

**Diseño y prototipado de un sistema de bajo costo basado en ESP32  
para el monitoreo en tiempo real de CO<sub>2</sub> y ruido en un aula de gamificación  
de un colegio en Mosquera**

Diego Alexander Fonseca

Asesor

Mauricio Alberto García Martínez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuelas de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería - ECBTI

Ingeniería Electrónica

2025

### **Dedicatoria**

A Dios, por darme la fuerza, la salud y la perseverancia para seguir adelante

incluso cuando el camino parecía incierto.

A mi mamá, por ser ejemplo de esfuerzo y constancia;

esta meta, alcanzada después de muchos años, también es tuya.

Y a mi esposa, por su apoyo incondicional, por creer en mí en cada paso

y por caminar a mi lado con amor y paciencia.

### **Agradecimientos**

Agradezco a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), por brindarme la oportunidad de formarme como ingeniero y desarrollar este proyecto con sentido social y técnico. A mi director de proyecto, por su guía, paciencia y conocimientos compartidos a lo largo del proceso. Extiendo mi gratitud a la institución educativa donde se realizaron las pruebas del prototipo, y especialmente a su rectora y al equipo docente, por su apoyo, apertura y disposición para colaborar en el desarrollo de este trabajo.

Gracias a todos los que creyeron en mí, directa o indirectamente.

## Resumen

Este proyecto presenta el diseño y prototipado de un sistema de bajo costo basado en el microcontrolador ESP32 para el monitoreo en tiempo real de los niveles de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y ruido en un aula escolar en Mosquera, Colombia. El sistema utiliza los sensores SCD41 y INMP441, comunicación mediante Wi-Fi, visualización local en una pantalla OLED y visualización en la nube a través de la plataforma ThingSpeak. También incorpora un mecanismo de notificación automática mediante WhatsApp utilizando la API de CallMeBot.

Las pruebas de campo se realizaron en condiciones reales durante 7 jornadas escolares. Los resultados mostraron que los niveles de CO<sub>2</sub> alcanzaron valores superiores a 1500 ppm en sesiones con alta ocupación y poca ventilación. También se registraron niveles de ruido superiores a los 50 dB, alcanzando en algunos casos más de 100 dB. La dosimetría sonora y la visualización en la nube permitieron interpretar el comportamiento ambiental del aula y facilitar la toma de decisiones por parte del docente investigador. El sistema cumple su objetivo con precisión, ofreciendo una herramienta accesible, replicable, con un costo de fabricación de aproximadamente \$128.385 COP, y enmarcada en la línea de investigación en automatización y herramientas lógicas.

***Palabras clave:*** ESP32, CO<sub>2</sub>, Ruido, Aula, ThingSpeak

## **Abstract**

This project presents the design and prototyping of a low-cost system based on the ESP32 microcontroller for real-time monitoring of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and noise levels in a school classroom in Mosquera, Colombia. The system uses the SCD41 and INMP441 sensors, Wi-Fi communication, local visualization via an OLED screen, and cloud visualization through the ThingSpeak platform. It also incorporates an automatic notification mechanism via WhatsApp using the CallMeBot API.

Field tests were carried out under real conditions over seven school days. The results showed that CO<sub>2</sub> levels exceeded 1500 ppm during sessions with high occupancy and poor ventilation. Noise levels above 50 dB were also recorded, in some cases exceeding 100 dB. The integrated sound dosimetry and cloud-based data visualization enabled the interpretation of classroom environmental behavior and supported decision-making by the teacher-researcher. The system successfully achieves its objective, providing an accessible and replicable tool with an approximate production cost of \$128.385 COP, and framed within the research line in automation and logical tools.

***Keywords:*** ESP32, CO<sub>2</sub>, Noise, Classroom, ThingSpeak

## Tabla de Contenido

Introducción .....	14
Planteamiento del Problema .....	16
Justificación .....	22
Objetivos .....	25
Objetivo General .....	25
Objetivos Específicos.....	25
Alcances .....	26
Limitaciones .....	27
Marco Teórico.....	29
Estado del Arte .....	29
IoT based Air Quality Index Monitoring using ESP32 .....	29
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 .....	30
Sistema de Ventilación y Purificación del Aire para Optimizar el Confort Ambiental de los Estudiantes en las Aulas de Clase de los Colegios Urbanos de Bogotá .....	31
A Real-Time Noise Monitoring System Based on Internet of Things for Enhanced Acoustic Comfort and Occupational Health.....	33
Sistema de Monitoreo de la Intensidad de Ruido en Zonas de Hospitalización por Medio del Internet de las Cosas .....	34
Sistema IoT para la Monitorización y Análisis de Niveles de Ruido .....	36
Bases Teóricas .....	38

Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ).....	38
Ruido .....	42
Marco Conceptual .....	46
Normatividad .....	67
Normatividad sobre CO <sub>2</sub> .....	67
Normatividad sobre Ruido.....	70
Metodología .....	73
Características de la Metodología .....	73
Desarrollo de la Metodología .....	74
Fase 1: Investigación y Análisis de Tecnologías Existentes .....	74
Fase 2: Desarrollo del Prototipo del Sistema de Monitoreo.....	74
Fase 3: Integración con la Plataforma en la Nube .....	74
Fase 4: Desarrollo y Prueba de Notificaciones Automáticas .....	74
Fase 5: Pruebas de Campo .....	75
Desarrollo del Proyecto .....	76
Fase 1: Investigación y Análisis de Tecnologías Existentes.....	76
Comparación de Sensores de CO <sub>2</sub> y Ruido .....	76
Selección de Tarjeta de Desarrollo .....	82
Selección de Plataformas IoT .....	84
Selección de Servicios de Notificación .....	85
Selección de Pantalla de Visualización de Datos .....	86

Fase 2: Desarrollo del Prototipo del Sistema de Monitoreo .....	88
Diseño del Circuito .....	88
Soldadura y Montaje del Sistema .....	89
Programación y Calibración de Sensores .....	94
Fase 3: Integración con la Plataforma en la Nube .....	107
Configuración de ThingSpeak .....	107
Programación del Dispositivo para la Transmisión de Datos.....	108
Validación y Visualización de Datos .....	108
Fase 4: Desarrollo y Prueba de Notificaciones Automáticas .....	110
Fase 5: Pruebas de Campo .....	113
Ubicación y Condiciones de Instalación.....	113
Conectividad del Prototipo.....	115
Protocolo de Pruebas .....	116
Visualización de Datos y Ajustes Funcionales .....	116
Resultados .....	117
Datos de CO <sub>2</sub> y Niveles de Ruido .....	117
Conectividad.....	120
Visualización de Datos en la Nube.....	121
Notificaciones Automáticas .....	121
Costo de Fabricación del Prototipo .....	122
Especificaciones Técnicas del Prototipo .....	125

Discusión.....	127
Conclusiones.....	130
Referencias Bibliográficas .....	132

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Límites de Exposición Ocupacional al Ruido</i> .....	71
<b>Tabla 2</b> <i>Comparativa de Tipos de Sensores CO<sub>2</sub></i> .....	77
<b>Tabla 3</b> <i>Comparativa de Sensores CO<sub>2</sub> Comerciales</i> .....	78
<b>Tabla 4</b> <i>Comparativa de Tipos de Sensores de Sonido</i> .....	80
<b>Tabla 5</b> <i>Comparativa de Sensores de Sonido Comerciales</i> .....	81
<b>Tabla 6</b> <i>Comparativa de Placas de Desarrollo ESP32</i> .....	83
<b>Tabla 7</b> <i>Comparativa de Plataformas IoT</i> .....	85
<b>Tabla 8</b> <i>Comparativa de Servicios de Notificación</i> .....	86
<b>Tabla 9</b> <i>Comparativa de Pantallas de Visualización</i> .....	87
<b>Tabla 10</b> <i>Mediciones de Sonido del Prototipo y iPhone 12</i> .....	104
<b>Tabla 11</b> <i>Costo de Materiales usados en el Prototipo</i> .....	123
<b>Tabla 12</b> <i>Costo Total del Proyecto</i> .....	124

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Diagrama de un Sensor NDIR</i> .....	53
<b>Figura 2</b> <i>Diagrama de un Sensor de Sonido MEMS</i> .....	60
<b>Figura 3</b> <i>Capas de un Sistema IoT</i> .....	61
<b>Figura 4</b> <i>Diagrama de Bloques de ESP32</i> .....	63
<b>Figura 5</b> <i>Diagrama de un Panel OLED</i> .....	65
<b>Figura 6</b> <i>Sensor de CO<sub>2</sub>: SCD41</i> .....	79
<b>Figura 7</b> <i>Sensor de Sonido: INMP441</i> .....	81
<b>Figura 8</b> <i>Tarjeta de Desarrollo: ESP32 - DevKitC</i> .....	83
<b>Figura 9</b> <i>Pantalla OLED 128X32</i> .....	87
<b>Figura 10</b> <i>Diseño Esquemático del Sistema de Monitoreo en Proteus</i> .....	88
<b>Figura 11</b> <i>Pruebas Preliminares en Protoboard</i> .....	90
<b>Figura 12</b> <i>Soldadura de Placa de Desarrollo</i> .....	91
<b>Figura 13</b> <i>Diseño de Estructura en Tinkercad</i> .....	92
<b>Figura 14</b> <i>Estructura Impresa en 3D</i> .....	92
<b>Figura 15</b> <i>Montaje del Sistema en la Caja Impresa</i> .....	93
<b>Figura 16</b> <i>Montaje Completo del Sistema en la Caja Impresa</i> .....	93
<b>Figura 17</b> <i>Relación entre dB SPL y dBFS en un Micrófono MEMS</i> .....	97
<b>Figura 18</b> <i>Programación del Prototipo en Arduino IDE</i> .....	99
<b>Figura 19</b> <i>Configuración de Red por medio de WiFiManager</i> .....	100
<b>Figura 20</b> <i>Prototipo mostrando Mediciones en Pantalla</i> .....	100
<b>Figura 21</b> <i>Aplicación NIOSH Sound Level Meter en iPhone 12</i> .....	102
<b>Figura 22</b> <i>Ubicación de Equipos para Calibración de Sensor de Sonido</i> .....	103

<b>Figura 23</b> <i>Registro de Mediciones de Sonido en el Prototipo y un iPhone 12</i> .....	103
<b>Figura 24</b> <i>Gráfico de Dispersión de Mediciones del Prototipo vs iPhone12</i> .....	105
<b>Figura 25</b> <i>Configuración de Canal en ThingSpeak</i> .....	107
<b>Figura 26</b> <i>Configuración de Campos de Datos ThingSpeak</i> .....	109
<b>Figura 27</b> <i>Visualización de Datos de Sensores en ThingSpeak</i> .....	110
<b>Figura 28</b> <i>Activación de Servicios de CallMeBot en WhatsApp</i> .....	112
<b>Figura 29</b> <i>Notificaciones de CallMeBot en WhatsApp para Niveles de Ruido y CO<sub>2</sub></i> ...	112
<b>Figura 30</b> <i>Ubicación del Prototipo dentro de la Zona B del Aula de Gamificación</i> .....	113
<b>Figura 31</b> <i>Zona A del Aula de Gamificación</i> .....	114
<b>Figura 32</b> <i>Zona B del Aula de Gamificación</i> .....	114
<b>Figura 33</b> <i>Parte Exterior del Aula de Gamificación</i> .....	115
<b>Figura 34</b> <i>Visualización de Datos en ThingSpeak - Prueba de Campo - Día 1</i> .....	117
<b>Figura 35</b> <i>Visualización de Datos en ThingSpeak - Prueba de Campo - Día 2</i> .....	117
<b>Figura 36</b> <i>Visualización de Datos en ThingSpeak - Prueba de Campo - Día 3</i> .....	118
<b>Figura 37</b> <i>Visualización de Datos en ThingSpeak - Prueba de Campo - Día 4</i> .....	118
<b>Figura 38</b> <i>Visualización de Datos en ThingSpeak - Prueba de Campo - Día 5</i> .....	119
<b>Figura 39</b> <i>Visualización de Datos en ThingSpeak - Prueba de Campo - Día 6</i> .....	120
<b>Figura 40</b> <i>Visualización de Datos en ThingSpeak - Prueba de Campo - Día 7</i> .....	120
<b>Figura 41</b> <i>Notificaciones de CallMeBot en WhatsApp - Prueba de Campo</i> .....	122
<b>Figura 42</b> <i>Prototipo Final</i> .....	126

## Lista de Apéndices

<b>Apéndice A</b> <i>Código Fuente en GitHub del Sistema de Monitoreo</i> .....	142
---	-----

## Introducción

La calidad del ambiente interior en las instituciones educativas es un factor importante para el bienestar físico y mental de estudiantes y docentes. La concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y los niveles de ruido influyen directamente en el rendimiento académico y la salud. Según Fernández-Agüera et al (2019) los niveles elevados de CO<sub>2</sub> pueden provocar somnolencia, disminución del rendimiento cognitivo, irritación de ojos, nariz y garganta, fatiga, dolor de cabeza, náuseas y mareos. Por su parte, Passchier-Vermeer & Passchier (2000) muestra que la exposición prolongada al ruido puede causar pérdida auditiva, estrés, alteraciones del sueño y enfermedades cardiovasculares. Estos efectos pueden aumentar en las escuelas y colegios, sobre todo en las que tienen una alta ocupación de estudiantes por aula, y no poseen ventilación mecánica.

El interés por desarrollar este proyecto de investigación nace de la experiencia del autor como docente en un aula de gamificación, donde se identificaron síntomas asociados a la mala calidad del aire y la contaminación acústica. También se observó la falta de sistemas que permitan monitorear estos factores en tiempo real. Las razones anteriores motivaron la creación de una solución tecnológica de bajo costo que brindara información al docente sobre el nivel de CO<sub>2</sub> y ruido en el aula, de tal manera que se puedan tomar medidas preventivas.

La estrategia empleada estuvo desplegada en 5 fases, donde se realizó la selección de tecnologías existentes, el diseño de un prototipo IoT utilizando el microcontrolador ESP32, el almacenamiento y visualización de datos en la nube, la incorporación de notificaciones automáticas, y la validación del prototipo mediante pruebas de campo, con observación directa de las variables dentro del aula.

Este proyecto tiene como objetivo prototipar un sistema de bajo costo para el monitoreo en tiempo real de CO<sub>2</sub> y ruido en un aula escolar en Mosquera, Colombia, y se enmarca en la línea de investigación Automatización y Herramientas Lógicas.

Este proyecto aprovecha la tecnología ESP32, que es de bajo costo y fácil de implementar, permitiendo que sea accesible para instituciones educativas con recursos limitados en Colombia. También se relaciona con las normativas nacionales e internacionales que buscan mejorar la calidad del ambiente en espacios interiores, contribuyendo con la creación de entornos educativos más saludables y favorables para el aprendizaje de los estudiantes.

## Planteamiento del Problema

Las condiciones ambientales de un aula, como la temperatura, iluminación, ventilación y ruido, influyen en el aprendizaje de los estudiantes. De acuerdo con Brink et al. (2021), la creación de un ambiente de aprendizaje adecuado necesita de recursos pedagógicos adecuados, y también de condiciones ambientales que favorezcan la concentración, el confort y la salud de los ocupantes del aula.

Según American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2022), a nivel global se observa un aumento en las concentraciones de CO<sub>2</sub>, creando dificultades para mantener niveles saludables en espacios interiores. Muchos países del mundo han establecido valores límite para las concentraciones de CO<sub>2</sub> en interiores, generalmente alrededor de 1000 ppm, para abordar las preocupaciones generales sobre la calidad del aire interior y los síntomas del síndrome del edificio enfermo.

De acuerdo a Envira (2023), para las aulas de enseñanza en España se exige 500 ppm sobre la concentración de CO<sub>2</sub> del exterior, y en el caso de las guarderías se exige un valor límite de 350 ppm. El Consejo General de la Ingeniería Técnica Industrial de España (COGITI) muestra la importancia de medir la concentración de CO<sub>2</sub> en las aulas, especialmente en el contexto de la pandemia de COVID-19, para determinar cuándo la renovación del aire ha sido efectiva. Un estudio de la Universidad de Sevilla sobre la calidad del aire en las escuelas andaluzas de Fernández-Agüera y colaboradores (2019), mostró que solo el 17% de los casos estudiados cumplían con las concentraciones de CO<sub>2</sub> recomendadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

En Colombia, se reconoce la importancia de la calidad del aire interior (CAI) y su impacto en la salud de las personas. Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible,

Colombia (2021) “Se estima que las personas pasan alrededor del 90% de su tiempo en espacios interiores, donde el aire puede estar hasta cinco veces más contaminado que el aire exterior” (p.7). Por su parte, Beltrán (2019) destaca que el 87% de la población colombiana vive en lugares donde la calidad del aire es perjudicial para la salud. En su investigación afirma que, en 2015, 15.749 personas murieron por causas relacionadas con la contaminación del aire, principalmente por material particulado, también menciona un informe de la Secretaría de Ambiente de Bogotá, que relaciona la mala calidad del aire con el ausentismo escolar y el aumento de síntomas respiratorios.

La calidad del aire, especialmente en ambientes interiores, tiene un impacto directo en la salud y el aprendizaje. Los altos niveles de CO<sub>2</sub>, como indicador de una mala ventilación, pueden generar diversas problemáticas.

En cuanto a la salud, Health Canada (2021) revela que la exposición a niveles elevados de CO<sub>2</sub> se asocia con un aumento en la probabilidad de experimentar síntomas respiratorios como irritación de ojos y garganta, congestión nasal, estornudos y tos. Altos niveles de CO<sub>2</sub> también se vinculan con dolores de cabeza, cansancio, fatiga y mareos. Se menciona que a niveles extremadamente altos de CO<sub>2</sub> (7,000-45,000 ppm), pueden ocurrir efectos cardiovasculares como reducción de la capacidad de difusión de CO, disminución del gasto cardíaco y aumento de la ventilación.

En relación al aprendizaje, Twardella et al. (2012) demuestran que la exposición a altos niveles de CO<sub>2</sub> afecta negativamente el rendimiento en tareas cognitivas como la toma de decisiones, la resolución de problemas y el desempeño en pruebas estandarizadas. La falta de una adecuada ventilación y la consecuente acumulación de CO<sub>2</sub> contribuyen a la falta de concentración y a la disminución de la atención en el aula.

Guo et al. (2023) mencionan la relación entre la concentración de CO<sub>2</sub> en las aulas y la asistencia escolar. Es posible que la mala calidad del aire, reflejada en altos niveles de CO<sub>2</sub>, contribuya al ausentismo escolar por problemas de salud o bajo rendimiento.

Finalmente, el estudio de Satish et al. (2012) concluye que el CO<sub>2</sub> debe ser considerado un contaminante del aire interior y que las concentraciones elevadas en ambientes cerrados, como escuelas y oficinas, pueden tener un impacto negativo en la toma de decisiones, el aprendizaje y la productividad.

Es importante recordar que el CO<sub>2</sub> es un indicador de la calidad del aire interior. La presencia de altos niveles de CO<sub>2</sub> sugiere una ventilación deficiente, que puede propiciar la acumulación de otros contaminantes que también afectan la salud y el aprendizaje. La mala calidad del aire en las escuelas puede ser particularmente problemática debido a la alta densidad de ocupación, lo que demuestra la necesidad de una ventilación adecuada para garantizar un ambiente saludable y propicio para el aprendizaje.

Si analizamos los efectos del ruido en la salud, podemos apreciar distintos trastornos y enfermedades que pueden darse en entornos laborales como educativos.

Según la OMS (2004), el ruido, tanto ocupacional como ambiental, es un problema de salud pública global. Altos niveles de ruido en el lugar de trabajo son un problema persistente en todas las regiones del mundo, afectando a millones de trabajadores y provocando una carga importante de enfermedad, principalmente en forma de pérdida auditiva inducida por el ruido (PAIR).

De acuerdo con las orientaciones de la OMS (2022), el ruido ambiental, proveniente principalmente del tráfico, la industria y las actividades de ocio, también representa una amenaza para la salud pública, especialmente en las regiones más urbanizadas. La exposición al ruido

ambiental se asocia a diversos efectos en la salud, como molestias, aumento del riesgo de enfermedades cardiovasculares, trastornos del sueño, pérdida auditiva, tinnitus y deterioro cognitivo.

En Iberoamérica, al igual que en muchas regiones del mundo, la falta de conciencia y compromiso político para abordar la contaminación acústica sigue siendo un obstáculo importante. La urbanización rápida y la falta de planificación urbana adecuada contribuyen a la proliferación de fuentes de ruido, especialmente el tráfico vehicular, que impacta negativamente la calidad de vida en las ciudades. Un estudio realizado por Figueroa et al. (2012) en escuelas primarias de Guadalajara, México, encontró que los estudiantes expuestos a altos niveles de ruido del tráfico mostraron un menor rendimiento académico, mostrando la importancia de considerar el ruido como un factor ambiental clave en el entorno educativo.

En Colombia, según la Resolución 8321 del 4 de agosto de 1983 del Ministerio de Salud, la exposición prolongada a ruidos fuertes puede causar daño irreversible a las células ciliadas del oído interno, lo que lleva a la pérdida de audición. El Ministerio de Salud y Protección Social (2024) afirma en un artículo que el ruido excesivo puede contribuir al estrés, la ansiedad, la depresión y los cambios de comportamiento, incluso a la agresividad.

Según Passchier-Vermeer y Passchier (2000) y enHealth. (2018), el ruido puede provocar problemas cardiovasculares, como el aumento en la presión arterial y la frecuencia cardíaca. También puede interrumpir el sueño, provocar insomnio, y puede estar relacionado con problemas gastrointestinales.

Figueroa et al. (2012) mencionan que el ruido puede dificultar la concentración y la atención, especialmente en tareas que requieren un alto nivel de procesamiento cognitivo. El ruido puede dificultar la comprensión del habla, lo que puede ser especialmente problemático en

entornos educativos. A su vez, la exposición al ruido puede aumentar el estrés y la fatiga en los estudiantes, lo que puede afectar negativamente su capacidad de aprendizaje.

En la sala de gamificación de una institución educativa ubicada la zona centro del municipio de Mosquera, Cundinamarca, los estudiantes y docente encargado están expuestos a altos niveles de CO<sub>2</sub> y ruido, además no cuentan con un sistema efectivo para monitorear estas variables. La institución educativa cuenta con una población estudiantil de aproximadamente 1200 alumnos, de los cuales 900 ingresan semanalmente al aula especializada de gamificación, en sesiones de 45 minutos por curso. Este lugar representa un enfoque innovador para el aprendizaje, transformando el espacio tradicional en un ambiente lúdico que busca aumentar la motivación y la participación de los estudiantes, mediante el uso de elementos como videojuegos y realidad virtual.

A pesar de que existen estrategias pedagógicas para reducir el ruido en un aula de clase normal, como establecer normas de comportamiento o utilizar materiales que absorban el sonido, la gamificación presenta una dificultad particular en este aspecto. Esto se debe a que la gamificación, por su propia naturaleza, suele implicar una mayor interacción entre los estudiantes, trabajo en equipo, y el uso de elementos lúdicos que pueden generar un aumento en los niveles de ruido. Si bien el entusiasmo y la participación activa que crea la gamificación son deseables para el aprendizaje, la gestión del ruido se vuelve necesaria para evitar que este se convierta en un factor distractor y afecte negativamente la concentración y la comprensión de los contenidos.

A este problema se suma la necesidad de garantizar una buena calidad del aire en el aula. La ventilación natural, a través de puertas y ventanas, puede ser insuficiente para mantener niveles adecuados de CO<sub>2</sub>, especialmente en momentos donde se requiere cerrar o entrecerrar las

mismas para proteger a los estudiantes y los equipos. Esta situación se agrava al no contar con sistemas de ventilación mecánica, como ventiladores, dependiendo únicamente de la ventilación natural a través de puertas y ventanas.

La falta de información precisa sobre los niveles de CO<sub>2</sub> y ruido en el aula genera incertidumbre sobre la calidad del ambiente al que están expuestos los estudiantes y el propio docente. Esta falta de datos dificulta la toma de decisiones informadas para garantizar un entorno de aprendizaje óptimo.

El investigador, como docente del aula de gamificación, ha manifestado de manera ocasional dolor de cabeza, fatiga, somnolencia y problemas gripales, también ha experimentado problemas para concentrarse y mantener la atención.

El docente ocasionalmente tiene situaciones no reportadas de zumbidos en los oídos, estrés, ansiedad, dolor en el pecho y alteraciones del sueño. Aunque la sintomatología puede no estar correlacionada con la labor del docente, el ambiente de trabajo puede contribuir o agudizarla, siguiendo los lineamientos de la OMS y El Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia. Aunque muchos estudiantes de la institución no observan dificultades en su estado de atención y nivel de control en la toma de decisiones, algunos manifiestan de manera verbal su molestia por el ruido.

La pregunta que motiva esta propuesta es: ¿Qué tan eficaz es un sistema de bajo costo, basado en ESP32, para monitorear y notificar en tiempo real los niveles de CO<sub>2</sub> y ruido, en un aula de gamificación en Mosquera?

## **Justificación**

El presente proyecto se basa en la necesidad de verificar los niveles del ruido y la calidad del aire en el entorno educativo. Diversos estudios han mostrado que la exposición a altos niveles de ruido puede generar pérdida de audición, estrés, problemas cardiovasculares y de salud mental, mientras que el aumento de los niveles de CO<sub>2</sub> afecta la concentración, el rendimiento cognitivo y la capacidad de aprendizaje.

Este proyecto busca aportar datos cuantitativos y en tiempo real sobre estas variables, contribuyendo al cuerpo de conocimiento que une las condiciones ambientales con los resultados académicos y la salud. Se busca integrar conceptos de ingeniería electrónica y control ambiental para ofrecer soluciones prácticas en la administración de entornos escolares. Cuando se monitorean y analizan datos ambientales se pueden validar teorías sobre cómo el ambiente influye en el aprendizaje y la salud, generando un marco teórico que puede ser aplicado a otras instituciones educativas.

Este proyecto ofrece una solución al monitoreo ambiental en tiempo real mediante un sistema de bajo costo. Al desarrollar un prototipo funcional, se busca identificar problemas potenciales y generar alertas que permitan implementar acciones correctivas inmediatas, asegurando un ambiente adecuado para el aprendizaje. La facilidad de implementación y la escalabilidad del sistema permiten replicarlo en otras instituciones educativas con características similares, y en sectores como la industria, el transporte y el comercio. Lo anterior demuestra la utilidad del proyecto, brindando herramientas accesibles para la gestión ambiental en varios contextos.

El proyecto tiene un impacto significativo en la comunidad educativa de Mosquera, ya que sensibiliza a la comunidad sobre la importancia de la calidad del aire y el control del ruido, creando una cultura de cuidado ambiental dentro y fuera del aula.

El proyecto propone una solución económica y sostenible, ideal para instituciones con recursos limitados. Al basarse en tecnologías de bajo costo como el ESP32 y sensores accesibles, se minimizan los gastos asociados a la implementación y mantenimiento del sistema. Al prevenir problemas de salud relacionados con el ruido y el CO<sub>2</sub>, es posible reducir los niveles de ausentismo escolar. De esta forma, la inversión inicial en el sistema se justifica por los beneficios económicos y de salud a largo plazo.

Desde el punto de vista legal, el proyecto toma como referencia normativas nacionales e internacionales que regulan la calidad del ambiente laboral y escolar, como la Resolución 8321 de 1983, la Resolución 2400 de 1979, y las normas NTC 4595 y NTC 4596 en Colombia, las cuales establecen límites permisibles de exposición al ruido y muestran la importancia de una ventilación adecuada. Aunque el sistema desarrollado no pretende sustituir equipos profesionales certificados para la medición ambiental, sí ofrece una herramienta de monitoreo preventivo, orientada a sensibilizar y apoyar la toma de decisiones en tiempo real dentro de las instituciones educativas. Su implementación puede contribuir a que las instituciones evidencien su compromiso con la salud y el bienestar de estudiantes y docentes, al mismo tiempo que promueven entornos más seguros, disminuyendo el riesgo de incurrir en incumplimientos normativos.

