Wuhan, China, y se convirtió en una pandemia que tuvo importantes consecuencias en los sistemas de salud, la economía y la política. En la actualidad, existe evidencia sólida de que el patógeno responsable de la COVID-19 se transmite principalmente a través de gotas de aerosol exhaladas por personas infectadas, que permanecen suspendidas en el aire en espacios cerrados [2]. Este comportamiento fue modelado inicialmente por Wells y Riley en [3], donde describen la transmisión por aire de aerosoles infecciosos en espacios cerrados. El modelo de Wells-Riley ha sido ampliamente utilizado para estimar el riesgo de infección de enfermedades respiratorias en espacios cerrados, ya que incluye varios parámetros, como el número de ocupantes y sus niveles de actividad respiratoria, el tiempo de exposición, las dimensiones del espacio, el tipo de ventilación y filtración del aire, la eficiencia de las mascarillas, entre otros.

Durante la pandemia, hubo un interés generalizado en mitigar el riesgo de contagio mediante la monitorización de los niveles de dióxido de carbono (CO₂) en espacios cerrados. El CO₂ es una fuente natural de datos para evaluar la calidad del aire en interiores, ya que los sensores son de bajo costo y ampliamente disponibles en el mercado; por ejemplo, en [4] se presentan correlaciones estadísticamente significativas entre los niveles de CO₂ y el ausentismo debido a enfermedades en escuelas primarias, y en [5] se encuentra una correlación directa entre los niveles de CO₂ y la concentración de bacterias en el aire en dos escuelas primarias. Por lo general, altos niveles de CO₂ se asocian con una mala calidad del aire, ya que un paciente infectado con COVID-19 exhala CO₂ y aerosoles infecciosos al respirar [4].

Con el fin de alertar a la comunidad de la universidad Antonio Nariño sede sur ante una ventilación deficiente frente al COVID-19 en aulas, se diseñó y construyó un dispositivo de monitoreo de la calidad del aire que mide, informa y analiza los niveles de CO₂ y material particulado dentro y fuera de las aulas de la Universidad Antonio Nariño sede sur, con el propósito de proporcionar información precisa a la comunidad académica sobre el estado de la calidad del aire.

1. Planteamiento del problema

1.1 Estado del arte

Para la presente investigación se estudiaron 10 artículos científicos enfocados a mitigar la propagación de COVID-19 mediante sensores de CO₂ que adviertan sobre una ventilación deficiente en aulas de clase.

El reporte técnico realizado por el Centro de Colaboración Nacional para la Salud Ambiental de Canadá pretende comprender mejor el razonamiento detrás del monitoreo de CO₂ en espacios cerrados con el fin de presentar sus beneficios y limitaciones [6]. Para esto, los autores consultan con expertos en salud ambiental, calidad del aire y salud ocupacional para evaluar los retos asociados al monitoreo de CO₂ y sugerir enfoques potenciales; adicionalmente, se hace una revisión bibliográfica con el fin de presentar las pautas y directrices que han generado otras entidades de salud reconocidas, cuales autoridades. Como resultado, el reporte técnico presenta lineamientos específicos para implementar el monitoreo de CO₂ en espacios cerrados siguiendo las recomendaciones de NIOSH, INS, etc. Específicamente, se abordan temas como los umbrales permitidos de CO₂ en espacios cerrados, la interpretación de los niveles de CO₂, los tipos de sensores de CO₂, la ubicación de los sensores y los errores comunes en la interpretación de resultados. En conclusión, este reporte técnico nos ofrece una visión general con el fin de implementar monitoreo de CO₂ efectivo ajustado a las aulas de la Universidad.

El objetivo de [7] es garantizar una ventilación adecuada de aire en los salones de clase de 9 colegios ubicados en el sur de Italia. Esto, a través del monitoreo de los niveles de CO₂ usando sensores de infrarrojo no dispersivos y aplicando protocolos detallados de ventilación del aire. El artículo clasifica en 4 niveles el riesgo de contagio y recomienda acciones específicas que deben aplicar los docentes para garantizar una adecuada ventilación del aire. Cuando los docentes implementan rigurosamente los protocolos de ventilación, se observa una mejora general de los niveles de CO₂ en los salones de clase. Sin embargo, se observaron salones de clase donde no mejoraban los niveles

de CO₂ a pesar de la implementación de los protocolos de ventilación debido a limitantes estructurales del edificio. En este caso, se recomienda usar equipos de ventilación con filtros de aire.

Por otra parte, [8] estima la probabilidad de infección en 45 salones de clase ubicados en el Reino Unido. En general, los autores desean comprender el riesgo de infección transmitida por el aire para los miembros de la comunidad académica, y para ello, monitorean el CO₂. Se concluye que el riesgo de infección varía dramáticamente según la temporada, específicamente, en invierno existe el doble de riesgo de infección que en verano. Lo anterior, se explica dado que en invierno los estudiantes pasan una mayor cantidad de tiempo en el aula, lo cual aumenta los niveles de CO₂.

En [9], se evalúan las condiciones de ventilación y los niveles de material particulado en 19 aulas de clase en España. En particular, los autores se enfocan en las aulas con peor desempeño con el fin de identificar factores de influencia y oportunidades de mejora. El estudio encontró que el 26% de las aulas examinadas excedía los límites recomendados de CO₂; el 63% de las aulas excedía el límite de concentración de PM_{2.5}; y, el 32% de las aulas excedía el límite de concentración de PM₁₀.

Adicionalmente, [10] estudia la calidad de aire y la comodidad térmica en 2 aulas de clase durante y antes de la pandemia en España; específicamente, los autores monitorean el CO₂, la temperatura y la humedad de los salones durante los periodos de invierno. Antes de la pandemia, la comunidad académica daba mayor prioridad a la comodidad térmica que a la calidad del aire. Sin embargo, desde que inició la pandemia, se recomienda favorecer la ventilación natural de los espacios cerrados (i.e., mantener las ventanas abiertas) a pesar de las bajas temperaturas que se presentan en invierno. En conclusión, los autores muestran que, aunque los niveles de CO₂ durante la pandemia bajaron 400 ppm, la comunidad académica estuvo en condición de incomodidad térmica durante más del 60% de las horas de clase.

De otro lado, [11] utiliza el CO₂ como un indicador para estimar la tasa de ventilación y el riesgo de infección en 3 salones de clase de Canadá. Específicamente, los autores proponen un modelo que le permite a los docentes estimar la tasa de ventilación de los salones a partir de las mediciones de CO₂. Dicho modelo indica que, si el promedio en el tiempo del CO₂ es menor que 450 ppm, entonces, eso significa que la tasa de ventilación es mayor que 10 renovaciones de aire por hora; dicho valor puede ser utilizado en la presente investigación a la hora de suministrar una aproximación de renovaciones de aire; específicamente, con las condiciones de un aula de clase de la Universidad Antonio Nariño

sede sur. Adicionalmente, los autores estiman los umbrales seguros de la tasa de ventilación y el CO₂ que evitan la propagación de COVID-19 como una función de tiempo de exposición en el aula. Así, se concluye que para un tiempo de exposición en el aula menor a 8 horas la tasa de ventilación debe estar entre 3 – 8 renovaciones de aire por hora y el CO₂ debe ser menor de 500 ppm.

En [2] los autores reconocen que el riesgo de transmisión depende de dos factores fundamentales: las concentraciones del patógeno en el aire y el tiempo de exposición. De un lado, las concentraciones del patógeno en el aire están directamente relacionadas con los niveles de CO₂ en la habitación (D., 2003). Por otro lado, la evolución en el tiempo de diferentes procesos físicos modifica las concentraciones de patógenos en un espacio cerrado, por ejemplo, la producción de patógenos a partir de la actividad vocal y la interpretación de instrumentos musicales de viento, el uso de sistemas de filtrado de aire, la sedimentación de los CO₂ y su desactivación. Por lo tanto, los autores proponen un modelo matemático que predice el riesgo de transmisión a partir de mediciones de CO₂, el cual tiene en cuenta las concentraciones del patógeno en el aire y el tiempo de exposición. Finalmente, los autores muestran ejemplos concretos para implementar este modelo en salones de clase y espacios de oficinas en instituciones de educación superior.

Además, [12] propone un sistema inteligente de ventilación que es eficiente a nivel de energía, y a su vez, es capaz de reducir el riesgo de infección. Este sistema utiliza una red neuronal artificial que predice el riesgo de infección tomando como entrada las dimensiones del espacio cerrado, el número de ocupantes, los niveles de concentración de CO₂ y la tasa de flujo de aire exterior. Adicionalmente, dichos parámetros de entrada son obtenidos a partir de una simulación computacional de dinámica de fluidos. El sistema inteligente de ventilación controla la operación de la calefacción, la ventilación y el aire acondicionado con el fin de ajustar el caudal de aire suministrado en el espacio cerrado para reducir el riesgo de infección. Finalmente, los autores resaltan que el umbral de CO₂ para un nivel de riesgo determinado varía según las características y el uso del espacio cerrado.

[13] propone expresiones analíticas de la probabilidad de infección y las aplican en espacios cerrados típicos. Como resultado, los autores encuentran que las concentraciones de CO₂ para determinado riesgo de infección varían en 2 órdenes de magnitud dependiendo de las características y el uso del espacio cerrado. Finalmente, los autores recomiendan ajustar los umbrales de concentración de CO₂ dependiendo de la actividad que se vaya a desarrollar en el espacio cerrado; así mismo, los autores sugieren que en espacios cerrados se limite al máximo la actividad física intensiva o las conversaciones con alto volumen.

Finalmente, [14] monitorea los niveles de CO₂ en dos salas geriátricas ubicadas en un hospital de Bélgica usando el dispositivo comercial de nombre Aranet4 Home. El objetivo del estudio es determinar si las enfermeras y el personal hospitalario vigilan periódicamente los monitores de CO₂ e incrementan la ventilación en caso de ser necesario; es decir, los autores desean investigar si el personal hospitalario hace modificaciones en su rutina de trabajo al introducir monitores de CO₂ en el hospital. El estudio reconoce que el personal de la salud se resiste a hacer cambios en sus rutinas de trabajo, dado que ellos tienen numerosas responsabilidades. Por lo tanto, los autores presentan un caso de estudio en el Departamento de Geriátrica del Hospital Imelda donde se estima el impacto en el comportamiento del personal de la salud al incluir monitores de CO₂ en el hospital.

1.2 Problemática

La COVID-19 fue identificada en Wuhan, China en diciembre de 2019, y a la fecha, ha causado una pandemia global devastadora [15]. Actualmente, existe evidencia contundente que indica que el patógeno responsable de la COVID-19 es transmitido principalmente a través de gotitas de aerosol exhaladas por individuos infectados, las cuales permanecen suspendidas en el aire de los espacios cerrados hasta por 8 horas [2] Por ejemplo, los autores en [16] detectaron viriones infecciosos de SARS-CoV-2 suspendidos en el aire a una distancia de 5,4 metros de un paciente infectado. Este comportamiento es modelado en [17] [3] donde se describe la transmisión aérea en un espacio interior que está mezclado por flujos de aire, de modo que los aerosoles infecciosos se dispersan uniformemente por todo el espacio. Dicho modelo se conoce como Wells-Riley y ha sido ampliamente usado para evaluar el riesgo de transmisión en espacios cerrados considerando variables como el tiempo de exposición, el número de ocupantes y su actividad respiratoria, las dimensiones del espacio, el tipo de ventilación, el filtrado del aire, y la eficiencia de los tapabocas [4] [18] [19] [20].

Disminuir la propagación de COVID-19 el monitoreo de CO₂ en espacios cerrados se ha convertido en una práctica común, por ejemplo, en países como Italia [7], Reino [8], España [9] [10] y Canadá [11] se han llevado a cabo estudios para estimar el riesgo de infección a partir de mediciones de CO₂ en aulas de clase de colegios y universidades. De este modo, el desafío tecnológico consiste en medir los niveles de CO₂ en decenas de salones de clase y reportar la información a un servidor centralizado en internet; este desafío puede ser abordado utilizando las ideas fundamentales del

Internet de las Cosas (IoT). El IoT es el nuevo paradigma de telecomunicaciones que propone conectar “las cosas” que nos rodean a internet, por ejemplo, neveras, aspiradoras, bombillos, carros, relojes, peceras, entre otros [21]; en términos generales, el IoT utiliza sistemas embebidos de bajo costo y con recursos restringidos que se encargan de monitorear y controlar variables físicas tales como la calidad del agua de un lago [22], la calidad del aire de un pueblo [23], el tráfico de una ciudad [24], entre otros. Específicamente, las redes inalámbricas de sensores es una rama del IoT especialmente útil dado que su objetivo es conectar un gran número de sensores entre ellos para que trabajen de forma colaborativa. De este modo, en esta propuesta, nuestro objetivo primordial es implementar una red inalámbrica de sensores que advierta sobre una ventilación deficiente frente al COVID-19 en las aulas de clase de la Sede-Sur usando IoT.

A mediados del 2007, se inició la práctica de monitorear el dióxido de carbono (CO₂) con el fin de evaluar cuantitativamente el riesgo de transmisión de enfermedades respiratorias en espacios cerrados [25]. El CO₂ es una fuente natural de datos para evaluar la calidad del aire en espacios interiores dado que los sensores son económicos y están ampliamente disponibles en el mercado. Por ejemplo, en [4] se encuentran correlaciones significativas estadísticamente entre los niveles de CO₂ y el ausentismo relacionado con enfermedades en colegios y oficinas; además, en [5] se encuentra una correlación directa entre los niveles de CO₂ y las concentraciones de bacterias en el aire. En general, los altos niveles de CO₂ están asociados con una baja calidad del aire. De este modo, los autores en [4] evalúan el riesgo de transmisión aérea en interiores usando mediciones de CO₂ y el modelo Wells-Riley. Específicamente, los autores consideran que los niveles de CO₂ son un indicador de aerosoles infecciosos dado que los individuos infectados exhalan ambos componentes al respirar. Por lo tanto, durante la pandemia se ha producido un interés generalizado en mitigar el riesgo de contagio a través del monitoreo de CO₂ en espacios cerrados. Por ejemplo, en [13] se estiman los niveles seguros de CO₂ que mitigan el riesgo de contagio de COVID-19 en varios espacios cerrados; así, los autores encuentran que los niveles de CO₂ varían hasta 2 órdenes de magnitud dependiendo de las características de lugar (tamaño, ventanas, temperatura) y el uso del espacio (canto, lectura, ejercicio, clase magistral).

La principal ventaja de medir el CO₂ como indicativo nativo para evitar un posible riesgo de infección es que, mediante sensores con tecnología de infrarrojo se puede reflejar en tiempo real el cambio de concentración respecto al tiempo [26], asimismo, el CO₂ censado se puede usar como

indicador de las concentraciones de SARS-CoV-2 el cual permitirá un monitoreo del riesgo de transmisión por aerosoles en interiores [13]. A través de la red inalámbrica de sensores se pretende contar con dispositivos electrónicos, los cuales posean un modelo matemático que estime los umbrales mínimos para que exista un riesgo de propagación de SARS-CoV-2 en dos aulas de clase de la universidad Antonio Nariño sede sur, que además, realicen la función de co-ayudante junto a los mecanismos y recomendaciones que se encuentran presentes día a día con respecto a ejercer un cuidado personal y social frente al SARS-CoV-2; a continuación, se ilustrará un esquema del diseño de conexión de la red inalámbrica de sensores.

1.3 Justificación

Al finalizar el año 2021 se reportaron más de 278 millones de casos (totales) de SARS-CoV-2 en todo el mundo, siendo América el continente más afectado con un 36% de tenencia seguido de Europa con un 35%, en este aspecto se cuenta con un acumulativo de más de 5.3 millones de muertes alrededor del planeta [27].

En diciembre del año 2021 según el Instituto nacional de salud (INS), Colombia supero los cinco millones de casos confirmados de SARS-CoV-2 y las muertes superaban las 130 mil, para dicho mes en total se habían hecho más de 26 millones de pruebas y además se habían aplicado más de 61 millones vacunas del mismo modo en el reporte dado por la secretaria de salud se muestra que el 28.6% de los casos reportados se encuentran en Bogotá D.C acumulando por sí misma más de 1.6 millones de casos

En [28] se expone que las partículas de aerosol de SARS-CoV-2 son emitidas mediante respiración normal y además se encuentran presentes tanto en personas sintomáticas como en asintomáticas, manteniéndose activo hasta un máximo aproximado de una hora en al ambiente y pudiendo ser trasladado. Así mismo, la evaporación y la fragmentación pueden reducir el tamaño de las gotículas, sin embargo, también se pueden unir mediante coalescencia.

Por otro lado, se expone que las partículas de aerosol que contienen el virus también se pueden unir con las partículas de contaminación en el ambiente, desde otro punto de vista en el estudio de [29]

se detalla que el material particulado se ha vinculado a otras enfermedades respiratorias en los últimos años, proporcionando coalescencia con aerosoles de enfermedades como el H1N1 en 2009, el síndrome respiratorio agudo severo (SARS) en 2003, entre otros, por lo tanto, se justifica el interés de tener a disposición los datos de material particulado a la vez que se mide la concentración de dióxido de carbono en el ambiente.

Dicho lo anterior, para la elaboración del dispositivo electrónico se utilizará un modelo teórico-práctico que se actualizará dependiendo de datos en tiempo real y condicionado por las especificaciones del aula de clase; por ejemplo, la concentración de dióxido de carbono dentro y fuera del aula, la tasa de respiración propia de la persona susceptible al virus (la cual dependerá de la actividad ejercida), la eficiencia de filtrado por inhalación y exhalación de los cubrebocas, la fracción de virus exhalado por una persona contagiada, la duración de la muestra, entre otros.

De esta forma, con la ayuda de la guía propuesta y la recolección de datos se proporcionará un modelo que cuenta con un aporte diferencial y práctico que facilitará el límite de concentración de CO₂, donde no será necesario acudir a variaciones de concentración “estándar” ni a límites de referencia propuestos por autores en diferentes locaciones del planeta. Además, el límite extraído mediante el modelo podrá tener una variación de hasta 2 órdenes de magnitud y se ajustará a las condiciones propias del aula a monitorear.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Implementar una red inalámbrica de sensores de CO₂ usando IoT como sistema de alerta ante una ventilación deficiente frente al COVID-19 en aulas de clase.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Identificar los niveles de CO₂ que representan un riesgo para la transmisión de COVID-19 según las características del aula de clases.

2. Construir un dispositivo electrónico que a partir de mediciones de CO₂ alerte al usuario sobre una ventilación deficiente.
3. Construir una red inalámbrica de sensores para enviar los niveles de CO₂ y las alarmas a un servidor en la nube usando IoT.
4. Evaluar el desempeño de la red inalámbrica de sensores en advertir un posible caso de riesgo de infección de COVID-19 basado en identificar picos de concentraciones riesgosas de CO₂, la efectividad de las alarmas y los indicadores de telecomunicaciones.

1.5 Alcance

A lo largo de la presente investigación, se pretende consultar en bases de datos certificadas y en revistas científicas un modelo de riesgo el cual permita la aproximación de la concentración máxima de dióxido de carbono para prevenir el contagio de SARS-CoV-2. Además, se busca que el mismo modelo consultado posibilite calcular la probabilidad de contagio según las condiciones dadas en las aulas de clase de la Universidad Antonio Nariño sede sur.

Posteriormente, se construirán 2 dispositivos electrónicos con base en un diseño de PCB los cuales tendrán la capacidad de monitorear y recolectar datos referentes a la concentración de CO₂ y material particulado, así como distribuir la información entre los dispositivos emparejados a través de una topología multisalto y compartirlos en la nube mediante ThingSpeak. De esta manera, se logrará obtener la información de todos los dispositivos enlazados para que se puedan adoptar mecanismos de ventilación o diferentes soluciones frente a riesgos de propagación del SARS-CoV-2.

Finalmente, al evaluar el desempeño de la red inalámbrica de sensores, se aportará información relevante entorno a los estándares de bioseguridad en las aulas de la Universidad Antonio Nariño sede sur.

2. Marco teórico

2.1 Agentes contaminantes en espacios cerrados

La calidad del aire en espacios cerrados es un aspecto importante para la salud de las personas que pasan tiempo en edificios no industriales como oficinas, escuelas, universidades, restaurantes y hogares. Esta relación ha cobrado mayor importancia debido a la asociación con el "síndrome del edificio enfermo" al cual se le atribuye un amplio rango de síntomas o enfermedades que las personas que trabajan o habitan en dicho edificio le inculpan al edificio en sí [30]. Una mezcla de contaminantes de bajo nivel, así como las condiciones de humedad y temperatura, pueden afectar la percepción de la calidad del aire interior, por lo que el olor es un indicador útil. Los factores que afectan la calidad de un espacio cerrado incluyen ventilación inadecuada, calidad del aire exterior y la presencia de fuentes interiores de contaminación. La ventilación debe ser suficiente para diluir los contaminantes a niveles que no sean perjudiciales para la salud y la percepción humana, por otro lado, por volumen de aire insuficiente, alta recirculación, ubicación inadecuada de los puntos de ventilación, ventilación insuficiente, distribución inadecuada y falta de mantenimiento o diseño del sistema de filtración incorrecto. Los contaminantes externos como el CO, los hidrocarburos y los óxidos de nitrógeno provienen principalmente de la combustión de los vehículos de motor, los óxidos de azufre y las partículas de la combustión de combustibles fósiles en la industria y las centrales eléctricas [31]. En la **Tabla 2-1** se ilustra una síntesis de los contaminantes más importantes del aire tanto interno como externo, así como sus fuentes generadoras.

Tabla 2-1: Fuentes comunes de contaminación en ambientes interiores y exteriores con sus contaminantes principales; tomado y adaptado de [31].

Situación	Fuente de emisión	Contaminante
Exterior	Producción industrial	SO_2 , NO_2 , NO , Ozono,
	Vehículos de motor	Partículas, CO y COV
	Suelo	CO, NO_2 , NO , plomo
		Radón
	<i>Materiales de construcción</i>	Radón
	Piedra, hormigón	Formaldehído, COV
	Compuestos de madera	Formaldehído, fibra de vidrio
	Aislamiento	Asbesto
	Ignífugos	COV, plomo
	Pintura	
Interior	<i>Instalaciones y mobiliario</i>	CO, CO_2 , SO_2 , NO, COV,
	Calefacción, cocinas	partículas
	Fotocopiadoras	Ozono
	Sistemas de ventilación	Microorganismos
	<i>Ocupantes</i>	
	Actividad metabólica	CO_2 , vapor de agua
	Actividad biológica	Microorganismos
	<i>Actividad humana</i>	
	Tabaquismo	CO, partículas.
	Ambientadores	Fluorocarburos, olores
	Limpieza	COV, olores
	Ocio, actividades artísticas	COV, olores

Por otro lado, existe un tipo específico de contaminante que puede ser encontrado en espacios cerrados, estos son los contaminantes biológicos. Dichos contaminantes incluyen diferentes tipos de agentes de origen biológico, como bacterias, virus, hongos y alérgenos. Cada uno de estos agentes puede tener un impacto diferente en la salud humana, por lo que es importante comprender las características y riesgos asociados con cada uno de ellos.

2.1.1 Agentes contaminantes de origen bacteriano

Los contaminantes biológicos principales de origen bacteriano en espacios cerrados son las denominadas bacterias saprófitas, las cuales son parte de la microflora normal encontrada en la nariz, boca, oído, etc. Otros tipos de bacterias que se encuentran en los espacios interiores incluyen bacterias heterotróficas que crecen en reservorios de agua o sitios húmedos como lavabos de baño. Los humanos son una importante fuente de bacterias interiores, ya que las células y fragmentos de bacterias se eliminan al hablar, toser o estornudar [32]. Por otra parte, las bacterias más comunes que se pueden identificar en el aire interior son micrococos, estafilococos, estreptococos y corynebacterium [33].