Este proyecto contribuye al campo de la investigación aplicada en ingeniería electrónica, al desarrollar un sistema innovador que combina monitoreo ambiental y análisis de datos en tiempo real, proporcionando un marco experimental para futuras investigaciones sobre el

impacto del ambiente en la educación y la salud, y abriendo nuevas líneas de estudio en el sector escolar y tecnológico. El sistema desarrollado puede servir como base para estudios comparativos entre diferentes instituciones, evaluando cómo las condiciones ambientales varían y qué estrategias son más efectivas para su gestión. Esto aporta valor al campo investigativo y a la mejora continua de las prácticas educativas.

Desde el punto de vista tecnológico, el proyecto aprovecha las capacidades específicas del microcontrolador ESP32, como conectividad inalámbrica, eficiencia energética y versatilidad para integrar múltiples sensores, fomentando la adopción de soluciones innovadoras en el sector educativo, mejorando el entorno de aprendizaje, y mostrando el potencial de las tecnologías emergentes en la transformación educativa.

El proyecto puede proporcionar de manera indirecta un ambiente más saludable y menos distractor, potenciando su rendimiento académico y su bienestar general. Además de mejorar las condiciones ambientales, también sirve como herramienta pedagógica para enseñar a los estudiantes sobre la importancia de la ciencia y la tecnología en la solución de problemas reales.

## Objetivos

### Objetivo General

Prototipar un sistema de bajo costo basado en ESP32 para el monitoreo en tiempo real de los niveles de ruido y CO<sub>2</sub> en un aula de gamificación de un colegio en Mosquera, notificando a los docentes sobre el estado de estas variables.

### Objetivos Específicos

Analizar las tecnologías disponibles para la medición de CO<sub>2</sub> y ruido, así como las plataformas IoT y servicios de notificación, identificando las opciones más adecuadas para el desarrollo del sistema.

Construir un prototipo funcional de un sistema de monitoreo de CO<sub>2</sub> y ruido, utilizando un microcontrolador con conectividad inalámbrica.

Implementar un mecanismo para la visualización y análisis en tiempo real de los datos recopilados, mediante una plataforma en la nube.

Integrar un sistema de alertas automáticas mediante un servicio de mensajería, que notifique a los docentes cuando se superen los límites preestablecidos de CO<sub>2</sub> o ruido.

Evaluar el desempeño preliminar del prototipo en condiciones reales de aula, a partir de los datos recopilados durante pruebas de campo.

## Alcances

El presente proyecto busca diseñar un prototipo de bajo costo basado en ESP32 para el monitoreo en tiempo real de los niveles de ruido y CO<sub>2</sub> en un aula de gamificación de un colegio en Mosquera. Los principales alcances del proyecto son:

**Monitoreo en tiempo real:** El sistema permite la recolección continua de datos sobre los niveles de ruido y CO<sub>2</sub>, ofreciendo información actualizada sobre la calidad del aire y el ambiente sonoro del aula.

**Visualización de datos:** Los valores medidos se mostrarán en una pantalla OLED, permitiendo al docente tener una referencia visual inmediata del estado ambiental del aula

**Alertas inmediatas:** El sistema está diseñado para generar alertas a los docentes a través de un servicio de mensajería cuando los niveles de ruido o CO<sub>2</sub> superen los límites establecidos, facilitando la toma de decisiones en tiempo real.

**Identificación de problemas:** Las pruebas preliminares pueden revelar patrones y tendencias en la calidad del aire y los niveles de ruido dentro del aula. Con el sistema es posible identificar una ventilación deficiente y fuentes de ruido no deseadas.

**Toma de decisiones informada:** El prototipo tiene la posibilidad de proporcionar información en tiempo real para que los docentes puedan tomar decisiones sobre la ventilación del aula y el control del ruido.

**Bajo costo:** El uso de ESP32 y otros componentes de bajo costo hace que el sistema sea accesible, lo que facilitaría una posible implementación en la institución educativa.

## Limitaciones

Este proyecto aborda problemáticas importantes en el ambiente educativo, pero presenta ciertas limitaciones relacionadas con su diseño y alcance:

**Lugar:** El sistema solo monitorea un aula específica, el aula de gamificación. Para una visión completa de la calidad del aire y ruido en la institución, se requeriría un sistema más amplio que abarque otras áreas.

**Tiempo de pruebas limitado:** El prototipo será evaluado durante un periodo de dos semanas en un aula de gamificación. No se realizarán pruebas prolongadas para verificar su funcionamiento a largo plazo.

**Fiabilidad de los sensores:** La precisión y fiabilidad de los sensores de bajo costo pueden ser inferiores a las de equipos profesionales. Es importante calibrar y verificar los sensores regularmente para garantizar mediciones precisas.

**Conectividad:** El sistema depende de la conexión a internet por Wi-Fi en la banda 2.4GHz para actualizar el reloj interno, recopilar datos y enviar notificaciones. En caso de interrupciones en la red, los datos y las alertas podrían no ser enviadas oportunamente.

**Alimentación:** El dispositivo deberá energizarse con una fuente externa DC; no posee baterías internas. Ante cualquier fallo de energía de la institución educativa, el sistema dejará de funcionar.

**Factores externos:** El sistema no puede controlar directamente las fuentes externas de ruido y contaminación del aire, como el tráfico vehicular o las actividades industriales.

**Interpretación de datos:** Para su posible implementación futura, sería importante que los docentes comprendan los niveles aceptables de CO<sub>2</sub> y ruido, así como las acciones a tomar cuando se superen los límites.

Uso pedagógico restringido: Aunque el sistema proporciona datos de interés general, su integración con las actividades pedagógicas depende de la disposición de los docentes y la comunidad educativa para adaptarse a los cambios sugeridos basados en las mediciones.

Instrumentación no certificada: El sistema desarrollado no busca cumplir con los estándares técnicos exigidos para instrumentos certificados de medición ambiental. El prototipo no aplicará ponderaciones acústicas a las mediciones de ruido. Aunque toma como referencia las normativas nacionales vigentes y estándares internacionales, su propósito es ofrecer una herramienta para la observación y toma de decisiones, pero no para procesos de inspección, auditoría o cumplimiento legal riguroso.

Dependencia de la ventilación natural: La efectividad del sistema se basa únicamente en la notificación oportuna de las variables de ruido y CO<sub>2</sub>. Los niveles de CO<sub>2</sub> están limitados por el uso de la ventilación por puertas y ventanas, y la ausencia de sistemas de ventilación mecánica, lo que podría dificultar mantener niveles adecuados en ciertas condiciones climáticas.

Integración con otros sistemas: El sistema no cuenta con actuadores como sistemas de ventilación mecánica o climatización. La integración del sistema de monitoreo con estos sistemas podría requerir inversión adicional.

Análisis comercial: Este proyecto abarca la creación de prototipo, no un producto comercial final. No se incluye este proyecto un análisis comparativo con todas las ofertas comerciales existentes en el mercado.

## Marco Teórico

### Estado del Arte

Varios estudios han abordado el monitoreo ambiental mediante tecnologías IoT, y enfocados en la medición de CO<sub>2</sub> y ruido. Estos trabajos son un referente para el desarrollo del presente proyecto, ya que ofrecen una visión general de las metodologías, componentes y plataformas utilizadas y limitaciones. A continuación, se presentan algunos trabajos relevantes que contextualizan esta investigación.

#### *IoT based Air Quality Index Monitoring using ESP32*

**Autor(es) y Año.** Mahetaliya, S., Makwana, D., Pujara, A., & Hanumante, S. (2021)

**Lugar del Estudio.** Mumbai, India

**Objetivo.** Medición de la calidad del aire utilizando sensores y ESP32

#### **Características Metodológicas.**

- Enfoque: Cuantitativo.
- Alcance: Diseño de un sistema de sensores para medir la calidad del aire.
- Muestra: valores de partículas (PM), CO<sub>2</sub>, CO captados por los sensores en una habitación de 300m<sup>2</sup>.
- Instrumentos: Sensores de gas (GP2Y1010AU0F, MQ135, MQ7), ESP32, buzzer, ThingSpeak.

**Principales Resultados.** Se obtuvieron valores de la calidad del aire, visualizados en la plataforma ThingSpeak. No se detallan los valores específicos ni el tipo de variables medidas.

**Conclusiones.** El sistema monitorea la calidad del aire en tiempo real de manera precisa, eficiente y comprensible. Su diseño compacto y de bajo costo permite una instalación en varios

entornos. La integración con IoT facilita el monitoreo remoto y la toma de decisiones para reducir la contaminación.

El estudio de Mahetaliya et al. (2021) es un referente importante para la selección de tecnologías del presente proyecto. Se mostró la viabilidad de la implementación del ESP32 para la adquisición de datos y de ThingSpeak para la visualización en la nube. Sin embargo, no contempla en su alcance la medición de ruido, ni un sistema de alertas en tiempo real.

***Implementación de una Red Inalámbrica de Sensores de CO<sub>2</sub> usando IoT como Sistema de Alerta ante una Ventilación Deficiente frente al Covid-19 en Aulas de Clase***

**Autor(es) y Año.** Quiroga Barrios, D. A. (2023)

**Lugar del Estudio:** Universidad Antonio Nariño, sede Sur, Bogotá, Colombia.

**Objetivo.** Implementar una red inalámbrica de sensores de CO<sub>2</sub> usando IoT como sistema de alerta ante una ventilación deficiente frente al COVID-19 en aulas de clase.

**Características Metodológicas.**

- Enfoque: Cuantitativo, experimental.
- Alcance: Diseño y construcción de un dispositivo electrónico para medir niveles de CO<sub>2</sub> y material particulado, conectado a una red inalámbrica de sensores.
- Muestra: Aulas de clase de la Universidad Antonio Nariño, sede Sur.
- Instrumentos: Sensores de CO<sub>2</sub> y material particulado, módulo ESP32, módulo Wifi, Node-RED, ThingSpeak, MATLAB.

**Principales Resultados.** El dispositivo electrónico fue capaz de medir con precisión las variables ambientales (CO<sub>2</sub> y material particulado) y alertar sobre una ventilación deficiente.

Se identificaron los niveles de CO<sub>2</sub> que representan un riesgo para la transmisión del COVID-19 en función de las características del aula y la actividad realizada. Se implementó un sistema de alarmas basado en umbrales de CO<sub>2</sub> que se ajustan según la actividad realizada en el aula.

**Conclusiones.** El dispositivo desarrollado es una herramienta para alertar sobre un posible caso de contagio de COVID-19 en aulas de clase. La red inalámbrica de sensores implementada con IoT permite un monitoreo en tiempo real de la calidad del aire en las aulas. Se muestra la importancia de una ventilación adecuada en espacios cerrados para reducir el riesgo de transmisión del covid-19.

Quiroga Barrios (2023) logró la implementación de un sistema IoT de monitoreo de CO<sub>2</sub> en aulas de clase en Colombia, utilizando tecnologías como ESP32 y ThingSpeak. Este trabajo sirvió como modelo, mostrando la factibilidad de realizar soluciones IoT de bajo costo en colegios. El presente proyecto amplía el alcance de la implementación de Quiroga Barrios (2023) al integrar la medición del ruido y el desarrollo de canales de notificación.

***Sistema de Ventilación y Purificación del Aire para Optimizar el Confort Ambiental de los Estudiantes en las Aulas de Clase de los Colegios Urbanos de Bogotá***

**Autor(es) y Año.** Beltrán Moreno, A. M. (2019).

**Lugar del Estudio.** Colegios urbanos de Bogotá, Colombia. Se realiza un trabajo de campo específico en el Colegio Parroquial San Pedro Claver, ubicado en Fontibón.

**Objetivo.** Diseñar un sistema pasivo para optimizar la renovación de aire y la reducción de contaminantes, con el fin de mitigar los efectos y consecuencias en la salud de la población estudiantil.

**Características Metodológicas.**

- Enfoque: Mixto (cualitativo y cuantitativo).

- Alcance: Investigación exploratoria sobre la calidad del aire en aulas de clase y diseño de un sistema de ventilación pasiva.
- Muestra: Estudiantes del Colegio Parroquial San Pedro Claver en Fontibón (387 estudiantes encuestados).
- Instrumentos: Encuestas, análisis de datos climáticos y geográficos, observación del espacio, software de simulación (Solidworks, Ansys).

**Principales Resultados.** Se identificó una alta tasa de síntomas respiratorios en los estudiantes del colegio estudiado, relacionada con la mala calidad del aire. Se diseñó un sistema de ventilación pasiva "Alisio", que utiliza los principios bioclimáticos de efecto chimenea y captación directa para mejorar la renovación del aire y la reducción de contaminantes. Se evaluó el impacto ambiental del sistema "Alisio", mostrando su bajo consumo energético y la posibilidad de reutilizar y reciclar sus componentes.

**Conclusiones.** El sistema Alisio es una alternativa viable para mejorar la calidad del aire en aulas de clase de colegios urbanos, contribuyendo a la salud y bienestar de los estudiantes. Se muestra la importancia de integrar estrategias bioclimáticas en el diseño de espacios educativos para crear ambientes más saludables y sostenibles. El estudio evidencia la necesidad de abordar la problemática de la contaminación del aire en las ciudades, especialmente en entornos educativos.

El estudio de Beltrán Moreno (2019) en colegios de Bogotá muestra la problemática de la mala calidad del aire en aulas urbanas y su impacto en la salud estudiantil. Este trabajo muestra la necesidad de mejorar los ambientes educativos mediante estrategias de ventilación.

Aunque Beltrán Moreno se basa en una solución de ventilación pasiva, un sistema IoT podría ofrecer la capacidad de medir en tiempo real variables clave como CO<sub>2</sub> y ruido, para diagnosticar problemas ambientales en el aula.

***A Real-Time Noise Monitoring System Based on Internet of Things for Enhanced Acoustic Comfort and Occupational Health***

**Autor(es) y Año.** Marques, G. y Pitarma, R. (2020).

**Lugar del Estudio.** El estudio se realizó en un laboratorio de ciencias ambientales en la Universidade da Beira Interior, Portugal.

**Objetivo.** Proponer una solución modular y escalable para mejorar la salud y el bienestar utilizando tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) y computación móvil. Se busca presentar un sistema de monitoreo en tiempo real para mejorar el confort acústico, con compatibilidad de computación móvil para la visualización, análisis y notificación de datos.

**Características Metodológicas.**

- Enfoque: Cuantitativo. Se recolectan datos de niveles de sonido y se analizan estadísticamente.
- Alcance: Descriptivo y exploratorio. Se describe el sistema propuesto y se exploran sus capacidades en un entorno de laboratorio.
- Muestra: El estudio se basa en la recolección continua de datos en tiempo real durante dos meses en un laboratorio.
- Instrumentos: El prototipo de hardware (iSoundIoT) utiliza un sensor de nivel de sonido calibrado (Gravity Analog Sound level meter) y un microcontrolador FireBeetle ESP8266 con soporte Wi-Fi. Para el acceso a datos, se desarrollaron un portal web (iSoundWeb) y una aplicación móvil (iSoundMobile).

- Otros: Se utiliza una base de datos SQL Server para almacenar los datos.

**Principales Resultados.** El sistema iSoundIoT demostró ser una herramienta adecuada para la supervisión del sonido y la mejora del confort acústico y el bienestar. Se obtuvieron niveles de sonido promedio que oscilan entre 47.35 y 52.99 dBA, agrupados por día de la semana, y entre 46.22 y 51.84 dBA, agrupados por hora del día. La tasa de éxito promedio de paquetes de datos (es decir, la proporción de datos correctamente almacenados) osciló entre el 93.58% (domingo) y el 97.41% (sábado).

**Conclusiones.** El sistema iSoundIoT es una solución rentable para el monitoreo de ruido en tiempo real que puede mejorar el confort acústico y la salud ocupacional. La visualización gráfica de los datos facilita la interpretación y el análisis de la información. El sistema puede ser utilizado como una herramienta para la planificación de intervenciones y mejoras en el aislamiento de los ambientes interiores. Los autores sugieren que el sistema podría ser útil para el diagnóstico médico, al correlacionar los síntomas de los pacientes con su entorno acústico.

El sistema de monitoreo de ruido basado en IoT desarrollado por Marques y Pitarma (2020) es un referente para validar la implementación de tecnología para el control del confort acústico. Lograron la adquisición y visualización de datos de ruido en dBA, utilizando componentes de bajo costo como el ESP8266.

***Sistema de Monitoreo de la Intensidad de Ruido en Zonas de Hospitalización por Medio del Internet de las Cosas***

**Autor(es) y Año.** Quintero Lugo, A., Herrera Londoño, S. y Álvarez Gaspar, C. A. (2023).

**Lugar del Estudio.** El estudio se realizó en la unidad de cuidados intensivos (UCI) de la clínica de Comfamiliar en la ciudad de Pereira, Colombia.

**Objetivo.** Desarrollar un sistema de medición y monitoreo de la intensidad del ruido en zonas hospitalarias, utilizando tecnologías IoT para facilitar la evaluación y validación de los niveles de ruido.

**Características Metodológicas.**

- Enfoque: Cuantitativo. Se miden los niveles de ruido y se comparan con los límites establecidos por la normativa colombiana.
- Alcance: Desarrollo tecnológico y prueba de concepto. Se desarrolla un prototipo de sistema IoT para la medición de ruido y se prueba su funcionamiento en un entorno real.
- Muestra: No se especifica el tamaño de la muestra ni el periodo de tiempo de la recolección de datos.
- Instrumentos: El sistema utiliza un módulo de micrófono MAX9814 para la captura de datos, una placa de desarrollo ESP32 para el procesamiento y envío de datos a la nube, y un módulo de memoria SD para el almacenamiento local. La plataforma Thingspeak se utiliza para el almacenamiento y visualización de datos en la nube.
- Otros: Se realiza una calibración a trozos del sensor de sonido para mejorar la precisión de las mediciones.

**Principales Resultados.** El sistema desarrollado demostró ser capaz de medir y monitorear la intensidad del ruido en la UCI de forma similar a un sonómetro calibrado. Se observó que los niveles de ruido en la UCI superaron los límites establecidos por la normativa colombiana, lo que indica la necesidad de implementar medidas de mitigación.

**Conclusiones.** Los sistemas IoT son una alternativa eficaz y de bajo costo para el monitoreo del ruido en zonas hospitalarias. La información recopilada por el sistema puede ser

utilizada para evaluar el cumplimiento de las normas de ruido y planificar estrategias de control y mitigación.

El trabajo de Quintero Lugo et al. (2023) es un antecedente de relevancia técnica y metodológica para nuestro proyecto. Este estudio demostró la capacidad de prototipos de bajo costo para obtener mediciones de ruido precisas. Sin embargo, su aplicación se centró en entornos hospitalarios. El presente proyecto se aplica a un aula de gamificación, integrando la medición de CO<sub>2</sub> para ofrecer una solución más completa.

### ***Sistema IoT para la Monitorización y Análisis de Niveles de Ruido***

**Autor(es) y Año:** Chanchí, G. E., Ospina, M. A. y Saba, M. (2020).

**Lugar del Estudio:** Edificio residencial de la ciudad de Cartagena de Indias, Colombia.

**Objetivo.** Proponer un sistema IoT para la monitorización y análisis de niveles de ruido, que pueda ser utilizado como referencia en auditorías acústicas.

#### **Características Metodológicas.**

- **Enfoque:** Cuantitativo. Se recolectan datos de niveles de ruido y se analizan estadísticamente.
- **Alcance:** Desarrollo tecnológico y prueba de concepto. Se desarrolla un prototipo de sistema IoT para la medición de ruido y se prueba su funcionamiento en un entorno real.
- **Muestra:** Se realizó una prueba funcional con 400 capturas de datos en un edificio residencial.
- **Instrumentos:** El sistema utiliza un sonómetro bluetooth UT353BT para la captura de datos. Se emplea una aplicación desarrollada en Java con un script de Python para la gestión de la conexión bluetooth, categorización de datos, visualización gráfica en tiempo

real, y almacenamiento en una base de datos no relacional (jsondb). Se usa la librería weka de Java para el clustering K-means.

- Otros: Se establecieron rangos de clasificación del nivel de ruido adaptados de la normativa colombiana.

**Principales Resultados.** El sistema desarrollado demostró ser capaz de capturar, almacenar, analizar y visualizar los niveles de ruido de forma efectiva. La prueba funcional en el edificio residencial arrojó un nivel de ruido promedio de 56.86 dBA, con una desviación estándar de 2.41 dBA. El análisis con K-means identificó dos clusters principales de niveles de ruido en la prueba funcional.

**Conclusiones.** El sistema IoT propuesto es una alternativa viable para mejorar las capacidades de los sonómetros convencionales. El uso de tecnologías bluetooth LE facilita la captura de datos de dispositivos comerciales. El sistema puede ser utilizado como una herramienta para la realización de auditorías acústicas.

El sistema IoT para la monitorización y análisis de ruido de Chanchí, Ospina y Saba (2020) ofrece un precedente en relación el monitoreo de ruido y el análisis de datos. Si bien, su sistema demuestra la captura, almacenamiento y visualización de niveles de ruido, el presente proyecto extiende esta funcionalidad al integrar también la medición de CO<sub>2</sub>. Además, se diferencia al estar específicamente diseñado para un entorno educativo.

Con base en los trabajos analizados, se identifican varios sistemas para el monitoreo de la calidad del aire y la intensidad del ruido mediante tecnologías, tanto en espacios hospitalarios, académicos y residenciales. Se encuentra que en estas investigaciones se centran en variables aisladas como CO<sub>2</sub> o ruido, pero sin una integración de ambas, ni la implementación de mecanismos de notificación. En algunos casos, las investigaciones no han sido evaluadas en

ambientes escolares reales, o no implementan la visualización local de datos, sin depender de la conexión a red. Por tal motivo, el presente proyecto presenta una solución innovadora que aportando a la literatura existente.

### **Bases Teóricas**

Este capítulo establece los fundamentos teóricos de las variables de CO<sub>2</sub> y el ruido, mostrando sus propiedades, métodos de medición, y los efectos en la salud y el aprendizaje. En base a lo anterior se determinan los criterios, recomendaciones y principios que guiarán el diseño del sistema de monitoreo de estas variables.

#### ***Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)***

**Definiciones.** El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es un gas incoloro, inodoro e insípido, más pesado que el aire, lo que lo lleva a acumularse en espacios cerrados (Azuma et al., 2018). Aunque la NASA (2024) lo clasifica principalmente como un gas de efecto invernadero asociado a fenómenos naturales y a actividades humanas a nivel atmosférico, en ambientes interiores no industriales la principal fuente de CO<sub>2</sub> es el metabolismo humano (Azuma et al., 2018). Por su parte Guardino (2015) complementa, al señalar que el CO<sub>2</sub> no es tóxico en bajas concentraciones, pero es un indicador clave de la calidad del aire interior y de la deficiencia de ventilación.

**Medición de CO<sub>2</sub>.** De acuerdo con Renke (2024), la medición de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en ambientes interiores se realiza con monitores de CO<sub>2</sub> los cuales usan sensores de diferentes tipos como electroquímicos, semiconductores, combustión catalítica, e infrarrojo no dispersivo (NDIR), siendo este último el más preciso y estable en las mediciones.

Para interpretar las mediciones, es fundamental conocer los valores típicos de CO<sub>2</sub> en diferentes entornos. En ambientes exteriores, las concentraciones de CO<sub>2</sub> en son relativamente

bajas y sirven como línea base, con valores cercanos a 400 ppm (partes por millón). La NASA (2024) monitorea estos niveles a nivel global, informando un aumento general debido a las actividades humanas y sus efectos en el cambio climático.

En ambientes Interiores, ya sean espacios cerrados y ocupados, las concentraciones de CO<sub>2</sub> son más elevadas debido a la exhalación humana y a la eficiencia de la ventilación. Según Health Canada (2021), hasta 1000 ppm se considera un nivel de buena calidad del aire interior, indicando una ventilación adecuada y mínimos riesgos para la salud, mientras que los valores superiores a 1500 ppm indican de ventilación deficiente según Health and Safety Executive (2023).

Para esta investigación, se debe seleccionar un sensor para la captura fiable y continua de los niveles de CO<sub>2</sub>. La interpretación de los datos se basará en los rangos de referencia de NASA (2024), Health Canada (2021) y Health and Safety Executive (2023).

**Fuentes y Acumulación de CO<sub>2</sub> en Interiores.** según Health Canada (2021), las fuentes de CO<sub>2</sub> en ambientes interiores se clasifican en biogénicas (generadas por los ocupantes, principalmente por la respiración) y antropogénicas (producidas por actividades o equipos dentro del edificio, como la combustión de materiales orgánicos. Azuma et al. (2018) afirman que la respiración humana es la fuente biogénica principal, mostrando que su tasa de emisión cambia con el nivel de actividad física. Por tal motivo y según Envira (2023), la presencia humana es el factor directo más relevante para la acumulación de dióxido de carbono en espacios cerrados, especialmente en aulas.

La concentración de CO<sub>2</sub> en interiores se incrementa directamente con la densidad de ocupación y la baja ventilación (Health Canada, 2021). Estudios como el de Fernández-Agüera et al. (2019) en escuelas mediterráneas, mostraron que un bajo porcentaje cumplía las

recomendaciones de la OMS de 1000 ppm, evidenciando una acumulación rápida en entornos educativos con alta afluencia y baja ventilación. También, de acuerdo con Azuma et al. (2018), el CO<sub>2</sub> al ser más denso que el aire, tiende a acumularse en zonas bajas. Health and Safety Executive (2023) afirma que los monitores de CO<sub>2</sub> permiten estimar de manera indirecta las tasas de flujo de aire, y que se deben tomar medidas para mejorar la ventilación cuando los niveles de CO<sub>2</sub> superan los 1500 ppm, en un espacio ocupado por personas.

En este proyecto, la acumulación de CO<sub>2</sub> en el aula se asume como el resultado directo de la ocupación humana y una ventilación baja. Se toma la recomendación de Health and Safety Executive (2023) de 1500 ppm como nivel crítico de CO<sub>2</sub>, ya que se considera un valor prudente, para generar alertas dentro de un aula de clases. Un valor inferior podría dar lugar a mayor número de alertas, no haciendo práctico el uso de este sistema. El monitoreo en tiempo real permitirá identificar y alertar sobre el valor crítico vinculado a la actividad de los ocupantes del aula y la falta de renovación del aire.

**Ventilación y CO<sub>2</sub>.** La ventilación es el mecanismo principal para controlar la acumulación de CO<sub>2</sub> en interiores. ASHRAE (2022) lo considera un indicador fiable de la tasa de ventilación por persona en espacios cerrados, a pesar de no reflejar la totalidad de los contaminantes. Esta consideración muestra la importancia del monitoreo de CO<sub>2</sub> como herramienta para evaluar la renovación del aire. Health Canada (2021) amplía esta idea al afirmar que la ventilación adecuada y el control de fuentes internas son acciones necesarias para prevenir la acumulación de este gas y proteger la salud.

ASHRAE (2016) a través de su estándar 62.1 establece criterios para la ventilación y la calidad del aire interior aceptable, basados en la necesidad de diluir los contaminantes para mantener un ambiente sano. Aunque ASHRAE (2022) reconoce al CO<sub>2</sub> como indicador indirecto

de ventilación, no todos los estudios coinciden en que sea suficiente para caracterizar la calidad del aire interior, por lo que se sugiere complementar con otras medidas en futuros desarrollos.

Para esta investigación, la perspectiva de ASHRAE (2022) es la base teórica que justifica su monitoreo en tiempo real, con una herramienta que permita identificar situaciones de baja ventilación.

**Efectos del CO<sub>2</sub> en la Salud Humana.** La exposición a concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub> en interiores tiene diversos efectos en la salud. Health Canada (2021) describe síntomas como irritación en ojos y garganta, congestión nasal, estornudos, tos, cefaleas, fatiga, somnolencia y mareos. Azuma et al. (2018) por su parte identifican efectos en los sistemas cardiovascular, respiratorio y circulatorio, como la alteración del pH sanguíneo y malestar general. Por encima de 500 ppm, se observan cambios fisiológicos sutiles como aumento de frecuencia cardíaca. Superando los 700 ppm, surgen síntomas leves como irritación de ojos, irritación de nariz, congestión nasal, irritación de garganta, tos, opresión en el pecho, dificultad para respirar, dolores de cabeza, fatiga, somnolencia, dificultad para concentrarse, mareos, náuseas, picazón en la piel, resfriados etc. Niveles sobre 1000 ppm afectan el rendimiento cognitivo, incluyendo la toma de decisiones, mientras que, a concentraciones de 10.000 ppm en adelante, los efectos se vuelven severos, causando problemas respiratorios graves, mareos, confusión y pérdida de conciencia.