2.1.2 Agentes contaminantes de origen viral

Los virus son entidades acelulares que requieren un huésped para su replicación y multiplicación, y pueden crecer en objetos naturales o fabricados por el hombre, además, la supervivencia de los virus respiratorios y el riesgo de infección y enfermedad están a menudo relacionados con el aire en interiores. Las actividades humanas como el toser, estornudar, hablar y reír pueden dispersar millones de virus en el ambiente interior [31]; los virus se pueden propagar por diferentes formas, las cuales incluyen la contaminación por gotículas, aerosoles y superficies contaminadas.

- **Contagio por aerosoles contaminados:** Los aerosoles son partículas sólidas o líquidas que se encuentran en suspensión en el aire o en un gas y son lo suficientemente pequeñas (<100µm) como para permanecer en el aire por períodos prolongados debido a su baja velocidad de sedimentación (los tiempos de sedimentación para diámetros específicos pueden verse en la **Tabla 2-2**) y ser transportados por corrientes de aire. La tos o el estornudo generan una cantidad sustancial de partículas, de las cuales la mayoría tiene un diámetro <5-10 µm, igualmente, las partículas lanzadas al aire por la tos o el estornudo se reducen rápidamente de tamaño por evaporación, aumentando el número de partículas que actúan como aerosoles [34]. Del mismo modo, los aerosoles son partículas sujetas a la aerodinámica del gas en el que se encuentran, por lo que las condiciones ambientales como la humedad, la temperatura y la ventilación pueden acelerar la transmisión de aerosoles y contribuir a la propagación de la enfermedad, por ejemplo, en espacios con poca ventilación, baja humedad y alta temperatura, los aerosoles con baja concentración del virus pueden ser altamente contagiosos en comparación a un espacio que posea buena ventilación. Los aerosoles

respiratorios pueden ser clasificados en aerosoles alveolares, bronquiales, laríngeos y orales, según el lugar de producción; los aerosoles bronquiales se forman durante la respiración normal y se producen cuando la capa líquida que recubre las superficies luminales de los bronquios se rompe durante la exhalación, son aerosoles generados por fuerzas de cizallamiento deshabilitando la interfaz aire-líquido o aire-moco, los aerosoles laríngeos se producen a través de las vibraciones de las cuerdas vocales durante la vocalización, mientras que las partículas ($>100\ \mu\text{m}$) se producen principalmente de la saliva en la cavidad oral [34].

Se ha demostrado que el tamaño de estas partículas juega un papel crucial en la ubicación de la deposición del aerosol, además de otros factores como el impacto inercial, sedimentación gravitacional, difusión browniana, precipitación electrostática y la interceptación, por ejemplo, las partículas de más de $5\ \mu\text{m}$ se depositan principalmente en la nasofaringe, especialmente por la fuerza de impacto inercial y sedimentación gravitacional, mientras que los aerosoles de menos de $5\ \mu\text{m}$ pueden penetrar profundamente en los pulmones y depositarse en la cavidad alveolar (**Figura 2-1**) [35].

Figura 2-1: Retención de aerosoles en diferentes partes del tracto respiratorio; tomado y adaptado de [35].

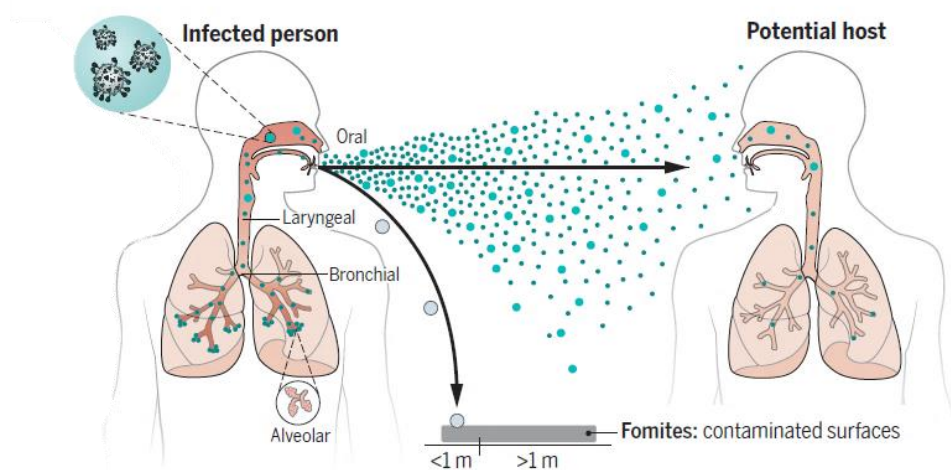


Tabla 2-2: Tiempos de sedimentación desde una altura de 1.5 metros para diámetros específicos; tomado y adaptado de [35]

Tamaño de partícula	Tiempo de sedimentación
100 μm	5 seg
5 μm	33 min
1 μm	12.2 h
<1 μm	Prácticamente no se sedimentan

- **Contagio por gotículas contaminadas:** La transmisión por gotículas o también conocida como transmisión por gotas gruesas, se refiere a la transmisión de enfermedades a través de gotas con diámetros mayores a 100 micras ($>100\mu\text{m}$) (figura 2-1), dichas partículas son transportadas por el flujo de aire turbulento generado por un evento espiratorio violento como toser o estornudar y generalmente se sedimentan dentro de una distancia de 1 y 2 metros [35]. La **Tabla 2-3** ilustra información detallada sobre las gotículas y aerosoles generados por las actividades respiratorias humanas. Cuando las gotículas son expulsadas pueden ser pulverizadas y depositadas directamente en las membranas mucosas de un huésped susceptible (ojos, fosas nasales, o boca), además, debido a su rápida sedimentación las gotículas se pueden depositar rápidamente en las superficies (volviéndolas fómites infecciosos) por efecto de la gravedad [36].

Tabla 2-3: Gotículas y aerosoles generados por actividades respiratorias humanas; tomado y adaptado de [37].

Actividad	Número de gotículas y aerosoles generados (1-100 μm)	Presencia de aerosoles (1-2 μm)	Región de origen
Respiración normal (durante 5 minutos)	Ninguno - pocos	Algunos	Nariz
			Nariz
Una sola expiración nasal fuerte	Pocos - pocos cientos	Algunos	

Contando en voz alta- hablando	Pocas docenas - pocos cientos	En su mayoría	Parte delantera de la boca
Una sola tos (boca abierta)	Ninguno - pocos cientos	Algunos	Región faucial
Una sola tos (boca inicialmente cerrada)	Pocos cientos - muchos miles	En su mayoría	Parte delantera de la boca
Estornudo único	Pocos cientos de miles-pocos millones	En su mayoría	Parte delantera de la boca

- **Contagio por superficies contaminadas:** Las personas producen gotas respiratorias durante la conversación, el tosido, el estornudo y otras actividades similares; dichas gotas potencialmente pueden contener diferentes tipos de patógenos, incluyendo virus y bacterias. La mayoría de las gotas se depositan en varios objetos (por ejemplo, pomos de puerta, superficies de mesa y pantallas táctiles), convirtiéndolos en “fómites” infecciosos [38] (**Figura 2-1**). Los virus pueden sobrevivir en superficies durante varios días, lo que significa que las superficies pueden ser una fuente de infección. Al tocar una superficie contaminada y luego tocarse la boca, nariz u ojos, una persona puede infectarse con el agente infeccioso que estaba depositado en la superficie.

2.1.3 Agentes contaminantes de origen fúngico

Los hongos son microorganismos unicelulares o multicelulares que tienen hifas microscópicas, a las que están unidos diversos tipos de estructuras formadoras de esporas (conidios). Las concentraciones de esporas de hongos varían de 100/m³ a 100.000/m³ en el aire libre [32]. La exposición a los hongos puede causar patologías a través de varios mecanismos como: inmunológicos (alérgicos), infección y efectos irritantes causados por la exposición a varias composiciones volátiles [31]. Las enfermedades fúngicas transmitidas por el aire afectan principalmente a los pulmones y, posteriormente, pueden afectar a otros tejidos y causar enfermedades sistémicas, las enfermedades más comunes incluyen neumonía por *Pneumocystis carinii*, una reacción de hipersensibilidad causada por *Alternaria*, *Botrytis*, *Aspergillus*, *Puccinia*, *Penicillium*, *Serpula*, *Cladosporium* y

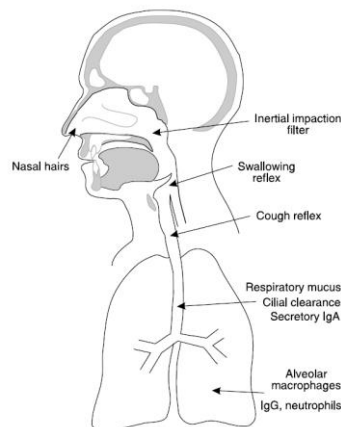
Mucor, por otro lado, las enfermedades respiratorias más comunes asociadas con la exposición a bioaerosoles son las alergias, especialmente el asma y la rinitis. [39].

2.2 Infección respiratoria aguda

En [40] la OMS menciona que las infecciones respiratorias agudas son una causa principal de mortalidad y morbilidad, además, representan una amenaza para la salud pública en todo el mundo. Estas infecciones pueden ser causadas por virus o una combinación de virus y bacterias, dichas infecciones son contagiosas y se propagan rápidamente. La mayoría de estos se transmiten a través de gotas o gotículas, pero también por contacto o por aerosoles respiratorios infecciosos.

En términos fisiológicos, el sistema respiratorio tiene como función principal el intercambio de gases, por lo que está constantemente expuesto a un ambiente gaseoso que incluye diferentes tipos de material particulado orgánico, como bacterias, virus y esporas. Aunque todo el sistema respiratorio está expuesto al aire, gran parte de las partículas se filtran en los cilios nasales y por impacto inercial con superficies cubiertas de moco en la nasofaringe posterior. La epiglotis, su reflejo de cierre y el reflejo de la tos (**Figura 2-2**) reducen el riesgo de que los microorganismos lleguen al tracto respiratorio inferior. Las partículas que son lo suficientemente pequeñas como para llegar a la tráquea y los bronquios se adhieren a la capa de moco respiratorio y son impulsadas hacia la orofaringe por la acción de los cilios, asimismo, la adquisición de patógenos microbianos se produce principalmente por inhalación, pero también puede ocurrir por aspiración, difusión mucosal y hematogénica [41].

Figura 2-2: Reflejo de cierre y el reflejo de la tos; tomado de [41].



2.3 Coronavirus

Los coronavirus (CoV) son una familia de virus que se encuentran en humanos y en muchas especies animales diferentes. Están clasificados en la subfamilia Orthocoronaviridae y se pueden agrupar en 4 géneros: Alphacoronavirus (α -CoV), Betacoronavirus (β -CoV), Gammacoronavirus (γ -CoV) y Deltacoronavirus (δ -CoV). Estructuralmente, todos los CoV son virus envueltos con una membrana lipídica derivada de la célula huésped cuyo ácido ribonucleico de cadena simple (ARN) tiene polaridad positiva. Los α -CoV y β -CoV pueden infectar mamíferos, mientras que los γ -CoV y δ -CoV principalmente infectan aves, igualmente, los CoV tienen una alta tasa de mutación debido a su ARN polimerasa y pueden ocurrir recombinaciones homólogas, Dichas propiedades han contribuido a la gran diversidad de CoV en la naturaleza, permitiéndoles infectar numerosas especies. Del mismo modo, la presencia de CoV en una amplia variedad de especies animales sugiere que estos patógenos son de origen zoonótico y se transmiten de animales salvajes a humanos. La mayor diversidad de CoV que se han detectado han sido en murciélagos y se hipotetizó que las primeras introducciones de CoV en humanos provienen originalmente de virus en murciélagos que se propagaron a animales intermedios antes de exponer a los humanos, sin embargo, aún existen interrogantes en la detección de CoV zoonóticos en poblaciones de animales salvajes[42].

2.3.1 SARS-CoV-2

El brote de un nuevo tipo de coronavirus, llamado inicialmente 2019-nCoV, fue reportado por China en diciembre de 2019 en la ciudad de Wuhan. En enero de 2020, se identificó como un nuevo β -CoV del grupo 2 y recibió el nombre oficial de SARS-CoV-2 (Síndrome Agudo Respiratorio Severo-CoV-2) por parte del Comité Internacional de Taxonomía de Virus. La enfermedad causada por el virus fue llamada COVID-19 por la OMS. El genoma del SARS-CoV-2 muestra similitudes con otros β -CoV encontrados en murciélagos y se cree que proviene de ellos, consecuentemente fue transmitido a otros animales y finalmente a los humanos[42]; este virus tiene una forma redonda o elíptica, a menudo pleomórfica y un diámetro entre 60-140 nm y al igual que otros CoVs, es sensible a los rayos ultravioleta y al calor [43].

La mayoría de los brotes de COVID-19 se han vinculado con interacciones en contacto cercano en ambientes interiores, como el hogar o espacios interiores con alta densidad de personas y períodos prolongados de contacto. Además, se cree que la propagación del SARS-CoV-2 está fuertemente

influenciada por el contacto con una persona infectada a través de aerosoles, gotículas y superficies contaminadas [44].

Según la OMS, la transmisión por gotículas y aerosoles puede ocurrir en contacto cercano con personas sintomáticas o asintomáticas, las cuales estén realizando algún tipo de actividad física o posean síntomas respiratorios. La infección por gotículas se puede dar en una distancia entre los 1 y 2 metros debido al comportamiento balístico de las gotículas, el cual hace que descienda al suelo en pocos segundos debido a la gravedad, en tales casos, las gotas cargadas de virus pueden entrar en la boca, la nariz o los ojos de una persona susceptible y causar un contagio[1]. Por otro lado, cuando se trata de una infección mediada por aerosoles, se hace énfasis en la exposición a partículas respiratorias menores de 100 micras, las cuales, por su muy baja tasa de sedimentación pueden permanecer suspendidas en el aire por un período prolongado de tiempo (segundos hasta horas) durante el cual puede ser inhalado a una distancia mayor de dos metros del emisor o incluso en ausencia de un emisor si todavía persisten en el aire [45]. Con respecto a los fómites, las superficies u objetos pueden contaminarse por la deposición directa de partículas virales o por la contaminación cruzada al tocar un objeto con las manos contaminadas, consecuentemente, el virus es transferido a las membranas nasales, la mucosa oral o la mucosa conjuntival del huésped susceptible provocando la infección [46].

Finalmente, el primer paso para el control de la COVID-19 fue la detección rápida y precisa del SARS-CoV-2 mediante la reacción en cadena de la polimerasa con transcriptasa inversa en tiempo real (RT-PCR). La RT-PCR detecta el ácido nucleico del SARS-CoV-2 en el líquido nasofaríngeo. Esta prueba se utiliza para prevenir la propagación de la infección entre individuos y comunidades.

2.4 Sistemas en chip

El chipset de una computadora es un circuito integrado que se encarga de la comunicación entre la CPU, RAM, almacenamiento y otros periféricos. El chipset determina cuántos componentes de alta velocidad o dispositivos USB puede soportar la placa madre y cuenta con controladores para periféricos asociados, por otro lado, un sistema en chip o “System on chip” (SoC) es un circuito integrado único que incorpora todos los componentes de un sistema electrónico en un solo chip. A diferencia de los chipsets convencionales que solo contienen componentes digitales, como

procesadores, memoria y bus, los SoCs pueden contener también componentes analógicos y de radio. Además de un procesador, el SoC por lo general contiene una GPU (procesador gráfico), memoria, controlador USB y circuitos de gestión de energía. Debido a que el SoC incluye tanto el hardware como el software, utiliza menos energía, tiene un mejor rendimiento, requiere menos espacio y es más confiable que los sistemas de múltiples chips [47][48].

2.5 Sensores de dióxido de carbono

El CO₂ es un componente natural del aire que nos rodea y se exhala por los seres humanos durante la respiración, por lo que, la cantidad de CO₂ emitido varía de manera cuantitativa con las actividades y puede acumularse sustancialmente en edificios con ventilación insuficiente. Los sensores de dióxido de carbono (CO₂) son dispositivos ampliamente utilizados hoy en día para monitorear y controlar los niveles de dióxido de carbono en el aire y así asegurar la salud y seguridad de los ocupantes. Además, los sensores de CO₂ son herramientas establecidas para evaluar la ocupación y los requisitos de ventilación de los espacios interiores [2]. En la actualidad existen diferentes tipos de sensores de CO₂ disponibles, siendo los más comunes los dispositivos NDIR (infrarrojo no dispersivo), los electroquímicos y los basados en óxidos metálicos semiconductores.

2.5.1 Sensores de infrarrojo no dispersivo

Los sensores NDIR (Infrarrojo No Dispersivo) funcionan midiendo el cambio neto en la luz que se produce en una longitud de onda específica cuando se absorbe el CO₂. La intensidad de la luz absorbida se utiliza para determinar la concentración de CO₂, hoy en día los sensores NDIR son ampliamente utilizados debido a su alta precisión, amplio rango de medición, durabilidad y confiabilidad [49]. Estos sensores se utilizan en una variedad de aplicaciones, incluyendo monitoreo de la calidad del aire interior, detección de fugas de gas, monitoreo de la calidad del aire exterior y en la industria alimentaria.

2.5.2 Sensores electroquímicos

Los sensores de CO₂ electroquímicos funcionan mediante una reacción química que produce una corriente eléctrica proporcional a la cantidad de CO₂ presente en el ambiente. Dentro del sensor, hay un electrodo de trabajo y un electrodo de referencia separados por una capa de electrolito. Cuando el CO₂ entra en contacto con el electrodo de trabajo, reacciona con el electrolito, lo que produce una corriente eléctrica. Esta corriente se mide y se utiliza para calcular la concentración de CO₂ en el ambiente [50].

2.5.3 Sensores de óxidos metálicos semiconductores

Los sensores de CO₂ basados en óxidos metálicos semiconductores utilizan un cuerpo poroso de bloques sinterizados que consisten en partículas policristalinas de un óxido semiconductor como SnO₂, WO₃, ZnO e In₂O₃. Por lo general, estos sensores tienen un calentador integrado que se utiliza para calentar el dispositivo a la temperatura óptima. Cuando se expone a un gas específico, el sensor cambia su resistencia eléctrica y la respuesta del gas, también conocida como sensibilidad, depende de la temperatura de operación y de la concentración del gas. Estos sensores se caracterizan por su bajo costo, tamaño compacto, y su capacidad para detectar concentraciones de CO₂ en un rango de partes por millón, lo que los hace adecuados para su uso en aplicaciones de monitoreo de calidad del aire en edificios, automóviles, y otros espacios cerrados [51]

2.6 Sensores de material particulado

El bajo nivel de calidad del aire en interiores se ha convertido en uno de los mayores riesgos para la salud, con la OMS atribuyendo más de 4,3 millones de muertes prematuras a la contaminación del aire en el hogar en 2012. Las partículas en el aire, especialmente las de menos de 200 nm de diámetro, están fuertemente asociadas con enfermedades cardíacas, pulmonares y neurodegenerativas. Como las personas pasan la mayoría de su tiempo en interiores, la calidad del aire interior es un factor clave en la salud. El material particulado (PM) en interiores puede tener niveles muy variables, con la presencia de fuentes internas de contaminación, generando niveles mucho más altos que los niveles exteriores [52].

Actualmente, hay varios tipos de sensores de PM que utilizan diversas técnicas para detectar partículas en el ambiente. Las técnicas más comunes incluyen los sensores ópticos basados en láser y los sensores gravimétricos basados en filtros.

2.6.1 Sensores ópticos basados en láser

Los sensores ópticos basados en láser son una tecnología popular para la detección de partículas en el aire en tiempo real, además, debido a su bajo costo, baja potencia requerida y tiempo de respuesta rápido, este tipo de sensor sigue siendo el principio preferido en los sensores comerciales a gran escala. En estos sensores, se utiliza la dispersión de la luz para medir el tamaño de las partículas, durante el proceso de detección, cada partícula se ilumina con un láser definido y se detecta la señal

dispersada de la luz en un ángulo de 90° con un fotodiodo. Según la teoría de Mie, cada señal medida es proporcional al tamaño de la partícula, por lo que la concentración de material particulado puede ser detectada. En este sistema, la fuente de láser ilumina el canal de aire donde fluye el aire. Luego, el láser experimenta el proceso de dispersión de la luz por las partículas y se recopilan los datos a través de un microprocesador [53].

2.6.2 Sensores gravimétricos basados en filtros

El método gravimétrico basado en filtros (GMM) es una técnica ampliamente utilizada y comprendida para medir la contaminación por partículas. Este método utiliza un dispositivo que consta de un impactor, un filtro y una bomba de precisión. El impactor clasifica las partículas por tamaño, mientras que el filtro recolecta las partículas para obtener el peso correspondiente de las mismas. La bomba de precisión aspira aire a una tasa constante para obtener un volumen de aire preciso que corresponde a las partículas de peso definido, lo que resulta en una concentración de partículas. La operación del GMM se basa en el procesamiento paralelo de filtros en blanco y de muestra, y en la medición precisa del peso antes y después de la recolección para obtener el nivel de contaminación por partículas [53].

2.7 Internet de las cosas

El Internet de las cosas (IoT por sus siglas en inglés) es un ecosistema en el que dispositivos digitalmente integrados (cosas) se comunican a través de internet, conectando a las personas con objetos físicos y permitiéndoles comunicarse entre sí, además el IoT permite compartir datos para producir servicios inteligentes y mejorar la calidad de vida. Por otro lado, en la literatura al IoT también se le conoce como el internet de todo (IoE) y consiste en dispositivos conectados que pueden recolectar o enviar datos, y también actuar sobre los datos que se encuentran en su entorno. Estos dispositivos son pequeños y pueden comunicarse con otros dispositivos relacionados a través del protocolo de comunicación máquina a máquina (M2M). El IoT funciona como una red gigante con una gran variedad de dispositivos que incluyen sensores, actuadores, dispositivos móviles y otros dispositivos de hardware y software, aunque, se considera una tecnología emergente importante, la implementación del IoT sigue siendo limitada debido a los altos costos, la falta de conocimiento y las infraestructuras inadecuadas [54] [55].

2.7.1 Modelo estandarizado

En el ámbito de las aplicaciones de Internet de las cosas (IoT), se ha propuesto un modelo de referencia global estandarizado compuesto por siete capas, presentado por Cisco en 2014. Este modelo, basado en el modelo OSI (Open Systems Interconnection), ha sido adaptado específicamente para la arquitectura de IoT y se utiliza como un punto de partida en el diseño y desarrollo de soluciones de IoT [56].

El modelo propuesto por Cisco consta de siete capas, siendo la primera la que se encuentra en la parte más baja del modelo:

- **Dispositivos físicos y controladores:** Esta capa incluye los sensores y actuadores que son utilizados para recopilar y controlar información en el mundo físico, y además son capaces de generar y procesar información a través de internet gracias a la conexión con los dispositivos finales y controladores físicos. Estos objetos son muy variados en términos de apariencia, tamaño, ubicación y origen [56].
- **Conectividad:** Esta capa se enfoca en la comunicación entre dispositivos a través de redes de comunicación de datos. La capa de conectividad es responsable de la implementación de varios protocolos, el cambio y la ruta de los paquetes, la traducción entre protocolos, la seguridad a nivel de red y el análisis de redes [56].
- **Computación de borde o Fog Computing:** Esta capa se encarga de procesar y analizar grandes cantidades de datos generados por los dispositivos conectados a la red IoT. Su función principal es convertir los flujos de datos en información útil para su posterior almacenamiento y procesamiento en la capa 4. Además, esta capa se enfoca en el análisis y transformación de datos de alto volumen, permitiendo una gestión más eficiente y rápida de los datos en tiempo real [56].
- **Almacenamiento de datos:** Esta capa implementa mecanismos para que los datos de la red sean utilizables por las aplicaciones. La capa de almacenamiento de datos se encarga de recibir, almacenar y gestionar grandes cantidades de información generada por los dispositivos en la red [56].

- **Abstracción de datos:** Esta capa asegura la integración de información de varias fuentes de datos y reconcilia los conflictos entre múltiples formatos de datos de diferentes fuentes, y garantiza la semántica consistente de los datos en todas las fuentes. Además, se verifica que los datos estén completos y se puedan usar en cualquier aplicación de nivel superior [56].

- **Aplicación:** Esta capa interactúa directamente con la capa 5. Algunas de las funcionalidades importantes de esta capa son monitorear datos de dispositivos, controlar dispositivos, combinar datos de dispositivos y no dispositivos, interpretar información y reportar [56].

- **Colaboración y procesos:** Esta capa trasciende la dimensión técnica e incluye a seres humanos y procesos empresariales. Aunque la información generada por los sistemas IoT puede ser abundante, su valor real radica en la obtención de análisis significativos. Para lograr una decisión acertada y tomar la acción adecuada, a menudo es necesario involucrar a personas y procesos [56].

Figura 2-3: Modelo de siete capas presentado por Cisco; tomado y adaptado de [56].

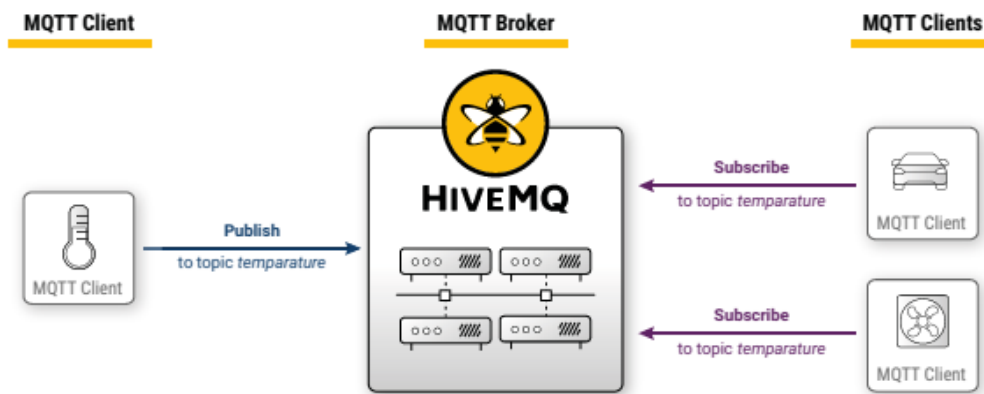
Nivel 7. Colaboración y procesos
Nivel 6. Aplicación
Nivel 5. Abstracción de datos
Nivel 4. Almacenamiento de datos
Nivel 3. Computación de borde
Nivel 2. Conectividad
Nivel 1. Dispositivos físicos y controladores

2.7.2 Protocolos de comunicación

Además de la arquitectura de siete capas, es fundamental contar con protocolos de comunicación confiables y eficientes para el intercambio de datos en una red de IoT. TCP/IP es uno de los protocolos más utilizados en la capa de aplicación de IoT, y está diseñado para permitir la comunicación M2M y la transferencia de datos a través de la red. La comunicación M2M se basa en protocolos de mensaje diseñados específicamente para la comunicación entre dispositivos en aplicaciones de IoT, enfocando en la interacción de los dispositivos conectados sin intervención humana [56]. Para cumplir con las necesidades de las aplicaciones de IoT, existen muchos protocolos de mensajería disponibles para elegir, sin embargo, entre los protocolos más utilizados se encuentran:

- **MQTT:** MQTT (MQ Telemetry Transport) es un protocolo de transporte de mensajes del tipo publicador/suscriptor. Su diseño se enfoca en minimizar el ancho de banda de la red y los requisitos de los recursos del dispositivo, asegurando la entrega confiable de mensajes y es capaz de transmitir datos a través de redes de baja velocidad o poco confiables con muy bajo consumo de energía. En el protocolo MQTT, existen tres componentes fundamentales: el publicador o productor (también conocido como MQTT client), el broker (o servidor MQTT) y el suscriptor o consumidor (también conocido como MQTT client). El publicador es el encargado de crear los mensajes y publicarlos en el servidor MQTT en un tópico (canales virtuales de comunicación que permiten clasificar y filtrar los mensajes enviados por los publicadores y recibidos por los suscriptores) determinado. El suscriptor, por su parte, está interesado en recibir los mensajes de un determinado tópico y se suscribe a dicho tópico en el servidor MQTT. El broker a su vez, se encarga de actuar como intermediario entre los publicadores y los suscriptores, aceptando las conexiones de red de los clientes, procesando los mensajes publicados por los publicadores y enviándolos a los suscriptores que hayan expresado su interés en recibirlos a través de la suscripción a un tópico determinado [56][57]. En la **Figura 2-4** se puede observar la arquitectura publicador/suscriptor utilizada por MQTT.

Figura 2-4: Arquitectura publicador/suscriptor utilizada por MQTT; tomado de [57].

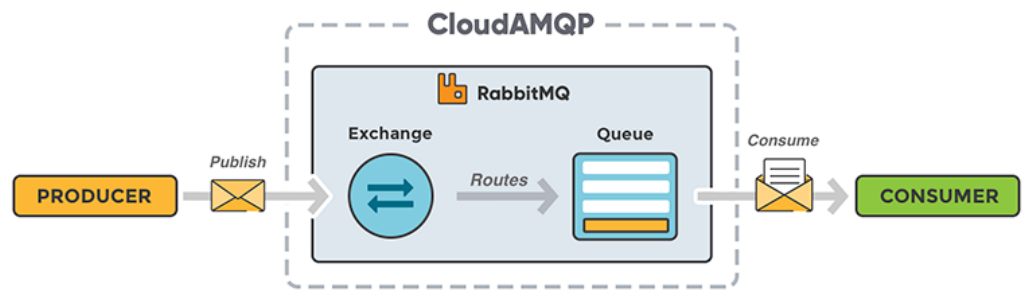


- **CoAP:** CoAP (Constrained Application Protocol) es un protocolo de capa de servicio utilizado por dispositivos de baja capacidad. CoAP es uno de los protocolos de comunicación IoT más populares debido a que extiende el alcance de HTTP a dispositivos con restricciones de recursos. CoAP se basa en un modelo cliente/servidor y se apoya en REST (Transferencia de Estado Representacional), lo que aumenta su interoperabilidad. Igualmente, su diseño ha sido cuidadosamente trabajado para adaptarse a dispositivos con restricciones de batería, memoria y almacenamiento. Por otro lado, los clientes CoAP se comunican con los servidores a través de 4 mensajes: GET, PUT, POST y DELETE. Además, su diseño ligero lo hace adecuado para dispositivos integrados, ya que funciona sobre UDP. Asimismo, CoAP también ofrece un modelo de publicador/suscriptor que utiliza identificadores de recursos universales (URI) en lugar de tópicos; y el uso de UDP permite la operatividad de los dispositivos incluso con calidad de señal baja en comparación con protocolos basados en TCP [58][59][60].

- **AMQP:** AMQP (Advanced Message Queuing Protocol) es un protocolo de mensajería desarrollado para proporcionar una plataforma de mensajería eficiente y confiable que pueda soportar diferentes tipos de aplicaciones y entornos. AMQP es un protocolo de nivel de aplicación que se ejecuta sobre TCP/IP, lo que lo hace altamente interoperable y fácilmente integrable con diferentes tipos de sistemas y aplicaciones. Al igual que MQTT, AMQP soporta la mensajería de publicador/suscriptor basada en tópicos (rutas).

Utiliza una arquitectura de intercambio basada en mensajes, lo que significa que los mensajes se envían y reciben a través de intercambios que actúan como intermediarios entre los productores y consumidores de mensajes; los mensajes se envían a una cola dentro de un intercambio, y luego se entregan a los consumidores que se suscriben a esa cola, esto permite una comunicación asíncrona y bidireccional entre diferentes sistemas y aplicaciones, lo que significa que las aplicaciones pueden enviar y recibir mensajes sin necesidad de una conexión en tiempo real [61]. La representación de este protocolo se indica en la **Figura 2-5**:

Figura 2-5: Arquitectura publicador/suscriptor utilizada por AMQP; tomado de [62].



2.8 Redes inalámbricas de sensores

Las Redes Inalámbricas de Sensores (WSN, por sus siglas en inglés) son redes inalámbricas compuestas por un gran número de dispositivos distribuidos equipados con sensores que miden distintas variables del ambiente físico y que trabajan de manera autónoma y se enlazan lógicamente mediante medios de auto-organización. Algunos de los principales desafíos que presentan son la fiabilidad, el consumo de energía, el tamaño reducido de los nodos, la movilidad y la seguridad [63]. La capacidad de auto-organización de las WSN es una de sus principales fortalezas; la manera de dicha organización depende de la topología de red utilizada como base para la comunicación, entre las topologías de red utilizadas para la construcción de redes inalámbricas de sensores, se encuentran:

- **Topología de red tipo estrella:** En esta topología, los nodos sensores se conectan directamente con un concentrador de comunicación centralizado, también conocido como nodo central o switch. Debido a que todos los nodos sensores dependen del nodo central para comunicarse entre sí, esta topología funciona como una red de área personal (PAN, por

sus siglas en inglés) coordinada por un coordinador. Cada nodo sensor cliente está conectado directamente al nodo central o servidor, lo que minimiza el consumo de energía en cada nodo cliente. Sin embargo, si el nodo central falla, la red completa fallará. Además, la capacidad de comunicación de esta topología se reduce a medida que aumenta el número de nodos clientes en la red [64].

- **Topología de red tipo anillo:** Esta topología consiste en que los nodos sensores se conectan exactamente con dos nodos sensores vecinos en forma de anillo. Todos los mensajes viajan a través de un anillo en la misma dirección (ya sea en sentido horario o antihorario). Todos los nodos sensores pueden transmitir datos a través de paquetes con todos los demás nodos sensores utilizando nodos sensores vecinos porque no tienen un nodo central. El mensaje se transmitirá desde cada nodo sensor en una vía continua en la red, pero solo el nodo sensor deseado lo recibirá y procesará. Aunque en comparación con la topología de bus, la topología de red de anillo tiene un mejor rendimiento en carga de tráfico pesado, pero debido a que el mensaje tiene que transmitirse desde toda la red, esta topología consume mucho tiempo y energía [64].

- **Topología de red tipo malla:** La topología de red de malla permite la transmisión de datos de un nodo a otro dentro del rango de transmisión de radio. Los nodos sensores están conectados entre sí y permiten la comunicación multisalto, lo que significa que si un nodo sensor que se encuentra fuera del rango de transmisión de radio desea comunicarse o transmitir datos, puede hacerlo utilizando otros nodos sensores intermedios. Esta topología es muy robusta y tolerante a fallos, ya que hay múltiples caminos posibles entre los nodos sensores. Sin embargo, esta topología también implica un alto consumo de energía y recursos, así como una mayor complejidad en el manejo de las colisiones y el control del tráfico [64].

3. Metodología

En esta sección se presentará la solución propuesta para la problemática planteada en la sección anterior. El objetivo principal es desarrollar un dispositivo electrónico capaz de medir los niveles de dióxido de carbono (CO₂) en aulas de clases y alertar al usuario sobre una ventilación deficiente, con el fin de prevenir la propagación del COVID-19 en espacios cerrados. Para lograr este objetivo, se llevó a cabo un proceso de diseño y construcción del dispositivo, el cual se describe detalladamente en las subsecciones que siguen.

En primer lugar, se identificaron los niveles de CO₂ que representan un riesgo para la transmisión del COVID-19 en función de las características del aula de clases. Posteriormente, se procedió a la selección de componentes electrónicos y la construcción del circuito impreso, Además, se utilizó el software Fusion 360 para el diseño 3D de la carcasa del dispositivo.

Finalmente, se implementó la red inalámbrica de sensores utilizando Painlessmesh para la transmisión de los datos a un servidor centralizado. El dispositivo fue ensamblado y probado para verificar su correcto funcionamiento. En las siguientes subsecciones se describen en detalle cada uno de los procesos llevados a cabo para la construcción del dispositivo.

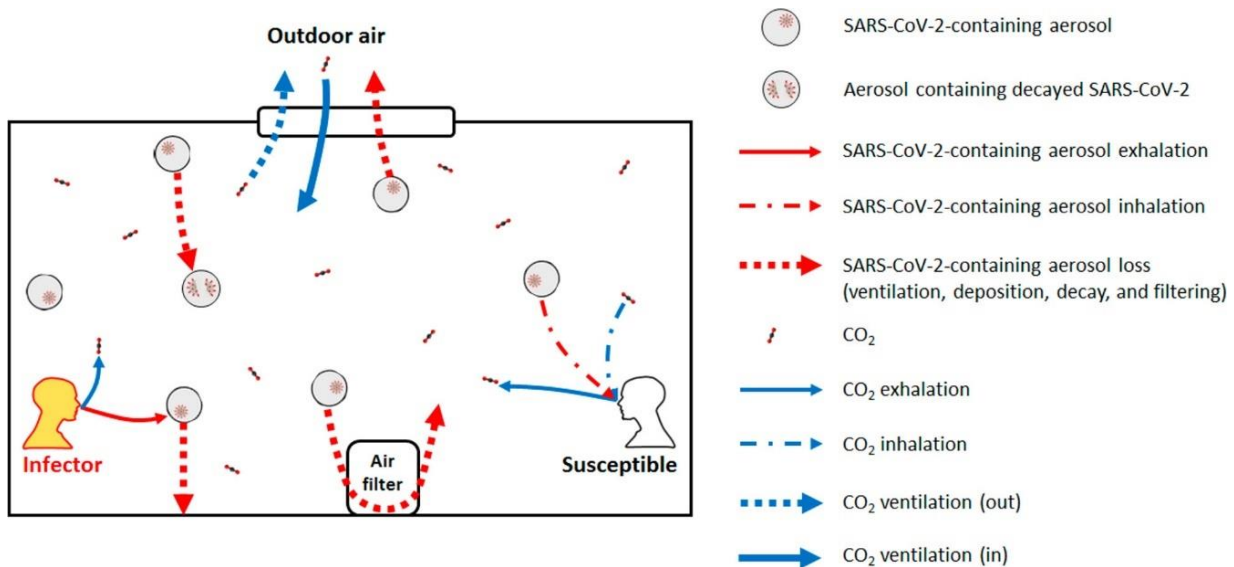
3.1 Identificar los niveles de CO₂ que representan un riesgo para la transmisión de COVID-19 según las características del aula de clases

En la actualidad existen diferentes modelos teóricos que se han desarrollado en las últimas décadas para la simulación de la transmisión aérea de patógenos dentro de ambientes cerrados, los cuales, tienen su origen en el modelo de infección por aerosoles de Wells y Riley, dicho modelo relaciona la cantidad de quanta de infección viral inhalados por una persona susceptible con la probabilidad de que la misma sea infectada [17].

En [13] Peng aborda la problemática de la transmisión del SARS-CoV-2 en ambientes cerrados y la necesidad de implementar medidas de mitigación efectivas para evitar la propagación del virus. En este contexto, los autores proponen el uso del dióxido de carbono (CO₂) como indicador nativo de la ventilación de espacios interiores y, por lo tanto, como un indicador práctico para evaluar el riesgo de transmisión del virus, los autores afirman que la transmisión del SARS-CoV-2 a través de aerosoles se ha convertido en un tema de gran interés debido a que los aerosoles pueden contener partículas del virus y permanecer suspendidos en el aire durante minutos u horas. Además, la transmisión es más fácil en espacios cerrados, donde el volumen de aire es limitado y los aerosoles pueden acumularse con mayor facilidad.

Para abordar esta problemática, Peng expone que el CO₂ es co-exhalado junto con los aerosoles que pueden contener partículas del virus, lo que lo convierte en un indicador útil para evaluar el riesgo de transmisión del virus, en la **Figura 3-1** se puede observar el comportamiento del CO₂ junto con los aerosoles.

Figura 3-1: Procesos de exhalación e inhalación de SARS-CoV-2 en interiores y su relación con CO₂; tomado de [13].



Asimismo, los autores proponen una expresión analítica para calcular el umbral de CO2 para diferentes entornos y actividades que se considera aceptable o seguro sin comprometer la calidad del aire ni la salud de las personas, la ecuación, varía en 2 órdenes de magnitud y se describe en (3.1.1). El umbral se obtiene sumando la diferencia máxima permitida de CO2 en el aire en comparación con el aire exterior ($\Delta c_{CO_2}^*$) y la concentración de CO2 en el ambiente interior ($CO2_{indoor}$).

$$Umbral = \Delta c_{CO_2}^* + CO2_{interior} \quad (3.1.1)$$

Adicionalmente, se representa la ecuación (3.1.2) que relaciona la concentración de CO2 en el aire con la probabilidad de infección por COVID-19 en ambientes interiores.

$$\Delta c_{CO_2}^* = \frac{0.0001/1h \times NE_{p,CO_2}}{(1 - n_{im})n_I(n - 1)E_p(1 - m_{ex})(1 - m_{in})B} \times \frac{\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1 - e^{-\lambda_0 D}}{\lambda_0^2 D}}{\frac{1}{\lambda} - \frac{1 - e^{-\lambda D}}{\lambda^2 D}} \quad (3.1.2)$$

En la ecuación ((3.1.2)) $\Delta c_{CO_2}^*$ toma en cuenta factores como la duración de la muestra (D), el número de ocupantes (N), la fracción de CO2 en el aire exhalado por persona (E_{p,CO_2}), la fracción de virus SARS-COV-2 exhalado por persona (E_p), la probabilidad que un ocupante sea inmune (m_{im}), la probabilidad que un ocupante sea un infectador (n_I), la eficiencia de filtrado de la mascarilla por exhalación (m_{ex}), la eficiencia de filtrado de la mascarilla por inhalación (m_{in}), la tasa de respiración de la persona susceptible al virus (B) y la tasa de ventilación (λ).

Por otro lado, los autores también proponen una expresión analítica para la probabilidad de infección por COVID-19 por partícula de exceso de CO2 (3.1.3). Esta fórmula representa el aumento en la probabilidad de infección que se produce por cada partícula adicional de CO2 en el aire.

$$P_{per\ ppm} = \frac{0.0001}{\Delta c_{CO_2}^*} = \frac{0.01\%}{\Delta c_{CO_2}^*} \quad (3.1.3)$$

Posteriormente, la ecuación (3.1.4) combina la probabilidad de infección por cada partícula adicional de CO2 en el aire ($P_{per\ ppm}$) con la diferencia entre los niveles de CO2 en el interior y en el exterior de un espacio cerrado ($CO2_{indoor} - CO2_{outdoor}$). Esto proporciona una forma de calcular la probabilidad de infección de COVID-19 para una persona susceptible en un espacio cerrado, para hacer esto, se necesitan dos monitores de calidad del aire, uno para medir el nivel de CO2 en el interior y el otro para medir el nivel de CO2 en el exterior.

$$P = \left(\frac{0.01\%}{\Delta c_{CO_2}^*} \right) = (CO2_{interior} - CO2_{exterior}) \quad (3.1.4)$$

Finalmente, en este proyecto se planteó utilizar el sistema de ecuaciones mencionado anteriormente para identificar los niveles de CO₂ que representan un riesgo para la transmisión de COVID-19 en aulas de clases, teniendo en cuenta las características específicas de cada ambiente. De esta manera, se proporcionará a la universidad Antonio Nariño una herramienta práctica y efectiva para evaluar el riesgo de transmisión del virus en ambientes cerrados como lo son las aulas de clases, lo que permitirá tomar medidas de mitigación adecuadas para proteger la salud de los estudiantes y personal docente, Además, es importante destacar que este enfoque no pretende reemplazar otras medidas de mitigación como el uso de mascarillas, el distanciamiento social y la higiene personal, sino que se presenta como una herramienta complementaria para evaluar el riesgo de transmisión del virus en ambientes interiores.

3.2 Construcción de dispositivo electrónico que a partir de mediciones de CO₂ alerte al usuario sobre una ventilación deficiente

En línea con la necesidad de mejorar la calidad del aire en espacios interiores, una solución potencial es el uso de dispositivos electrónicos que alerten al usuario sobre una ventilación deficiente en tiempo real. Este tipo de dispositivo puede ser de gran utilidad en lugares donde la ventilación natural es limitada o en espacios donde hay una alta densidad de personas como lo son los salones de clase.

El dispositivo propuesto en esta investigación fue diseñado para medir el nivel de CO₂ en el aire y alertar al usuario cuando este nivel supere cierto umbral dinámico (determinado a través de la ecuación (3.1.1)), indicando una ventilación deficiente tomando en cuenta el sistema de ecuaciones propuesto en la sección 3.1. Para empezar, utilizamos un microcontrolador ESP32 para la gestión del dispositivo y la comunicación de datos. Este dispositivo está equipado con un sensor infrarrojo de CO₂ (SKU SEN0219) y un sensor de material particulado PMSA003I, los cuales permiten medir la calidad del aire y detectar la presencia de partículas peligrosas. Además, el dispositivo incluye un sensor INA219 para la medición de corriente y voltaje, lo que permite conocer el consumo de energía y la carga restante de la batería de polímero de litio 105080 de 3.7v y 5000mAh utilizada como fuente de alimentación. Para garantizar una carga segura y eficiente de la batería, se incorporó un módulo cargador de batería TP4056. Finalmente, para visualizar los datos medidos por el dispositivo,

se utiliza un LCD 20x4 con comunicación I2C, lo que permite una conexión sencilla con el microcontrolador y una fácil integración con el resto del circuito.

Del mismo modo, el dispositivo electrónico incluye una carcasa impresa en 3D para proteger los componentes y facilitar su transporte. La **Figura 3-2** muestra el aspecto final del dispositivo construido, donde se puede observar la disposición de los componentes desde el exterior. La **Figura 3-3** ilustra la composición interna del dispositivo, donde se pueden observar todos los componentes conectados en la PCB.

Figura 3-2: Disposición externa de los componentes del dispositivo electrónico, a) Vista frontal b) Vista lateral izquierda c) Vista posterior d) Vista lateral derecha; elaboración propia.