Guardino (2015) por su parte afirma que una mala calidad del aire interior, producida por el CO<sub>2</sub>, puede provocar problemas de salud en los ocupantes, como irritación de mucosas y cansancio.

La importancia de monitorear el CO<sub>2</sub> con el sistema propuesto está en su potencial para prevenir estos efectos negativos, en la salud de docentes y estudiantes, al identificar y alertar sobre concentraciones peligrosas.

**Efectos del CO<sub>2</sub> en el Aprendizaje.** Adicional a los efectos directos en la salud física, la exposición a concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub> en aulas afecta negativamente el rendimiento cognitivo y el aprendizaje. Estudios como el de Twardella et al. (2012) demostraron un impacto en tareas que requieren concentración y toma de decisiones. Satish et al. (2012) complementan esto al concluir que incluso niveles moderados, considerados aceptable, pueden reducir la capacidad de concentración y el rendimiento cognitivo. Brink et al. (2021) reafirma la idea de que condiciones ambientales inadecuadas en las aulas pueden causar fatiga y problemas de concentración, afectando directamente el rendimiento académico.

Para este estudio, se adoptan los resultados de Satish et al. (2012) por su estudio de los niveles de CO<sub>2</sub> típicos en un aula y su impacto directo en el rendimiento cognitivo. La justificación del monitoreo de CO<sub>2</sub> está en reducir estos impactos negativos, buscando mantener la capacidad de concentración y mejorar el ambiente de aprendizaje para los estudiantes y docentes.

Así como la calidad del aire interior afecta la salud y el aprendizaje, el ruido ambiental es una variable importante en las aulas, que será abordado a continuación.

### ***Ruido***

**Definiciones.** De acuerdo con NIOSH (1998) y Svantek (2024a), el ruido es cualquier sonido no deseado, y un contaminante ambiental con efectos en la salud y en el comportamiento. La OMS (2022) lo clasifica como un factor de riesgo para la salud, estableciendo

recomendaciones, políticas, guías y acciones para mitigar el ruido ambiental y sensibilizar a la población sobre sus efectos.

**Medición de Ruido.** De acuerdo con Svantek (2024a), el nivel de presión sonora (SPL) expresado en decibeles (dB), es el valor logarítmico de la relación entre la presión de una onda sonora en relación con el valor de referencia estándar de 20  $\mu$ Pa. Este autor, a su vez menciona que la medición del ruido se realiza utilizando diferentes ponderaciones de frecuencia (A, C, Z). También se emplean constantes de tiempo como Rápida (125 milisegundos) y Lenta (1 segundo) para capturar las variaciones temporales. Svantek (2024b) también define el nivel de sonido continuo equivalente (Leq) como el promedio energético del sonido durante un período específico, útil para evaluar la exposición a largo plazo.

Svantek (2024a) nos brinda algunos ejemplos de nivel de presión acústica, como el umbral audición (0 dB), un susurro silencioso (30 dB), una oficina tranquila (40 dB), una conversación normal (60 dB), y un martillo neumático (90 dB). Superar los 120 dB es ensordecedor y se considera el umbral del dolor humano.

Para la presente investigación, se utiliza el nivel presión sonora en decibeles (dB) como parámetro de medición. Debido a que el sistema necesita una medición objetiva y completa del nivel de sonido, se tomara la medición del nivel presión sonora sin aplicar ponderaciones de frecuencia (A, C o Z). Sin embargo, se reconoce que esta metodología no cumple con los requerimientos establecidos para evaluación certificada del ruido ambiental u ocupacional.

**Ruido y Salud Ocupacional.** Según la OMS (2001) y OMS (2022), la exposición al ruido es un problema de salud pública global, tanto a nivel ocupacional como ambiental. NIOSH (1998) establece la hipótesis de la energía igual, un principio en la acústica de la salud ocupacional, que afirma que el daño auditivo es directamente proporcional a la energía sonora

acumulada, independientemente de su distribución temporal. Esta hipótesis justifica las recomendaciones, las cuales establecen una dosis máxima con un límite de exposición al ruido de 85 dBA durante 8 horas, para proteger la audición. NIOSH (1998) se enfoca en la prevención de la pérdida auditiva inducida por el ruido en el ambiente laboral, lo que es esencial para mantener la salud y el bienestar de los trabajadores

En este proyecto, se adopta la postura de NIOSH (1998), ya que su marco científico es la base para justificar la medición de la dosis de ruido en el ambiente escolar. Esto permite evaluar la exposición acumulada y generar alertas oportunas para prevenir efectos negativos en la salud auditiva y general de los estudiantes y docentes.

**Ruido en Aulas.** Svantek (2024a) afirma que la percepción del ruido es inherentemente subjetiva y varía significativamente entre individuos. Sin embargo, Figueroa et al. (2012) argumenta que, en entornos específicos como las aulas, el ruido ambiental se caracteriza por ser fluctuante y, frecuentemente, generado por las propias actividades de los estudiantes, convirtiéndose en un factor constante de distracción.

En este estudio, se adopta la caracterización del ruido en aulas propuesta por Figueroa et al. (2012). Esta definición del ruido escolar muestra la necesidad de un sistema de monitoreo capaz de capturar estas dinámicas para alertar sobre niveles que afectan la concentración y el aprendizaje.

**Efectos del Ruido en la Salud Humana.** La exposición a niveles de ruido excesivos tiene varios efectos en la salud. El Ministerio de Salud y Protección Social (2024) de Colombia advierte que la exposición prolongada a más de 85 dB puede causar daños auditivos irreversibles, y que picos superiores a 120 dB pueden generar daño inmediato y permanente. El ruido excesivo contribuye al estrés, la ansiedad, la depresión y alteraciones del comportamiento.

Passchier-Vermeer y Passchier (2000) añaden la correlación con el aumento del riesgo de hipertensión, enfermedades cardiovasculares y trastornos del sueño. EnHealth (2018) muestra una descripción completa de estos efectos, como los impactos en la audición, el sistema cardiovascular, el sueño y la salud mental.

Es importante resaltar que algunos estudios deben ser contextualizados al entorno educativo para evitar sobredimensionar riesgos. Sin embargo, son el punto de referencia que se utilizara en este proyecto.

El monitoreo de ruido es necesario para identificar y evitar estos riesgos, permitiendo a los docentes tomar acciones preventivas y proteger el bienestar físico y mental de los estudiantes y el personal en el aula.

**Efectos del Ruido en el Aprendizaje.** El ruido en el ambiente educativo tiene un impacto directo y negativo en el rendimiento académico. Figueroa et al. (2012) demostraron que el ruido en aulas afecta la capacidad de concentración y atención de los estudiantes, dificultando tareas cognitivas y la comprensión del habla. Brink et al. (2021), encontraron que las malas condiciones acústicas en las aulas pueden causar fatiga y problemas de concentración, afectando directamente el aprendizaje. Moya-López y Malla-Morocho (2022) argumentan que un ambiente ruidoso puede agravar las dificultades existentes en la adquisición de conocimientos, mostrando que los trastornos de aprendizaje pueden empeorar por factores ambientales.

Un sistema de monitoreo de ruido permite identificar y alertar sobre niveles que comprometen la concentración, la comprensión y el rendimiento académico de los estudiantes, buscando mejorar las condiciones del ambiente de aprendizaje.

Según las bases anteriores, el sistema diseñado debe usar un sensor capaz de registrar los niveles de CO<sub>2</sub> en partículas por millón (ppm) y un sensor que permita medir las variaciones en

el nivel de presión sonora (dB). Se debe procesar la información recopilada por los sensores en tiempo real por un microcontrolador, y emitir alertas cuando se exceden umbrales críticos definidos por NIOSH (1998) y por Health and Safety Executive (2023). El uso de conectividad inalámbrica y visualización de datos mediante plataformas IoT permitirá realizar análisis de los datos recopilados y mejorar la toma de decisiones.

### **Marco Conceptual**

Una vez establecidos los fundamentos teóricos sobre el CO<sub>2</sub> y el ruido, se definirán los conceptos, sistemas y tecnologías que se relacionan con el sistema de monitoreo propuesto.

En el contexto de la aplicación de este sistema, un concepto importante es el de la calidad del ambiente interior. El ambiente interior de las aulas es un factor esencial para el bienestar, la salud y el rendimiento académico de los estudiantes. Según Brink et al. (2021), las variables como la temperatura, la ventilación, la iluminación, el nivel de ruido y la concentración de CO<sub>2</sub> influyen directamente en el proceso de aprendizaje y la productividad. Por esto, la calidad del aire y el nivel de ruido no deben considerarse elementos secundarios, sino condiciones importantes que influyen en la atención, la fatiga y la salud tanto de estudiantes como de docentes (Twardella et al., 2012).

Aprendizaje es el proceso en el que, mediante intercambios con el medio, se reestructuran los pensamientos, sentimientos, percepciones y, como consecuencia, se producen cambios en el sistema nervioso. Los aprendizajes permiten la adaptación al entorno, responder a los cambios y a las acciones que estos producen.

En el contexto escolar, el aprendizaje puede verse afectado por diversos factores, incluyendo los problemas y trastornos de aprendizaje. Tanto los problemas como los trastornos de aprendizaje pueden impactar el desempeño académico de los estudiantes.

Los problemas de aprendizaje pueden originarse en factores ambientales y familiares como la falta de motivación o problemas económicos. A diferencia de los trastornos de aprendizaje, que tienen un origen neurológico, los problemas de aprendizaje están más relacionados con factores externos al individuo.

Algunas de las causas y problemas de aprendizaje derivados del ambiente mencionados por Brink et al. (2021) son:

- **Clima escolar no óptimo:** Un ambiente escolar que no sea positivo puede afectar el desarrollo saludable de los estudiantes e incluso predecir su rendimiento académico. Para mejorar este clima, es necesario asegurar ventilación, calefacción, iluminación y control acústico adecuados, así como un buen mantenimiento de las instalaciones.
- **Calidad del ambiente interior (IEQ):** Un IEQ deficiente puede causar resultados de salud adversos, lo que puede llevar a ausentismo y un rendimiento académico deficiente. El IEQ se refiere a las condiciones del aire interior, condiciones térmicas, acústicas y de iluminación.
- **Condiciones del aula:** Aulas en malas condiciones, pueden afectar negativamente el rendimiento de los estudiantes.
- **Ruido:** Niveles altos de ruido en el aula pueden afectar la capacidad de los estudiantes para escuchar al profesor. Las malas condiciones acústicas pueden causar problemas de salud mental como fatiga y problemas de concentración.
- **Iluminación:** La iluminación inadecuada puede afectar la capacidad de concentración de los estudiantes. La exposición a la luz blanca enriquecida con azul puede ser una contramedida efectiva contra la somnolencia matutina en las escuelas.

- Temperatura: El desconfort térmico, causado por temperaturas altas o bajas, afecta el rendimiento cognitivo de los estudiantes.
- Ventilación: Una ventilación insuficiente puede resultar en una mala calidad del aire interior, lo que puede afectar negativamente la salud y el rendimiento de los estudiantes. Se ha encontrado una correlación significativa entre la sensación térmica real de los estudiantes y la calidad del aire interior percibida, lo que indica una interdependencia mutua entre las percepciones de estos dos parámetros ambientales interiores.

El aire es una mezcla de gases que componen la atmósfera de la Tierra, principalmente compuesto por nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, neón, helio etc. La calidad del aire se refiere a la condición del aire en un espacio determinado, particularmente en relación con la salud y el bienestar de las personas que lo respiran.

Según Guardino (2015) la mala calidad del aire interior se debe a la contaminación de diversos tipos presentes en los edificios. Los contaminantes del aire pueden ser químicos o biológicos y pueden originarse dentro o fuera del edificio. Los siguientes son los contaminantes más comunes que se encuentran en el aire:

- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)
- Monóxido de carbono (CO)
- Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)
- Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)
- Ozono (O<sub>3</sub>).
- Compuestos orgánicos
- Metales, el amianto y otros materiales fibrosos.
- Formaldehído.

- Plaguicidas.
- Radón
- Polvo doméstico.
- Aerosoles biológicos.
- Microorganismos tales como hongos, bacterias, virus y protozoos

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2016) define calidad aceptable de aire interior como aquella que cumple con dos criterios principales:

- Ausencia de contaminantes nocivos: El aire no debe contener contaminantes conocidos en concentraciones que las autoridades competentes consideren perjudiciales para la salud.
- Satisfacción de la mayoría: Al menos el 80% de las personas expuestas al aire deben sentirse satisfechas con su calidad.

ASHRAE resalta la importancia de la ventilación para mantener una buena calidad del aire interior. La ventilación adecuada permite diluir los contaminantes generados en el interior, como el CO<sub>2</sub> producido por la respiración, y reponer el oxígeno.

La calidad del aire puede verse afectada por diversos factores, incluyendo:

- Contaminantes: Sustancias presentes en el aire que pueden ser perjudiciales para la salud, como el CO<sub>2</sub>, el monóxido de carbono, los compuestos orgánicos volátiles y las partículas en suspensión.
- Ventilación: La cantidad de aire fresco que ingresa a un espacio, que ayuda a diluir los contaminantes y mantener niveles adecuados de oxígeno.
- Temperatura y humedad: Condiciones que afectan la comodidad y la percepción de la calidad del aire.

- Olores: Percepciones sensoriales que pueden ser agradables o desagradables, y que influyen en la satisfacción de las personas con el aire.

El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) es un gas incoloro, insípido, inodoro y no inflamable. La molécula de  $\text{CO}_2$  está compuesta por 1 átomo de carbono (masa molar = 12.01 g/mol) y 2 átomos de oxígeno (masa molar = 16.00 g/mol).

La molécula de  $\text{CO}_2$  tiene una masa molar de aproximadamente 44.01 g/mol, mientras que la del aire es de aproximadamente 28.97 g/mol. Por su composición, el  $\text{CO}_2$  tiende a acumularse en las áreas más bajas cuando no está en movimiento o en mezcla con otros gases. Está presente de forma natural en la atmósfera terrestre como un gas traza, sin embargo, sus principales fuentes son el metabolismo humano, la quema de combustibles fósiles y el aumento de la concentración atmosférica.

Partes por millón (ppm) es una unidad de medida utilizada para mostrar la concentración de un gas en una mezcla gaseosa, indicando cuántas partes de un gas específico están presentes por cada millón de partes del gas total. Por ejemplo, una concentración de 500 ppm de un gas en el aire, significa que hay 500 moléculas de ese gas por cada millón de moléculas de aire.

Las concentraciones típicas de  $\text{CO}_2$  al aire libre son de aproximadamente 400 ppm, aunque en las zonas urbanas pueden llegar a 500 ppm. Por otro lado, la concentración media de  $\text{CO}_2$  en interiores suele oscilar entre 800 y 1000 ppm. Según NASA Climate (2024), hay un aumento significativo del  $\text{CO}_2$  atmosférico desde la era industrial, atribuido principalmente a la quema de combustibles fósiles, elevando los niveles en un 50% en menos de 200 años, y llegando al nivel actual (422 ppm). En sus observaciones se ha encontrado un patrón de dientes de sierra superpuestos a la tendencia general al alza. Por su parte, las autoridades ambientales han establecido límites de concentración para las concentraciones de  $\text{CO}_2$  en los edificios no

industriales en varios países, incluyendo Japón, Canadá, Singapur, Noruega, China, Corea del Sur, Alemania y Taiwán.

Según Azuma et al (2018), el dióxido de carbono puede originar los siguientes efectos en la salud:

- **Acidosis respiratoria:** El  $\text{CO}_2$  se produce por el metabolismo intracelular en las mitocondrias. A medida que el  $\text{CO}_2$  se acumula en la sangre, el pH de la sangre disminuye, aumentando la acidez. Por lo tanto, el  $\text{CO}_2$  se elimina del cuerpo humano para mantener el equilibrio ácido-base en la sangre. La acidosis respiratoria se produce cuando se acumula demasiado  $\text{CO}_2$  en el cuerpo, y puede causar síntomas como dolor de cabeza, confusión, ansiedad, somnolencia y estupor.
- **Síntomas relacionados con los edificios:** Varios estudios epidemiológicos indican una relación entre la exposición a niveles bajos de  $\text{CO}_2$  y los síntomas relacionados con los edificios (BRS), como síntomas de las vías respiratorias superiores e inferiores, ojos y piel, incluyendo dolor de cabeza, fatiga y dificultad para concentrarse. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los BRS probablemente estén influenciados por otros contaminantes presentes en interiores junto con el  $\text{CO}_2$ .
- **Función autonómica y rendimiento psicomotor:** Estudios recientes han demostrado cambios fisiológicos lineales en los sistemas circulatorio, cardiovascular y autonómico, incluyendo un aumento de la  $\text{pCO}_2$  en la sangre, la presión arterial, la frecuencia cardíaca y la circulación sanguínea periférica, así como un aumento de la estimulación simpática, con exposiciones al  $\text{CO}_2$  en el rango de 500 a 5000 ppm. Varios estudios experimentales en humanos sugieren que el  $\text{CO}_2$  puede afectar al rendimiento cognitivo (toma de

decisiones, resolución de problemas, velocidad de adición, número de aciertos) a partir de concentraciones de aproximadamente 1000 ppm para la exposición a corto plazo al CO<sub>2</sub>.

Un sensor de CO<sub>2</sub> es un dispositivo que detecta este gas y su concentración en el aire.

Estos sensores convierten la concentración en señales eléctricas a través de reacciones físicas o químicas, y luego emiten valores calculados.

Renke (2024) describe cuatro tipos de sensores CO<sub>2</sub> según su principio de funcionamiento:

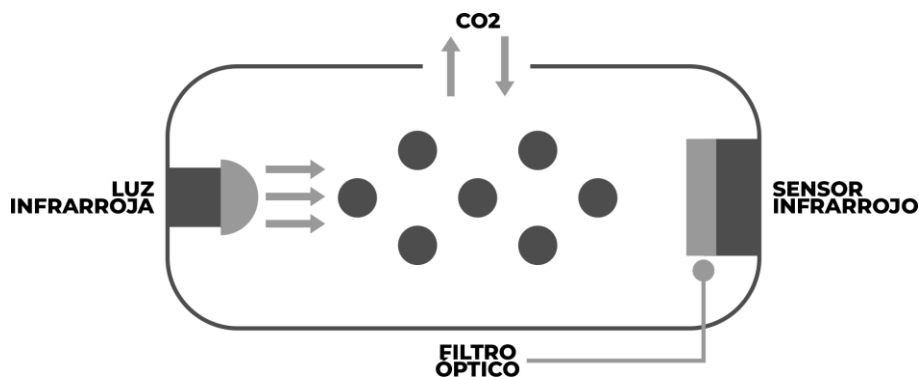
- **Electroquímicos:** Estos sensores convierten la concentración de dióxido de carbono en una señal eléctrica a través de una reacción electroquímica. Durante el proceso, el CO<sub>2</sub> interactúa con un electrodo, generando una corriente eléctrica cuya intensidad es proporcional a la cantidad de gas presente. Se caracterizan por ser compactos y de bajo consumo, ideales para aplicaciones portátiles, aunque pueden requerir calibración periódica y tener una vida útil limitada.
- **Semiconductores (MOX):** Se basan en la reacción de oxidación-reducción del CO<sub>2</sub> en la superficie del semiconductor, lo que provoca un cambio en la resistencia del elemento sensible. En otras palabras, al interactuar con el gas, se detecta una variación en la conductividad eléctrica del material de óxido metálico. Estos sensores ofrecen una solución económica y de respuesta rápida, aunque pueden ser sensibles a cambios de temperatura y humedad.
- **Combustión catalítica:** Estos sensores emplean un recubrimiento catalítico en la superficie de un resistor especializado. A una temperatura determinada, el gas inflamable se quema de forma catalítica en la superficie del sensor. La reacción de combustión genera un cambio en la temperatura o en la resistencia del elemento, que se correlaciona con la concentración del gas. Este principio se utiliza principalmente para la detección de

gases inflamables, pero también puede aplicarse en algunas configuraciones para la medición de CO<sub>2</sub>.

- NDIR: utiliza el principio de que el CO<sub>2</sub> absorbe luz infrarroja en una banda específica. Según Zhou et al. (2021), este tipo de sensor posee una fuente de luz infrarroja que emite un haz de luz a través de una cámara que contiene el gas a medir. La luz pasa por un filtro óptico que selecciona la longitud de onda específica que absorbe el CO<sub>2</sub>, que es 4.26 μm. Un detector mide la cantidad de luz infrarroja que llega al otro lado de la cámara. La cantidad de luz absorbida por el CO<sub>2</sub> es proporcional a la concentración del gas presente. El sensor calcula la concentración midiendo la diferencia entre la luz emitida y la detectada. Esta tecnología es conocida por su alta precisión y estabilidad a largo plazo, aunque suele tener un costo mayor en comparación con otros métodos.

### Figura 1

*Diagrama de un Sensor NDIR*



*Nota.* El sensor mide la diferencia entre la luz infrarroja emitida y la detectada.

Otra de las variables de esta investigación es el nivel de ruido. De acuerdo con NIOSH (1998), el sonido es la oscilación en la presión o desplazamiento de partículas en un medio, o la

superposición de tales oscilaciones propagadas. El sonido también se puede definir como la sensación auditiva producida por la oscilación descrita anteriormente.

La frecuencia de un sonido es el número de ciclos que ocurren en 1 segundo y determina el tono percibido por el oyente. La frecuencia se mide en Hertz (Hz). Los humanos con audición normal pueden escuchar un rango de frecuencia de aproximadamente 20 Hz a 20 kHz. La sensibilidad del oído humano a diferentes frecuencias no es igual, siendo el rango más sensible entre 2 kHz y 5 kHz. El oído es menos sensible para percibir el volumen de los sonidos que duran menos de un segundo.

La presión de referencia  $P_0$  para el sonido en el aire es de 20  $\mu\text{Pa}$ , la cual se considera el umbral de la audición humana. El nivel de presión sonora (SPL) es una medida del nivel de presión de una onda de sonido en relación con el nivel de referencia  $P_0$ . El nivel de presión sonora generalmente se mide en decibelios (dB) y se obtiene a través de la siguiente fórmula:

$$SPL = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{P}{P_0} \right) \quad (1)$$

Los sonidos audibles en la escala de decibelios van desde 0 dB, el umbral de audición, hasta más de 130 dB, el umbral del dolor. El sonido es una forma de energía, y la cantidad de daño auditivo causado por la exposición a un entorno sonoro depende tanto del nivel como de la duración de la exposición.

El ruido es un sonido indeseable que puede interferir con las actividades humanas, la comunicación o el bienestar general. El ruido es un contaminante ambiental que puede afectar negativamente la salud humana y la calidad de vida, sin embargo, la percepción del ruido es subjetiva, ya que lo que una persona considera ruido, otra puede no considerarlo. Según Svantek

(2024), el ruido se mide dB SPL, utilizando diferentes tipos de procesamiento o ponderaciones para ajustar la medición a la percepción humana del sonido.

- Ponderación A: Se utiliza comúnmente para medir el ruido ambiental, ya que se adapta mejor a la sensibilidad del oído humano a los sonidos de frecuencia media, entre 500 Hz y 10 kHz. Los niveles de ruido con ponderación A se expresan en dBA.
- Ponderación C: Se utiliza para medir el sonido en entornos de alto nivel de ruido. Los niveles de ruido con ponderación C se expresan en dBC.
- Ponderación Z: No aplica ninguna ponderación de frecuencia a la medición SPL. Los niveles de ruido sin ponderación se expresan en dBZ.

En la medición del ruido se usan constantes de tiempo, las cuales se utilizan para capturar con precisión las variaciones en el nivel de presión del sonido.

- Rápida (F): Tiene una constante de tiempo de 125 milisegundos, lo que permite una respuesta de pantalla de reacción rápida.
- Lenta (S): Tiene una constante de tiempo de 1 segundo, lo que da una respuesta más lenta que ayuda a promediar las fluctuaciones de la pantalla.

Un medidor de sonido profesional también puede integrar la presión del sonido a lo largo del tiempo en forma de Nivel de Sonido Continuo Equivalente (Leq). El Leq es el promedio de energía del sonido durante un cierto período de tiempo y es útil para representar un nivel de energía de sonido equivalente a lo largo del tiempo.

$$L_{eq} = 10 \cdot \log_{10} \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt \right] \quad (2)$$

El SPL puede ponderarse en frecuencia (A, C, Z) y también en tiempo (rápido, lento). Sin embargo, el Leq es una medida promediada en el tiempo de los valores de presión sonora durante un periodo, ponderada en frecuencia, pero no en tiempo.

De acuerdo con NIOSH (1998), se recomienda un límite de exposición para el ruido ocupacional de 85 dBA durante 8 horas. Las exposiciones a este nivel o superiores se consideran peligrosas. NIOSH recomienda una tasa de cambio de 3 dB para calcular las exposiciones al ruido. Esto significa que, por cada aumento de 3 dB en el nivel de ruido, el tiempo de exposición permitido se reduce a la mitad. Por el contrario, si el tiempo de exposición es superior a 8 horas, el nivel de ruido permitido es más bajo. La tasa de cambio de 5 dB, utilizada por OSHA, es menos protectora que la de NIOSH. La tasa de cambio de 3 dB se basa en la hipótesis de la energía igual, que establece que cantidades iguales de energía sonora producirán cantidades iguales de daño auditivo, independientemente de cómo se distribuya la energía sonora en el tiempo.

La dosis de ruido es el porcentaje de exposición al ruido permisible que puede tener un trabajador. Una dosis de ruido del 100% o más significa que un trabajador ha excedido su límite diario de exposición al ruido. La dosis de ruido se puede expresar como la relación entre el tiempo de exposición C y el tiempo T permitido a ese nivel.

$$D = \frac{C}{T} \cdot 100\% \quad (3)$$

La expresión que nos permite calcular la dosis con diferentes niveles de ruido es:

$$D = \left( \frac{C_1}{T_1} + \frac{C_2}{T_2} + \frac{C_3}{T_3} + \dots + \frac{C_n}{T_n} \right) \cdot 100\% \quad (4)$$

Para calcular el tiempo máximo permitido en minutos a un determinado nivel de ruido (L), NIOSH nos proporciona la siguiente expresión matemática:

$$T_{min} = \frac{480}{2^{\frac{L-85}{3}}} \quad (5)$$

Ajustando los términos para la medición en horas, y operando la potencia en la fracción obtenemos:

$$T = 8 \cdot 2^{\frac{85-L}{3}} \quad (6)$$

Según Ministerio de Salud y Protección Social (2015) la exposición al ruido puede tener varios efectos negativos en la salud, incluyendo:

- Daño auditivo: La exposición a niveles de presión sonora superiores a 85 dB durante períodos prolongados puede causar daños auditivos, mientras que la exposición a niveles superiores a 120 dB puede causar daños auditivos inmediatos y permanentes. El ruido ocupacional es una causa importante de pérdida de audición.
- Hipertensión y enfermedad cardíaca isquémica: La evidencia científica sugiere que la exposición al ruido puede inducir hipertensión y enfermedad cardíaca isquémica.
- Molestia: El ruido puede causar molestia, estrés, pérdida de sueño, ansiedad, depresión y cambios en el comportamiento, lo que lleva a conductas agresivas y baja productividad.
- Efectos en la salud relacionados con el estrés: La exposición al ruido puede causar estrés, lo que puede provocar una serie de problemas de salud, como dolores de cabeza, problemas digestivos y un sistema inmunitario debilitado.

De acuerdo a Figueroa et al. (2012), la exposición al ruido puede afectar negativamente el aprendizaje, especialmente en los niños. Los estudios han demostrado que los niños expuestos a altos niveles de ruido pueden experimentar:

- Disminución del rendimiento escolar: Los niños en escuelas ubicadas en zonas ruidosas tienen un rendimiento menor en pruebas de concentración y comprensión lectora.
- Problemas de atención: El ruido puede interferir con la capacidad de los niños para concentrarse y prestar atención, lo que dificulta el aprendizaje.
- Problemas de comunicación: El ruido puede dificultar que los niños escuchen y comprendan a sus maestros y compañeros de clase.
- Estrés y ansiedad: El ruido puede aumentar los niveles de estrés y ansiedad en los niños, lo que puede afectar negativamente su aprendizaje y su bienestar general.