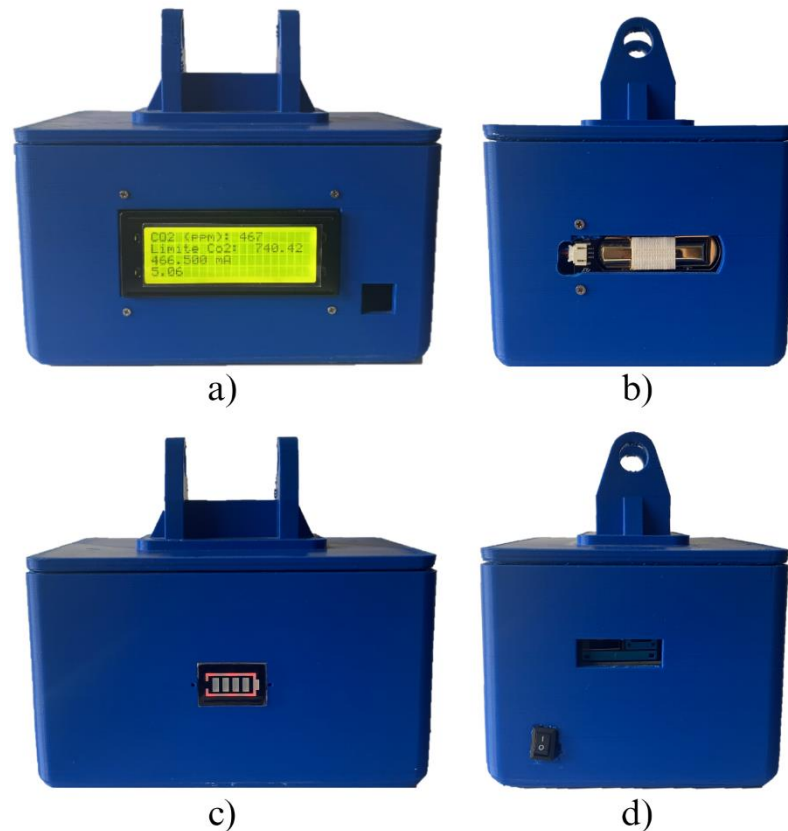
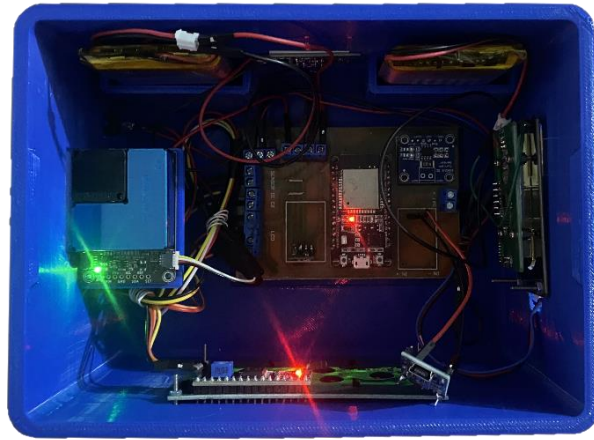


Figura 3-3: Disposición interna de los componentes del dispositivo electrónico; elaboración propia.



Asimismo, se desarrolló un dispositivo electrónico para los nodos de retransmisión, el cual cuenta con una carcasa impresa en 3D que brinda protección a los componentes y facilita su traslado. La disposición de los componentes se puede apreciar desde el exterior en la **Figura 3-4**, mientras que la composición interna del dispositivo se muestra en la **Figura 3-5**, en la cual, se pueden visualizar todos los componentes conectados en la PCB.

Figura 3-4: Disposición externa de los componentes del dispositivo electrónico, a) Vista frontal b) Vista lateral derecha c) Vista posterior d) Vista lateral izquierda; elaboración propia.

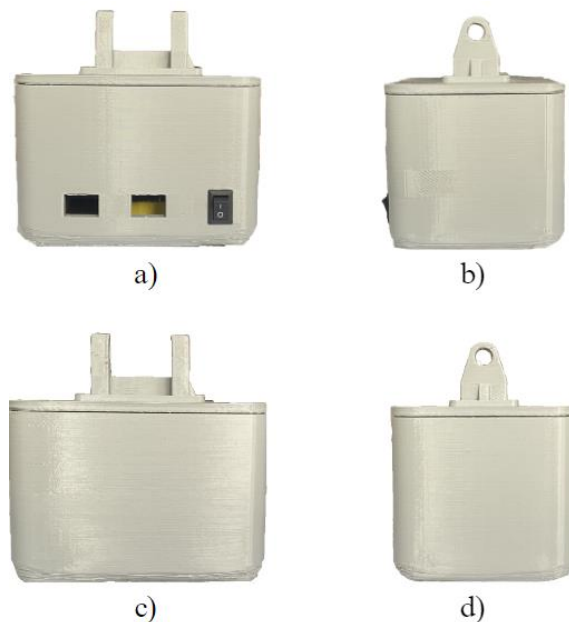
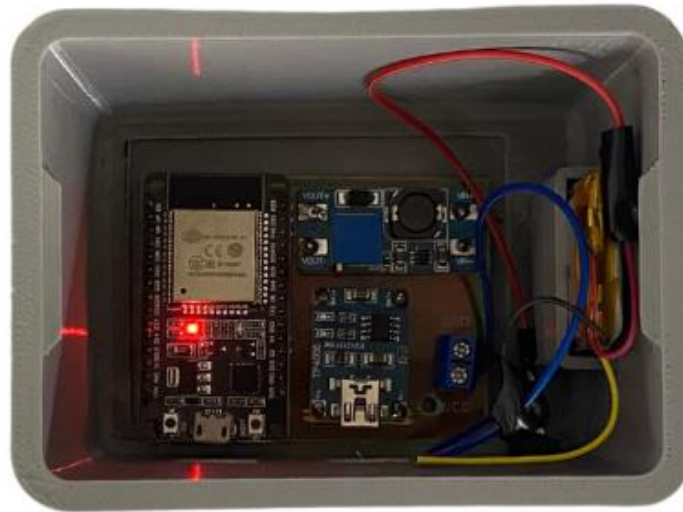


Figura 3-5: Disposición interna de los componentes del dispositivo electrónico; elaboración propia.



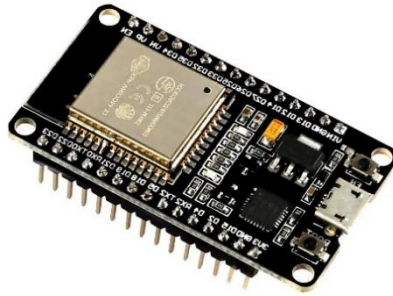
3.2.1 Selección de componentes

ESP32: Para la adquisición y procesamiento de datos provenientes de los sensores se utilizó el módulo ESP32, el cual, está basado en el sistema en chip (SoC) ESP32 de Espressif Systems. Entre las características más destacables, el ESP32 cuenta con un convertor ADC de 12 bits. Por otro lado, el ESP32 posee diversos medios de comunicación, entre los cuales destacan la comunicación serial y la comunicación inalámbrica. Para la comunicación serial, el ESP32 cuenta con un puerto UART, dos puertos I2C y dos puertos SPI. Además, el ESP32 cuenta con módulos de conectividad WiFi y Bluetooth, lo que le permite establecer conexiones inalámbricas con otros dispositivos compatibles.

El ESP32 requiere una fuente de alimentación de entre 2.2 V y 3.6 V, asimismo, el ESP32 cuenta con un regulador de voltaje interno que permite una entrada de voltaje de hasta 5 V, lo que lo hace compatible con una amplia gama de fuentes de alimentación.

Por último, el ESP32 cuenta con un procesador dual-core Xtensa LX6 de 32 bits que ofrece un alto rendimiento en términos de procesamiento y velocidad. Este procesador permite la ejecución de múltiples tareas de manera simultánea, lo que lo hace muy eficiente en términos de tiempo de respuesta y capacidad de procesamiento [65]. El ESP32 se puede observar en la **Figura 3-6**.

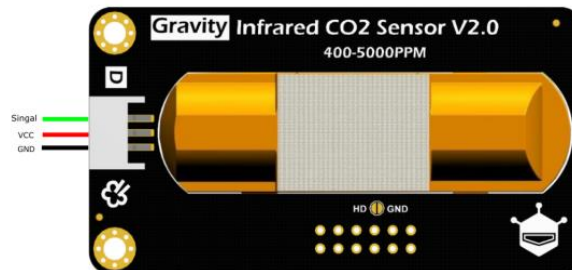
Figura 3-6: ESP32; tomado de [66].



Sensor de CO2 infrarrojo SKU SEN0219: El sensor SEN0219 es un dispositivo que mide el CO2 basado en la tecnología infrarroja no dispersiva (NDIR) lo que le brinda características como alta sensibilidad, alta resolución, bajo consumo de energía, respuesta rápida, anti-interferencia de vapor de agua, alta estabilidad y larga vida., con un rango efectivo de medición de 400 a 5000 ppm. En términos de especificaciones, el sensor funciona con un voltaje de operación de 4.5 a 5.5V DC, con un consumo de corriente promedio de menos de 60mA a 5V y un pico de corriente de 150mA a 5V. La señal de salida es analógica, con un rango de medición de 0 a 5000ppm y una precisión de $\pm (50\text{ppm} + 3\% \text{ de lectura})$. El tiempo de precalentamiento es de 3 minutos y el tiempo de respuesta es de 120 segundos. El sensor es capaz de operar en temperaturas de 0 a 50°C y una humedad relativa de 0 a 95% sin condensación.

El sensor SEN0219 también cuenta con un circuito de calibración interno que permite una mayor precisión en las mediciones. Este circuito se encarga de compensar las variaciones en la temperatura y la humedad ambiental para asegurar que las mediciones sean lo más precisas posible [67]; Un esquema de los terminales se muestra en la **Figura 3-7**.

Figura 3-7: Sensor SEN0219; tomado de [68].



Sensor de material particulado PMSA003I: El sensor PMSA003I es un dispositivo que utiliza el principio de dispersión láser para medir la concentración de partículas suspendidas en el aire y

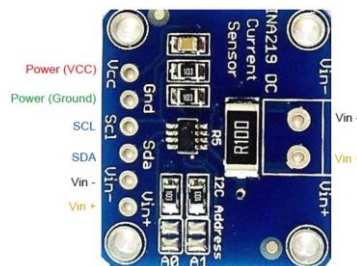
producir una señal digital, este sensor puede medir la concentración de partículas PM1.0, PM2.5 y PM10.0 tanto en unidades estándar como ambientales. Además, clasifica el material particulado por cada 0.1L de aire en diferentes tamaños de partículas: 0.3 μ m, 0.5 μ m, 1.0 μ m, 2.5 μ m, 5.0 μ m y 10 μ m. Asimismo, el sensor cuenta con una resolución de 1 μ g/m³, una eficiencia de conteo de partículas del 50% a 0.3 μ m y del 98% a \geq 0.5 μ m. En cuanto a las conexiones, cuenta con una interfaz digital con pines para VCC, GND, RESET, SCL, SDA, SET y 3Vo (el cual solo funciona para operar la interfaz). Su voltaje de alimentación es de 4.5-5 VCC y su corriente activa es menor a 100 mA. El rango de temperatura de trabajo es de -10 ~60 °C y el rango de humedad de trabajo es de 0~99% [69]; Un esquema de los terminales se muestra en la **Figura 3-8**.

Figura 3-8: Sensor PMSA003I: tomado de [70].



INA219: El sensor INA219 (**Figura 3-9**), es un componente utilizado para supervisar la potencia de un dispositivo electrónico este dispositivo puede medir tensiones de 0V a 26V con una precisión máxima de \pm 0.5V, además puede medir corrientes de hasta \pm 3.2A con una precisión de 0.8mA o \pm 400mA con una precisión de 0.1mA. El INA219 se puede alimentar con un voltaje entre 3.3 – 5V, adicionalmente, se comunica a través de I2C [71].

Figura 3-9: Sensor INA219; tomado de [72].



Batería de polímero de litio 105080 3.7v 5000mAh: La batería de polímero de litio (**Figura 3-10**) es un componente crucial para la alimentación del dispositivo electrónico ya que otorga el componente de portabilidad, el cual, es indispensable para poder monitorear en diferentes espacios. Dicho tipo de batería se caracteriza por su alta densidad de energía, lo que significa que puede almacenar una gran cantidad de energía en un espacio relativamente pequeño. Además, las baterías de polímero de litio tienen una larga vida útil y son recargables.

Figura 3-10: Batería de polímero de litio 105080; tomado de [73].



Pololu 5V U1V11F: El Pololu 5V Step-Up U1V11F5 (**Figura 3-11**) es un regulador de voltaje compacto que genera una salida de 5V a partir de entradas de 0.5V, este dispositivo es el utilizado para aumentar el voltaje de entrada de alimentación de dispositivos electrónicos. El regulador tiene cuatro conexiones: SHDN (para apagado), VIN (para entrada de voltaje), GND (tierra) y VOUT (salida de voltaje). Por otro lado, el regulador también tiene una protección contra sobrecalentamiento que se activa a aproximadamente 140°C, sin embargo, no posee protección contra voltajes inversos.

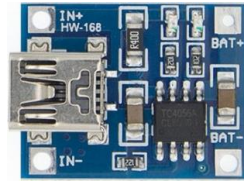
Figura 3-11: Pololu 5V U1V11F; tomado de [74].



Módulo cargador de batería TP4056: El módulo TP4056 (**Figura 3-12**) tiene el objetivo de recargar las baterías de polímero de litio de 3.7V. Este módulo utiliza el chip TP4056 y el chip de

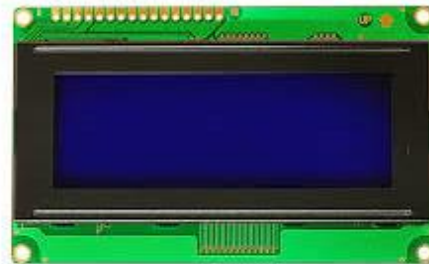
protección de batería DW01, lo que permite que la carga sea de 1A y luego se detendrá cuando la batería esté completamente cargada [75].

Figura 3-12: TP4056; tomado de [76].



LCD 20x4 I2C: El módulo de visualización LCD de 20x4 (**Figura 3-13**) caracteres con interfaz I2C posee alta calidad de visualización, debido a que está integrado con 4 líneas y 20 caracteres, es utilizado para visualizar las características más importantes del dispositivo.[77].

Figura 3-13: LCD de 20x4; tomado de [78].



Módulo indicador de batería de litio SPBKBS-10-5: El módulo indicador de nivel de carga de batería de litio SPBKBS-10-5 (**Figura 3-14**) permite medir con precisión el nivel de carga de la batería en cualquier momento.

Figura 3-14: Módulo indicador de batería de litio SPBKBS-10-5; tomado de [79].

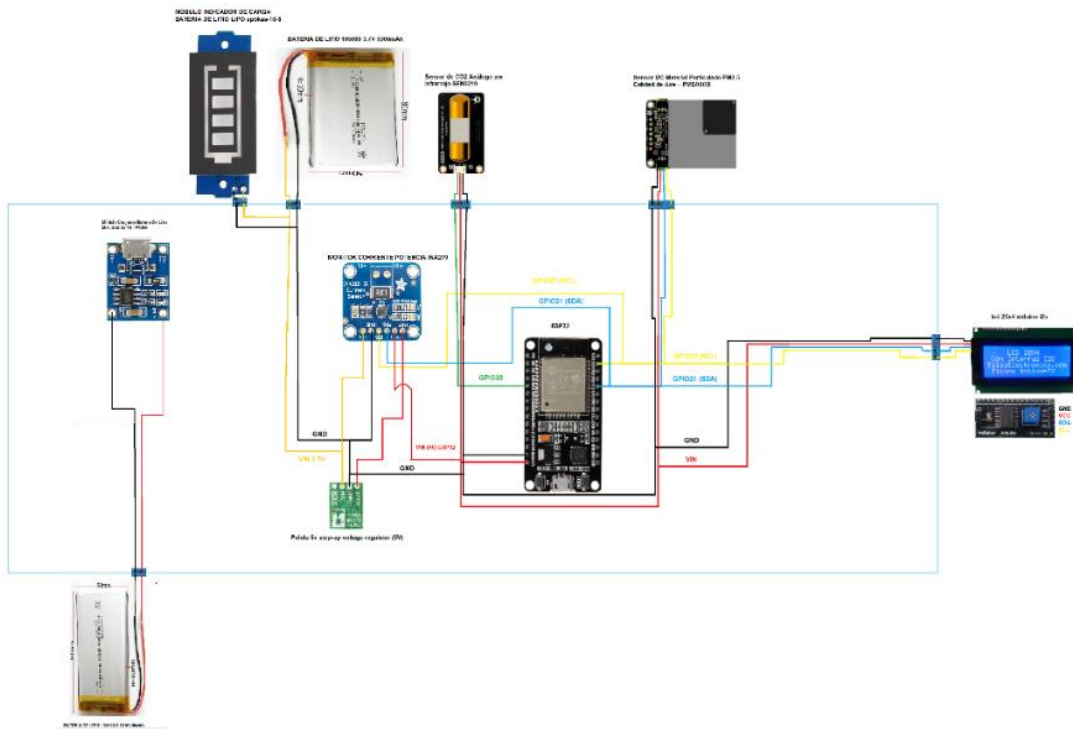


3.3 Diseño del circuito impreso

En la sección anterior, se describieron los componentes seleccionados para la construcción del dispositivo. El siguiente paso en el proceso de diseño fue la creación del circuito esquemático, el cual, permite visualizar la conexión de los diferentes componentes, su interconexión eléctrica y cómo se relacionan entre sí.

El circuito esquemático del dispositivo electrónico se puede observar en la **Figura 3-15** y muestra la conexión de los componentes del dispositivo, incluyendo el ESP32, el sensor de CO2, el sensor de material particulado PMSA003I, el INA219, la batería de polímero de litio 105080 3.7v 5000mAh, el Pololu 5V U1V11F, el módulo cargador de batería TP4056, el LCD 20x4 I2C y el módulo indicador de batería de litio SPBKBS-10-5.

Figura 3-15: Circuito esquemático del dispositivo; elaboración propia.

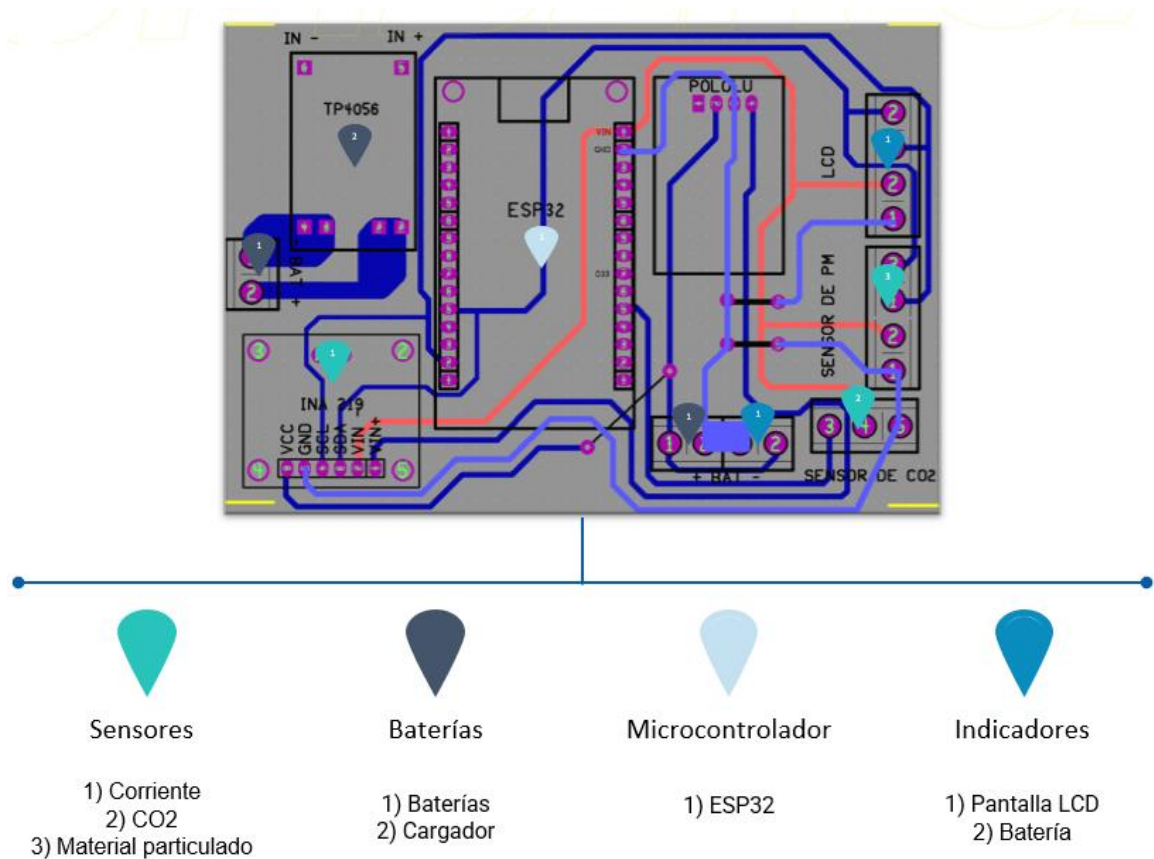


Una vez que fue creado el circuito esquemático, se procedió a la creación de la PCB o placa de circuito impreso. La PCB es la base física del circuito electrónico y está diseñada para alojar los componentes y permitir la interconexión eléctrica de los mismos. Es importante destacar que todo el diseño de las PCBs fue realizado utilizando el software de diseño de circuitos electrónicos "CIRCAD". Este software permite crear y diseñar de manera intuitiva y eficiente las placas de

circuito impreso, con herramientas para el enrutamiento de pistas, la verificación de errores, entre otras funciones que facilitan el proceso de diseño.

La **Figura 3-16** ilustra la PCB diseñada para el dispositivo. Se puede observar la disposición de los componentes en la placa y las conexiones que fueron establecidas para su correcto funcionamiento.

Figura 3-16: Diseño PCB del nodo sensor; elaboración propia.



Tan pronto fue diseñada la PCB del nodo encargado de medir las variables ambientales en un espacio cerrado (nodo sensor), se procedió al diseño de los circuitos esquemáticos utilizados para la construcción de los nodos retransmisores de la red inalámbrica, los cuales, permitieron transmitir la información de los sensores a un nodo raíz. Los nodos están compuestos por el ESP8266/ESP32, una batería de iones de litio de 3.7V 1200mAh, un amplificador de voltaje MT3608 y el módulo cargador de batería TP4056. Las figuras **Figura 3-17** y **Figura 3-18** ilustran los circuitos esquemáticos y las PCBs diseñadas para los nodos retransmisores de la red inalámbrica respectivamente.

Figura 3-17: Diseño del circuito esquemático de los nodos retransmisores de la red inalámbrica de sensores (ESP32/ESP8266); elaboración propia.

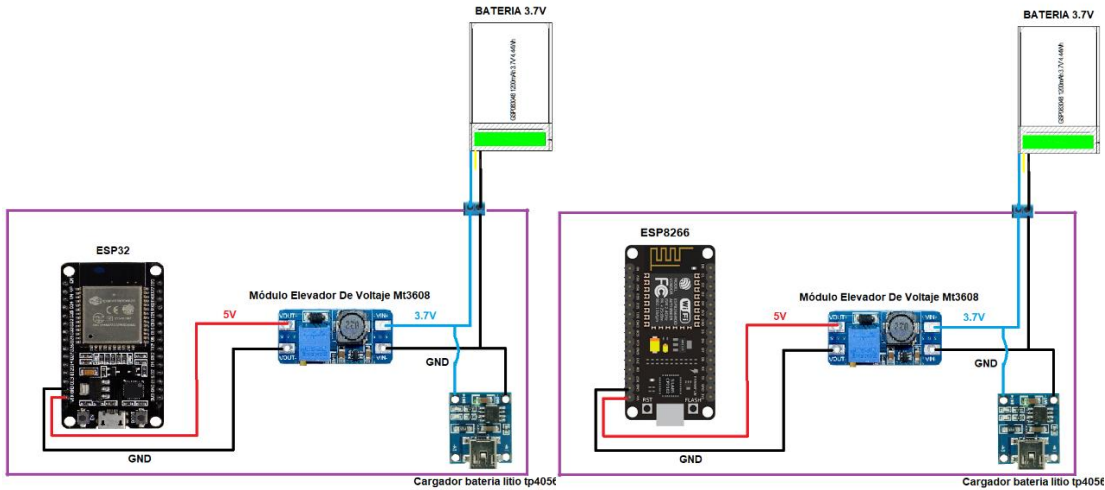
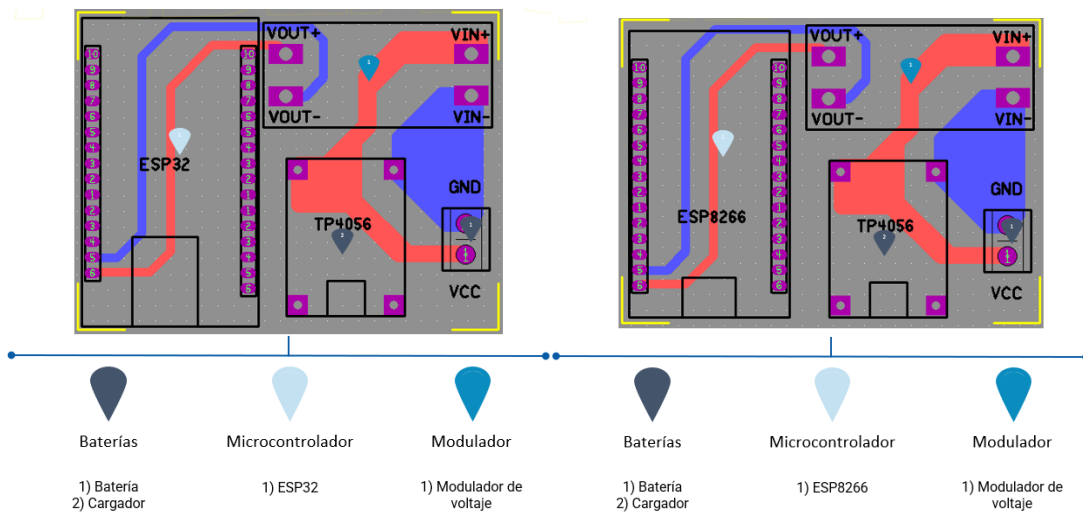


Figura 3-18: Diseño PCB de los nodos retransmisores de la red inalámbrica de sensores (ESP32/ESP8266); elaboración propia.