Un sensor de sonido es un transductor que convierte la energía acústica en energía eléctrica. Diferentes mecanismos de transducción tendrán distintos niveles de rendimiento en cuanto a sensibilidad, respuesta de frecuencia y ruido inherente.

- Sensores de condensador electret (ECM): El principio de funcionamiento de los ECM se basa en la variación de capacitancia entre un diafragma delgado cargado eléctricamente, llamado electret, y una placa posterior fija, formando un condensador. Cuando las ondas sonoras inciden sobre el diafragma, éste vibra, provocando un cambio en la distancia entre el diafragma y la placa posterior, y, por lo tanto, una variación en la capacitancia. Esta alteración en la capacitancia se convierte en una señal eléctrica mediante un preamplificador integrado, que muchas veces utiliza un transistor FET. Los ECM son muy utilizados en dispositivos electrónicos de consumo como teléfonos inteligentes,

computadores portátiles y auriculares debido a su bajo costo, tamaño reducido y amplia respuesta de frecuencia.

- **Sensores piezoeléctricos:** Los micrófonos piezoeléctricos se basan en el efecto piezoeléctrico, donde ciertos materiales, como el cuarzo o la cerámica, generan una carga eléctrica cuando se someten a estrés o deformación mecánica, como la causada por las ondas sonoras. Estos sensores se utilizan con frecuencia para detectar vibraciones y golpes, y poseen respuesta limitada en el rango de frecuencias.
- **Sensores MEMS (Micro-Electro-Mecánicos):** Los micrófonos MEMS son dispositivos miniaturizados fabricados utilizando técnicas de micro-mecanizado en obleas de silicio. Al igual que los ECM, incorporan un diafragma y una placa posterior que forman un transductor capacitivo. Se caracterizan por su tamaño compacto, bajo consumo de energía y alta fiabilidad, lo que los hace idóneos para dispositivos portátiles. Los micrófonos MEMS están disponibles tanto con salida analógica como digital, utilizando protocolos como I2S. Una ventaja de los micrófonos MEMS con salida digital (I2S) es su inmunidad al ruido y la posibilidad de lograr una mayor precisión. Los micrófonos MEMS suelen tener una respuesta de frecuencia plana que va desde los 80 Hz hasta los 10 kHz, y una buena relación señal-ruido para la evaluación del ruido ambiental.

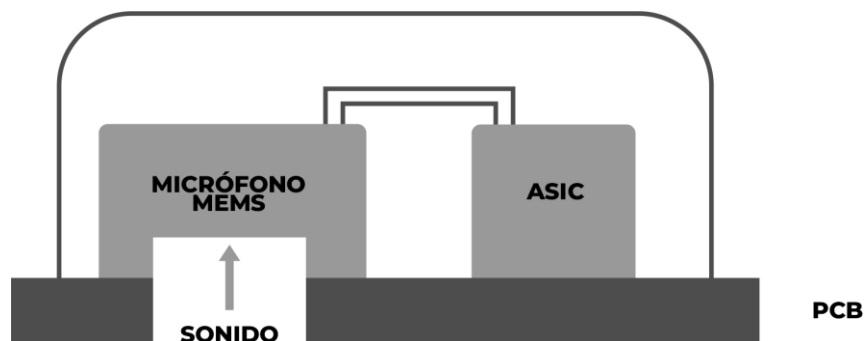
De acuerdo con el artículo de Ahmad (2021), el funcionamiento de un micrófono MEMS es el siguiente:

- Cuando la presión del sonido pasa a través de los orificios en la placa posterior, causa que el diafragma se mueva en proporción a la amplitud de la onda de sonido.
- El movimiento varía la distancia entre el diafragma y la placa posterior, lo que a su vez varía la capacitancia.

- Un dispositivo semiconductor convierte el cambio de la capacitancia en una señal eléctrica.
- El ASIC amplifica la señal eléctrica generada por el transductor y produce la salida del micrófono, ya sea en formato analógico diferencial o digital.

**Figura 2**

*Diagrama de un Sensor de Sonido MEMS*



*Nota.* En un micrófono MEMS se convierte el cambio de la capacitancia en una señal eléctrica.

Para monitorear en tiempo real los niveles de CO<sub>2</sub> y ruido en un aula, se hace necesario un sistema basado en IoT. Según Gokhale et al. (2018), el Internet de las Cosas (IoT) se refiere a la interconexión de diversos dispositivos físicos y objetos a través de Internet a nivel mundial. Este concepto fue introducido por primera vez por Kevin Ashton en 1999 y representa una evolución del Internet que va más allá de la simple comunicación entre personas y se extiende a la comunicación entre objetos. Sus principales características son:

- **Identidad única:** Cada objeto dentro de una red IoT posee una identidad única que permite su rastreo y control.
- **Sensores y conectividad:** Los objetos están equipados con sensores que recolectan datos del entorno y se conectan a Internet para compartirlos.

- **Comunicación M2M:** El IoT permite la comunicación máquina a máquina (M2M), que permite que los objetos puedan interactuar y tomar decisiones sin intervención humana.
- **Análisis de Datos:** Los datos recopilados por los objetos se pueden analizar para obtener información valiosa y mejorar la eficiencia de los sistemas.

Un sistema IoT se compone de diferentes capas que interactúan entre sí:

- **Capa de Sensores:** Esta capa se encarga de recopilar datos del entorno utilizando sensores como etiquetas RFID, nodos de sensores y otros dispositivos de detección.
- **Capa de Red:** Esta capa proporciona la infraestructura de comunicación que permite a los objetos conectarse e intercambiar datos. Se utilizan tecnologías de red como Wi-Fi, Bluetooth, redes móviles y otras.
- **Capa de Servicios:** Esta capa se encarga de procesar los datos recopilados y proporcionar servicios a los usuarios o aplicaciones. Se utilizan plataformas de computación en la nube para almacenar, analizar y gestionar los datos.
- **Capa de Interfaz:** Esta capa proporciona la interfaz para que los usuarios interactúen con el sistema IoT. Puede incluir aplicaciones móviles, paneles de control web y otras formas de acceder a la información y controlar los objetos.

### Figura 3

*Capas de un Sistema IoT*



*Nota.* Las capas de un sistema IoT están interconectadas.

ESP32 es uno de los componentes más usados para la recopilación y envío de datos en un sistema IoT. El ESP32 es un microcontrolador de bajo consumo, desarrollado por Espressif Systems. Está diseñado para dispositivos móviles, electrónica portátil y aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT). Se caracteriza por su alta integración de componentes y su conectividad Wi-Fi y Bluetooth integrada, ideal para una gran variedad de aplicaciones.

De acuerdo al datasheet oficial, el ESP32 integra Wi-Fi 802.11 b/g/n hasta 150 Mbps (2.4 GHz), con 4 interfaces virtuales. y modos Station y SoftAP. Soporta Bluetooth v4.2 BR/EDR y Bluetooth LE. Su CPU es Xtensa® LX6 de 32 bits hasta 240 MHz, con 448 KB ROM, 520 KB SRAM y 16 KB SRAM RTC.

Dispone de 34 GPIO programables, ADC de 12 bits, dos DAC de 8 bits, sensores táctiles, cuatro SPI, dos I2S, tres UART, un host SDIO, un esclavo SDIO/SPI, controlador de conteo de pulsos, interfaz Ethernet MAC (IEEE 1588), protocolo de comunicación serial TWAI® (CAN 2.0), RMT, PWM. Ofrece cinco modos de energía, con consumo en Deep-sleep de 10  $\mu$ A. En materia de seguridad incluye arranque seguro, cifrado flash y OTP de hasta 768 bits para clientes.

Espressif Systems ofrece una gran variedad de módulos, kits de desarrollo y recursos para ayudar a los desarrolladores a comenzar a usar el ESP32. Estos módulos incorporan componentes como oscilador de cristal, circuito de adaptación de antena, interfaz USB etc.

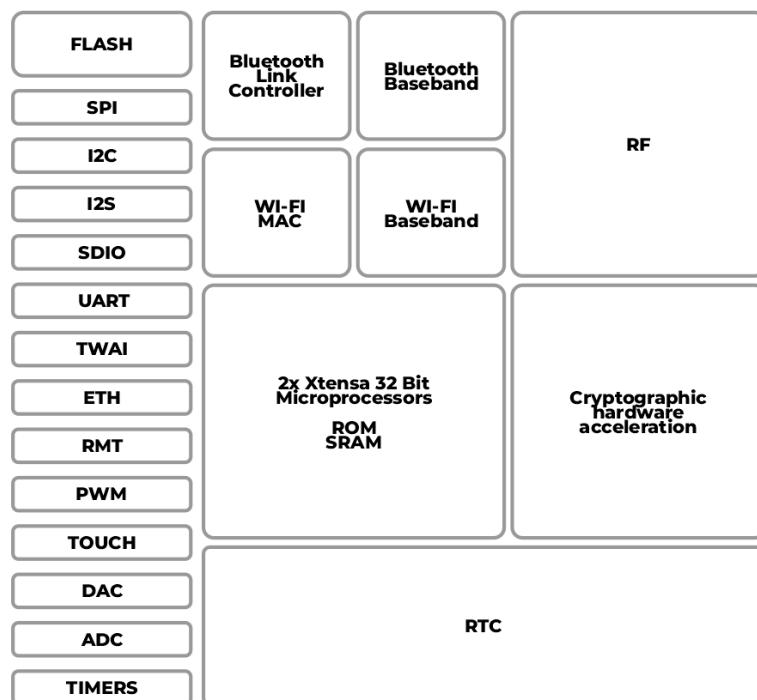
En un sistema IoT requerimos de un sistema que nos permita manipular a las capas de servicios e interfaz. Una de las más populares es ThingSpeak.

ThingSpeak es una plataforma en la nube especializada en aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT) que permite la recolección, visualización y análisis de datos en tiempo real. Su arquitectura facilita el desarrollo de prototipos y sistemas IoT al eliminar la necesidad de

configurar servidores locales o implementar software web personalizado, lo que la convierte en una herramienta muy útil para proyectos académicos y de investigación.

#### Figura 4

*Diagrama de Bloques de ESP32*



*Nota.* ESP32 es usado en la recopilación y envío de datos en un sistema IoT.

Su principal característica es la capacidad de integrarse con MATLAB, permitiendo la ejecución de scripts para procesamiento avanzado de datos (como filtrado, transformación o cálculos estadísticos) directamente en la plataforma. Esta funcionalidad facilita el análisis en tiempo real y la automatización de respuestas ante eventos específicos, ya sea en aplicaciones de monitoreo industrial o ambiental.

Para la comunicación con dispositivos, ThingSpeak ofrece APIs basadas en REST y MQTT, que son protocolos estándar en IoT. Las interfaces permiten la integración con microcontroladores como ESP32 o Arduino, sensores inalámbricos y aplicaciones móviles,

garantizando compatibilidad con varias tecnologías. La plataforma soporta la configuración de alertas mediante servicios externos como Twilio o Twitter, la cual es muy útil para notificaciones en sistemas de supervisión remota.

ThingSpeak tiene herramientas para generar gráficos temporales, mapas de geolocalización y dashboards personalizables. Estas representaciones pueden ser compartidas públicamente o restringidas a usuarios autorizados, la cual es una ventaja en proyectos colaborativos. También permite programar acciones automatizadas al detectar umbrales predefinidos en los datos, lo que amplía su utilidad en sistemas de control.

ThingSpeak es una excelente herramienta para proyectos IoT en etapas académicas o de prototipado inicial, ya que combina herramientas de análisis, compatibilidad con hardware común y bajo requisito de infraestructura, y la hacen adecuada para implementaciones en ingeniería electrónica.

Aunque ThingSpeak brinda herramientas en la nube para un sistema IoT, ante un fallo de red, se requiere un sistema que permita visualizar datos de manera local.

Un panel OLED es un diodo que se basa en una capa electroluminiscente formada por una película de componentes orgánicos. Estos componentes reaccionan a una estimulación eléctrica, generando y emitiendo luz por sí mismos. A diferencia de los LCDs, los OLEDs no requieren una iluminación trasera, ya que generan su propia luz, consumiendo así menos potencia.

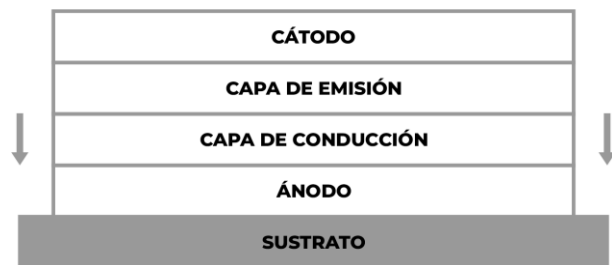
Existen diversas tecnologías OLED, clasificadas según el sistema utilizado para contener la capa electroluminiscente y el tipo de componentes orgánicos empleados. Algunos tipos comunes son SM-OLED (OLED de molécula pequeña), PLED (diodos emisores de luz de polímero), TOLED (OLED transparente) y SOLED (OLED apilado). Las pantallas OLED se

activan mediante una matriz que puede ser activa (AMOLED) o pasiva (PMOLED). El desarrollo de los OLED se intensificó a finales de los años 80, impulsado por el trabajo de Tang et al. del grupo Kodak.

Los paneles OLED ofrecen varias ventajas en comparación con otras tecnologías de visualización. Las capas orgánicas son más delgadas, ligeras y flexibles que las capas cristalinas de los LEDs o LCDs. Los OLEDs tienen campos de visión amplios, de alrededor de 170 grados. También ofrecen un mayor rango de colores, más contraste y brillo, y tiempos de respuesta menores. Sin embargo, los OLEDs también presentan inconvenientes, como su degradación por la humedad y su costo de fabricación, aunque se está investigando para solucionar estos problemas.

### Figura 5

*Diagrama de un Panel OLED*



*Nota.* Un panel OLED está formado por una película de componentes orgánicos.

Los OLEDs tienen aplicaciones en pantallas de televisión, ordenadores, dispositivos portátiles como teléfonos móviles y reproductores MP3, e indicadores de información o aviso. También se espera su uso en carteles de publicidad. Algunas tecnologías OLED tienen una estructura flexible, lo que permite desarrollar pantallas plegables e incluso integrarlas en ropa y tejidos. Se espera que los OLEDs sean la tecnología dominante para pantallas pequeñas en un

futuro cercano, gracias a sus excelentes tiempos de respuesta y bajo consumo de energía, lo que los hace ideales para dispositivos portátiles con aplicaciones de video.

Para controlar y gestionar la visualización en pantallas OLED pequeñas, se utiliza comúnmente el circuito integrado SSD1306. Este actúa como interfaz entre el microcontrolador y los píxeles de la pantalla OLED, permitiendo la visualización de texto, gráficos e imágenes.

Las pantallas OLED pueden usarse en aplicaciones de Internet de las Cosas debido a su bajo consumo de energía, tamaño compacto y capacidad para mostrar información visual de manera clara.

## Normatividad

### Normatividad sobre CO<sub>2</sub>

US EPA (2024) destaca la norma ASHRAE 62-2001, en su guía de calidad del aire para escuelas. Esta norma recomienda un límite de concentración de CO<sub>2</sub> de 700 ppm por encima de la concentración exterior. Este límite se establecía no sólo para evitar efectos de salud inmediatos, sino también para prevenir la acumulación de olores corporales y mejorar la comodidad percibida. Sin embargo, el documento ASHRAE 62-1-2016 no establece un límite específico de ppm para el CO<sub>2</sub>, eliminando el Apéndice Informativo D que previamente proporcionaba información sobre los niveles recomendados.

A pesar de que, en un nuevo documento, ASHRAE (2022) señala las limitaciones del CO<sub>2</sub> como indicador absoluto de la calidad del aire interior (CAI), su monitoreo sigue siendo valioso en entornos cerrados. Aunque las concentraciones de CO<sub>2</sub> principalmente indican la tasa de ventilación por persona y no abarcan otros contaminantes, este gas puede servir como una referencia útil para evaluar el nivel de ventilación y así contribuir a un entorno más saludable. Aunque no exista una relación concluyente sobre los efectos del CO<sub>2</sub> en la salud y el rendimiento, algunos estudios sugieren que concentraciones elevadas podrían afectar la función cognitiva. Monitorear el CO<sub>2</sub> también puede dar indicios sobre el riesgo de transmisión de enfermedades, particularmente en espacios con alta ocupación, donde una ventilación insuficiente puede incrementar este riesgo. ASHRAE (2022) recomienda buenas prácticas en la medición de CO<sub>2</sub> y su incorporación en estrategias de ventilación controlada, ya que si es bien utilizado puede ser una herramienta valiosa para mejorar la calidad ambiental en interiores.

Health Canada (2021) recomienda mantener niveles de CO<sub>2</sub> por debajo de 1000 ppm para proteger la salud en ambientes interiores, especialmente en lugares como hogares, escuelas y

guarderías, donde la calidad del aire afecta de manera significativa al bienestar. Si bien no se determina un umbral único para iniciar la ventilación, se reconoce que concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub> pueden señalar problemas de ventilación y la presencia potencial de otros contaminantes. Estudios revisados sugieren que exposiciones prolongadas a concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub> pueden asociarse con síntomas respiratorios y neurofisiológicos, y una disminución del rendimiento cognitivo. También se recomienda la ventilación adecuada, ya sea natural o mecánica, y el control de las fuentes internas de CO<sub>2</sub> para evitar acumulaciones.

Health Canada, en su apéndice C, muestra los estándares de diversos países que han establecido niveles recomendados de CO<sub>2</sub> en espacios interiores para asegurar una buena calidad de aire. Estados Unidos, Francia, Noruega, Alemania, Portugal, Corea y Japón recomiendan un rango entre 600 y 1000 ppm. Nueva Zelanda fija un límite de 1000 ppm para la ventilación en escuelas. La Unión Europea clasifica la calidad del aire interior en función de la concentración de CO<sub>2</sub>, por encima del nivel exterior: excelente (< 400 ppm), promedio (400-600 ppm), moderada (600-1000 ppm) y baja (> 1000 ppm). En España, la NTP 549 de España, recomienda un máximo de 1000 ppm para evitar molestias olfativas y lograr un ambiente confortable. En el Reino Unido, se recomienda un promedio diario de 1500 ppm para edificios escolares, con un máximo de 5000 ppm. Según Health and Safety Executive (2023) de Reino Unido, los niveles superiores a 1500 ppm en una habitación ocupada sugieren una ventilación deficiente que requiere atención.

En Bélgica, el límite para edificios residenciales, escolares y de oficinas es de 500 ppm. Alemania considera concentraciones de CO<sub>2</sub> de hasta 1000 ppm como inofensivas, entre 1000 y 2000 ppm como elevadas, y más de 2000 ppm como inaceptables. Finalmente, el Código

Nacional de Construcción de Finlandia (D2) establece un límite de 1200 ppm para edificios residenciales, escolares y de oficinas.

En Colombia, la normativa específica sobre concentraciones de CO<sub>2</sub> en espacios interiores es limitada y carece de directrices claras para ambientes educativos, lo cual se convierte en un reto importante para garantizar la calidad del aire en entornos escolares. Existen algunas normativas relacionadas con la calidad del aire en general y en contextos laborales, como el Decreto 1886 de 2015, que establece un límite permisible de 5000 ppm para jornadas laborales de 8 horas y 30000 ppm para exposiciones de corta duración en ambientes subterráneos. Sin embargo, estas no aplican directamente a aulas escolares. A su vez, la Resolución 2254 de 2017 regula contaminantes del aire ambiente, pero no especifica un límite para el CO<sub>2</sub>.

La normativa colombiana NTC 4595-4596, que regula el planeamiento y diseño de instalaciones escolares, se enfoca en crear ambientes de aprendizaje saludables y cómodos. Esta norma considera aspectos clave de la calidad ambiental en las aulas, como la comodidad térmica, acústica y visual, y muestra la importancia de una adecuada ventilación natural, especialmente en regiones cálidas, para mejorar la calidad del aire interior. También aboga por orientar y diseñar las aulas de manera que mejoren la ventilación natural y reduzcan la exposición solar excesiva. Asimismo, se sugiere el uso de materiales de construcción que favorezcan el confort térmico y promuevan un ambiente más saludable. Aunque la norma no establece un límite específico de CO<sub>2</sub> en el aire, reconoce la ventilación adecuada como un elemento esencial para mantener la calidad del aire, un aspecto complementado por la norma ASHRAE 62.1-2007, que ofrece un enfoque técnico para determinar tasas de ventilación en espacios interiores.

A pesar de esto, no existe un marco normativo que establezca límites adecuados para la concentración de CO<sub>2</sub> en espacios educativos en Colombia, lo que plantea una problemática en la implementación de estrategias de monitoreo y control del aire en las aulas, donde la ventilación suele estar restringida debido a cuestiones de seguridad y el diseño de los espacios.

### **Normatividad sobre Ruido**

En Estados Unidos, NIOSH (1998) establece que el límite recomendado para la exposición ocupacional al ruido es de 85 dBA como promedio de 8 horas, un valor revisado del límite inicial de 1972. Este estándar se compara con el de OSHA (2024) que permite un nivel de 90 dBA en promedio. NIOSH adopta un enfoque más preventivo al recomendar una tasa de cambio de 3 dB, frente a los 5 dB de OSHA, implicando que una reducción de 3 dB es necesaria al duplicarse el tiempo de exposición para evitar el riesgo. Ambos organismos acuerdan un límite máximo de 140 dB para ruidos impulsivos. También la CDC - Centros para el Control y Prevención de Enfermedades de Estados Unidos (2024) muestra en su guía la importancia de emplear medidas preventivas tanto en la administración como en el uso de equipos de protección personal para reducir la exposición al ruido en industrias de alto riesgo como minería y manufactura, mostrando que empleadores y trabajadores deben colaborar para minimizar el riesgo de daño auditivo en el lugar de trabajo.

En Colombia, la Resolución 8321 de 1983 del Ministerio de Salud se enfoca en la conservación de la audición y el bienestar de las personas. Esta normativa establece límites sonoros en diferentes zonas (residenciales, comerciales, industriales y de tranquilidad) tanto en horarios diurnos como nocturnos. También regula la emisión de ruido de fuentes específicas, como vehículos y establecimientos comerciales, y exige a los responsables que prevengan emisiones que puedan perjudicar la salud y el bienestar público.

Por su parte, la Resolución 1792 de 1990, promulgada por los Ministerios de Trabajo y Seguridad Social y Salud, fija límites de exposición ocupacional al ruido con el propósito de proteger a los trabajadores. Estos valores permisibles están diseñados para prevenir efectos negativos en la salud auditiva de los empleados y asegurar condiciones de trabajo más seguras. Estos pueden ser observados en la Tabla 1.

El Decreto 1886 de 2015, por el cual se establece el Reglamento de Seguridad en las Labores Mineras Subterráneas en su Artículo 215, especifica los niveles de presión sonora permitidos en ambientes laborales y la duración máxima de exposición segura a cada nivel sonoro, conforme a lo establecido en la Resolución 1792 de 1990.

**Tabla 1**

*Límites de Exposición Ocupacional al Ruido*

Niveles De Presión Sonora dBA	Máxima Duración De Exposición (Horas)
85	8
90	4
95	2
100	1
105	1/2
110	1/4
115	1/8

*Nota.* Tomado de Resolución 1792 de 1990. Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (s.f.).

La Resolución 627 de 2006, emitida por el Ministerio de Ambiente, establece los límites de emisión y de ruido ambiental en diferentes sectores. Su objetivo es proteger la salud pública clasificando el ruido en dos tipos: emisión, que proviene de fuentes específicas, y ambiental, que

se refiere a la presión sonora en un lugar determinado. La resolución define límites máximos permisibles para cada caso, requiere la medición del ruido y la elaboración de mapas sonoros en municipios con más de 100,000 habitantes, e impone sanciones en caso de incumplimiento.

La Resolución 0627 de 2006 menciona los colegios y escuelas, clasificándolos en el Sector B: Tranquilidad y Ruido Moderado, con un estándar máximo de 65 dBA durante el día. Sin embargo, no especifica directamente la medición dentro de un aula de clases. Esta resolución está orientada principalmente a la medición del ruido ambiental en Colombia, como calles, zonas verdes, parques, áreas residenciales, comerciales e industriales

Para efectos de medición del ruido en interiores podemos acogernos a la Resolución 8321 de 1983 del Ministerio de Salud, de acuerdo a los artículos 18,19 y 47.

Los artículos 18 y 19 establecen los procedimientos para medir el ruido ambiental y en interiores.

- La medición de niveles de presión sonora se realiza con un medidor calibrado, con filtro A y respuesta rápida, durante al menos 15 minutos de forma continua.
- Se debe usar un protector contra el viento cuando sea necesario.
- Para medir el ruido dentro de viviendas, se toma la muestra en la casa más cercana a la fuente, a 1.2 m del piso y 1.5 m de las paredes.
- Se hacen mediciones en 3 puntos separados por 0.5 m y se toma el nivel promedio.
- Las mediciones en sitios de trabajo deben determinar la exposición al ruido.
- Se realizan a la altura del oído, con un medidor calibrado y el micrófono a más de 0.5 m de la persona expuesta.
- Si el ruido supera los 90 dBA, se hace un análisis de frecuencia.

## **Metodología**

El objetivo principal de este proyecto es diseñar un prototipo de bajo costo basado en ESP32 para el monitoreo en tiempo real de los niveles de ruido y CO<sub>2</sub> en un aula. Para ello, se recopilarán y analizarán datos numéricos sobre estas variables en su estado natural, sin intervenir en ellas, utilizando una metodología cuantitativa de carácter descriptivo. La recolección de datos se realizará en un período definido, permitiendo observar la evolución de los parámetros monitoreados.

### **Características de la Metodología**

- **Objetivo:** Aplicado. Se enfoca en resolver problemas específicos que afectan a estudiantes y docentes.
- **Enfoque:** Cuantitativo. Se recopilarán y analizarán datos numéricos sobre los niveles de ruido (dBA) y la concentración de CO<sub>2</sub> (ppm).
- **Profundidad:** Descriptiva. El objetivo principal es medir y caracterizar los niveles de ruido y CO<sub>2</sub> en el aula sin manipular las variables. Se busca describir cómo se comportan estas variables en un entorno real.
- **Manipulación de variables:** No experimental. El sistema de monitoreo registrará las variables existentes (ruido y CO<sub>2</sub>) sin manipularlas o intentar modificarlas.
- **Tipo de análisis:** Descriptivo. Se analizarán los datos recogidos para identificar comportamientos, rangos y situaciones críticas, sin establecer generalizaciones ni comprobación de hipótesis.
- **Temporalidad:** Transversal. La recolección de datos se llevará a cabo durante un período de 2 semanas, lo que permitirá observar la evolución de las variables

## **Desarrollo de la Metodología**

Para lograr el objetivo general y los objetivos específicos planteados, la investigación se desarrolla en cinco fases principales:

### ***Fase 1: Investigación y Análisis de Tecnologías Existentes***

En esta fase se lleva a cabo un análisis comparativo de sensores de CO<sub>2</sub> y sonido, plataformas IoT y servicios de notificación, evaluando aspectos como precisión, costo y compatibilidad con placa de desarrollo. Finalmente, se seleccionan los componentes y tecnologías más adecuados según criterios predefinidos.

### ***Fase 2: Desarrollo del Prototipo del Sistema de Monitoreo***

En esta etapa se diseña el esquema del circuito y se seleccionan los componentes necesarios. Se procede con la soldadura y montaje del circuito integrado, conectando los sensores con la placa de desarrollo. Posteriormente, se desarrolla y prueba el código para el microcontrolador, incluyendo la calibración de los sensores para garantizar mediciones precisas.

### ***Fase 3: Integración con la Plataforma en la Nube***

Se configura una cuenta y se crean los canales necesarios en plataforma en la nube para la recepción y visualización de los datos. Se programa placa de desarrollo para la correcta transmisión de los valores medidos a la plataforma en la nube. Finalmente, se realizan pruebas de transmisión de datos y ajustes en la visualización mediante gráficos para mejorar la interpretación de la información recopilada.

### ***Fase 4: Desarrollo y Prueba de Notificaciones Automáticas***

En esta fase se desarrollan y prueban scripts para la detección de umbrales críticos de CO<sub>2</sub> y ruido. Se configura la API del servicio de mensajería para el envío de alertas automáticas cuando los valores excedan los límites preestablecidos. Se realizan pruebas funcionales del

sistema de notificación y se ajustan los umbrales de activación según los resultados obtenidos en entornos de prueba.