3.4 Diseño 3D de las carcasas en Fusion 360

Después de haber diseñado la PCB del dispositivo, el siguiente paso fue diseñar la carcasa que albergaría los componentes electrónicos del dispositivo, para ello, se diseñaron dos carcasas diferentes: una para el nodo encargado de medir las variables ambientales en un espacio cerrado, y

otra para los nodos retransmisores de la red inalámbrica de sensores que permitirían la transmisión de la información de los sensores a un nodo raíz. En el diseño de las carcasas se utilizaron dos materiales diferentes (filamento ABS y PLA). Estos son dos materiales ampliamente utilizados en la impresión 3D debido a su resistencia y durabilidad. Además, la impresión 3D permite una alta precisión en la creación de la carcasa, lo que garantiza un buen ajuste de los componentes electrónicos en su interior.

La carcasa del nodo encargado de medir las variables ambientales se diseñó utilizando el software de diseño 3D "Fusion 360". La carcasa del nodo sensor tiene dos aberturas a ambos lados donde se anclan cada uno de los sensores, además de tener el indicador de batería en la parte trasera y la pantalla LCD en la parte frontal, como se puede apreciar en la **Figura 3-19**. Por otro lado, la base de la carcasa cuenta con un acople para la PCB y en un lado tiene dos compartimentos para las baterías. Adicionalmente, para la tapa se diseñó una pieza que permite colgar la carcasa en diferentes posiciones y un encastre a presión, garantizando suficiente estabilidad en diferentes entornos y un cierre a presión confiable; en la **Figura 3-20** se observa el diseño de la tapa.

Figura 3-19: Diseño 3D de la carcasa inferior del nodo sensor; elaboración propia.

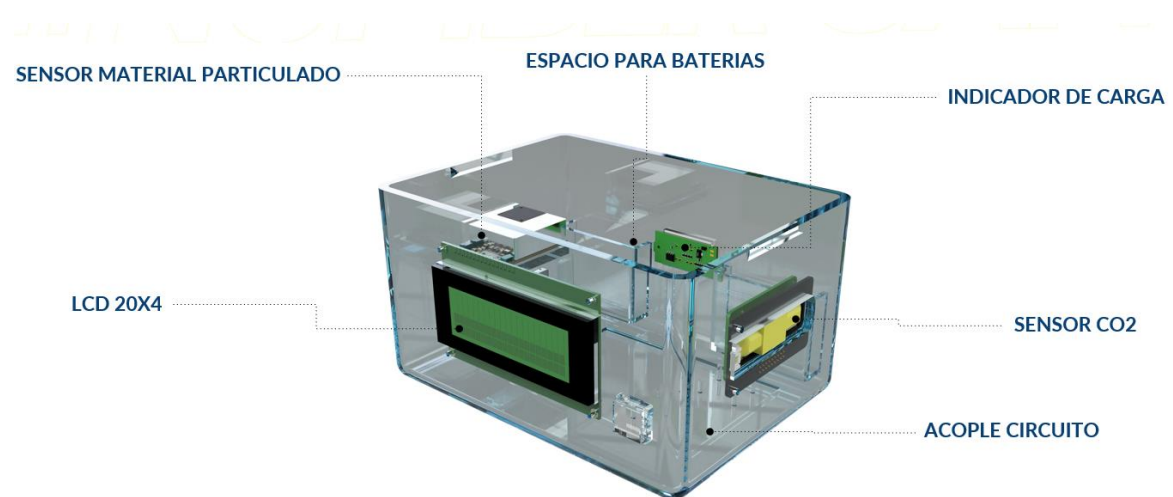
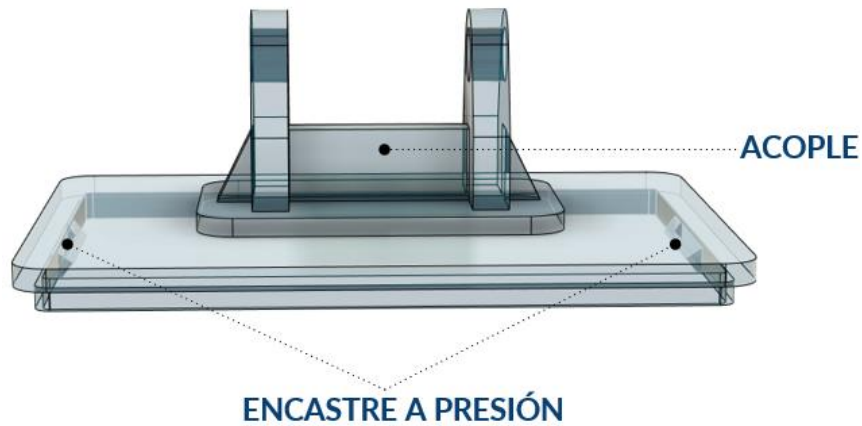


Figura 3-20: Diseño 3D de la tapa del nodo sensor; elaboración propia.



Mencionando lo anterior, la carcasa posee dimensiones de 19.00 x 14.00 x 15.70 cm (teniendo en cuenta el acople); la carcasa completa se puede observar en la **Figura 3-21**.

Figura 3-21: Diseño 3D carcasa completa del nodo sensor; elaboración propia.



Con respecto a la carcasa de los nodos retransmisores, también fue diseñada utilizando "Fusion 360". La carcasa cuenta con una tapa superior y una base inferior, siendo la pieza que permite colgar la carcasa en diferentes posiciones y el encastre a presión las características principales de la tapa superior (**Figura 3-22**). La base inferior cuenta con aberturas para la conexión del puerto de carga de la batería y el interruptor de encendido y apagado. Además, se diseñó un soporte para la batería de iones de litio para facilitar su sustitución (**Figura 3-23**).

Figura 3-22: Diseño 3D de la tapa del nodo retransmisor utilizado en la inalámbrica de sensores; elaboración propia.

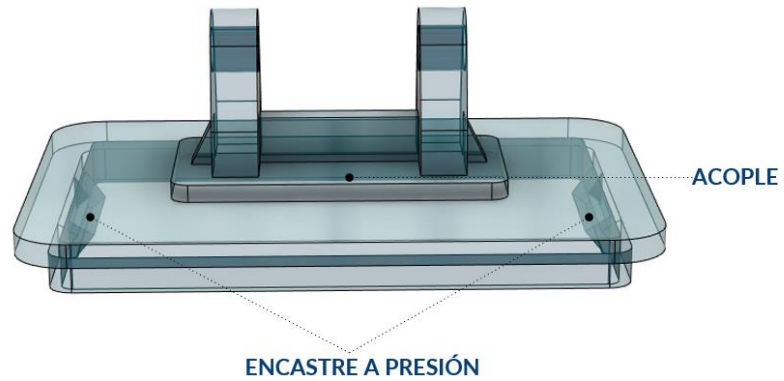


Figura 3-23: Diseño 3D de la carcasa inferior del nodo retransmisor utilizado en la inalámbrica de sensores; elaboración propia.



Mencionando lo anterior, la caja posee dimensiones de 10.80 x 8.00 x 10.00 cm (teniendo en cuenta el acople); la carcasa completa se puede observar en la **Figura 3-24**.

Figura 3-24: Diseño 3D carcasa completa del nodo retransmisor utilizado en la inalámbrica de sensores; elaboración propia.



Una vez diseñadas las carcasas, se procedió a la impresión 3D de las mismas. Se utilizó una impresora 3D Da Vinci 1.0 Pro para imprimir las carcasas con filamento ABS y PLA.

3.5 Implementación de la red inalámbrica de sensores con Painlessmesh

Posteriormente a la impresión y ensamble de los nodos de la red inalámbrica de sensores, se procedió a su implementación. Para la implementación de la red inalámbrica se utilizó la biblioteca PainlessMesh, la cual, es una biblioteca de código abierto para la implementación de redes inalámbricas de sensores. PainlessMesh facilita la creación de redes de sensores inalámbricas de malla, las cuales, permiten la comunicación de los nodos a través de múltiples saltos.

Para la configuración de los nodos, se establecieron los parámetros necesarios en el código fuente de la ESP32/ESP8266 a través de Arduino, como la dirección IP, el nombre y contraseña de la red, el nombre de cada nodo, entre otros. Una vez que se configuraron los nodos, se procedió a su encendido y se verificó la conexión de la red inalámbrica de sensores. Posteriormente, se comprobó que los nodos de la red estuvieran transmitiendo la información de los sensores correctamente a través de la red inalámbrica de malla.

Una vez configurados y conectados los nodos, se procedió a la transmisión de datos de los sensores a través de la red inalámbrica de malla. Para ello, se utilizó la plataforma de código abierto Node-RED, que proporciona un entorno de programación visual y fácil de usar para la conexión de dispositivos y servicios. Además, se implementó el protocolo de comunicación MQTT para establecer la comunicación entre el nodo raíz y el servidor local.

Se configuró un broker de escucha en el servidor local y en Node-RED un cliente que se suscribió al tópico en cuestión para recibir los datos enviados por los nodos sensores. Posteriormente, se enviaron los datos recolectados por los nodos sensores a través de una interfaz desarrollada en Node-RED hacia ThingSpeak, una plataforma en línea que permite la recopilación y análisis de datos en tiempo real. En la **Figura 3-25** se puede observar la disposición final de la red inalámbrica de sensores, el uso de Painlessmesh y la conexión con ThingSpeak. Asimismo, en la **Figura 3-26** y **Figura 3-27** se pueden visualizar otras gráficas relevantes, como la disposición de Node-RED y el canal de ThingSpeak utilizado para la visualización de los datos y la alarma.

Figura 3-25: Estructura de red utilizada para la implementación de la red inalámbrica de sensores; elaboración propia.

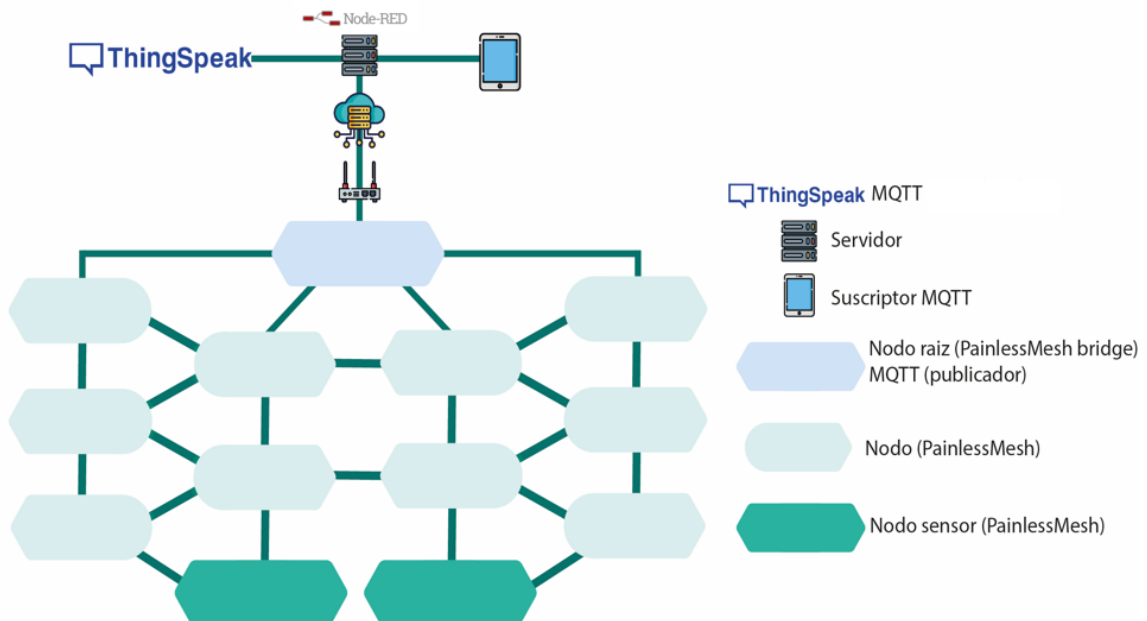


Figura 3-26: Interfaz gráfica de Node-RED utilizada para la conexión y configuración de los canales de ThingSpeak utilizados para visualizar los datos en tiempo real; elaboración propia.

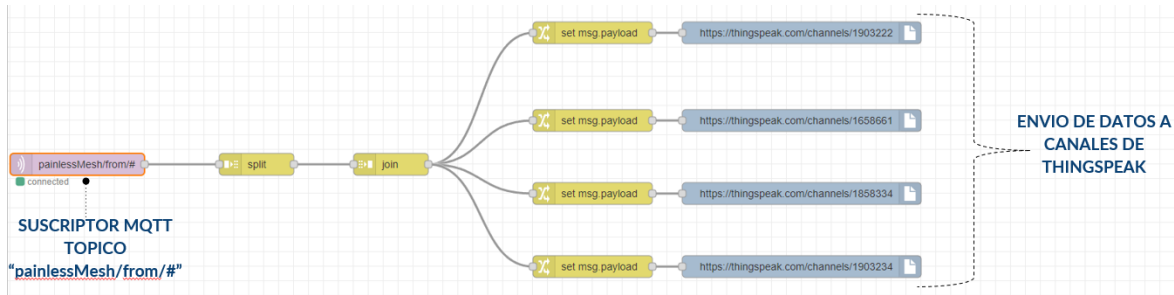
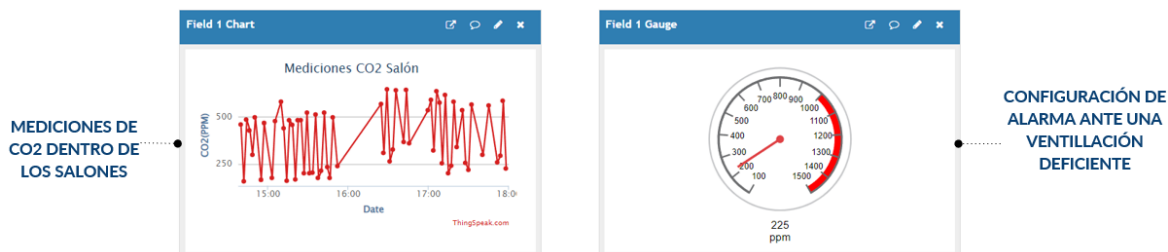


Figura 3-27: Gráfica de los datos recolectados por los nodos sensores y configuración de la alarma en tiempo real en ThingSpeak (canal de CO2 interior del aula); elaboración propia.



Después de que los datos han sido compartidos por NODE-RED a ThingSpeak a través de cada uno de los canales, en el canal con ID `"/1903222/"` (primer canal como se puede ver en la Figura **Figura 3-26**), se configuraron dos campos importantes. Uno de ellos se encarga de graficar cada nuevo valor entrante del CO2 interior (se puede observar en la **Figura 3-27** como "Field 1 Chart"). Además, este mismo canal cuenta con un widget de "gauge" que permite visualizar un tipo de indicador de "alarma" (se puede ver en la **Figura 3-27** como "Field 1 Gauge"). Sin embargo, es importante mencionar que los indicadores límites de este widget deben ser configurados manualmente y por dicha razón, no son muy eficientes. Por lo tanto, en este caso, el widget cumple únicamente una función visual.

Por otro lado, se implementó una aplicación de análisis en ThingSpeak denominada "MATLAB Analysis". En esta aplicación se creó un script que utiliza la ecuación (3.1.2) para identificar en tiempo real el umbral de concentración de CO2 interior. Los parámetros de la ecuación se deben insertar manualmente y los datos del CO2 interior y exterior se extraen de los canales con ID `"/1903222/"` y `"/1858334/"`, respectivamente. Una vez que se han parametrizado las variables, si en algún momento la concentración interior supera el umbral, se envían dos tipos de alarma. La primera es una notificación por correo electrónico al propietario del canal (que se puede ver en la **Figura**

3-28). La otra alarma es una publicación en Twitter a través de un perfil específicamente creado para que los alumnos o profesores del aula puedan suscribirse (activando notificaciones del perfil). De esta manera, cuando se publique la alarma, les llegará inmediatamente una notificación (**Figura 3-29**).

Figura 3-28: Alerta enviada al correo electrónico del propietario del canal desde ThingSpeak; elaboración propia.

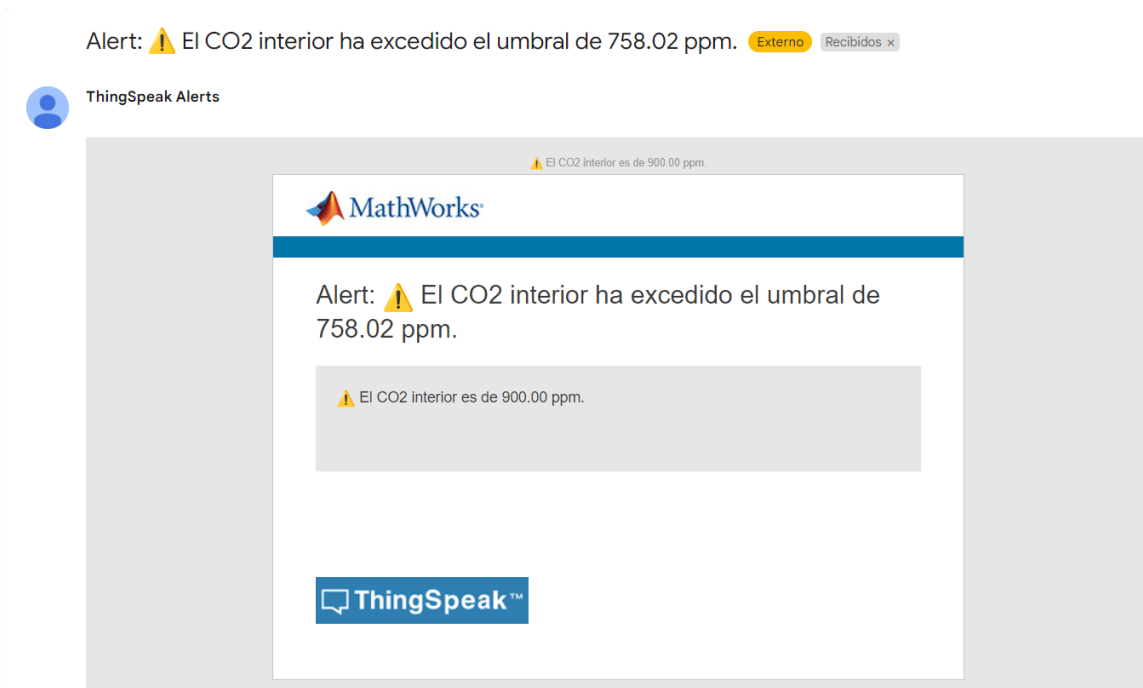


Figura 3-29: Alerta enviada a Twitter desde ThingSpeak; elaboración propia.



Una vez que se han recopilado los datos de calidad del aire durante una sesión de clase, es importante analizar la variación de la concentración de CO₂ en el ambiente. Para ello, se exportan los datos del canal de ThingSpeak a un archivo CSV que permite realizar un análisis más detallado a través de MATLAB. En este análisis, se identificarán patrones y tendencias en la variación de la calidad del aire (Sección 4).

En total, se dispuso de un nodo raíz (PainlessMesh bridge), ocho nodos (PainlessMesh) y dos nodos sensor (PainlessMesh), lo que permitió la recopilación de datos precisos y en tiempo real de las variables ambientales en diferentes salones de la universidad. Por otro lado, esta implementación no solo fue exitosa en su objetivo, sino que también demostró la eficacia de la biblioteca PainlessMesh en la creación de redes de sensores inalámbricas de malla y la plataforma Node-RED para la recolección de datos en tiempo real. Además, la plataforma ThingSpeak permitió la visualización y

análisis de datos en tiempo real. La información recolectada fue posteriormente analizada utilizando la herramienta de análisis de datos MATLAB, lo que permitió la identificación de patrones y tendencias en los datos recopilados.

4. Resultados

En esta sección se presentan los resultados de la medición de la calidad del aire en aulas de la Universidad Antonio Nariño, tanto en interiores como en exteriores. Se registraron los niveles de CO₂ y material particulado en diferentes configuraciones y actividades, en total, se registraron 7 conjuntos de datos con una duración de aproximadamente una hora y media con intervalos de dos minutos entre cada muestra. Además, se analizó el comportamiento del CO₂ y el material particulado en función del número de ocupantes, tipo de actividad y número de ventanas abiertas en diferentes configuraciones de aula (clase magistral, exámenes, presentaciones y trabajo en grupo). En la **Tabla 4-1** se presentan los parámetros de entrada utilizados en el modelo descrito en la sección 3.1. Del mismo modo, se usó información del artículo de referencia [13] para obtener las variables que se utilizaron en la ecuación (3.1.2) para determinar la diferencia máxima permitida de CO₂ en el aire en comparación con el aire exterior ($\Delta c_{CO_2}^*$).

Tabla 4-1: Parámetros de entrada utilizados en el modelo descrito en la ecuación (3.1.2).