### ***Fase 5: Pruebas de Campo***

En esta fase se realizarán pruebas dentro del aula de gamificación durante dos semanas, con el objetivo de obtener datos e identificar patrones en la detección de niveles de ruido y CO<sub>2</sub>, y el desempeño del sistema de notificaciones. Dado que el sistema podría requerir calibración adicional, los resultados se considerarán preliminares. Al final se documentarán los hallazgos y se propondrán recomendaciones para futuras mejoras.

## **Desarrollo del Proyecto**

En este capítulo se explica cómo se llevó a cabo el desarrollo del proyecto, siguiendo las fases de la metodología planteada en la investigación, y cumpliendo con los objetivos específicos del proyecto. A lo largo de este capítulo se describen las decisiones tomadas, los retos encontrados y los ajustes realizados para mejorar el funcionamiento del sistema. También se presentan los resultados preliminares obtenidos durante las pruebas.

### **Fase 1: Investigación y Análisis de Tecnologías Existentes**

#### ***Comparación de Sensores de CO<sub>2</sub> y Ruido***

Para la selección del sensor de CO<sub>2</sub> adecuado para este proyecto, se realizó un análisis comparativo entre las principales tecnologías disponibles en el mercado. Como se mencionó en el marco conceptual, los sensores de CO<sub>2</sub> se pueden clasificar en cuatro tipos principales: NDIR, electroquímicos, semiconductores y de combustión catalítica.

Como se muestra en la tabla 2, y según Renke (2024), cada uno de estos sensores presenta ventajas y desventajas que influyen en su aplicabilidad según el contexto de este proyecto. La tabla 3 muestra una comparación de las características más relevantes de varios sensores comerciales, teniendo en cuenta criterios como rango, precisión y voltaje de operación.

Dado que el objetivo del sistema es realizar un monitoreo continuo en entornos escolares, se requiere un sensor que ofrezca precisión, estabilidad y una buena relación costo-beneficio a largo plazo.

Los sensores electroquímicos tienden a tener un rango de medición más amplio pero una precisión menor, presentan una vida útil reducida y susceptibilidad a interferencias los hacen menos adecuados para un monitoreo prolongado. Los sensores MOX suelen ser sensibles a una variedad de gases, y su salida puede verse influenciada por la temperatura y la humedad.

**Tabla 2***Comparativa de Tipos de Sensores CO<sub>2</sub>*

Categoría	Características	Ventajas	Desventajas
NDIR	Mide la absorción de luz infrarroja a una longitud de onda específica. Utiliza emisores y detectores ópticos.	Alta precisión, estabilidad a largo plazo, amplio rango de medición.	Costo elevado, mayor tamaño y consumo energético en algunos modelos.
Electroquímicos	Convierten la concentración de CO <sub>2</sub> en una señal eléctrica mediante una reacción electroquímica en el sensor.	Compactos, bajo consumo de energía, adecuados para dispositivos portátiles.	Vida útil limitada, requieren calibración periódica y pueden ser sensibles a condiciones ambientales.
MOX	Utilizan materiales de óxido metálico. La interacción con el CO <sub>2</sub> provoca una reacción de oxidación-reducción que modifica la resistencia del sensor.	Económicos, respuesta rápida y fáciles de integrar en sistemas compactos.	Menor precisión, sensibles a variaciones de temperatura y humedad, y posible interferencia de otros gases.
Combustión Catalítica	Emplean un recubrimiento catalítico sobre un resistor; a temperaturas determinadas, el gas se quema en la superficie generando cambios medibles.	Respuesta rápida y adecuados para detectar gases inflamables o cambios abruptos en la concentración.	Mayor consumo energético por calentamiento, mantenimiento del catalizador y menor precisión en bajas concentraciones. Uso industrial

*Nota.* Elaborado a partir de CO<sub>2</sub> Sensors: Definition, Types, and How to Choose?. Rankee.

(2024). <https://www.renkeer.com/co2-sensors-types-and-choose/>

La medición de algunos de estos sensores se basa en la detección de compuestos orgánicos volátiles (VOC) afectando la exactitud en entornos donde se requiera una lectura específica de CO<sub>2</sub>.

**Tabla 3***Comparativa de Sensores CO<sub>2</sub> Comerciales*

Sensor	Tipo	Rango	Precisión	Voltaje	Consumo (mW) <sup>g</sup>	Precio (US) <sup>h</sup>
MH-Z19B <sup>a</sup>	NDIR	0 – 5,000 ppm	±50 ppm + 3%	4.5 - 5.5V	300	~\$28
SCD41 <sup>b</sup>	NDIR	400 – 5,000 ppm	±(50 ppm + 2.5–5%)*	2.4 - 5.5 V	10-50	~\$20
MG-811 <sup>c</sup>	Electroquímico	0 – 10,000 ppm	±100 ppm @ 400 ppm	3.7 - 5 V	1000	~\$15
ENS160 <sup>d</sup>	MOX	400 – 65,000 eCO <sub>2</sub>	---	1.7 - 1.98V	58	~\$8
MQ135 <sup>e</sup>	MOX	10 – 1,000 ppm	---	5V	950	~\$4
CCS811 <sup>f</sup>	MOX	400 – 8,192 eCO <sub>2</sub>	---	1.8 - 3.3 V	1-46	~\$8

*Nota.* <sup>a</sup> Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd. (2016). <sup>b</sup> Sensirion AG. (2024).

<sup>c</sup> DFRobot. (s.f.). <sup>d</sup> ScioSense (2022). <sup>e</sup> Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd.

(2015). <sup>f</sup> AMS. (2016). <sup>g</sup> Calculado sobre un voltaje de 3.3V. <sup>h</sup> Los precios aproximados fueron tomados de <https://es.aliexpress.com/> y están sujetos a cambios.

Los sensores de combustión catalítica, están diseñados principalmente para la detección de gases inflamables y no son la opción estándar para la monitorización directa de CO<sub>2</sub> ambiental con microcontroladores. Podrían ser relevantes en escenarios muy específicos donde se infieren los niveles de CO<sub>2</sub> a partir de la combustión de otros gases. Considerando estos criterios, los sensores NDIR son la mejor opción debido a:

- Su alta precisión y selectividad para medir CO<sub>2</sub> sin interferencias de otros gases.
- Su estabilidad a largo plazo, reduciendo la necesidad de calibraciones frecuentes.

- Su capacidad de compensar variaciones de temperatura y humedad, condiciones que pueden cambiar dentro de un aula.

Dentro de la categoría NDIR tenemos como referencia a los sensores MH-Z19B y SCD41. El MH-Z19B tiene facilidad de integración, aunque su mayor consumo energético lo hacen menos adecuado para mediciones continuas. Por otra parte, el SCD41, a pesar de tener un costo inicial mayor, brinda mayor estabilidad y precisión, debido a su tecnología NDIR fotoacústica, además de bajo consumo y calibración mínima.

Según Mariete (2023), el MH-Z19B presenta problemas técnicos importantes. Aunque su rango es adecuado y su precisión teórica es aceptable, la exactitud se degrada significativamente por encima de 2000 ppm. También requiere una alimentación muy estable entre 4.5 y 5.5 V, y su calibración puede resultar inestable en entornos con ventilación irregular. Por estas razones, se seleccionó el sensor SCD41 de la empresa Sensirion. Este sensor es ideal para aulas, con un rango apropiado, alta precisión y estabilidad. Aunque su costo inicial es mayor, su bajo consumo y calibración mínima reducen los costos operativos, y su interfaz I2C facilita su integración.

### **Figura 6**

*Sensor de CO<sub>2</sub>: SCD41*



*Nota.* Adaptado de SCD4x Datasheet. Sensirion. (2023). [https://sensirion.com/media/documents/48C4B7FB/66E05452/CD\\_DS\\_SCD4x\\_Datasheet\\_D1.pdf](https://sensirion.com/media/documents/48C4B7FB/66E05452/CD_DS_SCD4x_Datasheet_D1.pdf)

**Tabla 4***Comparativa de Tipos de Sensores de Sonido*

Tipo	Características	Ventajas	Desventajas
Condensador Electret (ECM)	Variación de capacitancia entre diafragma y placa, amplificada mediante un FET.	Bajo costo, tamaño reducido, amplia respuesta de frecuencia, fácil integración.	Calidad y ruido del preamplificador pueden variar; menos robustos en entornos ruidosos.
MEMS	Transductor capacitivo miniaturizado en silicio, con salida analógica o digital (I2S).	Bajo consumo, alta estabilidad, salida digital robusta, excelente relación señal-ruido, compactos.	Sensibilidad ligeramente inferior a algunos ECM en entornos de alta fidelidad.
Piezoeléctrico	Generación de carga eléctrica mediante el efecto piezoeléctrico al sufrir vibraciones.	Muy bajo consumo, muy económico.	Respuesta limitada en frecuencia. Son más adecuados para detectar impactos o vibraciones.

*Nota.* Elaborado a partir de Tech Forum: Microphone Sound Sensors: Types, Functionality, and Applications. DigiKey. (2024). [https://forum.digikey.com/t/microphone-sound-sensors-types-functionality-and-applications/44389\\_choose/](https://forum.digikey.com/t/microphone-sound-sensors-types-functionality-and-applications/44389_choose/)

La tabla 5 muestra una comparación de las características más relevantes de varios sensores de sonido comerciales, teniendo en cuenta criterios como rango, sensibilidad y voltaje de operación. Los micrófonos ECM tienen buena respuesta de frecuencia y son de bajo costo, pero pueden sufrir de variaciones en la calidad del preamplificador y menor robustez en entornos ruidosos. Los sensores piezoeléctricos, aunque son económicos y de muy bajo consumo, son más adecuados para detectar impactos o vibraciones. Los micrófonos MEMS tienen bajo consumo, alta estabilidad, salida digital y un rendimiento consistente, lo que resulta ideal para aplicaciones de monitoreo en aulas.

**Tabla 5***Comparativa de Sensores de Sonido Comerciales*

Sensor	Tipo	Rango	Sensibilidad	SNR (dBA)	Voltaje	Consumo (mW) <sup>g</sup>	Precio (USD) <sup>h</sup>
KY-037 <sup>a</sup>	ECM	50 Hz – 20 kHz	-42 ±3 dB	-	3.3 - 5 V	20	~\$3
MAX9814 <sup>b</sup>	ECM	20 Hz – 20 kHz	-44 ±2 dB	60	2.4 – 5 V	10	~\$5
MAX4466 <sup>c</sup>	ECM	20 Hz – 20 kHz	-44 ±2 dB	60	2.4 – 5 V	0.1	~\$3
INMP441 <sup>d</sup>	MEMS	60 Hz – 15 kHz	-26 dBFS	61	1.6 - 3.6 V	5	~\$2
SPH0645 <sup>e</sup>	MEMS	100 Hz – 10 kHz	-26 dBFS	65	1.6 - 3.6 V	2	~\$4
SPW2430 <sup>f</sup>	MEMS	100 Hz – 10 kHz	-42 dBFS	59	1.5 -3.6 V	0.27	~\$5

*Nota.* <sup>a</sup> ArduinoModules.info. (s.f.). <sup>b</sup> Maxim Integrated. (2009). <sup>c</sup> Maxim Integrated Products. (2001). <sup>d</sup>InvenSense Inc. (2014). <sup>e</sup> Knowles. (s.f.). <sup>f</sup> Knowles Electronics. (2014). <sup>g</sup> Calculado sobre un voltaje de 3.3V. <sup>h</sup> Los precios aproximados fueron tomados de <https://es.aliexpress.com/> y están sujetos a cambios.

**Figura 7**

*Sensor de sonido: INMP441*



*Nota.* Adaptado de Módulo de micrófono MEMS INMP441. AliExpress. (2025).

<https://es.aliexpress.com/item/1005006867450927.html>

Dentro de la categoría MEMS, el sensor INMP441 se destaca por su respuesta de frecuencia, excelente relación señal-ruido, bajo consumo y bajo costo. Por lo anterior, se concluye que la tecnología MEMS es la opción óptima y el INMP441 es la mejor elección de sensor para el proyecto.

### ***Selección de Tarjeta de Desarrollo***

Para el monitoreo de CO<sub>2</sub> y ruido en entornos escolares, se requiere una placa de desarrollo capaz de procesar datos en tiempo real, comunicarse con la nube y operar de manera eficiente en términos de capacidad de procesamiento y costos.

Dentro de las opciones más populares del mercado se encuentran, ESP32-C3 Super Mini, ESP32-DevKitC y ESP32-S3-DevKitC-1. La tabla 6 muestra una comparativa de sus principales características. Las tres opciones comparten la tecnología del ESP32 en distintas versiones y diferentes placas de desarrollo. También tienen en común la conectividad Wi-Fi y Bluetooth, interfaces I2C e I2S que facilitan la conexión con los sensores, regulador de voltaje integrado, y puerto USB para alimentación y programación.

La placa ESP32-C3 Super Mini tiene un tamaño compacto y un costo accesible, sin embargo, tiene menor frecuencia de CPU, un solo núcleo y menor cantidad de GPIO.

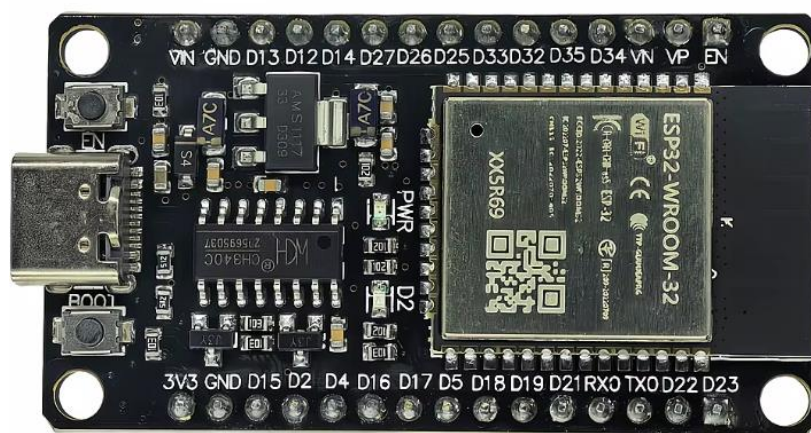
Por otro lado, la placa ESP32-S3-DevKitC-1 tiene un excelente rendimiento y potencial en aplicaciones de inteligencia artificial, sin embargo, tiene un mayor precio.

Dentro de las opciones que se analizaron, se seleccionó la tarjeta de desarrollo ESP32 - DevKitC debido a que tiene prestaciones equilibradas entre precio y capacidad de procesamiento, además de una gran comunidad de desarrollo y facilidad de adquisición en el mercado.

**Tabla 6***Comparativa de Placas de Desarrollo ESP32*

Placa	MCU	Frecuencia CPU	Dimensiones	Precio (USD) <sup>d</sup>	Ventajas	Desventajas
ESP32-C3 Super Mini <sup>a</sup>	ESP32-C3 RISC-V Single Core	160 MHz	22.5 x 18 mm	~5	Tamaño compacto Seguridad Menor Precio	Cantidad de GPIOs
ESP32 - DevKitC <sup>b</sup>	ESP32 Xtensa LX6 Dual Core	240 MHz	54.4 x 27.9 mm	~7	Comunidad Compatibilidad	Tamaño
ESP32-S3-DevKitC-1 <sup>c</sup>	ESP32-S3 Xtensa LX7 Dual Core	240 MHz	64 x 25.4 mm	~10	Soporte para redes neuronales USB nativo 8 MB de PSRAM	Mayor costo y tamaño

*Nota.* <sup>a</sup> ESPBoards. (s.f.). <sup>b</sup> Espressif Systems. (s.f. -a). <sup>c</sup> Espressif Systems. (s.f. -b). <sup>d</sup> Los precios aproximados fueron tomados de <https://es.aliexpress.com/> y están sujetos a cambios.

**Figura 8***Tarjeta de Desarrollo: ESP32 - DevKitC*

*Nota.* Adaptado de Imagen de ESP32 – DevKitC. AliExpress. (2025).

<https://es.aliexpress.com/item/1005006516529521.html>

### *Selección de Plataformas IoT*

Para el monitoreo de CO<sub>2</sub> y ruido, se requiere una plataforma IoT que permita la recepción, almacenamiento, visualización y análisis de los datos en tiempo real.

Se analizaron 5 plataformas populares del mercado, y se condensaron tanto ventajas como desventajas en la tabla 7.

Después de analizar las opciones del mercado, ThingSpeak se identifica como la mejor alternativa para este proyecto, frente a las demás alternativas del mercado debido a las siguientes razones:

- Optimizado para IoT: Diseñado específicamente para la recopilación, almacenamiento y análisis de datos de sensores.
- Integración nativa con MATLAB: Permite realizar análisis y procesamiento de datos en la nube sin necesidad de software adicional.
- Fácil configuración: Compatible con ESP32 y otros microcontroladores sin necesidad de configuraciones complejas.
- Visualización en tiempo real: Permite graficar datos
- Gratuito para proyectos pequeños: La versión gratuita es suficiente para un sistema de monitoreo como el del proyecto.
- Mensajes/año: La versión gratuita ofrece 3 millones de mensajes/año que equivalen a 8219 mensajes/día, o 342 mensajes/hora, lo cual es suficiente para las necesidades de este proyecto.

**Tabla 7***Comparativa de Plataformas IoT*

Plataforma	Mensajes/año Versión gratuita <sup>f</sup>	Ventajas	Desventajas
Firebase <sup>a</sup>	---	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Integración con apps móviles y web.</li> <li>- Soporte para bases de datos en tiempo real.</li> <li>- Escalabilidad con respaldo de Google.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No optimizada para IoT.</li> <li>- Requiere configuración adicional para microcontroladores.</li> <li>- No ofrece herramientas específicas para sensores sin desarrollo extra.</li> </ul>
AWS IoT Core <sup>b</sup>	500.000	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta seguridad y cifrado.</li> <li>- Capacidad de escalar con miles de dispositivos.</li> <li>- Integración con otros servicios de AWS.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Costos elevados.</li> <li>- Complejidad en la configuración.</li> <li>- Requiere conocimientos avanzados en la nube.</li> </ul>
Blynk <sup>c</sup>	360.000	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fácil configuración y uso.</li> <li>- Soporte nativo para ESP32.</li> <li>- Interfaz gráfica personalizable.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Versión gratuita con limitaciones.</li> <li>- No permite análisis avanzados sin suscripciones.</li> <li>- Dependencia de la infraestructura.</li> </ul>
Ubidots <sup>d</sup>	---	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Excelente visualización de datos.</li> <li>- API bien documentada.</li> <li>- Compatible con múltiples dispositivos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Costos altos en planes avanzados.</li> <li>- Versión gratuita por 30 días</li> </ul>
ThingSpeak <sup>e</sup>	3.000.000	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Optimizado para IoT.</li> <li>- Integración con MATLAB.</li> <li>- Versión gratuita suficiente para el proyecto.</li> <li>- Fácil integración con ESP32.</li> <li>- Visualización y análisis de datos en tiempo real.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Límite de datos en la versión gratuita.</li> <li>- Menos opciones de personalización en comparación con otras plataformas.</li> </ul>

*Nota.* <sup>a</sup> Google. (s.f.). <sup>b</sup> Amazon Web Services, Inc. (s.f.). <sup>c</sup> Blynk. (s.f.). <sup>d</sup> Ubidots. (s.f.).

<sup>e</sup>ThingSpeak (s.f.). <sup>f</sup>Los precios, planes y tarifas están sujetos a cambios.

***Selección de Servicios de Notificación***

Para el monitoreo de CO<sub>2</sub> y ruido, se requiere un servicio de notificación instantáneo que alerte al docente cuando se alcancen valores críticos. Por tal motivo se hace la comparativa de servicios de notificación más populares del mercado en la tabla 8.

**Tabla 8***Comparativa de Servicios de Notificación*

Servicio	Tipos de Notificación	Precio (USD) <sup>e</sup>
CallMeBot <sup>a</sup>	WhatsApp, Telegram, Signal, FB (Texto), Telegram (Voz)	Gratis (Personal)
Telegram <sup>b</sup>	Texto, Voz (bot)	Gratis (API)
TextMeBot <sup>c</sup>	WhatsApp	\$1 mensual
Twilio <sup>d</sup>	Email, SMS, MMS, Push, WhatsApp	\$0.005 por mensaje

*Nota.* <sup>a</sup>CallMeBot. (s.f.). <sup>b</sup>Telegram Core. (s. f.). <sup>c</sup>TextmeBot. (s. f.). <sup>d</sup>Twilio. (s.f.). <sup>e</sup>Los precios, planes y tarifas están sujetos a cambios.

Con base en esta comparación, CallMeBot es la opción ideal para este proyecto, ya que permite notificar a través de WhatsApp de forma gratuita, lo que es fundamental en este proyecto de bajo costo. WhatsApp es la aplicación de mensajería más utilizada a nivel mundial y se integra de manera natural en el uso diario de los docentes, en comparación con otros canales como Telegram o email, que pueden no ser tan accesibles o conocidos.

***Selección de Pantalla de Visualización de Datos***

Un tamaño reducido de pantalla, hará que las dimensiones del prototipo final sean menores, y como consecuencia, más barato de fabricar. En la tabla 9 se hace la comparativa de paneles de visualización para proyectos electrónicos compactos.

**Tabla 9***Comparativa de pantallas de visualización*

Modelo	Tecnología	Resolución	L x A x H (mm)	Consumo (mW) <sup>e</sup>	Precio (USD) <sup>f</sup>
SSD1306 128x32 <sup>a</sup>	OLED	128 x 32	30 x 11.5 x 1.45	~60 mW	~2
SSD1306 128x64 <sup>b</sup>	OLED	128 x 64	27 x 27 x 3	~60 mW	~3.5
HD44780 16x2 <sup>c</sup>	LCD	16 caracteres x 2	80 x 36 x 11	~200 mW	~2
HD44780 20x4 <sup>d</sup>	LCD	20 caracteres x 4	98 x 60 x 14	~200 mW	~3

*Nota.* <sup>a</sup> Vishay. (2017). <sup>b</sup> Vishay. (s.f.). <sup>c</sup> Joy-IT. (2022). <sup>d</sup> Joy-IT. (2024). <sup>e</sup> Calculado sobre un voltaje de 3.3V. <sup>f</sup> Los precios tomados de <https://es.aliexpress.com/> están sujetos a cambios.

Después de comparar, se concluye que la pantalla OLED SSD1306 128x32 tiene bajo consumo igual que las demás pantallas, sin embargo, tiene tamaño más reducido y precio accesible, lo que la convierte en la opción ideal para integrar en el proyecto.

**Figura 9***Pantalla OLED 128X32*

*Nota.* Adaptado de Pantalla OLED 128X32 SSD1306. AliExpress. (2025).

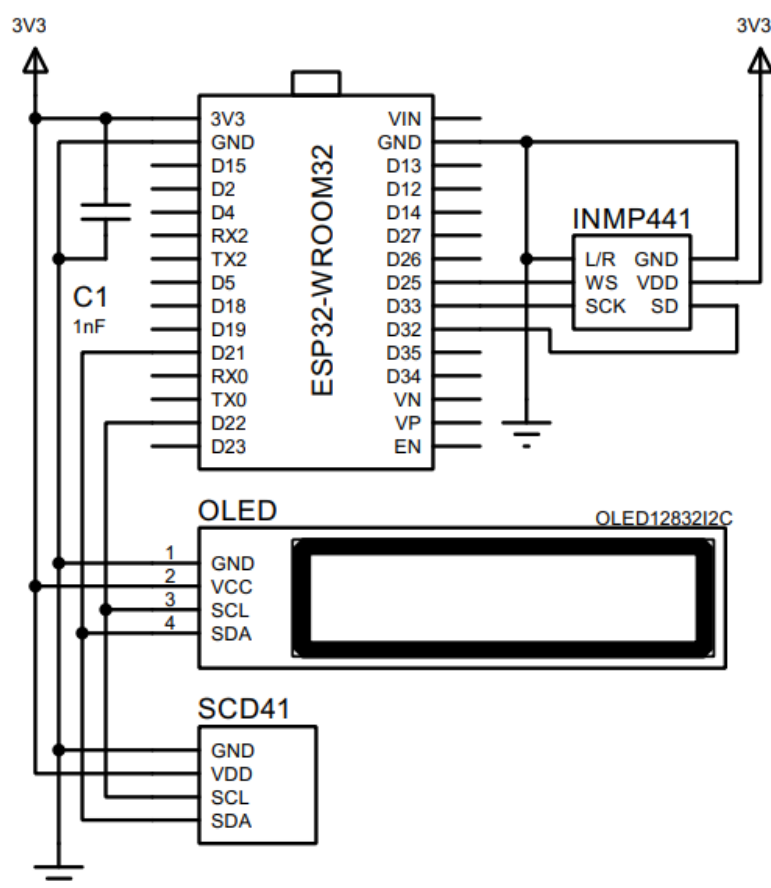
<https://es.aliexpress.com/item/1005008476201706.html>

## Fase 2: Desarrollo del Prototipo del Sistema de Monitoreo

### Diseño del Circuito

Figura 10

Diseño Esquemático del Sistema de Monitoreo en Proteus



*Nota.* Se usa I2C para comunicación con SCD41 y OLED, e I2S para recibir datos de INMP441.

Para el diseño del circuito, se han elegido los siguientes componentes:

- ESP32 WROOM32: seleccionado por su conectividad Wi-Fi y Bluetooth, capacidad de procesamiento y compatibilidad con sensores.
- Sensor de CO<sub>2</sub> SCD41: Permite la medición de dióxido de carbono mediante tecnología NDIR. Se comunica con el ESP32 a través del protocolo I2C.

- Sensor de ruido INMP441: Permite la captura del nivel de sonido ambiental a través del protocolo I2S.
- Pantalla OLED SSD1306 (128x32): Se elige por su bajo consumo y dimensiones compactas para la visualización en tiempo real de los datos. Se comunica con el ESP32 a través del protocolo I2C.
- Condensador 100nF: El prototipo se alimentará a través del puerto USB tipo C del ESP32. Del regulador de la placa se obtienen 3.3V para alimentar a los sensores y la pantalla OLED. Sin embargo, se añadirá un condensador de 100nF entre la salida del regulador de 3.3V y tierra para filtrar ruido, y estabilizar variaciones de voltaje.

Según lo anterior se procede a realizar el diseño del esquemático en el software Proteus.

Se usan los pines I2C por defecto, GPIO 22 (SCL) y GPIO 21 (SDA), y los GPIO 25, GPIO 31, GPIO 32, para la comunicación I2S.

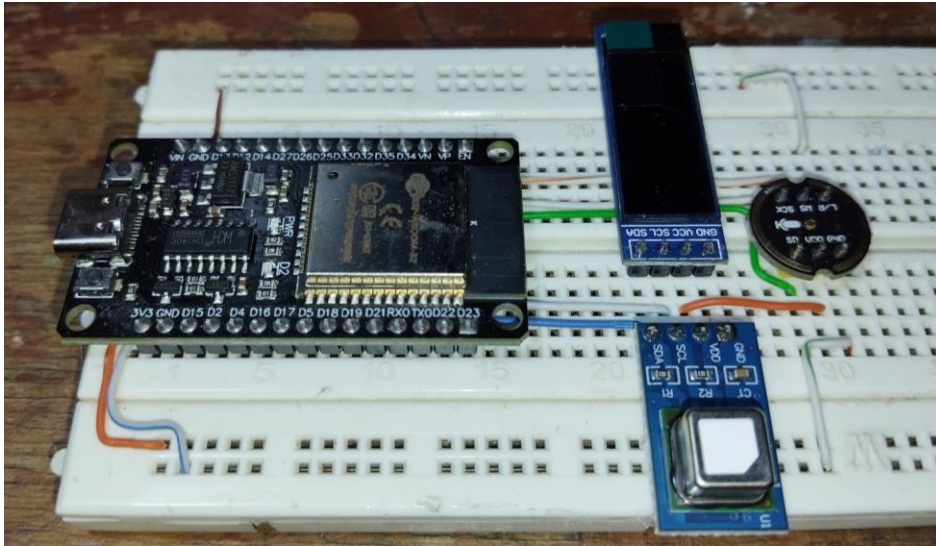
La suma del consumo máximo de INMP441, SCD41, OLED 128X32 y ESP32 a 3,3V es de 1,021W. El doble de este valor (~2W) nos permite obtener la potencia adecuada de la fuente de voltaje.

### ***Soldadura y Montaje del Sistema***

Inicialmente se interconectan los elementos del circuito en una protoboard, se verifican voltajes y compatibilidad con pequeños códigos de prueba.

## Figura 11

### *Pruebas Preliminares en Protoboard*



*Nota.* Se verifican voltajes y compatibilidad de sensores y pantalla con códigos de prueba.

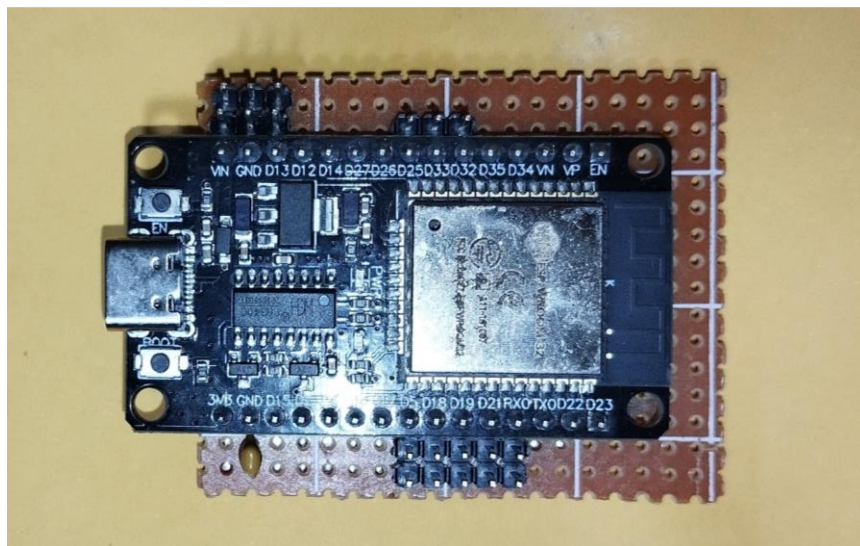
Una vez se realizan estas comprobaciones se inicia con la organización de los elementos en una PCB universal, asegurando la correcta orientación y disposición según el diseño establecido. Para los sensores y la pantalla OLED se establecen headers macho, que posibilitan conectar o desconectar con facilidad los módulos y hacer pruebas.

Posteriormente, se procede a la soldadura de la placa de desarrollo ESP WROOM32, el condensador y los headers. Se emplea un soldador y estaño para asegurar uniones firmes y libres de impurezas.

Una vez finalizada la soldadura, se realiza una inspección visual y pruebas de continuidad para verificar que no haya cortocircuitos o fallas en las conexiones.

## Figura 12

### *Soldadura de Placa de Desarrollo*



*Nota.* Se soldan headers macho para facilitar pruebas y cambio de sensores a futuro.

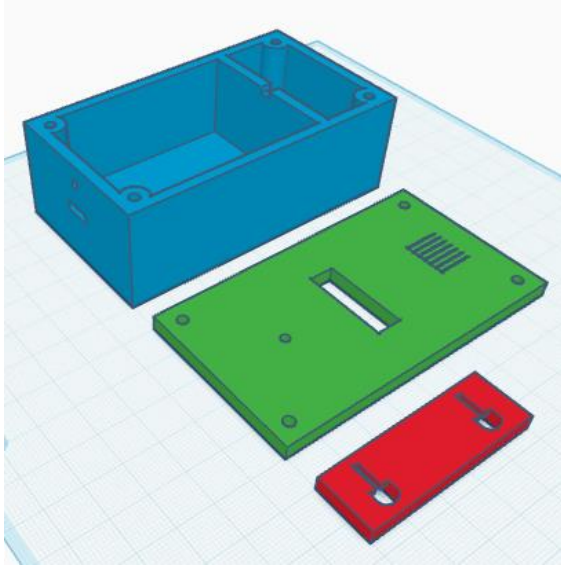
A continuación, se diseña en Tinkercad una estructura que permita alojar todo el sistema, teniendo en cuenta las dimensiones de los componentes claves, como el puerto USB tipo C, los sensores y la pantalla OLED. Al mismo se busca el mantener el tamaño mínimo, para reducir costes en fabricación. Las dimensiones finales de la caja para el prototipo son 50mm x 90mm x 34mm.

Una vez se cuenta con el diseño 3D, se descarga el archivo STL, y se envía a fabricar en una impresora 3D, con filamento PLA.

Posteriormente, los módulos y sensores se ensamblan en su estructura mecánica, considerando la disposición óptima para minimizar interferencias y facilitar su mantenimiento.

**Figura 13**

*Diseño de Estructura en Tinkercad*



*Nota.* Las dimensiones finales de la estructura son  $50 \times 90 \times 34$  mm.

**Figura 14**

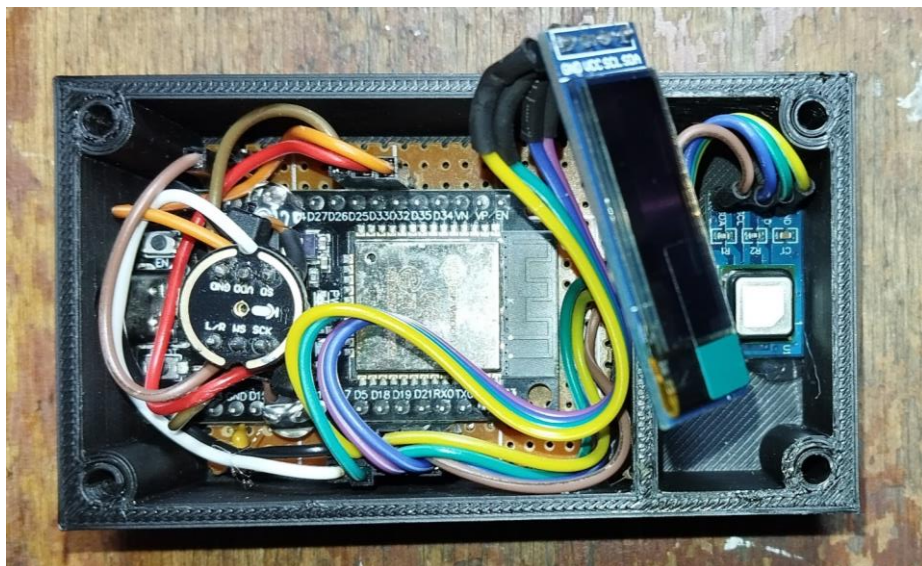
*Estructura Impresa en 3D*



*Nota.* La impresión se realiza en filamento PLA de color negro.

## Figura 15

### *Montaje del Sistema en la Caja Impresa*



*Nota.* El sensor de CO<sub>2</sub> cuenta con un espacio de acuerdo a indicaciones del fabricante.

## Figura 16

### *Montaje Completo del Sistema en la Caja Impresa*



*Nota.* La tapa de la caja impresa se fija con tornillos Philips M12 - 1.50mm x 30mm.

### ***Programación y Calibración de Sensores***

Se utiliza el entorno de desarrollo Arduino IDE para escribir y cargar el firmware en el ESP32, aprovechando bibliotecas para la configuración Wi-Fi, sensores, pantalla OLED, y adquisición de datos.

- Wire.h: Maneja la comunicación I2C, para conectar la pantalla OLED y el sensor CO<sub>2</sub>.
- driver/i2s.h: Configura y opera el bus I2S, utilizado para leer datos del sensor de sonido.
- WiFi.h y WiFiManager.h: Gestionan la conexión inalámbrica, permitiendo que el ESP32 se conecte a la red Wi-Fi.
- Adafruit\_GFX.h y Adafruit\_SSD1306.h: Proporcionan funciones gráficas para controlar la pantalla OLED, permitiendo la visualización de datos en tiempo real.
- SparkFun\_SCD4x\_Arduino\_Library.h: Facilita la interacción con el sensor CO<sub>2</sub> SCD41 mediante I2C, permitiendo obtener mediciones de CO<sub>2</sub>, temperatura y humedad.
- Math.h: Se utilizan para cálculos matemáticos
- Time.h: Se utilizan para la obtención y gestión de la hora local.

El código se centra en varios bloques importante:

- Librerías
- Configuración de pines del ESP32
  - I2S - WS = GPIO25
  - I2S - SD = GPIO32
  - I2S - SCK = GPIO33
  - I2C - SDA = GPIO21
  - I2C - SCL = GPIO22
- Declaración de constantes y variables auxiliares

- float dB SPL = 0;
  - float dbcal = 0;
  - float co2 = 0;
  - float t = 0;
  - float h = 0;
  - float dosis = 0; // Dosis de ruido acumulada (%)
  - int hmax = 8; // horas máximas de exposición a db máximo (NIOSH)
  - int dbmax = 85; // db máximo (NIOSH)
  - int co2max = 1500; // nivel ppm máximo - Health and Safety Executive (2023)
  - unsigned long whatsPreviousMillis = 0;
  - unsigned long thingPreviousMillis = 0;
  - unsigned long sensor1PreviousMillis = 0;
  - unsigned long sensor2PreviousMillis = 0;
  - unsigned long sensor1Interval = 1000; // 1 segundo para medir db
  - unsigned long sensor2Interval = 5000; // 5 segundos para medir co2, h, t
- Configuración WiFi: con ayuda de WiFi.h se establece el modo STATION. Con el uso de WiFiManager.h creamos una interfaz que nos permita configurar la SSID y contraseña de red de manera dinámica, a través de un smartphone.
  - Lectura del sensor de sonido (INMP441): Se utiliza la función `i2s_read ()` de la biblioteca `driver/i2s.h` para capturar datos en un buffer. Luego se calcula el valor RMS de la señal, se convierte a dBFS y finalmente se ajusta a dB SPL mediante una regresión lineal. Este valor se utiliza para calcular la dosis acumulada de ruido, que se va actualizando en cada iteración.

- Lectura del sensor de CO<sub>2</sub> (SCD41): Con las funciones propias de la biblioteca SparkFun\_SCD4x\_Arduino\_Library.h, cada 5 segundos se lee la medición del sensor SCD41, obteniendo valores de CO<sub>2</sub>. Estos datos se imprimen en el monitor serial para seguimiento y también se utilizan para actualizar la visualización en la pantalla OLED.
- Visualización de datos: La función de visualización se invoca periódicamente para actualizar la pantalla OLED con los valores actuales de dB SPL, CO<sub>2</sub>, ofreciendo una referencia visual inmediata sobre el estado del ambiente, con ayuda de las bibliotecas Adafruit\_GFX.h y Adafruit\_SSD1306.h.
- Gestión de tiempo: Se utiliza la biblioteca time.h para obtener la hora local y gestionar eventos basados en cambios de día (por ejemplo, resetear la dosis acumulada). Esto permite llevar un control temporal preciso en las mediciones.
- Depuración: En esta etapa se implementan rutinas de depuración utilizando el monitor serial, permitiendo identificar posibles errores en la comunicación o en la lectura de los sensores.

El sensor INMP441 envía datos o muestras al ESP32, y este los almacena en un buffer. El sensor entrega datos en formato digital con valores en dBFS, los cuales son una medida que representa la relación entre el nivel de una señal y el nivel máximo que el sistema puede manejar o Full Scale. El nivel 0 dBFS indica que la señal alcanza el valor máximo permitido en el sistema digital. Los valores negativos de dBFS indican señales por debajo del máximo. Esto se ilustra en la Figura 17.

El valor RMS mide la potencia media de una señal en el dominio del tiempo. Para una señal discreta  $x$  de  $N$  muestras usamos la ecuación 7.

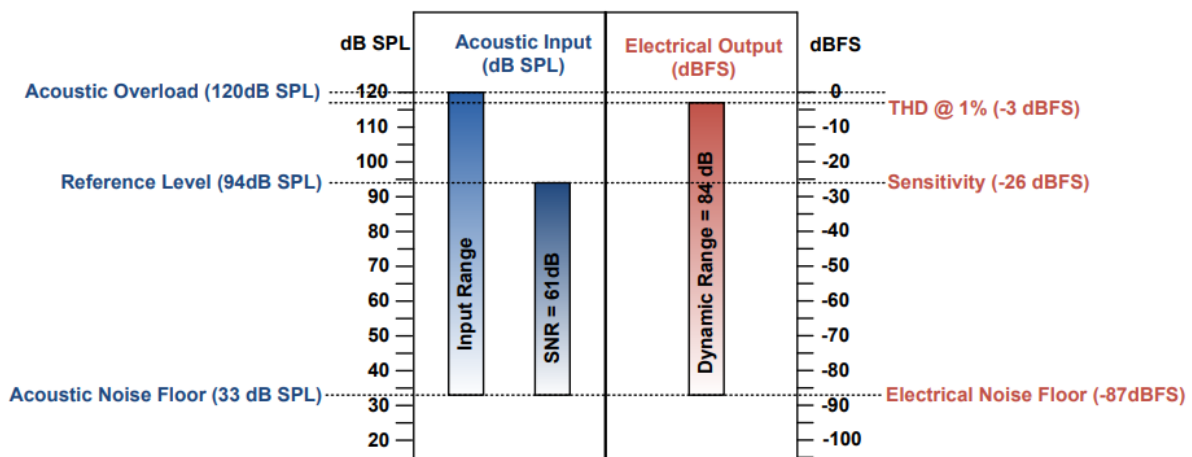
$$rms = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n^2} \quad (7)$$

El sonido digital se mide en dBFS, lo que significa que necesitamos convertir el valor RMS a una escala logarítmica. Como la potencia de una señal es proporcional al cuadrado de la amplitud, al expresar la amplitud en términos de decibeles obtenemos a la ecuación 8.

$$dBFS = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{A}{B} \right) \quad (8)$$

**Figura 17**

*Relación entre dB SPL y dBFS en un Micrófono MEMS*



*Nota.* Adaptado de Digital Microphone Specifications Reference Diagram (basado en WM7211).  
Cirrus Logic. (2015).

[https://www.mouser.com/catalog/additional/Cirrus%20Logic\\_WAN0290\\_v1.0.pdf](https://www.mouser.com/catalog/additional/Cirrus%20Logic_WAN0290_v1.0.pdf)

Dado que la señal que proviene del sensor de sonido es de 16 bits, y un bit es usado para el signo, tenemos un valor máximo digital de 32768. Para medir la amplitud relativa de una señal en comparación con el valor máximo permitido por el sistema digital (dBFS), usamos la ecuación 9.

$$dBFS = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{rms}{maxdv} \right) \quad (9)$$

Esto asegura que cuando se alcance el valor máximo digital de 32768, dBFS sea 0. El valor dBFS se correlaciona con el valor de dB SPL a través de la ecuación 10.

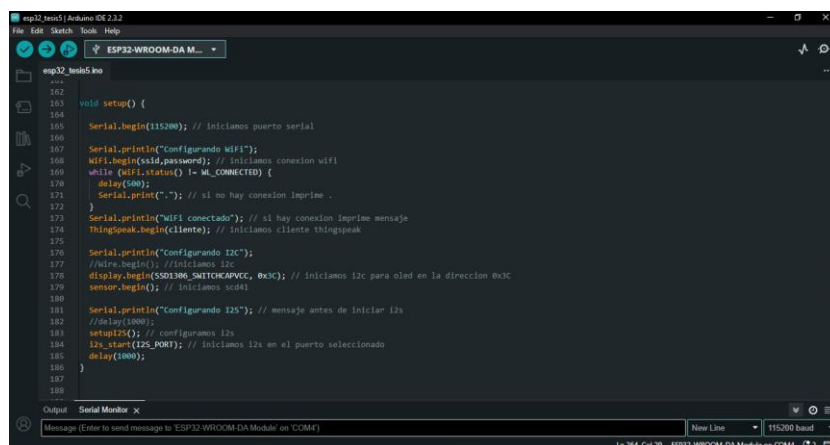
$$dB SPL = dBFS + 120 \quad (10)$$

La ecuación 10 se desprende del valor de la sensibilidad del sensor INMP441 que es de -26 dBFS. En el proceso de fabricación del sensor se aplica una señal de 94 dB SPL a 1KHz, y se obtiene como respuesta un valor en dBFS, que es la sensibilidad.

Se procede a programar el prototipo usando Arduino IDE, haciendo iteraciones con el código, y depurando errores con ayuda del monitor serial. Se incluyó la lectura de temperatura y humedad, que el SCD41 tiene por defecto, aunque posteriormente se eliminó, ya que no estaba dentro del objetivo el proyecto.

## Figura 18

### Programación del Prototipo en Arduino IDE



```

esp32_wifi5.ino
162
163
164 void setup() {
165
166   Serial.begin(115200); // Iniciamos puerto serial
167   Serial.println("configurando WiFi");
168   WiFi.begin(ssid,password); // Iniciamos conexión wifi
169   while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
170     delay(500);
171     Serial.print("."); // si no hay conexión imprime .
172   }
173   Serial.println("WiFi conectado"); // si hay conexión imprime mensaje
174   ThingSpeak.begin(client); // iniciamos cliente thingspeak
175
176   Serial.println("configurando I2C");
177   //I2C.begin(); // iniciamos I2C
178   display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C); // iniciamos I2C para oled en la dirección 0x3C
179   sensor.begin(); // iniciamos scd41
180
181   Serial.println("configurando I2S"); // mensaje antes de iniciar I2S
182   //delay(1000);
183   setupI2S(); // configuramos I2S
184   I2S.start(I2S_PORT); // iniciamos I2S en el puerto seleccionado
185   delay(1000);
186 }
187
188
189

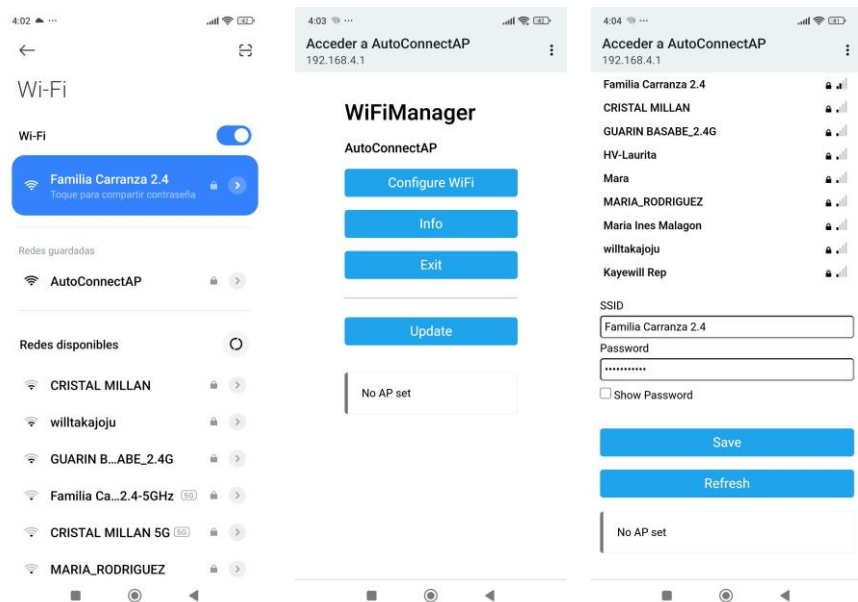
```

*Nota.* Se usa monitor serial para revisar lecturas y depurar código.

La biblioteca WiFiManager permite configurar red WiFi y su contraseña sin necesidad de programarlos directamente en el código. Un dispositivo crea un punto de acceso temporal al encenderse, permitiendo que un usuario, a través de su teléfono móvil o computadora, ingrese las credenciales de la red Wi-Fi a la que se conectará el dispositivo.

Esto evita que la información de la red quede expuesta en el código fuente, mejorando la seguridad. También es útil cuando se fabrican múltiples dispositivos que serán desplegados en diferentes ubicaciones de escuelas o colegios.

Con WiFiManager no es necesario modificar ni reprogramar el código de cada unidad para conectarla a una red específica.

**Figura 19***Configuración de Red por medio de WiFiManager*

*Nota.* WiFiManager evita que la información de la red quede expuesta en el código fuente.

**Figura 20***Prototipo Mostrando Mediciones en Pantalla*

*Nota.* Las lecturas de ruido y CO<sub>2</sub> se actualizan cada segundo en la pantalla.

Si se comparan las mediciones del sistema con un sonómetro o sensor calibrado, es posible obtener los valores  $a$  y  $b$  de la regresión lineal en la ecuación 11. El valor obtenido  $dB_{cal}$  es un valor calibrado.

$$dB_{cal} = a \cdot dB_{SPL} + b \quad (11)$$

Para la calibración del sensor de sonido se usa un iPhone 12 con la aplicación NIOSH Sound Level Meter. Según National Institute for Occupational Safety and Health (s.f.), esta app es una herramienta precisa para medir niveles de sonido, desarrollada por expertos en acústica y pérdida auditiva. De acuerdo a los estudios de Shahnaz y Brown (2024), las mediciones medias de la aplicación NIOSH no fueron significativamente diferentes en la mayoría de los entornos en comparación con el sonómetro usado. Esto sugiere que es una de las aplicaciones más precisas frente a otras del mercado.

Los dispositivos iPhone cuentan con hardware estandarizado, lo que significa que todos los modelos de un mismo tipo tienen los mismos micrófonos y componentes de audio. Esto garantiza que una aplicación como NIOSH Sound Level Meter pueda ofrecer mediciones consistentes y confiables en cualquier iPhone del mismo modelo. Los dispositivos Android varían ampliamente en términos de hardware, ya que cada fabricante utiliza diferentes micrófonos y configuraciones de audio. Esta variabilidad hace que las mediciones de sonido en Android sean menos predecibles y dependan del modelo específico, lo que reduce la fiabilidad de las aplicaciones de medición en comparación con iPhone.

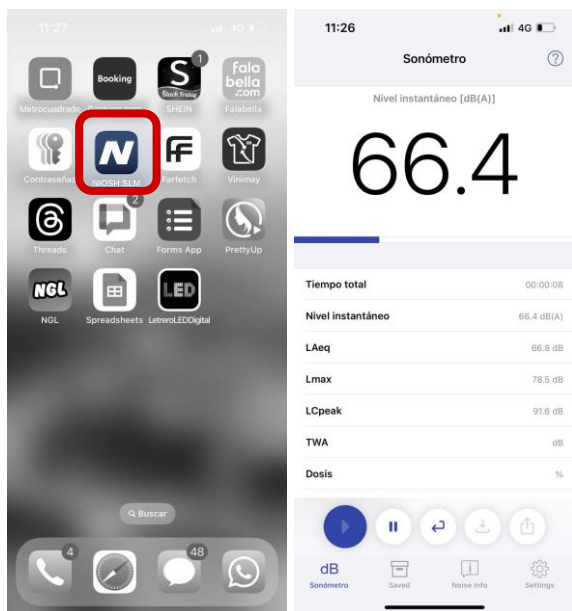
Para la calibración del sensor de sonido no se utilizó un sonómetro profesional debido a su alto costo y la dificultad para obtener uno certificado en el contexto del estudio. Los

sonómetros de clase 1, que tienen una precisión superior, requieren calibraciones periódicas con equipos de referencia y su adquisición no fue viable este proyecto ya que se contaba con recursos limitados y los sonómetros que contaba la UNAD en el CEAD carecían de calibración.

Al tratarse de una calibración relativa, en la que se busca establecer una correspondencia entre los valores medidos por el INMP441 y una fuente de referencia confiable, la aplicación NIOSH en el iPhone 12 es suficiente para obtener una curva de ajuste válida. La metodología utilizada permite replicar el procedimiento sin necesidad de equipo especializado y mantiene una precisión adecuada para el propósito del estudio, asegurando que el sensor INMP441 tenga una referencia confiable sin depender de instrumentos de laboratorio de alto costo.

### Figura 21

#### *Aplicación NIOSH Sound Level Meter en iPhone 12*



*Nota.* NIOSH Sound Level Meter ofrece mediciones consistentes en iPhone.

Para calibrar el sensor de sonido se registraron 22 mediciones simultáneas con el prototipo y un iPhone 12 con la aplicación NIOSH instalada, en una sala con baja interferencia

acústica. Como fuente de sonido se usó un celular con un generador de frecuencia de 1kHz. Se ubicó el prototipo y el iPhone 12 a la misma altura, y a la misma distancia de la fuente.

## Figura 22

*Ubicación de Equipos para Calibración de Sensor de Sonido*



*Nota.* La distancia entre la fuente de sonido y los dispositivos de medición es de 10cm.

## Figura 23

*Registro de Mediciones de Sonido en el Prototipo y un iPhone 12*



*Nota.* Se tomaron fotografías para registrar los valores instantáneos.

En la prueba se varió el volumen de la fuente, asegurando cubrir el mayor rango de valores posibles. Las mediciones se registraron en la tabla 10.

**Tabla 10**

*Mediciones de Sonido del Prototipo y iPhone 12*

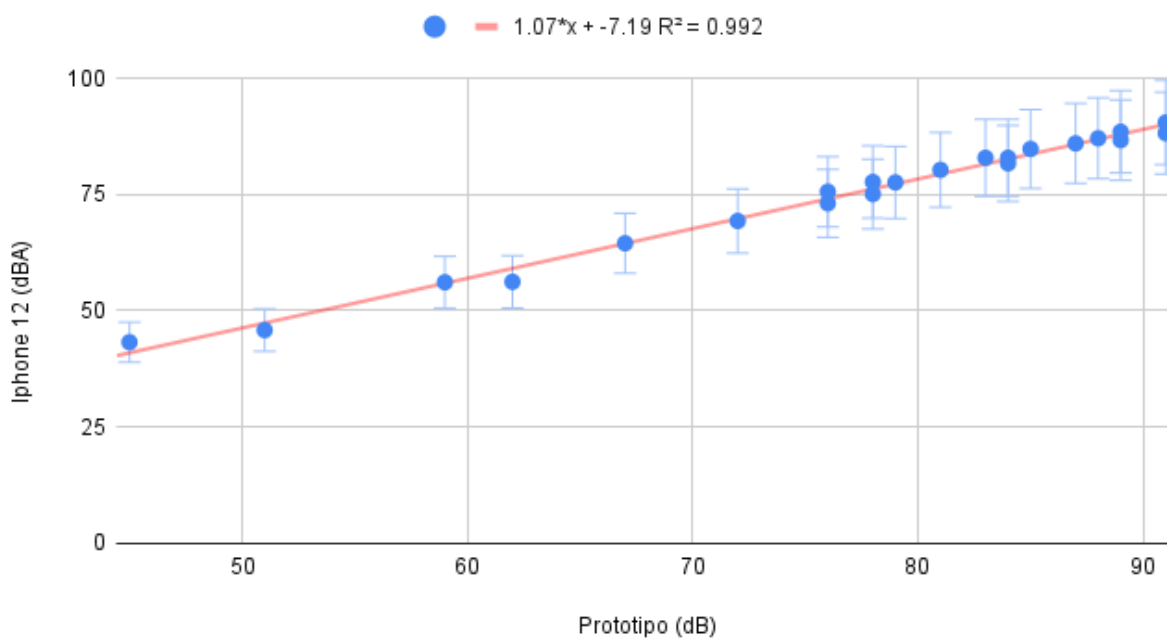
N	Prototipo (dB)	iPhone 12 (dBA)
1	89	86.7
2	91	88.2
3	84	81.7
4	78	75.1
5	76	73.1
6	72	69.3
7	67	64.5
8	59	56.1
9	62	56.2
10	76	75.6
11	78	77.7
12	79	77.6
13	81	80.3
14	83	82.9
15	84	82.9
16	85	84.8
17	87	86
18	88	87.1
19	89	88.5
20	91	90.5
21	45	43.2
22	51	45.8

*Nota.* Se registraron 22 mediciones simultáneas variando el volumen de la fuente de sonido.

Los datos posteriormente se representaron en un gráfico de dispersión en Google Sheets, permitiendo acceder por regresión lineal a una función, mostrada en la Figura 24, que relaciona tanto los valores medidos con el prototipo como los valores medidos por el iPhone 12.

### Figura 24

Gráfico de Dispersión de Mediciones del Prototipo vs iPhone12



*Nota.* El gráfico de dispersión fue realizado en Google Sheets.