Caso	N	E_p $quanta^{-1}$	E_{p,CO_2} m^3h^{-1}	B m^3h^{-1}	n_{im}	n_l	D h	m_{ex}	m_{in}	λ_0 h^{-1}	λ h^{-1}
Exposiciones	28	60.5	0.0273	0.716	0	0.001005	0.825	0.5	0.3	1.19	3.92
Exámenes	31	4	0.0203	0.516	0	0.001005	1.07	0.5	0.3	3	3.92
Clase magistral	23	4	0.0203	0.516	0	0.001005	0.959	0.5	0.3	3	3.92
Trabajo en grupo	18	9.4	0.0203	0.716	0	0.001005	1.5	0	0	3	3.92

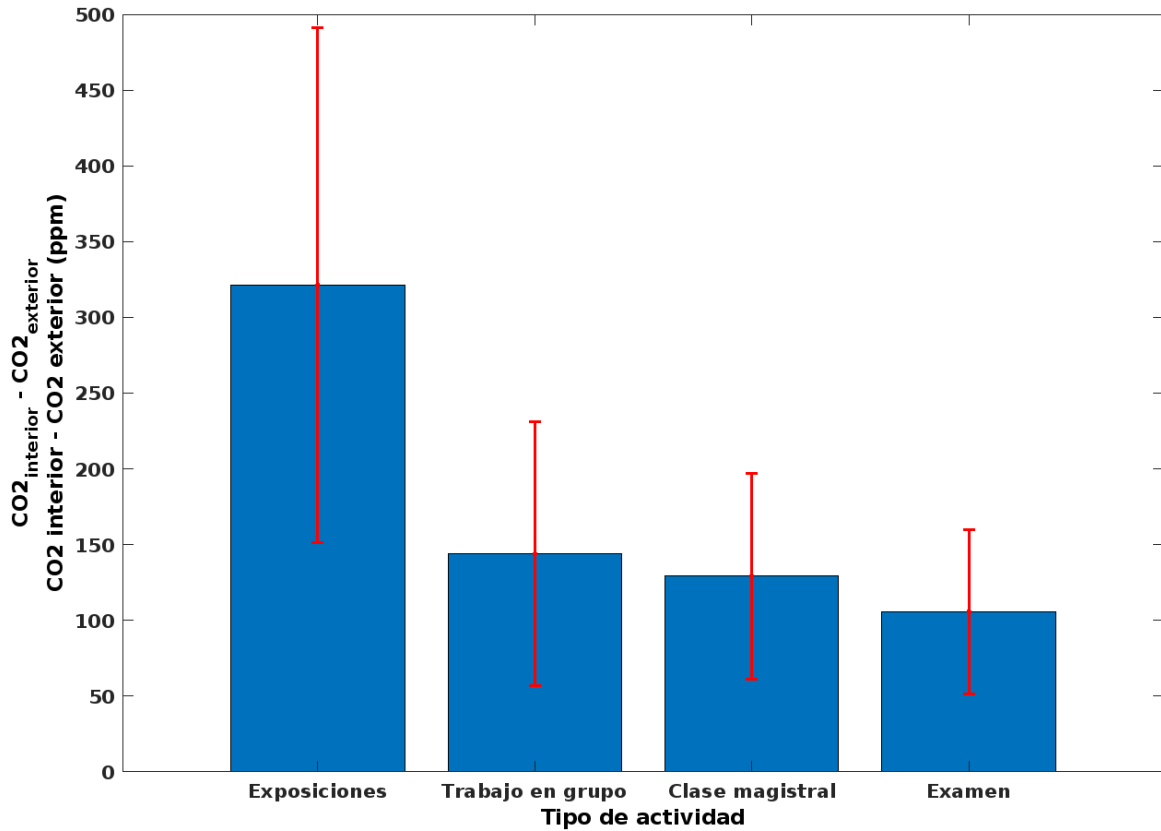
Los sensores se posicionaron siguiendo las recomendaciones de [6], que indican que los sensores deben ubicarse en un lugar con flujo de aire sin obstrucciones, pero evitando la influencia directa de ventanas, sistemas de ventilación o corrientes concentradas de aire exhalado. Por lo tanto, los sensores se colocaron a una distancia de 2 metros de cualquier ocupante humano o ventana, pero a la misma altura que los ocupantes. Cabe destacar que ambos sensores se calibraron previamente en un laboratorio acreditado por ISO/IEC 17025:2017. El sensor de CO₂ admite la calibración de punto cero, por lo que se ajustó manualmente a 400 ppm. Por otro lado, el sensor de material particulado utiliza el principio de dispersión láser, por lo que se calibró utilizando un estándar de calibración debido a la naturaleza altamente sensible del principio a factores ambientales como la humedad.

En cuanto al desempeño del prototipo en términos de variables de telecomunicaciones y energía, se realizaron pruebas de alcance, latencia y pérdida de paquetes para evaluar la efectividad de la red de inalámbrica de sensores implementada.

4.1 Medición de CO₂ y material particulado en aulas de clase

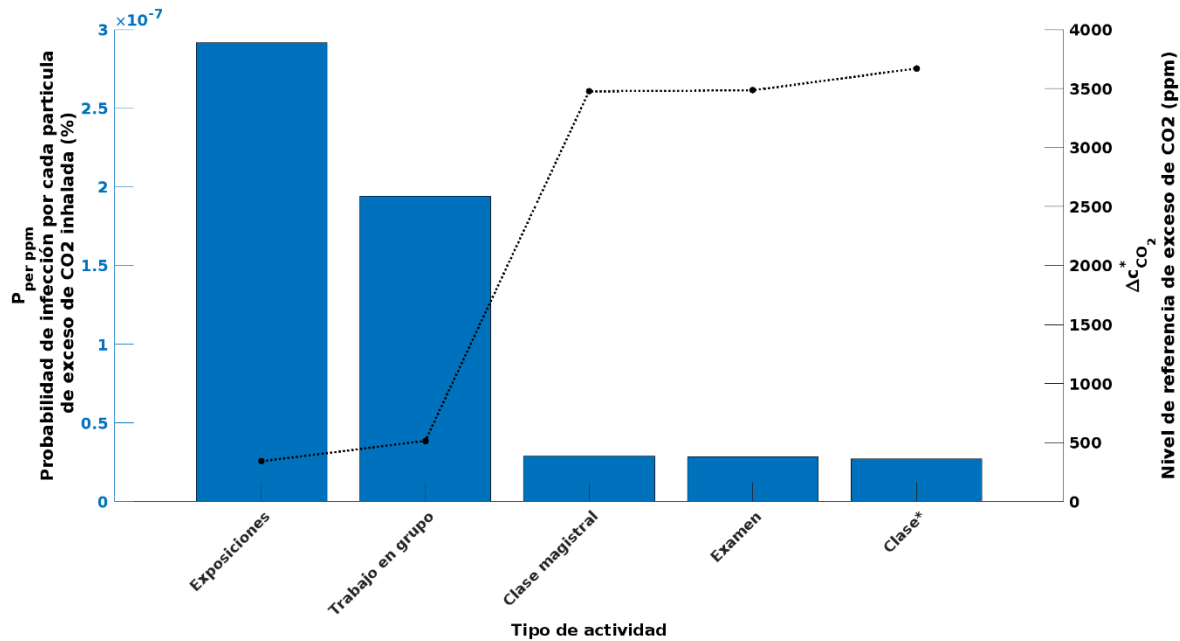
La **Figura 4-1** muestra la diferencia en la concentración de CO₂ dentro y fuera de las aulas ($CO_{2_{interior}} - CO_{2_{exterior}}$) en el eje y, y el tipo de actividad en el eje x. Los resultados indican que el mayor exceso promedio de CO₂ se observó durante las exposiciones, con un valor promedio de 321 ± 169 ppm. Esto se debe a que, durante las exposiciones, los estudiantes hablan constantemente y, por lo tanto, exhalan mayores cantidades de CO₂ en el aula. Además, el trabajo en grupo y la clase magistral tuvo un exceso de CO₂ promedio de 143 ± 87 y 129 ± 67 ppm respectivamente, lo que implica que las discusiones en grupo y la participación activa en la clase magistral también contribuyen al aumento de los niveles de CO₂ en las aulas. Por otro lado, los exámenes tuvieron el menor exceso promedio de CO₂ con un valor promedio de 105 ± 54 ppm, posiblemente debido a una duración más corta y menos movimiento, lo que resulta en una exhalación y concentración de CO₂ más baja. Finalmente, los resultados sugieren que el nivel de exceso de CO₂ en las aulas depende del tipo de actividad que se realice.

Figura 4-1: Diferencia de la concentración de CO₂ dentro y fuera de las aulas ($CO_{2\text{interior}} - CO_{2\text{exterior}}$) para diferentes tipos de actividades; elaboración propia.



Por otro lado, se calculó la probabilidad de infección por COVID-19 por cada partícula (ppm) de CO₂ de exceso ($P_{per\ ppm}$) y el nivel de referencia de exceso de CO₂ ($\Delta c_{CO_2}^*$) para diferentes actividades, utilizando las ecuaciones (3.1.1) y (3.1.2) respectivamente. La **Figura 4-2** ilustra $P_{per\ ppm}$ en el eje izquierdo y $\Delta c_{CO_2}^*$ en el eje derecho para diferentes tipos de actividades. Los resultados indican que la actividad de clase* tuvo una $P_{per\ ppm}$ de $2.724 \times 10^{-8}\%$ y un $\Delta c_{CO_2}^*$ de 3670 ppm como se reportó en [13]. La actividad de exposiciones y trabajo en grupo mostraron un aumento promedio en $P_{per\ ppm}$ de 2.2×10^{-7} unidades en comparación con la actividad de clase*, debido a un mayor nivel de actividad física y tasas de respiración asociadas con estas actividades. Por otro lado, se observó una disminución de 3.2×10^3 ppm en $\Delta c_{CO_2}^*$ para las actividades de exposiciones y trabajo en grupo, lo que indica un umbral más bajo para la infección por COVID-19 (3.1.1) en comparación con la actividad de clase*. Estos hallazgos indican que la probabilidad de infección por COVID-19 por cada ppm de exceso de CO₂ y el nivel de referencia de exceso de CO₂ en las aulas dependen del tipo de actividad que se esté llevando a cabo.

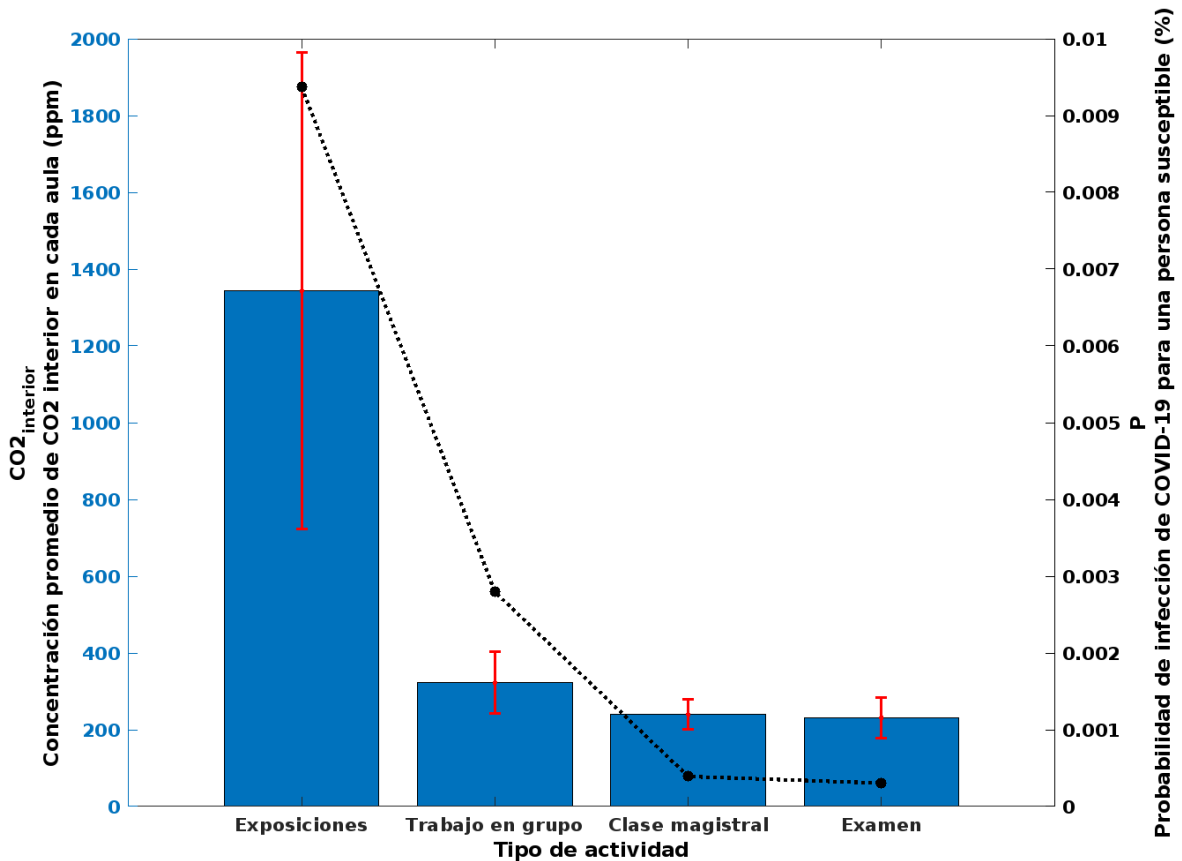
Figura 4-2: Probabilidad de infección por COVID-19 por partícula de exceso de CO₂ exceso ($P_{per\ ppm}$) y el nivel de referencia de exceso de CO₂ ($\Delta c_{CO_2}^*$) para diferentes tipos de actividades; elaboración propia.



Se midió la concentración promedio de CO₂ en el interior de cada aula ($CO_{2\ interior}$) y se calculó probabilidad de infección de COVID-19 para una persona susceptible (P) descrita en la ecuación (3.1.4) para diferentes tipos de actividades, como se muestra en la **Figura 4-3**. En el eje x se describe el tipo de actividad, en el eje y de la izquierda se describe $CO_{2\ interior}$ y en el eje y de la derecha P . Los resultados indican que las exposiciones tuvieron la concentración promedio más alta de $CO_{2\ interior}$ con un valor medio de 1342 ± 620 ppm y P de 0.0094%. Esto podría deberse a la mayor exhalación y actividad física asociada con las exposiciones. El trabajo en grupo tuvo la segunda concentración promedio más alta de $CO_{2\ interior}$ con un valor medio de 322 ± 79 ppm y P de 0.0028%. La clase magistral tuvo una concentración promedio más baja de $CO_{2\ interior}$ con un valor medio de 240 ± 38 ppm y P de 0.0004%, mientras que los exámenes tuvieron la concentración más baja de $CO_{2\ interior}$ con un valor medio de 231 ± 53 ppm y P de 0.0003%. Vale la pena señalar que la clase magistral y los exámenes tenían concentraciones de CO₂ en interiores similares, lo que sugiere que estas actividades podrían considerarse menos riesgosas para la transmisión de COVID-19 en comparación con las exposiciones y el trabajo en grupo. Los resultados revelan que la

exposición a altos niveles de CO₂ en interiores se asoció con un aumento en la probabilidad de infección de COVID-19.

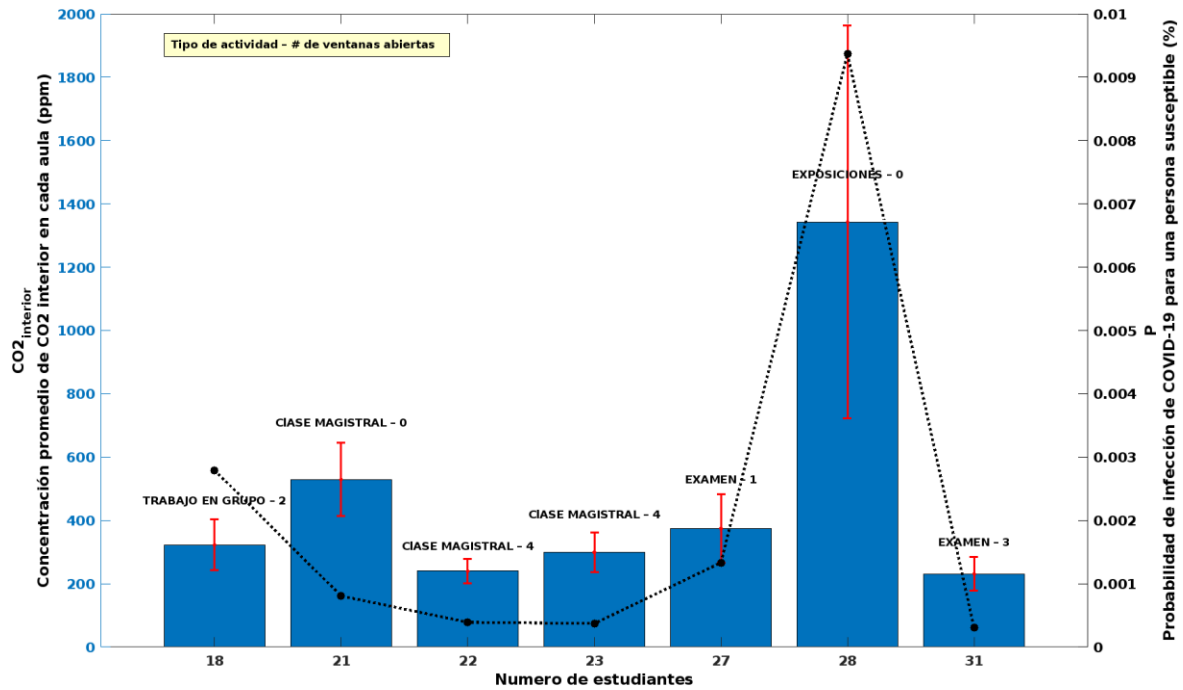
Figura 4-3: Concentración promedio de CO₂ interior en cada aula ($CO_{2_{interior}}$) y la probabilidad de infección de COVID-19 para una persona susceptible (P) para diferentes tipos de actividades; elaboración propia.



Se realizó un análisis de la relación entre el número de personas en un aula de clase (N), midió la concentración promedio de CO₂ en el interior de cada aula ($CO_{2_{interior}}$) y la probabilidad de infección de COVID-19 para una persona susceptible (P). La **Figura 4-4** muestra los valores de $CO_{2_{interior}}$ en el eje y izquierdo, y P en el eje y derecho para diferentes números de estudiantes representados en el eje x. Cada barra en la gráfica contiene una etiqueta que representa el tipo de actividad ejercida en el aula y el número de ventanas abiertas durante esa actividad. Los resultados indican que el número de estudiantes no es un factor determinante que contribuya a la concentración de CO₂ en interiores. Además, se observó que P disminuyó a medida que aumentó el número de ventanas abiertas, independientemente del número de estudiantes presentes en el aula. Se pudo observar que las actividades de tipo clase magistral con 22 y 23 personas y cuatro ventanas abiertas

tuvieron una menor concentración de CO₂ y una menor probabilidad de infección por COVID-19 en comparación con la clase magistral con 21 personas sin ventanas abiertas.

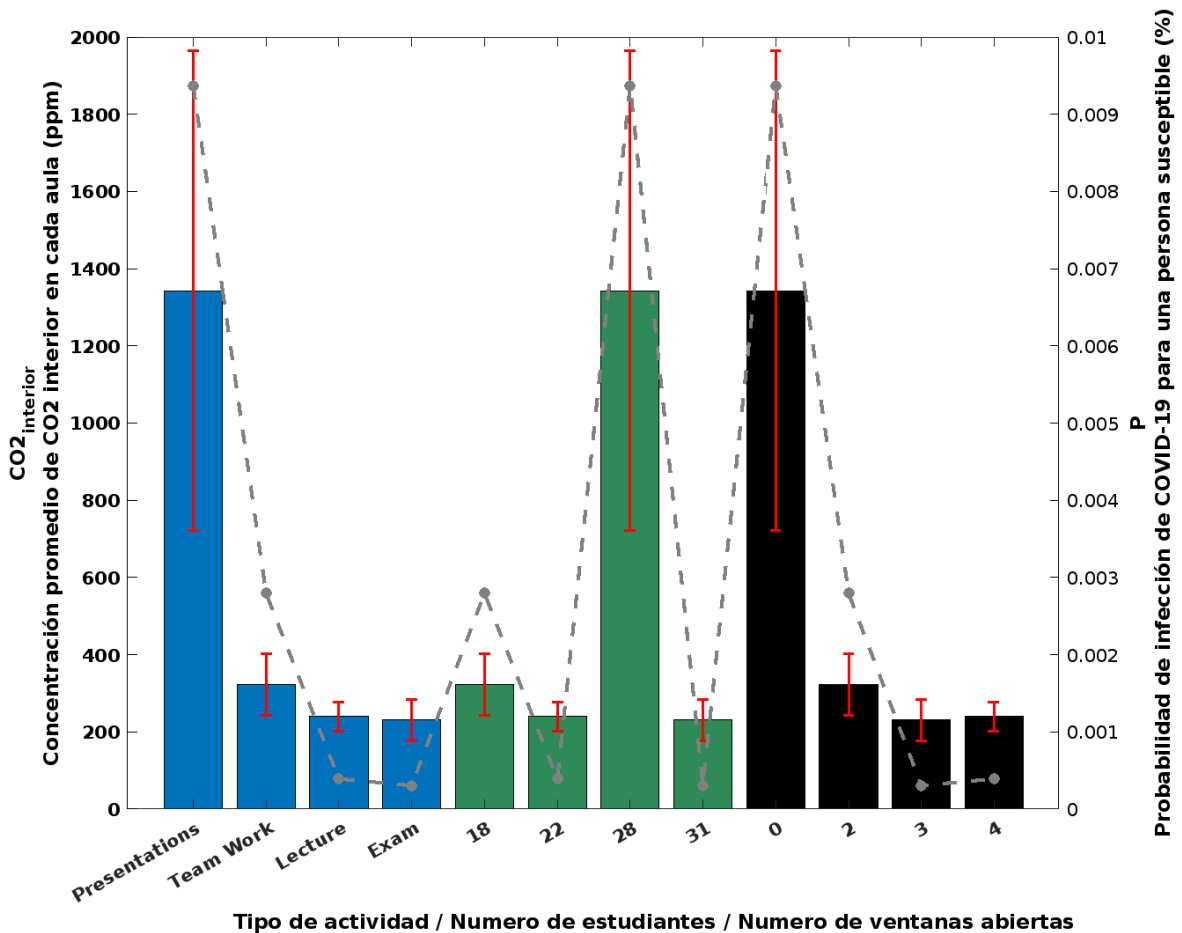
Figura 4-4: Concentración promedio de CO₂ interior en cada aula ($CO_{2,interior}$) y probabilidad de infección de COVID-19 para una persona susceptible (P) para diferentes tipos de actividades; elaboración propia.



La **Figura 4-5** la concentración promedio de CO₂ en el interior de cada aula ($CO_{2,interior}$) en el eje y izquierdo la probabilidad de infección de COVID-19 para una persona susceptible (P) en el eje y derecho. El eje x muestra el tipo de actividad (barras azules), el número de estudiantes (barras verdes) y el número de ventanas abiertas (barras negras). La línea gris punteada muestra la P correspondiente para cada actividad. Las barras azules representan la concentración promedio de CO₂ en interiores para cada actividad, ordenadas en orden descendente. Las exposiciones tienen el mayor $CO_{2,interior}$ y P , seguidas por trabajo en grupo, clase magistral y exámenes. Las barras verdes muestran que un número relativamente pequeño de estudiantes no afecta significativamente el $CO_{2,interior}$ y el P . Por ejemplo, algunas actividades con menos estudiantes tienen niveles elevados de $CO_{2,interior}$ y P más bajos que actividades con más estudiantes. En cuanto a las ventanas abiertas, representadas por las barras negras, más ventanas abiertas conducen a niveles más bajos de $CO_{2,interior}$ y P para el mismo tipo de actividad. Finalmente, la **Figura 4-5** ilustra que el $CO_{2,interior}$ y el P están influenciados

principalmente por el tipo de actividad y el número de ventanas abiertas. Además, cuando variamos ligeramente el número de estudiantes, no afecta significativamente los niveles de $CO2_{interior}$ y P .