Como se puede apreciar, los valores obtenidos por el prototipo son bastante similares a los obtenidos por el iPhone 12 con la aplicación NIOSH. Los valores de la función de regresión lineal de la ecuación 12 fueron usados en la ecuación 11, y posteriormente incorporados con el código, donde  $a = 1.07$  y  $b = -7.19$ .

$$y = 1.07x - 7.19$$

(12)

Para calcular la dosis diaria de ruido en el proyecto, se implementó un algoritmo que toma mediciones continuas con el sensor INMP441 y calcula la exposición acumulada en el tiempo. Para ello, se almacena la duración de cada nivel de ruido registrado y se compara con los tiempos de exposición permitidos según las normativas internacionales. Las ecuaciones 4 y 6 permiten obtener el porcentaje de exposición diaria, lo que indica si se ha superado el límite recomendado. La implementación del cálculo se realizó en la programación del ESP32, donde se creó un bucle que captura los valores de nivel de sonido en intervalos regulares. Finalmente, el porcentaje de dosis diaria se muestra en la pantalla OLED del dispositivo.

Otra tarea importante de esta etapa es la calibración del sensor de CO<sub>2</sub>. De acuerdo con su datasheet, el sensor SCD41 tiene dos modos de calibración: ASC (auto-calibración automática) y FRC (re-calibración forzada/manual).

En el aula de gamificación, el sensor de CO<sub>2</sub> utilizará la calibración automática ASC debido a que el ambiente cumple con las condiciones necesarias para su correcto funcionamiento. Durante la semana, el aula se utiliza entre las 7:00 a.m. y las 3:00 p.m., pero después de este horario, suele permanecer vacía con las puertas y ventanas abiertas. Los sábados y en momentos de limpieza y ventilación, el aula también se mantiene sin ocupantes, permitiendo que el sensor registre niveles bajos de CO<sub>2</sub> cercanos a los 400 ppm, que es el valor de referencia que usa la calibración automática.

Este proceso de calibración es ideal ya que garantiza que el sensor se ajuste continuamente sin necesidad de intervención manual, manteniendo el sistema con una calibración confiable. Otra ventaja de utilizar la calibración automática es que evita errores derivados de una calibración manual incorrecta o de la necesidad de sacar el sensor al exterior para ajustarlo periódicamente.

Dado que el aula cumple con los requisitos para la calibración automática, el SCD41 se ajustará de manera continua y sin intervención, facilitando su implementación en un entorno educativo donde la ventilación es una práctica habitual. Debido a lo anterior, se establece en el código del ESP32 este parámetro del sensor.

### Fase 3: Integración con la Plataforma en la Nube

La integración del sistema de monitoreo con la plataforma ThingSpeak permite la recolección y visualización remota de los datos capturados por los sensores.

#### *Configuración de ThingSpeak*

**Creación de una Cuenta y un Canal.** Se creó una cuenta en la plataforma ThingSpeak y se generó un canal específico para el proyecto, según la figura 25. Este canal actúa como un contenedor donde se almacenan los datos enviados desde el dispositivo.

### Figura 25

#### *Configuración de Canal en ThingSpeak*

The screenshot displays the 'Channel Settings' page in the ThingSpeak interface. The top navigation bar includes 'Channels', 'Apps', 'Devices', and 'Support'. The main content area is divided into two columns. The left column, titled 'Channel Settings', shows a progress indicator for 'Percentage Complete' at 30%. Below this, the 'Channel ID' is 2610886. The 'Name' field contains 'Proyecto'. The 'Description' field is empty. There are six 'Field' settings, each with a text input and a checkbox: Field 1 (SPL, checked), Field 2 (CO2, checked), Field 3 (T, checked), Field 4 (H, checked), Field 5 (Dosis, checked), and Field 6 (empty, unchecked). The right column, titled 'Help', provides instructions for each field: 'Percentage complete' (calculated based on data), 'Channel Name' (unique name), 'Description' (channel description), 'Field#' (enable field and name), 'Metadata' (channel data info), 'Tags' (keywords), 'Link to External Site' (website URL), and 'Show Channel Location'.

*Nota.* Adaptado de Channel Settings. ThingSpeak. (2025). <https://thingspeak.mathworks.com/>

**Configuración de Campos de Datos.** Se definieron los campos para recibir los datos relevantes, incluyendo los valores de CO<sub>2</sub> (ppm), nivel de ruido (dBA), temperatura (°C), humedad relativa (%) y dosis diaria (%), según la figura 26.

**Obtención de las Claves API.** ThingSpeak proporciona una clave API de escritura, necesaria para que el dispositivo pueda enviar datos, y una clave API de lectura, utilizada para acceder a los datos desde otras plataformas o aplicaciones.

**Ajuste de Intervalos de Actualización.** Se estableció un intervalo de actualización de 30 segundos, mejorando el equilibrio entre la frecuencia de actualización y el consumo de datos.

### ***Programación del Dispositivo para la Transmisión de Datos***

Una vez configurado el canal en ThingSpeak, se procedió a programar el ESP32 para la adquisición y envío de datos de los sensores. Para ello, se utilizó la librería HTTPClient para realizar solicitudes POST al servidor de ThingSpeak, enviando los datos en formato URL codificado.

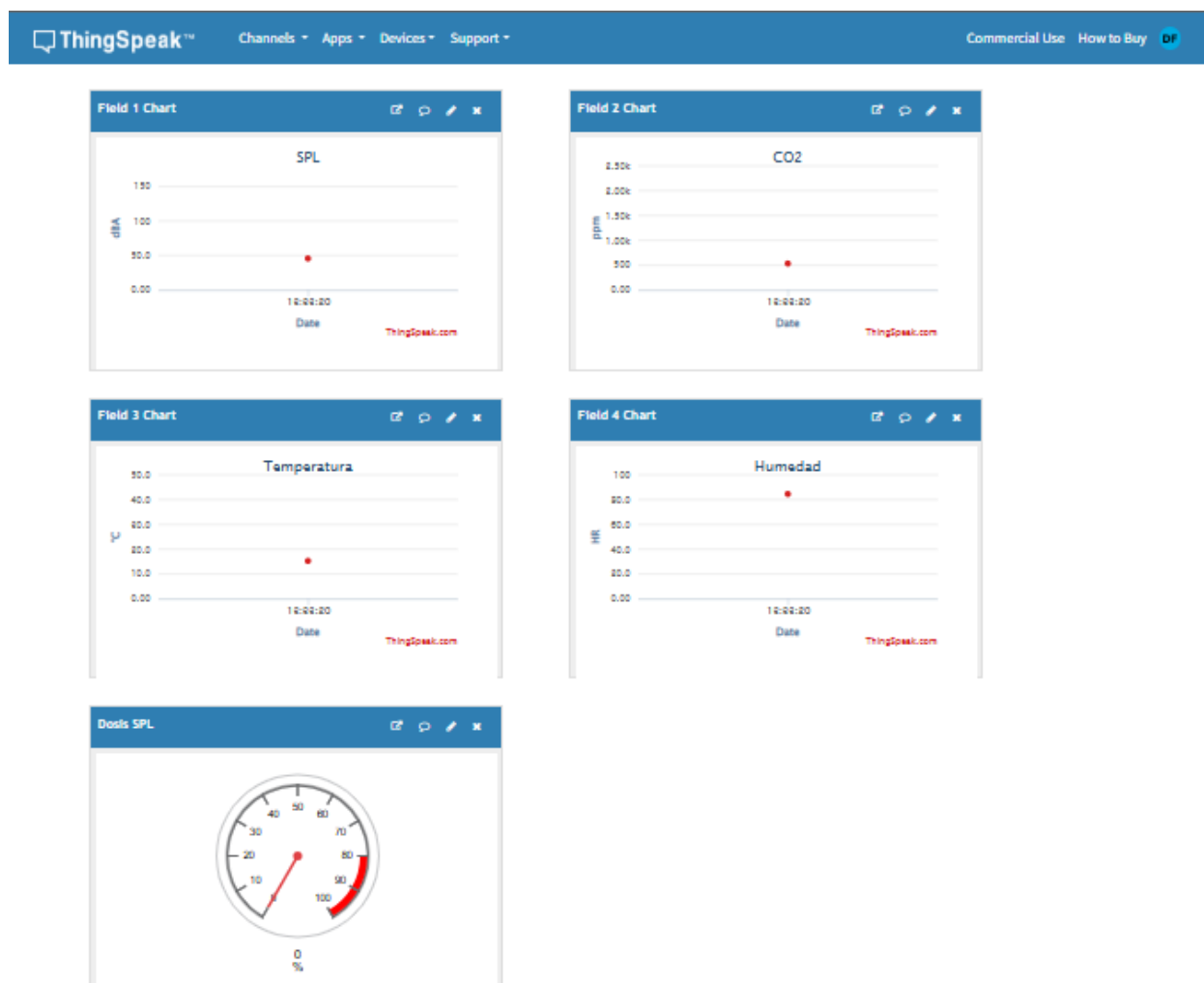
### ***Validación y Visualización de Datos***

Con el sistema en funcionamiento, se verificó la correcta transmisión y visualización de los datos en la plataforma ThingSpeak. Se realizaron las siguientes acciones:

- **Monitoreo de la transmisión:** Se revisaron los registros en tiempo real de ThingSpeak para asegurar que los datos fueran recibidos sin interrupciones ni valores atípicos.
- **Gráficos de tendencias:** Se generaron gráficos en la plataforma para analizar la evolución de los parámetros monitoreados según la figura 27.
- **Ajuste de parámetros:** Se adecuaron los intervalos de muestreo y la precisión de los sensores según las observaciones realizadas.

## Figura 26

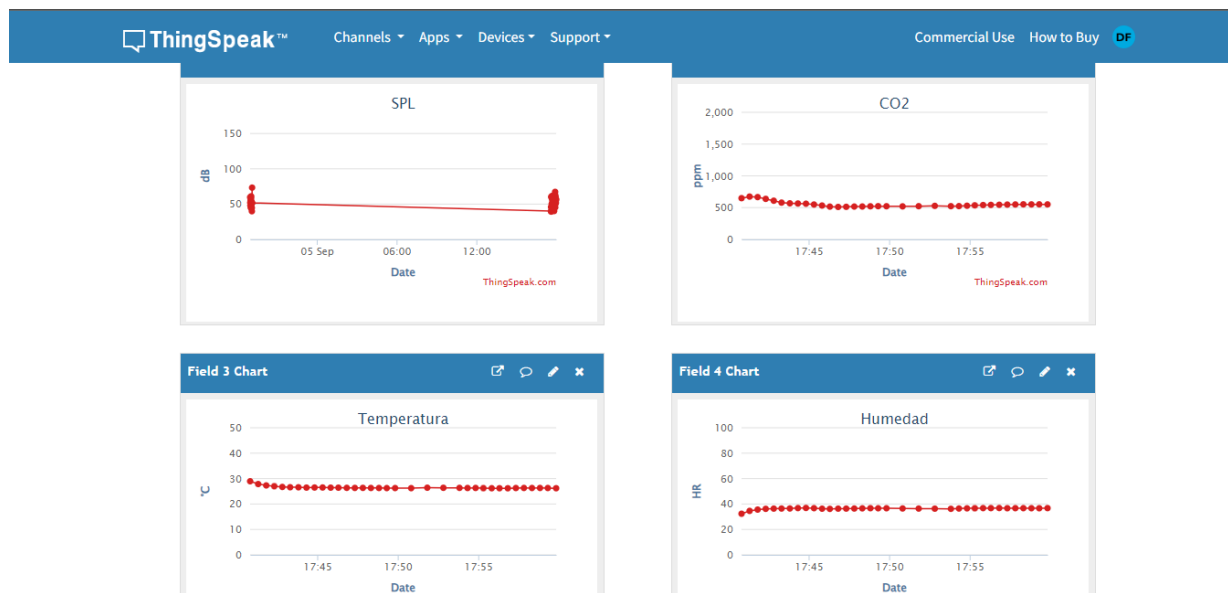
### Configuración de Campos de Datos ThingSpeak



Nota. Adaptado de Channel Stats. ThingSpeak. (2025). <https://thingspeak.mathworks.com/>

## Figura 27

### Visualización de Datos de Sensores en ThingSpeak



Nota. Adaptado de Channel Stats. ThingSpeak. (2025). <https://thingspeak.mathworks.com/>

## Fase 4: Desarrollo y Prueba de Notificaciones Automáticas

En esta fase del proyecto, se desarrolló la programación para la detección de niveles críticos de CO<sub>2</sub> y ruido, con el objetivo de generar alertas automáticas cuando estos parámetros superan los límites establecidos. Para esto, se implementaron funciones en el código del ESP32 que analizan en tiempo real los valores capturados por los sensores de CO<sub>2</sub> y ruido, comparándolos con los umbrales predefinidos basados en NIOSH (1998) y Health and Safety Executive (2023).

- Dosis de ruido acumulada máxima = 100%
  - Nivel de ruido máximo = 85 dBA
  - Tiempo máximo de exposición a nivel de ruido máximo = 8 horas
- Nivel ppm máximo recomendado = 1500 ppm

Cuando un valor excede su umbral, el sistema envía una notificación por WhatsApp.

Para gestionar el envío de notificaciones automáticas, se configuró la API de un CallMeBot, de manera que los avisos lleguen de forma inmediata al responsable de la supervisión del aula.

Para utilizar la API de CallMeBot se siguieron estos pasos:

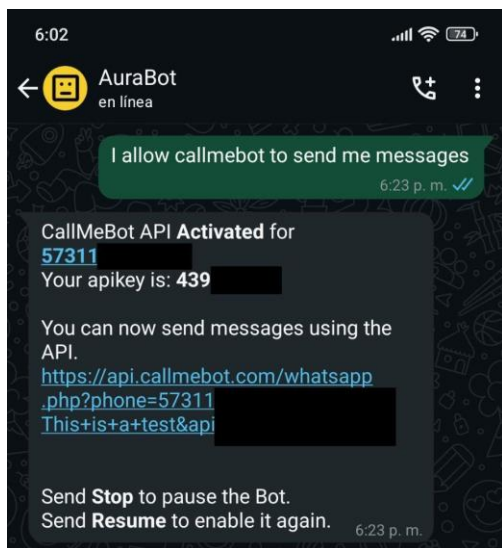
- Añadir el número de CallMeBot +34 621 08 34 84 a los contactos del teléfono donde se van a recibir las notificaciones
- Enviar este mensaje de autorización a CallMeBot:  
*"I allow callmebot to send me messages"*
- Esperar un mensaje de respuesta del bot con la API KEY:  
*"API Activated for your phone number. Your APIKEY is 123123"*
- Agregar las librerías URLEncode y HTTPClient al código del ESP32
- Configurar el envío de mensajes con la API KEY con el método HTTP POST. El sistema enviará mensajes cada 300 segundos si se superan los umbrales permitidos. El tiempo es suficiente para establecer una lectura correcta del mensaje y evitar saturar el chat.

Para este proyecto se estableció un formato de mensaje claro, indicando el parámetro afectado y el valor registrado.

El código fuente con el cual fue programado el ESP32 puede consultarse en GitHub, siguiendo el enlace del apéndice A.

## Figura 28

### Activación de Servicios de CallMeBot en WhatsApp



*Nota.* Adaptado de WhatsApp. Meta. (2025).

[https://play.google.com/store/apps/details?id=com.whatsapp&hl=es\\_CO](https://play.google.com/store/apps/details?id=com.whatsapp&hl=es_CO)

## Figura 29

### Notificaciones de CallMeBot en WhatsApp para Niveles de Ruido y CO<sub>2</sub>



*Nota.* Adaptado de WhatsApp. Meta. (2025).

[https://play.google.com/store/apps/details?id=com.whatsapp&hl=es\\_CO](https://play.google.com/store/apps/details?id=com.whatsapp&hl=es_CO)

## Fase 5: Pruebas de Campo

Durante esta fase se lleva a cabo la implementación del prototipo en un entorno real de uso, con el fin de verificar su funcionamiento integral y recopilar datos ambientales en condiciones auténticas de aula escolar. Esta etapa es importante para validar la operación del sistema en términos de instalación, conectividad, alimentación, visualización de datos y capacidad de recolección de información mediante sensores.

### *Ubicación y Condiciones de Instalación*

El prototipo es instalado en la Zona B del aula de gamificación, como se muestra en la Figura 30. Se ubica sobre una pared a una altura aproximada de 1.5 metros, garantizando una adecuada captación del sonido ambiente y una posición estratégica respecto a las áreas de mayor concentración estudiantil. También se evita su exposición directa a corrientes de aire generadas por puertas y ventanas, para asegurar lecturas estables del sensor de CO<sub>2</sub>.

### Figura 30

#### *Ubicación del Prototipo dentro de la Zona B del Aula de Gamificación*



*Nota.* El prototipo se ubica a una altura aproximada de 1.5 metros.

**Figura 31***Zona A del Aula de Gamificación*

*Nota.* En la Zona A se encuentran 12 computadores.

**Figura 32***Zona B del Aula de Gamificación*

*Nota.* En la Zona A se encuentran 8 computadores y 7 gafas de realidad virtual.

### Figura 33

#### *Parte Exterior del Aula de Gamificación*



*Nota.* Zona A a la izquierda. Zona B a la derecha.

La alimentación del dispositivo se realiza mediante un cargador de celular genérico 5V-2A (10W), lo que permite su funcionamiento continuo durante la jornada escolar y mantiene una potencia superior a la calculada para el dispositivo (2W). Las Figuras 31, 32 y 33 muestran diferentes vistas del aula y su disposición espacial para contextualizar el lugar de instalación del sistema.

#### ***Conectividad del Prototipo***

La conexión a Internet se establece a través de una red Wi-Fi compartida desde un teléfono celular, debido a que las políticas institucionales no permiten acceso a la red Wi-Fi del colegio.

### ***Protocolo de Pruebas***

Las pruebas se desarrollarán durante dos semanas, en horarios escolares entre las 7:30 a.m. y 3:00 p.m. Se organizaron sesiones de monitoreo de 45 minutos durante clases con estudiantes de segundo a noveno grado, en grupos de 20 a 35 alumnos. También se realizaron mediciones en momentos sin clase, con el aula cerrada.

Cada sesión estará acompañada de un protocolo de ventilación, donde se abrían dos puertas y dos ventanas, durante cinco minutos entre clases. Esto permitirá observar dinámicas de acumulación y disipación de contaminantes en distintos niveles de ocupación y ventilación.

Debido a ajustes en la agenda escolar y actividades institucionales, el monitoreo se realizará durante siete días en total, cuatro en la primera semana, y tres en la segunda. Esta frecuencia, aunque limitada, ofrecerá datos representativos de una jornada escolar típica.

### ***Visualización de Datos y Ajustes Funcionales***

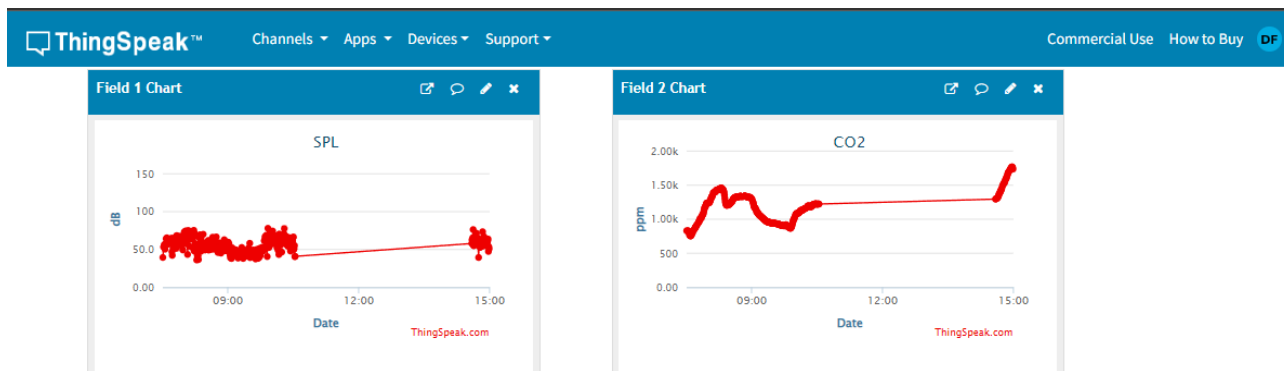
Durante las pruebas, los datos recolectados deberán ser enviados a la plataforma ThingSpeak para su visualización. Se deberán generar gráficas diarias que muestran la evolución de las variables monitoreadas. CallMeBot deberá enviar notificaciones automáticas a través de WhatsApp cuando los valores de CO<sub>2</sub> o ruido superan umbrales predefinidos.

## Resultados

### Datos de CO<sub>2</sub> y Niveles de Ruido

#### Figura 34

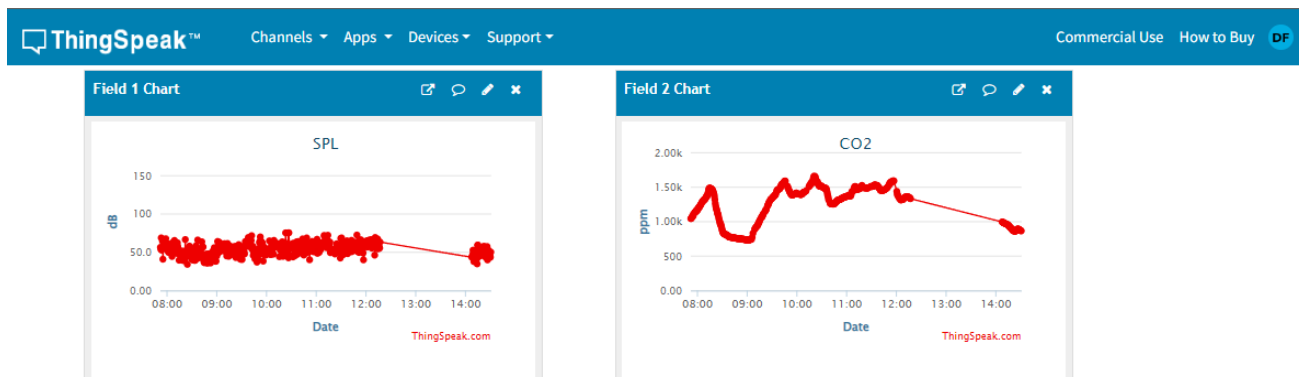
Visualización de Datos en ThingSpeak - Prueba de Campo - Día 1



Nota. Adaptado de Channel Stats. ThingSpeak. (2025). <https://thingspeak.mathworks.com/>

#### Figura 35

Visualización de Datos en ThingSpeak - Prueba de Campo - Día 2

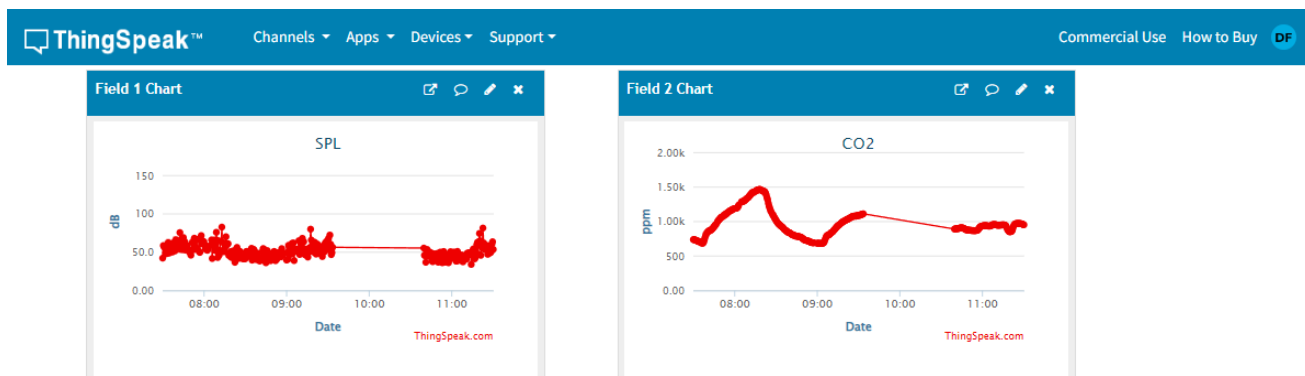


Nota. Adaptado de Channel Stats. ThingSpeak. (2025). <https://thingspeak.mathworks.com/>

En la Figura 34 y 35, se observan valores de ruido superiores a los 50 dBA y valores de CO<sub>2</sub> superiores a los 1500 ppm. Se aprecia el intervalo de tiempo donde no se envían datos.

### Figura 36

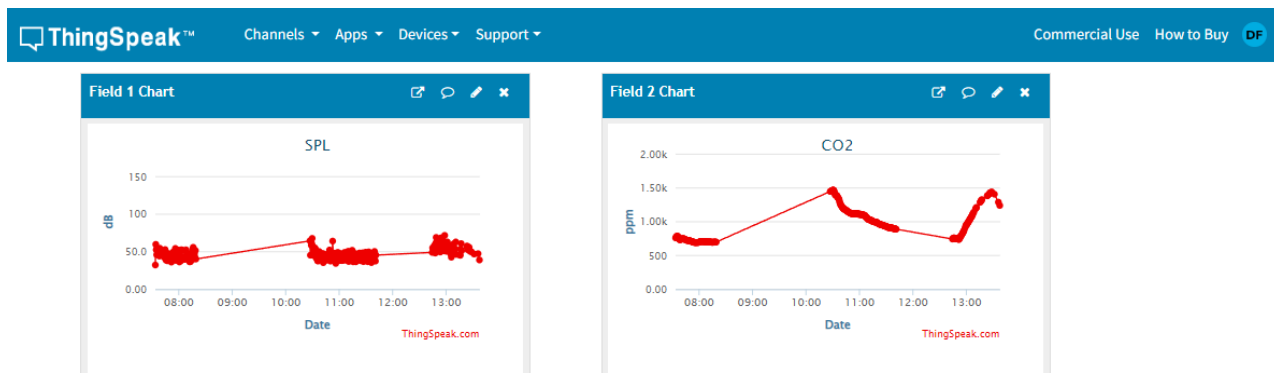
Visualización de Datos en ThingSpeak - Prueba de Campo - Día 3



Nota. Adaptado de Channel Stats. ThingSpeak. (2025). <https://thingspeak.mathworks.com/>

### Figura 37

Visualización de Datos en ThingSpeak - Prueba de Campo - Día 4

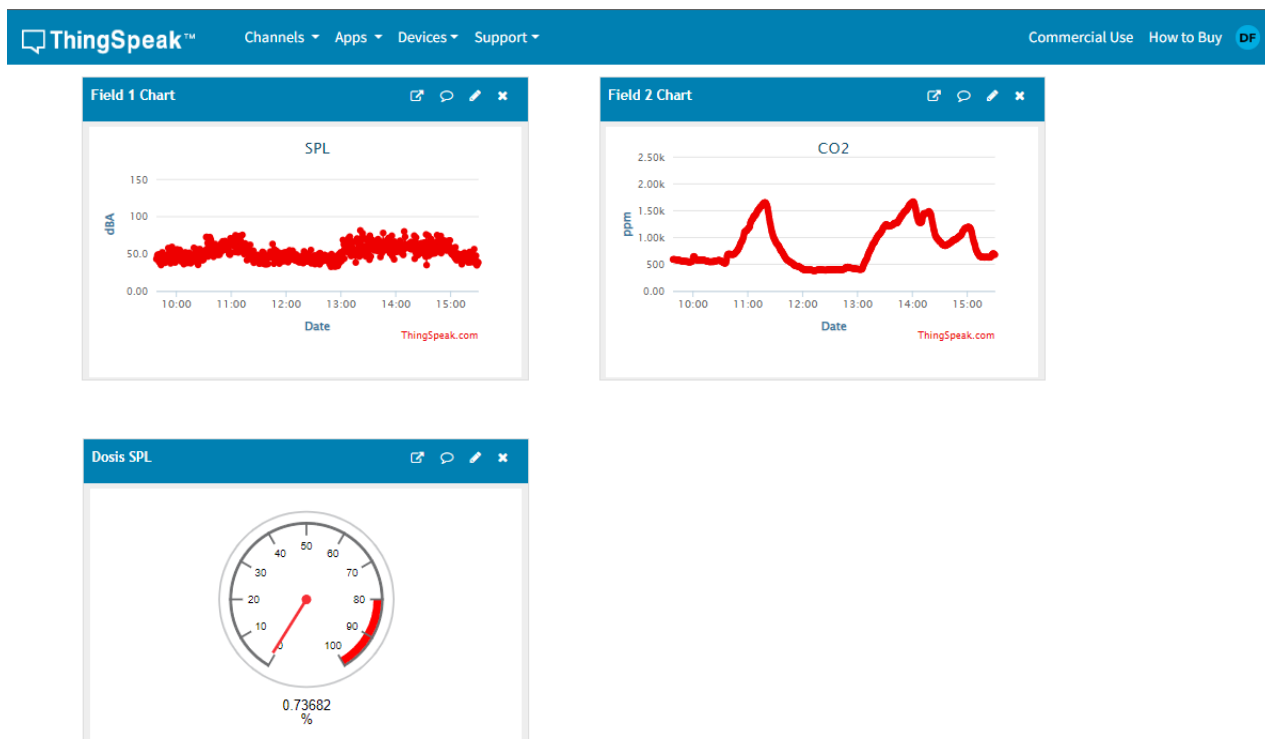


Nota. Adaptado de Channel Stats. ThingSpeak. (2025). <https://thingspeak.mathworks.com/>

En la Figura 36 y 37, se observan valores de ruido superiores a los 50 dBA. Se aprecia como desciende los niveles de CO<sub>2</sub> en momentos puntuales del día. También se pueden apreciar los intervalos de tiempo donde se presentó desconexión de red.