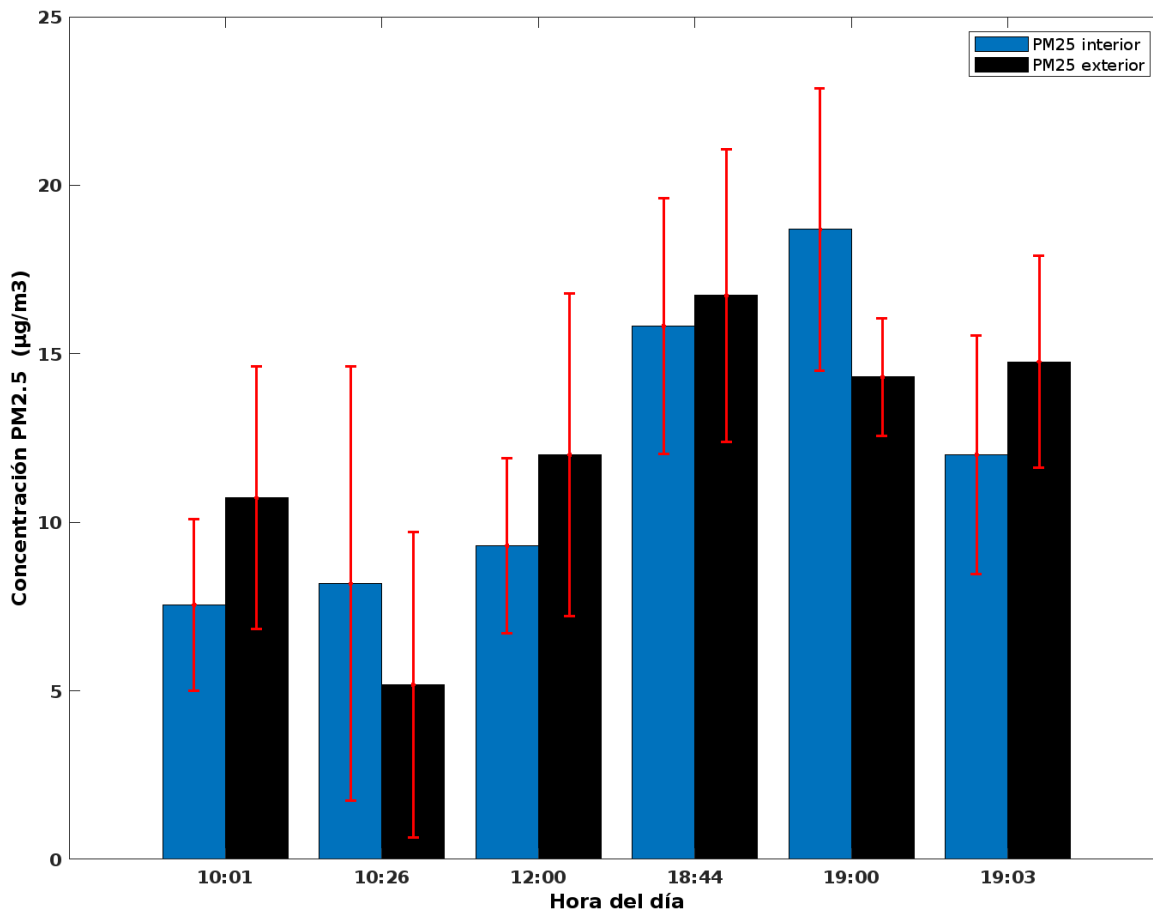
Figura 4-5: Concentración promedio de $CO2$ interior en cada aula ($CO2_{interior}$) y probabilidad de infección de COVID-19 para una persona susceptible (P) en función del tipo de actividad, número de estudiantes y cantidad de ventanas abiertas.



Se midió la concentración promedio de partículas finas suspendidas en el aire con un diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 micrómetros ($PM2.5$) en diferentes horas del día, en relación con las actividades previamente presentadas. La **Figura 4-6** ilustra la concentración promedio de $PM2.5$ ($\frac{\mu g}{m^3}$) en el eje y, mientras que en el eje x se presentan diferentes horas del día. Cada hora tiene dos barras, una azul que representa la concentración promedio de $PM2.5$ interior y una negra que representa la concentración promedio de $PM2.5$ exterior. Los resultados indican que la concentración promedio de $PM2.5$ interior varía a lo largo del día, con valores más altos a las 19:00 y más bajos a

las 10:01. Sin embargo, la concentración de PM_{2.5} exterior también muestra variabilidad a lo largo del día, con valores más altos a las 18:44 y más bajos a las 10:26. Además, las concentraciones de PM_{2.5}, tanto en el interior como en el exterior, parecen ser mayores durante la tarde y noche en comparación con las concentraciones durante la mañana. Esto puede deberse a varios factores, como el aumento del tráfico vehicular y las actividades humanas durante las horas pico de la tarde y la noche, lo que puede contribuir a una mayor emisión de partículas finas al aire.

Figura 4-6: Concentración promedio de PM_{2.5} y para diferentes horas del día; elaboración propia.



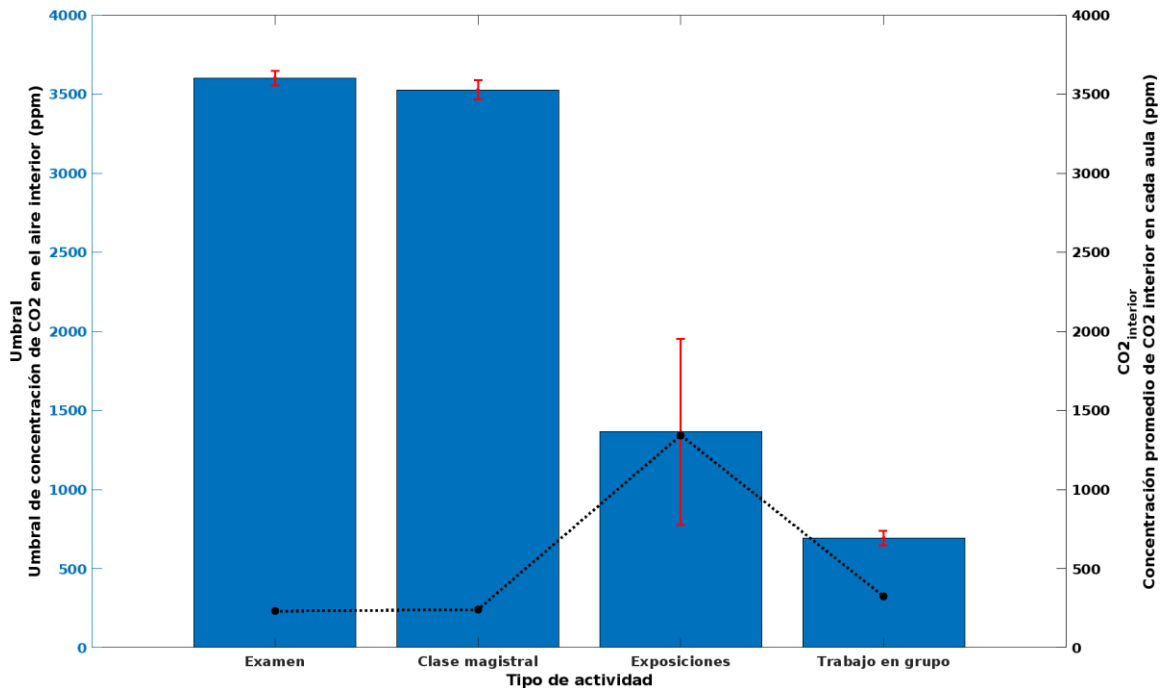
4.2 Efectividad de las alarmas

La **Figura 4-7** representa los resultados relacionados con los niveles de dióxido de carbono en el interior de las aulas durante diferentes tipos de actividades. En el eje y izquierdo se muestra el umbral de concentración de CO₂ en el aire interior, el cual fue calculado a través de la ecuación (3.1.1),

mientras que en el eje y derecho se presenta la concentración promedio de CO₂ en el interior de cada aula ($CO_{2\text{interior}}$) para diferentes tipos de actividad representados en el eje x.

Los resultados revelan que el umbral de concentración promedio de CO₂ para los exámenes fue de 3601 ± 45 ppm, con un $CO_{2\text{interior}}$ de 231 ppm. Para la clase magistral, el umbral fue de 3526 ± 60 ppm, con un $CO_{2\text{interior}}$ 240 ppm. En el caso de las exposiciones, el umbral fue de 1364 ± 588 ppm, mientras un $CO_{2\text{interior}}$ alcanzó los 1342 ppm. Por último, para el trabajo en grupo, el umbral fue de 693 ± 46 ppm, con un $CO_{2\text{interior}}$ de 322 ppm. Se observa que la actividad de exposiciones fue la que obtuvo la concentración de CO₂ promedio más cercana al umbral. En dicha actividad activó una alarma cuando se superó el umbral por primera vez, inmediatamente se notificó al instructor, quien tomó medidas para mitigar la situación abriendo la puerta para que entre mayor cantidad de aire desde el exterior. Después de esta intervención, se observó una disminución en la concentración de CO₂ en el interior del aula.

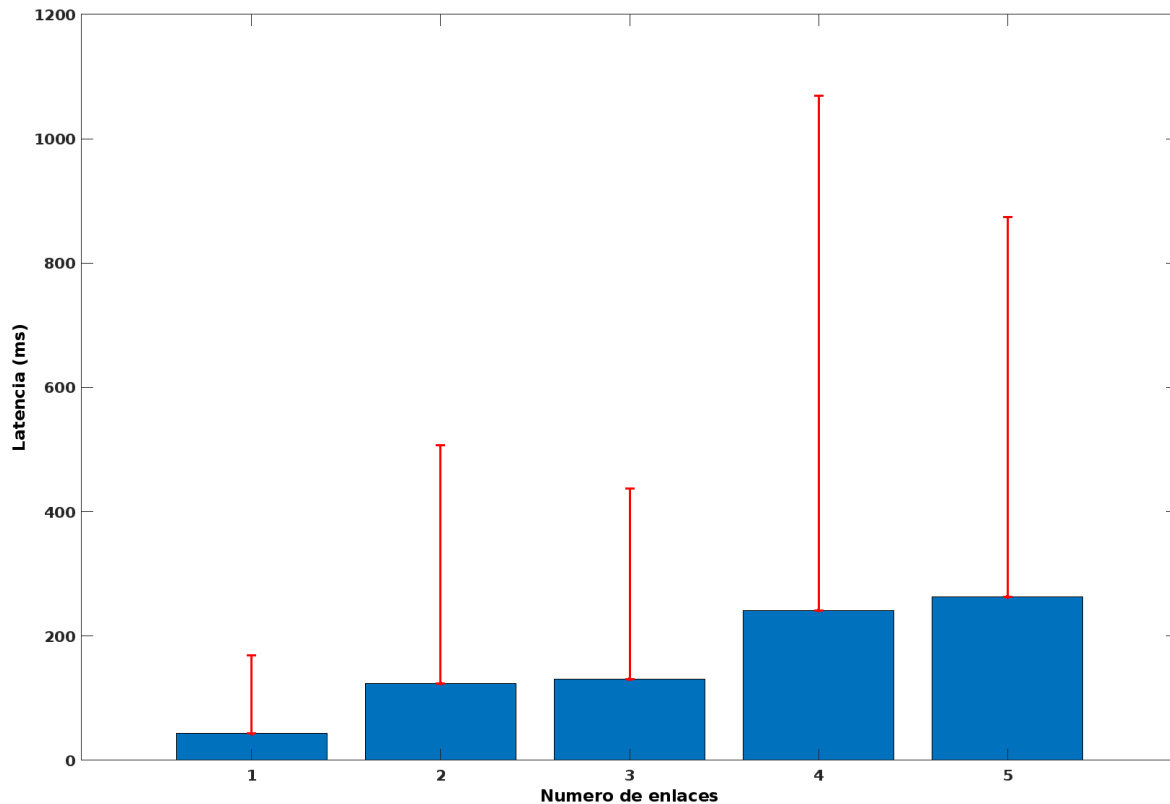
Figura 4-7: Umbral de concentración de CO₂ en el aire interior y la concentración promedio de CO₂ interior en cada aula ($CO_{2\text{interior}}$) para diferentes tipos de actividades; elaboración propia.



4.3 Desempeño del prototipo

La red inalámbrica de sensores fue evaluada con cinco enlaces para determinar si la adición de nodos afectaba la latencia. La **Figura 4-8** ilustra la latencia en milisegundos en el eje y, y el número de enlaces en el eje x. Para un enlace, la latencia promedio fue de $43.031 + 126.294$ ms. Con dos enlaces, la latencia promedio aumentó a $124.027 + 382.709$ ms. Con tres enlaces, la latencia promedio fue de $130.7 + 307.106$ ms. Para cuatro enlaces, la latencia promedio fue de $240.821 + 828.986$ ms. Finalmente, con cinco enlaces, la latencia promedio fue de $262.836 + 611.262$ ms. Los resultados indican que a medida que se agregan más enlaces a la red inalámbrica de sensores, la latencia promedio tiende a aumentar, lo cual era de esperarse debido a que la transmisión de datos a través de múltiples enlaces puede introducir mayor interferencia y retrasos en la comunicación. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los valores de latencia presentan una alta variabilidad, como se evidencia por las desviaciones estándar, lo cual puede deberse a factores como la congestión de la red y la calidad de la señal inalámbrica en diferentes momentos y ubicaciones.

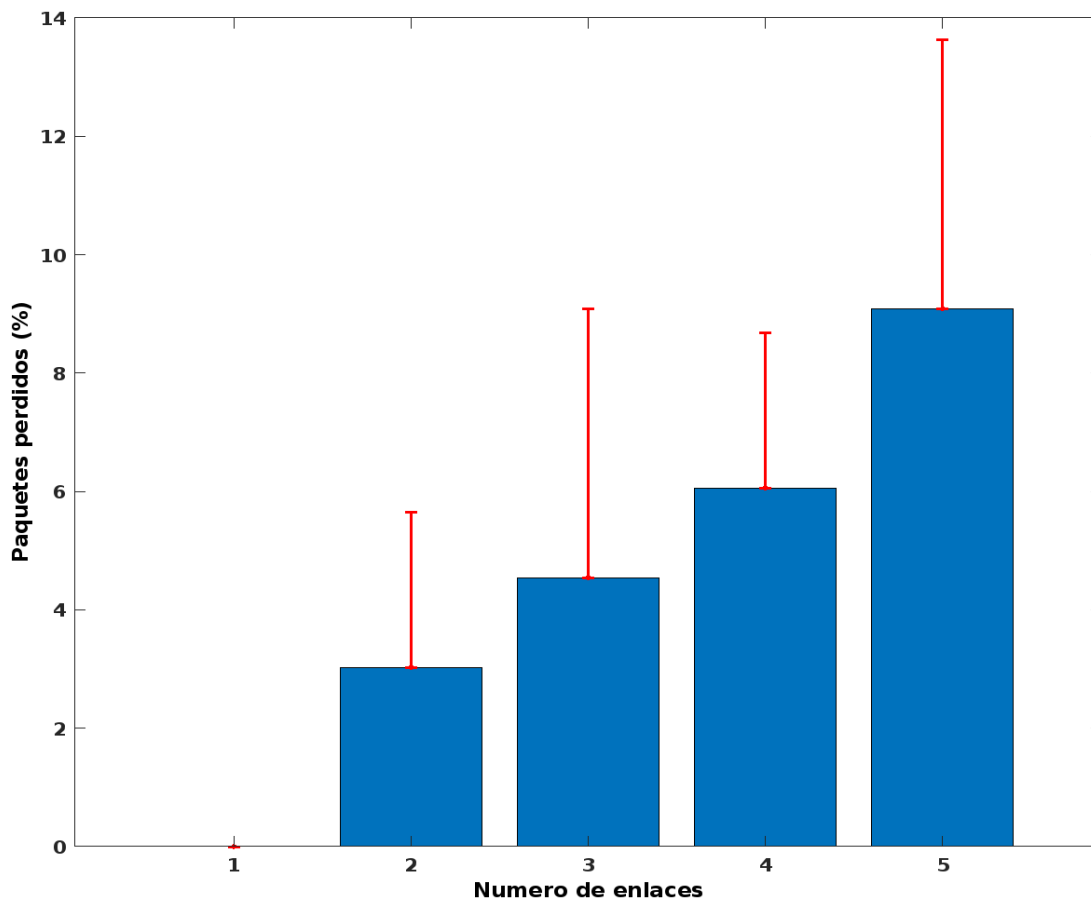
Figura 4-8: Latencia promedio en la red inalámbrica de sensores en función del número de enlaces; elaboración propia.



La **Figura 4-9** muestra el porcentaje de paquetes perdidos en la red inalámbrica de sensores al implementar diferentes enlaces para determinar su impacto en la pérdida de paquetes. Los resultados

obtenidos indican que, con un solo enlace, el porcentaje de pérdida de paquetes fue de 0%. Sin embargo, al aumentar el número de enlaces, se observó un aumento en el porcentaje de pérdida de paquetes. Con dos enlaces, el porcentaje de pérdida de paquetes fue del $3.030 + 2.624\%$. Con tres enlaces, el porcentaje de pérdida de paquetes aumentó a $4.545 + 4.545\%$. Con cuatro enlaces, el porcentaje de pérdida de paquetes fue de $6.060 + 2.624\%$. Y finalmente, con cinco enlaces, el porcentaje de pérdida de paquetes alcanzó el $9.090 + 4.545\%$. Estos resultados sugieren que el número de enlaces adicionales en la red inalámbrica de sensores puede tener un impacto significativo en el porcentaje de paquetes perdidos, lo cual puede deberse a una mayor congestión en la red. Además, se observa una variabilidad en los resultados, representada por las desviaciones estándar, lo cual indica que el desempeño del prototipo puede variar en función del número de enlaces utilizados.

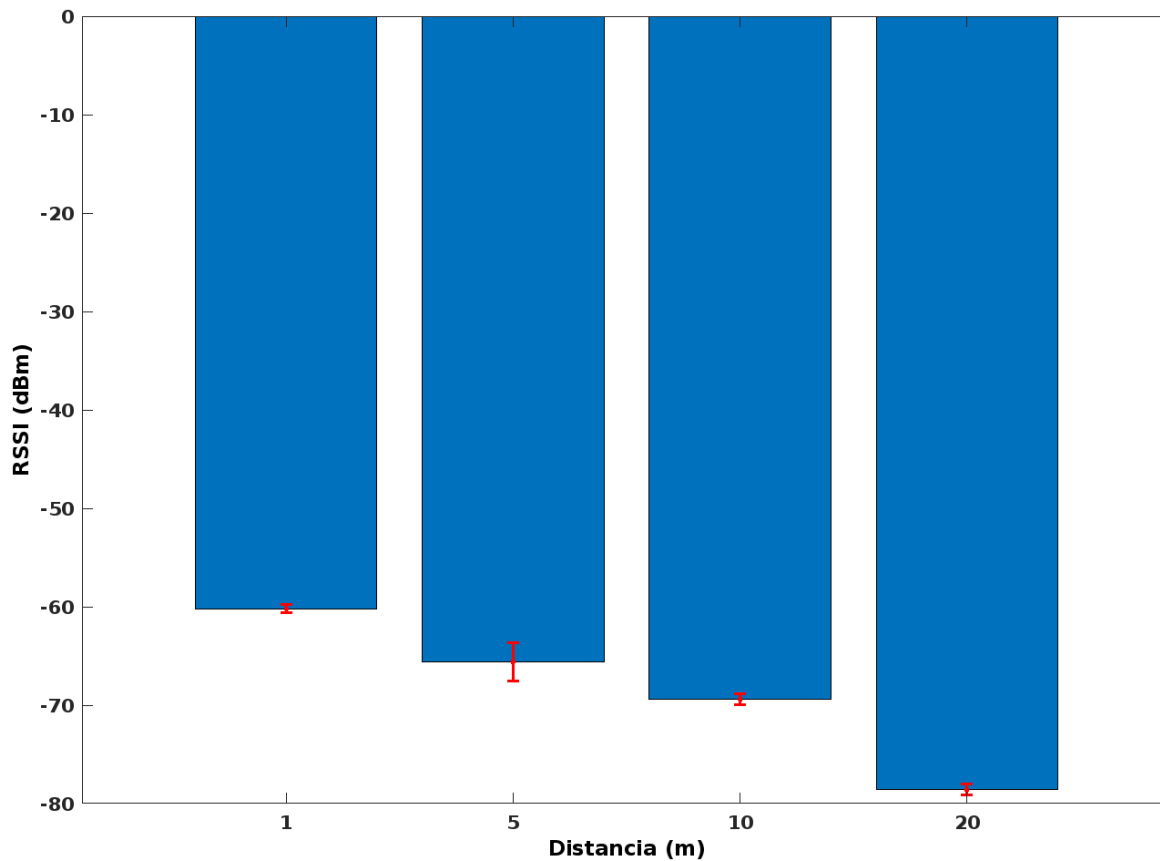
Figura 4-9: Impacto del número de enlaces en la pérdida de paquetes en una red inalámbrica de sensores; elaboración propia.



Se midió el RSSI (Indicador de Fuerza de Señal Recibida, por sus siglas en inglés) para la red inalámbrica de sensores. El RSSI fue medido con el nodo raíz colocado a diferentes distancias con

respecto al enrutador o punto de acceso. La **Figura 4-10** muestra los valores de RSSI en el eje y, y la distancia del nodo raíz al punto de acceso en el eje x. Para una distancia de 1 metro, el RSSI fue de -60.2 ± 0.447 dBm. A 5 metros, el RSSI fue de -65.6 ± 1.949 dBm. A 10 metros, el RSSI fue de -69.4 ± 0.547 dBm. Y a 20 metros, el RSSI fue de -78.6 ± 0.547 dBm. Estos resultados indican que a medida que la distancia del nodo raíz aumenta, el valor del RSSI disminuye, lo cual es esperado en la red inalámbrica debido a la atenuación de la señal con la distancia. Además, se observa que la variabilidad de la RSSI aumenta a medida que aumenta la distancia, lo que puede deberse a la atenuación de la y a posibles interferencias en el entorno.

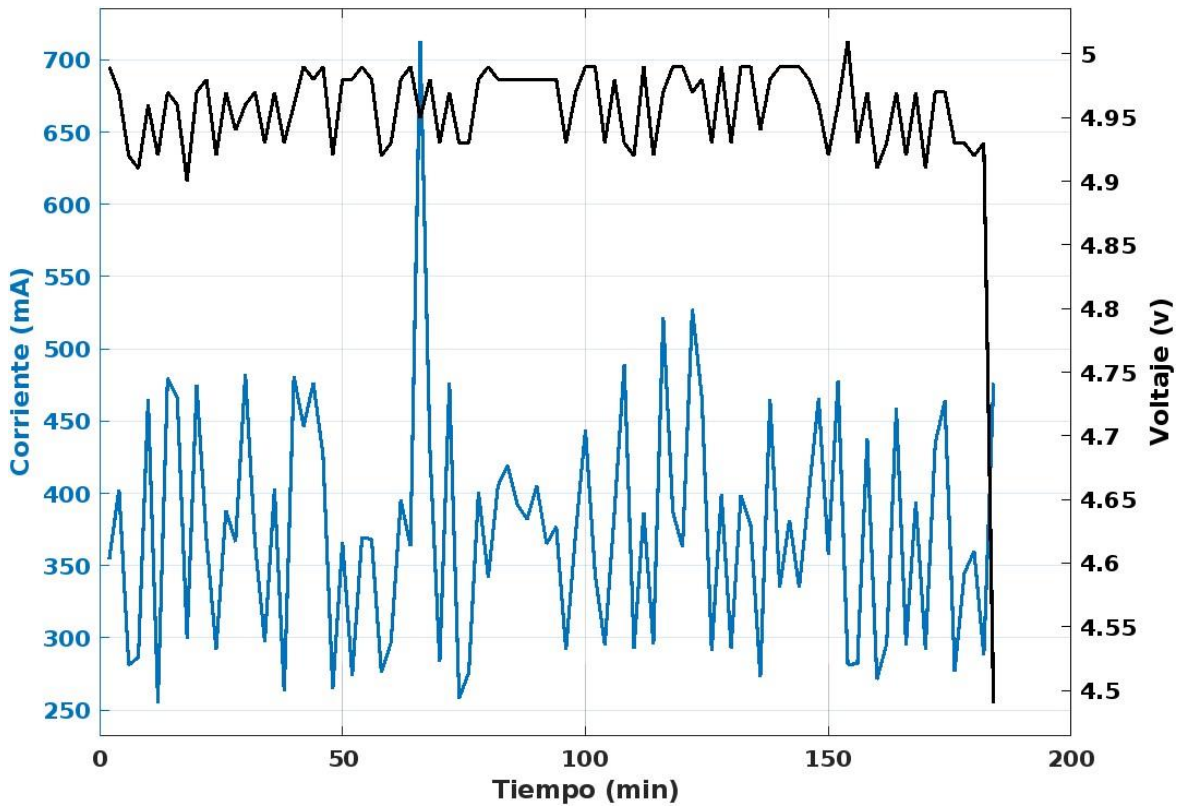
Figura 4-10: Medición del RSSI en la red inalámbrica de sensores a diferentes distancias del nodo raíz al punto de acceso; elaboración propia.



La **Figura 4-11** ilustra la relación entre la corriente y el voltaje en función del tiempo de descarga con respecto al nodo sensor. El tiempo está representado en minutos en el eje x. En el eje y izquierdo se muestra la corriente, mientras que en el eje y derecho se representa el voltaje. Es importante destacar que la medición de voltaje se realizó con respecto a un amplificador de voltaje, en lugar de hacerlo directamente en la batería. Durante el tiempo de funcionamiento aproximado de 184 minutos, se registraron valores de corriente que oscilaron entre 354.4 y 712.9 mA, los cuales se encuentran

dentro de los límites aceptables para los componentes del dispositivo y se observaron fluctuaciones dentro del rango normal esperado. En cuanto a los valores de voltaje, se observó un valle antes de que la batería de 3.7v se agotara. Este comportamiento es típico en baterías de litio y puede ser un indicador de la batería se ha descargado completamente.

Figura 4-11: Comportamiento de corriente, voltaje y tiempo de descarga del dispositivo (nodo sensor); elaboración propia.



5. Conclusiones

5.1 Conclusiones

- Se logró identificar los niveles de CO₂ que representan un riesgo para la transmisión de COVID-19 en aulas de clases, implementando un dispositivo electrónico que realiza mediciones ambientales y alerta sobre una ventilación deficiente.
- Se construyó una red inalámbrica de sensores que envía los niveles de CO₂, material particulado y las alarmas a un servidor en la nube mediante IoT, utilizando la plataforma Thingspeak.
- Se utilizó el software CIRCAD para el diseño de circuitos electrónicos y el software Fusion 360 para la creación de las carcasas del dispositivo y los nodos retransmisores, utilizando materiales duraderos como ABS y PLA.
- La implementación de la red inalámbrica de sensores con PainlessMesh, Node-RED y ThingSpeak fue exitosa en la recopilación de datos precisos y en tiempo real de las variables ambientales en las aulas de la universidad.
- La implementación del sistema de alarmas basado en umbrales dinámicos de concentraciones de CO₂ permitió monitorear y controlar la calidad del aire en las aulas durante diferentes actividades, reduciendo la concentración de CO₂ mediante intervenciones oportunas.
- La investigación resalta la importancia de la ventilación adecuada en las aulas para reducir la concentración de CO₂ y material particulado, y sugiere que el tipo de actividad y el número de ventanas abiertas son factores determinantes en la probabilidad de infección por COVID-19 y los niveles de CO₂ dentro de las aulas.

- Los resultados del desempeño del prototipo de la red inalámbrica de sensores mostraron que el número de enlaces utilizados afecta la latencia y el porcentaje de paquetes perdidos, y que la distancia influye en el valor y la variabilidad del RSSI debido a la atenuación de la señal y posibles interferencias.

5.2 Trabajos futuros

Entre los trabajos futuros que se proponen para ampliar el alcance de esta investigación se encuentra el diseño de una interfaz que logre conectar y visualizar de manera automática que la medición se está haciendo de manera correcta, lo que facilitaría el uso. Asimismo, se recomienda el análisis de patrones con machine learning, que permitiría detectar umbrales de riesgo de forma predictiva. Para ello, se podría utilizar una base de datos histórica de las mediciones ambientales y las alarmas generadas por el dispositivo, y aplicar algoritmos de aprendizaje supervisado o no supervisado para identificar los factores que influyen en el aumento o disminución de la concentración de CO₂ y material particulado en los espacios educativos.

Bibliografía

- [1] World Health Organization, "Modes of transmission of virus causing COVID-19: implications for IPC precaution recommendations," *Geneva World Heal. Organ.*, no. March, pp. 1–10, 2020, doi: 10.1056/NEJMc2004973.Cheng.
- [2] M. Z. Bazant, O. Kodio, A. E. Cohen, K. Khan, Z. Gu, and J. W. M. Bush, "Monitoring carbon dioxide to quantify the risk of indoor airborne transmission of COVID-19," *Flow*, vol. 1, no. December 2019, pp. 1–18, 2021, doi: 10.1017/flo.2021.10.
- [3] E. C. Riley, G. Murphy, and R. L. Riley, "Airborne spread of measles in a suburban elementary school," *Am. J. Epidemiol.*, vol. 107, no. 5, pp. 421–432, May 1978, doi: 10.1093/oxfordjournals.aje.a112560.
- [4] M. J. Mendell *et al.*, "Association of classroom ventilation with reduced illness absence: a prospective study in California elementary schools," *Indoor Air*, vol. 23, no. 6, pp. 515–528, Dec. 2013, doi: 10.1111/ina.12042.
- [5] L.-J. S. Liu *et al.*, "Investigation of the Concentration of Bacteria and Their Cell Envelope Components in Indoor Air in Two Elementary Schools," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, vol. 50, no. 11, pp. 1957–1967, Nov. 2000, doi: 10.1080/10473289.2000.10464225.
- [6] A. Eykelbosh, "Indoor CO₂ sensors for COVID-19 risk mitigation: Current guidance and limitations," *Natl. Collab. Cent. Environmental Heal.*, pp. 1–13, 2021.
- [7] A. Di Gilio *et al.*, "CO₂ concentration monitoring inside educational buildings as a strategic tool to reduce the risk of Sars-CoV-2 airborne transmission," *Environ. Res.*, vol. 202, no. July, p. 111560, 2021, doi: 10.1016/j.envres.2021.111560.
- [8] C. V. M. Vouriot, H. C. Burridge, C. J. Noakes, and P. F. Linden, "Seasonal variation in airborne infection risk in schools due to changes in ventilation inferred from monitored carbon dioxide," *Indoor Air*, vol. 31, no. 4, pp. 1154–1163, 2021, doi: 10.1111/ina.12818.
- [9] F. Villanueva, A. Notario, B. Cabañas, P. Martín, S. Salgado, and M. F. Gabriel, "Assessment of CO₂ and aerosol (PM_{2.5}, PM₁₀, UFP) concentrations during the reopening of schools in the COVID-19 pandemic: The case of a metropolitan area in Central-Southern Spain," *Environ. Res.*, vol. 197, no. January, 2021, doi: 10.1016/j.envres.2021.111092.
- [10] A. Alonso, J. Llanos, R. Escandón, and J. J. Sendra, "Effects of the covid-19 pandemic on indoor air quality and thermal comfort of primary schools in winter in a mediterranean climate," *Sustain.*, vol. 13, no. 5, pp. 1–17, 2021, doi: 10.3390/su13052699.
- [11] D. Hou, A. Katal, and L. Wang, "Bayesian calibration of using CO₂ sensors to assess ventilation conditions and associated COVID-19 airborne aerosol transmission risk in schools," *medRxiv*, 2021, doi: 10.1101/2021.01.29.21250791.
- [12] Z. Pang, P. Hu, X. Lu, Q. Wang, and Z. O. Neill, "A Smart CO₂-Based Ventilation Control Framework to Minimize the Infection Risk of COVID-19 In Public Buildings J. Mike Walker '66 Department of Mechanical Engineering, Texas A & M University, College Mary Kay O' Connor Process Safety Center, Texas," vol. 2019, 2020.
- [13] Z. Peng and J. L. Jimenez, "Exhaled CO₂ as a COVID-19 infection risk proxy for different indoor

- environments and activities," *Environ. Sci. Technol. Lett.*, vol. 8, no. 5, pp. 392–397, 2021, doi: 10.1021/acs.estlett.1c00183.
- [14] M. R. Laurent and J. Frans, "Monitors to Improve Indoor Carbon Dioxide Concentrations in the Hospital: Background, Rationale and Protocol for a Randomized, Sham-controlled, Cross-Over, Open Label Trial," *medRxiv*, p. 2021.05.08.21256868, 2021, [Online]. Available: <http://medrxiv.org/content/early/2021/05/14/2021.05.08.21256868.abstract>.
- [15] N. Chen *et al.*, "Epidemiological and clinical characteristics of 99 cases of 2019 novel coronavirus pneumonia in Wuhan, China: a descriptive study," *Lancet*, vol. 395, no. 10223, pp. 507–513, 2020, doi: 10.1016/S0140-6736(20)30211-7.
- [16] J. A. Lednicky, M. Lauzardo, Z. H. Fan, and A. Jutla, "Since January 2020 Elsevier has created a COVID-19 resource centre with free information in English and Mandarin on the novel coronavirus COVID- 19 . The COVID-19 resource centre is hosted on Elsevier Connect , the company ' s public news and information ," no. January, 2020.
- [17] W. Wells, *Airborne Contagion and Air Hygiene: An Ecological Study of Droplet Infections*. Massachusetts, 1955.
- [18] G. Buonanno, L. Stabile, and L. Morawska, "Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment," *Environ. Int.*, vol. 141, p. 105794, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.105794.
- [19] M. Prentiss, A. Chu, and K. K. Berggren, "Superspreading Events Without Superspreaders: Using High Attack Rate Events to Estimate N ," *medRxiv*, p. 2020.10.21.20216895, 2020, [Online]. Available: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.10.21.20216895v1%0Ahttps://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.10.21.20216895v1.abstract>.
- [20] M. J. Evans, "A VOIDING COVID-19 : A EROSOL G UIDELINES," 2020.
- [21] K. Chopra, K. Gupta, and A. Lambora, "Future Internet: The Internet of Things-A Literature Review," in *2019 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COMITCon)*, Feb. 2019, pp. 135–139, doi: 10.1109/COMITCon.2019.8862269.
- [22] A. Molano, J. C. Monroy, C. Erazo, and S. Diaz, "WQMS: water quality monitoring station for IoT," *Int. J. Sens. Networks*, vol. 35, no. 2, p. 79, 2021, doi: 10.1504/IJSNET.2021.10036228.
- [23] H. Mokrani, R. Lounas, M. T. Bennai, D. E. Salhi, and R. Djerbi, "Air Quality Monitoring Using IoT: A Survey," in *2019 IEEE International Conference on Smart Internet of Things (SmartIoT)*, Aug. 2019, pp. 127–134, doi: 10.1109/SmartIoT.2019.00028.
- [24] R. Patel, V. K. Dabhi, and H. B. Prajapati, "A survey on IoT based road traffic surveillance and accident detection system (A smart way to handle traffic and concerned problems)," in *2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, Apr. 2017, pp. 1–7, doi: 10.1109/IPACT.2017.8245066.
- [25] Y. Li *et al.*, "Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment ? a multidisciplinary systematic review," *Indoor Air*, vol. 17, no. 1, pp. 2–18, Feb. 2007, doi: 10.1111/j.1600-0668.2006.00445.x.
- [26] C.-Y. Chen, P.-H. Chen, J.-K. Chen, and T.-C. Su, "Recommendations for ventilation of indoor spaces to reduce COVID-19 transmission," *J. Formos. Med. Assoc.*, vol. 120, no. 12, pp. 2055–2060, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.jfma.2021.08.007.

- [27] World Health Organization, "COVID-19 Weekly Epidemiological Update (Edition 72).," no. December, 2021, pp. 139–150.
- [28] M. C. Jarvis, "Aerosol Transmission of SARS-CoV-2: Physical Principles and Implications," *Front. Public Heal.*, vol. 8, Nov. 2020, doi: 10.3389/fpubh.2020.590041.
- [29] Service European Parliamentary Research, "Pollution and the spread of Covid-19," no. December, pp. 1–76, 2021, [Online]. Available: <http://www.europarl.europa.eu/thinktank>.
- [30] Guardino Solá Xavier, "Calidad del aire interior," *Enclíclopedia salud Y Segur. en el Trab.*, p. 33, 2011.
- [31] L. Carazo Fernández, R. Fernández Alvarez, F. J. González-Barcala, and J. A. Rodríguez Portal, "Indoor Air Contaminants and their Impact on Respiratory Pathologies," *Arch. Bronconeumol.*, vol. 49, no. 1, pp. 22–27, 2013, doi: 10.1016/j.arbr.2012.11.004.
- [32] P. Kumar, M. A. Kausar, A. B. Singh, and R. Singh, "Biological contaminants in the indoor air environment and their impacts on human health," *Air Qual. Atmos. Heal.*, vol. 14, no. 11, pp. 1723–1736, 2021, doi: 10.1007/s11869-021-00978-z.
- [33] A. M. Moldoveanu, "Biological Contamination of Air in Indoor Spaces," in *Current Air Quality Issues*, InTech, 2015.
- [34] R. Tellier, "Review of aerosol transmission of influenza A virus," *Emerg. Infect. Dis.*, vol. 12, no. 11, pp. 1657–1662, 2006, doi: 10.3201/eid1211.060426.
- [35] C. C. Wang *et al.*, "Airborne transmission of respiratory viruses," *Science (80-.)*, vol. 373, no. 6558, 2021, doi: 10.1126/science.abd9149.
- [36] Y. Drossinos, T. P. Weber, and N. I. Stilianakis, "Droplets and aerosols: An artificial dichotomy in respiratory virus transmission," *Heal. Sci. Reports*, vol. 4, no. 2, pp. 1–7, 2021, doi: 10.1002/hsr.2.275.
- [37] M. Jayaweera, H. Perera, B. Gunawardana, and J. Manatunge, "Transmission of COVID-19 virus by droplets and aerosols: A critical review on the unresolved dichotomy," *Environ. Res.*, vol. 188, no. June, p. 109819, 2020, doi: 10.1016/j.envres.2020.109819.
- [38] A. Božič and M. Kanduč, "Relative humidity in droplet and airborne transmission of disease," *J. Biol. Phys.*, vol. 47, no. 1, pp. 1–29, 2021, doi: 10.1007/s10867-020-09562-5.
- [39] M. Daza, D. Martinez, and P. Caro, "Contaminación microbiológica del aire al interior y el síndrome del edificio enfermo," *Biociencias*, vol. 10, no. 2, pp. 37–50, 2015, [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5460365.pdf>
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5460365>.
- [40] O. M. de la S. OMS, "Prevención y control de las infecciones respiratorias agudas con tendencia epidémica y pandémica durante la atención sanitaria," *Enfermedades Pandémicas Y Epidémicas*, vol. 1, pp. 1–156, 2016, [Online]. Available: <https://www.paho.org/hq/dmdocuments/2014/2014-cha-prevencion-control-atencion-sanitaria.pdf>.
- [41] M. A. Miller and K. R. Flaherty, "Respiratory system infections," *Schaechter's Mech. Microb. Dis. Fifth Ed.*, pp. 628–640, 2013.
- [42] S. Ludwig and A. Zarbock, "Coronaviruses and SARS-CoV-2: A Brief Overview," *Anesth. Analg.*, vol. 131, no. 1, pp. 93–96, 2020, doi: 10.1213/ANE.0000000000004845.
- [43] M. HASÖKSÜZ, S. KILIÇ, and F. SARAÇ, "Coronaviruses and SARS-COV-2," *TURKISH J. Med.*

- Sci.*, vol. 50, no. SI-1, pp. 549–556, Apr. 2020, doi: 10.3906/sag-2004-127.
- [44] V. S. Salian *et al.*, “COVID-19 Transmission, Current Treatment, and Future Therapeutic Strategies,” *Mol. Pharm.*, vol. 18, no. 3, pp. 754–771, 2021, doi: 10.1021/acs.molpharmaceut.0c00608.
- [45] Ministerio de Sanidad, “Información científico-técnica. Transmisión de SARS-CoV-2. Actualización,” pp. 1–16, 2021, [Online]. Available: https://www.msbs.gob.es/profesionales/saludPublica/ccayes/alertasActual/nCov/documentos/Documento_TRANSMISION.pdf.
- [46] J. O’keeffe and A. Eykelbosh, “Understanding transmission of SARS-CoV-2 in the ongoing COVID-19 pandemic. National Collaborating Centre for Environmental Health (NCCEH). Vancouver, BC,” no. December, pp. 1–46, 2021, [Online]. Available: <https://ncceh.ca/documents/evidence-review/understanding-transmission-sars-cov-2-ongoing-covid-19-pandemic>.
- [47] J. Dongarra *et al.*, “SoC (System on Chip),” in *Encyclopedia of Parallel Computing*, Boston, MA: Springer US, 2011, pp. 1837–1842.
- [48] Intel Corporation, “Chipset and System-on-a-Chip (SoC) Reference for Intel® NUC,” 000056236, 2022. <https://www.intel.com/content/www/us/en/support/articles/000056236/intel-nuc.html>.
- [49] H. Hayat *et al.*, “The State-of-the-Art of Sensors and Environmental Monitoring Technologies in Buildings,” *Sensors*, vol. 19, no. 17, p. 3648, Aug. 2019, doi: 10.3390/s19173648.
- [50] M. Struzik, I. Garbayo, R. Pfenninger, and J. L. M. Rupp, “A Simple and Fast Electrochemical CO₂ Sensor Based on Li₇La₃Zr₂O₁₂ for Environmental Monitoring,” *Adv. Mater.*, vol. 30, no. 44, p. 1804098, Nov. 2018, doi: 10.1002/adma.201804098.
- [51] N. Yamazoe, G. Sakai, and K. Shimanoe, “Oxide semiconductor gas sensors,” *Catal. Surv. from Asia*, vol. 7, no. 1, pp. 63–75, 2003, doi: 10.1023/A:1023436725457.
- [52] S. D. Lowther, K. C. Jones, X. Wang, J. D. Whyatt, O. Wild, and D. Booker, “Particulate Matter Measurement Indoors: A Review of Metrics, Sensors, Needs, and Applications,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 53, no. 20, pp. 11644–11656, Oct. 2019, doi: 10.1021/acs.est.9b03425.
- [53] X. Su, L. Sutarlie, and X. J. Loh, “Sensors and Analytical Technologies for Air Quality: Particulate Matters and Bioaerosols,” *Chem. – An Asian J.*, vol. 15, no. 24, pp. 4241–4255, Dec. 2020, doi: 10.1002/asia.202001051.
- [54] E. E. Cranmer, M. Papalexi, M. C. tom Dieck, and D. Bamford, “Internet of Things: Aspiration, implementation and contribution,” *J. Bus. Res.*, vol. 139, pp. 69–80, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.jbusres.2021.09.025.
- [55] M. H. Miraz, M. Ali, P. S. Excell, and R. Picking, “A review on Internet of Things (IoT), Internet of Everything (IoE) and Internet of Nano Things (IoNT),” in *2015 Internet Technologies and Applications (ITA)*, Sep. 2015, pp. 219–224, doi: 10.1109/ITeChA.2015.7317398.
- [56] B. Mishra and A. Kertesz, “The use of MQTT in M2M and IoT systems: A survey,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 201071–201086, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3035849.
- [57] HiveMQ, “MQTT & MQTT 5 Essentials,” pp. 1–72, 2020, [Online]. Available: <https://www.hivemq.com/mqtt-essentials/>.
- [58] D. Silva, L. I. Carvalho, J. Soares, and R. C. Sofia, “A Performance Analysis of Internet of Things

- Networking Protocols: Evaluating MQTT, CoAP, OPC UA,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 11, p. 4879, May 2021, doi: 10.3390/app11114879.
- [59] D. A. Jörg Heuer, Daniel Peintner, Sebastian Käbisch, Johannes Hund, “Web of Things Technologies for Embedded Applications,” 2014, [Online]. Available: <https://www.w3.org/2014/02/wot/papers/heuer.pdf>.
- [60] S. Hamdani and H. Sbeyti, “A Comparative study of COAP and MQTT communication protocols,” in *2019 7th International Symposium on Digital Forensics and Security (ISDFS)*, Jun. 2019, pp. 1–5, doi: 10.1109/ISDFS.2019.8757486.
- [61] E. Al-Masri *et al.*, “Investigating Messaging Protocols for the Internet of Things (IoT),” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 94880–94911, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2993363.
- [62] CloudAMQP, “AMQP,” *AMQP*. <https://www.cloudamqp.com/docs/amqp.html>.
- [63] F. Nack, “An overview on wireless sensor networks technology,” pp. 1–8, 2010.
- [64] Maitri Rashmikant Sakarvadia, “Network Topologies in Wireless Sensor Networks : A Review,” *An Int. Open Access*, vol. 10, no. May, pp. 1–6, 2022.
- [65] V. Van Yem, “ESP 32 Wroom Series Datasheet,” *Espr. Syst.*, vol. 2.9, p. 20, 2019, [Online]. Available: www.espressif.com.
- [66] S. ELECTRÓNICA, “ESP-32.” <https://www.sigmaelectronica.net/producto/esp-32/>.
- [67] DFRobot, “Gravity: Analog Infrared CO2 Sensor For Arduino (0~5000 ppm),” *DFRobot*, 2018, [Online]. Available: <https://www.dfrobot.com/product-1549.html>.
- [68] DFROBOT, “SEN0219 Gravity Infrared CO2 Sensor For Arduino.” https://wiki.dfrobot.com/Gravity__Infrared_CO2_Sensor_For_Arduino_SKU__SEN0219.
- [69] W. Z. Yong and V. Z. Haoxin, “Digital universal partical concentration sensor PMSA003I series data manual,” 2018.
- [70] Digi-Key, “Adafruit Industries LLC 4632.” <https://www.digikey.com.mx/es/products/detail/adafruit-industries-llc/4632/12715744>.
- [71] R. Current *et al.*, “High-or Low-Side Measurement , Bi-Directional CURRENT / POWER MONITOR with I 2 C™ Interface,” no. June, 2011.
- [72] C. 101, “INA219 Based Current Sensor Module.” <https://components101.com/modules/1na219-current-sensor-module>.
- [73] “Batería de polímero de litio de alta capacidad, 3,7 v 5000mah 105080.” <https://spanish.alibaba.com/product-detail/High-capacity-Lithium-Polymer-Battery-3-1600444655033.html>.
- [74] R. G. Australia, “5V 1.2A Pololu Step-Up Voltage Regulator U1V11F5.” <https://www.robotgear.com.au/Product.aspx/Details/992-5V-1-2A-Pololu-Step-Up-Voltage-Regulator-U1V11F5>.
- [75] NanJing Top Power ASIC Corp., “TP4056 1A Standalone Linear Li-Ion Battery Charger with Thermal Regulation in SOP-8,” *Datasheet TP4056*, pp. 1–3, 2019, [Online]. Available: <https://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Prototyping/TP4056.pdf>.
- [76] Eymelectronica, “TP4056 1A MODULO CARGADOR DE BATERIAS DE LITHIO.” <https://www.ymelectronica.com/inicio/302-tp4056-1a-modulo-cargador-de-baterias-de-lithio.html>.
- [77] Handson Technology, “I2C Serial Interface 20x4 LCD Module,” *Handson Technol.*, 2021.
- [78] Gravitech, “20x4 White on Blue Character LCD with Backlight.”

- <https://www.gravitech.us/20chblcd.html>.
- [79] MACTRONICA, "MODULO INDICADOR DE CARGA BATERIA DE LITIO LIPO."
<https://www.mactronica.com.co/modulo-indicador-de-carga-bateria-de-litio-lipo>.