## Figura 38

Visualización de Datos en ThingSpeak - Prueba de Campo - Día 5



Nota. Adaptado de Channel Stats. ThingSpeak. (2025). <https://thingspeak.mathworks.com/>

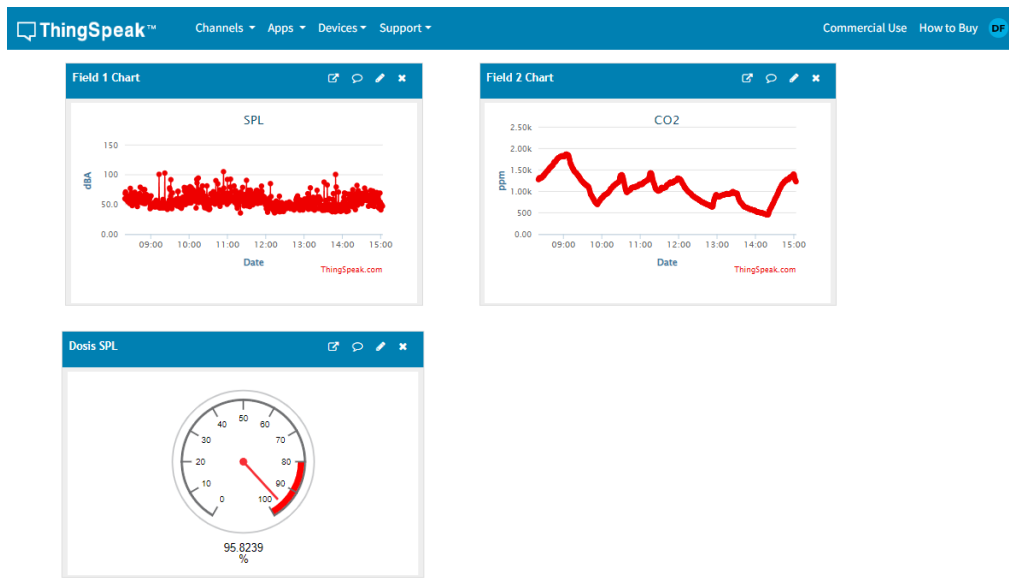
En la Figura 38 se observan valores de ruido superiores a los 70 dBA. Se aprecia como descendiendo los niveles de CO<sub>2</sub> en momentos puntuales de la lectura. Se incorpora la visualización de dosis de ruido diaria. También se puede apreciar la estabilidad en la conexión de red.

En la Figura 39 se observan valores de ruido superiores a los 100 dBA. Se aprecia cómo fluctúan los niveles de CO<sub>2</sub> durante el día. Se aprecia un valor superior al 80% de dosis de ruido diaria. También se puede apreciar su estabilidad en la conexión de red.

La Figura 40 muestra el comportamiento de los niveles de CO<sub>2</sub> (ppm) y de sonido (dBA) a lo largo del último día de prueba de campo, permitiendo observar fluctuaciones relacionadas con la ocupación del aula, la ventilación y los momentos de mayor actividad.

## Figura 39

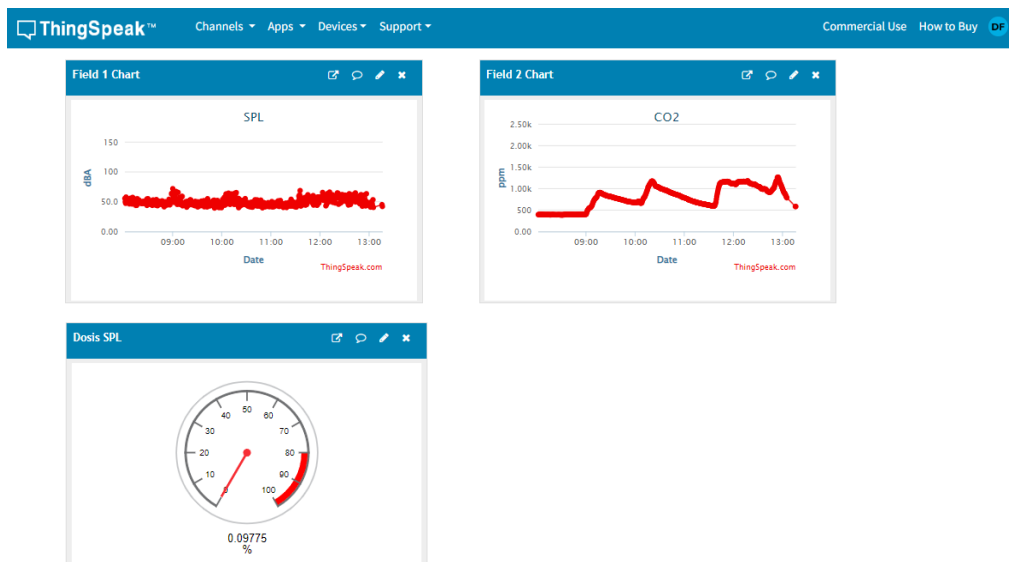
### Visualización de Datos en ThingSpeak - Prueba de Campo - Día 6



Nota. Adaptado de Channel Stats. ThingSpeak. (2025). <https://thingspeak.mathworks.com/>

## Figura 40

### Visualización de Datos en ThingSpeak - Prueba de Campo - Día 7



Nota. Adaptado de Channel Stats. ThingSpeak. (2025). <https://thingspeak.mathworks.com/>. Los datos recopilados pueden descargarse desde el enlace del apéndice A.

## **Conectividad**

La conexión a Internet se estableció a través de una red Wi-Fi compartida desde un teléfono celular. Esta configuración presentó ciertos problemas, como pérdidas esporádicas de conectividad, las cuales requerían reiniciar el dispositivo para restablecer el enlace con los servicios en la nube (ThingSpeak y CallMeBot), no registrando la totalidad de datos.

## **Visualización de Datos en la Nube**

En la segunda semana de pruebas se integró la visualización de la dosis acumulada de ruido, permitiendo observar la exposición total a lo largo de la jornada escolar. Esta adaptación permitió representar gráficamente cómo evoluciona la exposición sonora del docente a lo largo de la jornada escolar, como se muestra en las Figuras 38, 39 y 40.

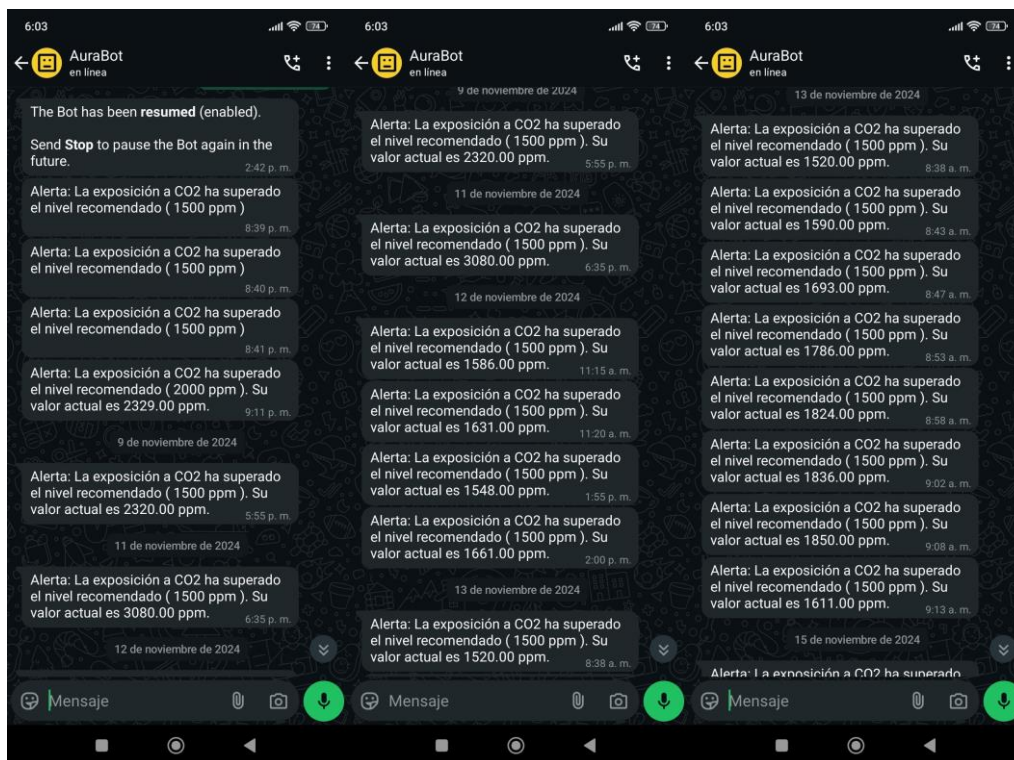
Aunque el sistema también captura temperatura y humedad relativa, estos parámetros no fueron considerados, ya que no corresponden a los objetivos específicos de este proyecto.

## **Notificaciones Automáticas**

El sistema generó notificaciones automáticas a través del servicio CallMeBot, las cuales eran enviadas por WhatsApp al número del investigador. Estas alertas se activaron cuando se superaron los umbrales predefinidos, 1500 ppm de CO<sub>2</sub>, o 100% de dosis diaria de ruido.

Estas notificaciones sirvieron como mecanismo de alerta en tiempo real, informando al investigador sobre la necesidad de ventilar el aula. Si bien, se observa en la Figura 41 varias alertas consecutivas, estas fueron programadas para ser enviadas en intervalos de 5 minutos, evitando saturar el chat de WhatsApp.

En las pruebas de campo nunca se superó el 100% de dosis diaria de ruido. Aunque nunca se superó dicho límite, el investigador pudo observar regularmente la exposición al ruido, mediante la pantalla OLED.

**Figura 41***Notificaciones de CallMeBot en WhatsApp - Prueba de Campo*

*Nota.* Adaptado de WhatsApp. Meta. (2025).

[https://play.google.com/store/apps/details?id=com.whatsapp&hl=es\\_CO](https://play.google.com/store/apps/details?id=com.whatsapp&hl=es_CO)

### Costo de Fabricación del Prototipo

El sistema fue diseñado con componentes de bajo costo y fácil acceso en el mercado. Según la tabla 11, el costo total de los materiales de fabricación fue de \$128.385 COP, considerando únicamente los materiales y componentes electrónicos principales necesarios para su funcionamiento como la placa de desarrollo, sensores, pantalla, fuente de alimentación, PCB, cableado básico y caja de proyecto. Algunos elementos fueron comprados en la plataforma AliExpress, mientras que otros en el mercado local.

**Tabla 11***Costo de Materiales Usados en el Prototipo*

Descripción	Cantidad	Valor (USD)	Total(USD)
INMP441	1	\$1.63	\$1.63
OLED 128X32	1	\$1.22	\$1.22
ESP32 - DEVKITC32 - CH340	1	\$2.18	\$2.18
SCD41	1	\$16.57	\$16.57
Condensador 100nF	1	\$0.04	\$0.04
Header Macho	1	\$0.90	\$0.90
PCB Universal 7x9	1	\$0.50	\$0.50
Cables	12	\$0.06	\$0.72
Termo-encogible 10x40mm	12	\$0.02	\$0.24
Soldadura	0.01	\$6.00	\$0.06
Caja impresa en 3D	1	\$7.00	\$7.00
Tornillos Philips M12 - 1.50mm x 30mm	4	\$0.05	\$0.20
Cargador 5V/2A + Cable USB Tipo C	1	\$3.00	\$3.00
			<b>\$29.23 USD</b>
			<b>\$128.385 COP<sup>1</sup></b>

*Nota.* <sup>1</sup> El valor de conversión usado es 1 USD= \$ 4.392,2 COP.

El costo total del proyecto, incluyendo, mano de obra, equipos, software, viajes, salidas de campo, materiales, suministros y bibliografía fue de \$2.970.744 COP. Las descripciones completas de estos valores se encuentran en la tabla 12. El valor estimado del trabajo del autor del proyecto se calculó tomando como referencia el Salario Mínimo Legal Mensual Vigente (SMLMV) en Colombia para el año 2024 equivalente a \$1.300.000 COP. Dado que el proyecto fue desarrollado en una jornada equivalente a medio tiempo durante cuatro meses, se valoró en \$2.600.000 COP.

**Tabla 12***Costo Total del Proyecto*

Recurso	Descripción	Valor
Equipo Humano	Estudiante autor del proyecto. 4 meses de desarrollo Medio Tiempo Base: SMLMV (2024)	\$2,600,000
	HP Elite 8300 SFF. CPU Intel(R) Core (TM) i5-3470 a 3.20GHz, 8 GB de RAM DDR3, 1TB HDD, Windows 10 Pro. Equipo Usado	\$0
Equipos y Software	Xiaomi Redmi Note 12	\$0
	iPhone 12	\$0
	Multímetro Techman TM 102 C	\$25,000
	Cautín 30W	\$25,000
	Plataformas de desarrollo: Arduino IDE, Thingspeak, CallMeBot API	\$0
Viajes y Salidas de Campo	Desplazamientos para pruebas de campo	\$140,000
Materiales y suministros	INMP441	\$7,172
	OLED 128X32	\$5,368
	ESP32 - DEVKITC32 - CH340	\$9,592
	SCD41	\$72,908
	Condensador 100nF	\$176
	Header Macho	\$3,960
	PCB Universal 7x9	\$2,200
	Cables	\$3,168
Termoencogible 10x40mm	\$1,056	
	Soldadura	\$264

Recurso	Descripción	Valor
	Caja impresa en 3D	\$30,800
	Tornillos Philips M12 - 1.50mm x 30mm	\$880
	Cargador 5V/2A + Cable USB Tipo C	\$13,200
	Cortafrío pequeño	\$15,000
	Alicate pequeño	\$15,000
Bibliografía	Artículos científicos en internet, biblioteca virtual UNAD	\$0
		<b>\$2,970,744</b>

*Nota.* Valores estimados en Colombia para el año 2024.

### **Especificaciones Técnicas del Prototipo**

- Dimensiones: 50 × 90 × 34 mm
- Alimentación: 5V / 2A (USB-C)
- Conectividad: Wi-Fi 2.4 GHz
- Configuración Wi-Fi: Modo AP
- Sensor CO<sub>2</sub>: SCD41
- Sensor CO<sub>2</sub> - Tecnología: NDIR
- Sensor CO<sub>2</sub> - rango: 400–5000 ppm
- Sensor CO<sub>2</sub> - exactitud: ±40 ppm + 5,0 %
- Sensor de sonido: INMP441
- Sensor de sonido - Tecnología: MEMS
- Sensor de sonido - Respuesta en frecuencia: 60 Hz-15 kHz Plana
- Sensor de sonido - SNR: 61dBA
- Sensor de sonido - Sensibilidad: -26 dBFS

- Pantalla: OLED - 128X32.
- Alertas en Tiempo Real: WhatsApp
- Registro de Datos: ThingSpeak

**Figura 42**

*Prototipo Final*



*Nota.* El prototipo permite la medición de ruido y CO<sub>2</sub>.

## Discusión

El prototipo logró cumplir el objetivo general del proyecto, el cual consistía en ofrecer una solución de bajo costo, basada en ESP32, capaz de monitorear en tiempo real los niveles de CO<sub>2</sub> y ruido en un aula de gamificación, y de notificar oportunamente a los docentes sobre situaciones críticas. La integración de los sensores, visualización en pantalla OLED, envío de datos a ThingSpeak y generación de alertas automáticas por WhatsApp, permitió monitorear las variables durante siete jornadas de prueba, bajo condiciones reales de operación en un entorno educativo.

Uno de los hallazgos más relevantes fue la facilidad con la que los niveles de CO<sub>2</sub> alcanzan valores superiores a 1500 ppm, límite recomendado por de Health and Safety Executive (2023). Este fenómeno se observó en sesiones con alta ocupación y poca ventilación, demostrando que el problema de acumulación de dióxido de carbono podría estar subestimado en las aulas. Esto corrobora la investigación de Fernández-Agüera et al. (2019) en escuelas mediterráneas, que muestran la rápida acumulación de CO<sub>2</sub> en entornos educativos con alta afluencia y baja ventilación. Por lo tanto, existe la necesidad de establecer protocolos de ventilación más rigurosos dentro de las rutinas diarias del aula. Las fluctuaciones de la concentración de CO<sub>2</sub> vistas en los gráficos de Thingspeak, muestran que cuando se abren puertas y ventanas, los niveles descienden bruscamente, mostrando la efectividad de la ventilación manual. Esto coincide con lo establecido por Health Canada (2021).

En cuanto al ruido, los niveles registrados superaron los 50 dBA y en algunos casos los 100 dBA. Aunque no se alcanzó el 100% de la dosis diaria de ruido recomendada por NIOSH (1998) para una jornada laboral, la percepción de molestia por parte del docente investigador fue constante durante las jornadas de prueba. Lo anterior se enlaza a las advertencias del Ministerio

de Salud y Protección Social (2024) de Colombia sobre la exposición prolongada al ruido excesivo y su correlación con el estrés, la ansiedad, la depresión y alteraciones del comportamiento.

Futuras versiones podrían incluir un análisis más profundo de los niveles de ruido, y del espectro de frecuencias, e incorporar las mediciones de temperatura y humedad, que permitan adquirir más información sobre las condiciones ambientales del aula.

La conexión a Internet presentó problemas ya que se estableció a través de una red Wi-Fi compartida desde un teléfono celular. A pesar de estas interrupciones el prototipo mantenía su funcionalidad local, visualizando en tiempo real los datos en la pantalla OLED. En pruebas realizadas en el hogar del investigador, utilizando un router convencional, no se presentaron desconexiones de red. Esto puede sugerir que la estructura del aula de gamificación puede generar interferencias en la señal. Cabe resaltar que, en el aula, existe un router institucional con buena cobertura, lo que permitiría mejorar la estabilidad del sistema en una implementación definitiva.

Desde el punto de vista del diseño electrónico, la selección de componentes fue adecuada para un sistema embebido, y se mantuvo una buena relación entre costo, tamaño y precisión. Sin embargo, puede optimizarse evitando usar una PCB, soldando los cables de sensores y pantalla directamente a la placa de desarrollo. Con esto se reducen aún más los costos y tiempo de fabricación, así como el volumen final del prototipo.

Entre las fortalezas del sistema está la integración con la plataforma ThingSpeak, la cual facilita el análisis de los datos y la toma de decisiones. De igual manera, las alertas automáticas enviadas por WhatsApp demostraron ser útiles para reaccionar en tiempo real ante niveles críticos, ofreciendo una solución práctica y accesible para el docente. La pantalla OLED cumplió

un rol importante en garantizar la visualización local de datos en casos donde la red Wi-Fi presentó fallos, lo cual muestra su importancia como elemento de redundancia.

La visualización gráfica en ThingSpeak, si bien es funcional, podría mejorarse mediante paneles más amplios o dashboards dedicados que representen con mayor claridad variables como la dosis acumulada de ruido. Para mejorar la limitación de almacenamiento de ThingSpeak, podría incorporarse un lector tarjeta SD que permita guardar datos localmente, pero aumentaría los costos del sistema final.

El costo total estimado de los materiales de fabricación del prototipo fue de aproximadamente \$128.385 COP. Este bajo costo muestra el potencial del sistema como una herramienta económica y escalable para instituciones educativas, sobre todo aquellas con recursos limitados.

Este tipo de sistema tiene potencial de impactar en el entorno escolar, ya que puede motivar acciones simples, como abrir puertas y ventanas, ajustar horarios de clases, modificar dinámicas pedagógicas e incluso diseñar mejores condiciones de la infraestructura. El bajo costo del sistema, lo hacen escalable a otros contextos de ocupación humana, como oficinas, transporte público o industrias, donde el monitoreo ambiental puede contribuir a la salud física, mental y al rendimiento de las personas.

Los resultados obtenidos abren la puerta a nuevas líneas de investigación y mejora, enfocadas en la calidad del ambiente interior y su relación con el bienestar en espacios compartidos.

## Conclusiones

Se cumplió con el objetivo general del proyecto, al prototipar un sistema de bajo costo basado en ESP32, capaz de monitorear en tiempo real los niveles de CO<sub>2</sub> y ruido en un aula de gamificación de un colegio de Mosquera. El sistema tiene funciones de almacenamiento en la nube y generación de alertas automáticas a través de WhatsApp, notificando a los docentes sobre el estado de estas variables.

El análisis de tecnologías permitió seleccionar componentes adecuados para el proyecto, equilibrando precisión, bajo costo y compatibilidad. Se seleccionó el sensor SCD41 para medir CO<sub>2</sub> con la tecnología NDIR, el sensor INMP441 para medir niveles de ruido con la tecnología MEMS, la placa de desarrollo ESP32- DevKitC, pantalla OLED 128x32 para visualización local, ThingSpeak para visualización en la nube, y CallMeBot como servicio de mensajería.

Se construyó un prototipo funcional utilizando un microcontrolador ESP32, con conexión Wi-Fi, capaz de capturar niveles de CO<sub>2</sub> y ruido en tiempo real, y con un costo total estimado de fabricación de \$128.385 COP. No se realizó un análisis comercial comparativo con productos existentes en el mercado, por lo que sus ventajas económicas deben interpretarse dentro del contexto experimental y académico de esta investigación.

Se implementó un mecanismo para la visualización y análisis en tiempo real de los datos recopilados utilizando ThingSpeak, permitiendo el monitoreo de los niveles de CO<sub>2</sub> y ruido en la nube.

Se integró un sistema de notificaciones automáticas a través de WhatsApp, utilizando la API de CallMeBot. Este sistema se programó para alertar al docente cuando los niveles de CO<sub>2</sub> superaron los 1500 ppm, y cuando se excedía la dosis de ruido máxima (85dBA – 8 horas).

El desempeño del prototipo fue probado durante 7 días, mostrando su funcionamiento en condiciones reales. Se observaron valores superiores a 50 dBA y picos de más de 100 dBA. También se apreciaron niveles de CO<sub>2</sub> superiores 1500 ppm en horarios de alta ocupación. Las pruebas mostraron que una conexión a internet estable es esencial para que el sistema funcione sin interrupciones.

### Referencias Bibliográficas

- Ahmad, M. (2021). *How does a MEMS microphone work?* Planet Analog.  
<https://www.planetanalog.com/how-does-mems-microphone-work/>
- Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (s.f.). *Resolución 1792 de 1990 Ministerio del Trabajo*.  
<https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=87427>
- Amazon Web Services, Inc. (s.f.). *AWS IoT Core*. <https://aws.amazon.com/es/iot-core/>
- American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers. (2001).  
*Ventilation for acceptable indoor air quality*. Atlanta, ASHRAE.  
[https://www.ashrae.org/File%20Library/Technical%20Resources/Standards%20and%20Guidelines/Standards%20Addenda/62-2001/62-2001\\_Addendum-n.pdf](https://www.ashrae.org/File%20Library/Technical%20Resources/Standards%20and%20Guidelines/Standards%20Addenda/62-2001/62-2001_Addendum-n.pdf)
- American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers. (2016).  
*ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2016: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*.  
 ASHRAE. [https://upgreengrade.ir/admin\\_panel/assets/images/books/25223276727.pdf](https://upgreengrade.ir/admin_panel/assets/images/books/25223276727.pdf)
- American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers. (2022). *ASHRAE position document on indoor carbon dioxide*.  
[https://www.ashrae.org/file%20library/about/position%20documents/pd\\_indoorcarbondioxide\\_2022.pdf](https://www.ashrae.org/file%20library/about/position%20documents/pd_indoorcarbondioxide_2022.pdf)
- AMS. (2016). *CCS811 Ultra-Low Power Digital Gas Sensor for Monitoring Indoor Air Quality (v1-00)*. [https://cdn.sparkfun.com/assets/learn\\_tutorials/1/4/3/CCS811\\_Datasheet-DS000459.pdf](https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/1/4/3/CCS811_Datasheet-DS000459.pdf)
- APC International. (2025). *How piezoelectric sensors work?*  
<https://www.americanpiezo.com/blog/how-piezoelectric-sensors-work/>

ArduinoModules.info. (s.f.). *KY-037 high sensitivity sound detection module*.

<https://arduinomodules.info/ky-037-high-sensitivity-sound-detection-module/>

Azuma, K., Kagi, N., Yanagi, U., y Osawa, H. (2018). *Effects of low-level inhalation exposure to carbon dioxide in indoor environments: A short review on human health and psychomotor performance*. *Environment international*, 121(Pt 1), 51–56.

<https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.08.059>

Beltrán Moreno, A. M. (2019). *Sistema de ventilación y purificación del aire para optimizar el confort ambiental de los estudiantes en las aulas de clase de los colegios urbanos de Bogotá (Tesis de pregrado, Universidad El Bosque)*.

<https://es.scribd.com/document/669817527/Beltran-Moreno-Ana-Maria-2019>

Blynk. (s.f.). *Blynk: a low-code IoT software platform for businesses and developers*.

<https://blynk.io/>

Brink, H. W., Loomans, M. G., Mobach, M. P., y Kort, H. S. (2021). *Classrooms' indoor environmental conditions affecting the academic achievement of students and teachers in higher education: A systematic literature review*. *Indoor air*, 31(2), 405-425.

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ina.12745>

CallMeBot. (s.f.). *CallMeBot*. <https://www.callmebot.com/>

Celestina, M., Hrovat, J., y Kardous, C. A. (2018). *Aplicaciones de medición de nivel de sonido basadas en teléfonos inteligentes: Evaluación del cumplimiento con los estándares internacionales de medidores de nivel de sonido*. *Acústica aplicada*, 139, 119-128.

<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.04.011>

Chamorro, P., Martín, J., Martín, P., y Navas, L. M. (2008). *Fundamentos de la tecnología OLED*. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/2578>

Chanchí, G. E., Ospina, M. A., y Saba, M. (2020). *Sistema IoT para la monitorización y análisis de niveles de ruido*. Revista Espacios, 41(50), 39-50.

<http://www.1.revistaespacios.com/a20v41n50/a20v41n50p04.pdf>

Cirrus Logic, Inc. (2015). *Introduction to MEMS microphones: Applications note WAN\_0290 (Rev. 1.0)*. Mouser Electronics.

[https://www.mouser.com/catalog/additional/Cirrus%20Logic\\_WAN0290\\_v1.0.pdf](https://www.mouser.com/catalog/additional/Cirrus%20Logic_WAN0290_v1.0.pdf)

CUI Devices. (2008). *Electret Condenser Microphone CMA-4544PF-W*. [https://cdn-](https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/CMA-4544PF-W.pdf)

[shop.adafruit.com/datasheets/CMA-4544PF-W.pdf](https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/CMA-4544PF-W.pdf)

DFRobot. (s.f.). *Gravity: Analog Infrared CO<sub>2</sub> Sensor For Arduino (0~5000 ppm)*.

<https://www.farnell.com/datasheets/3176108.pdf>

DigiKey (2024). *Tech Forum: Microphone Sound Sensors: Types, Functionality, and*

*Applications*. <https://forum.digikey.com/t/microphone-sound-sensors-types-functionality-and-applications/44389>

Digi-Key Electronics. (s.f.). *MEMS vs. ECM: Comparing Microphone Technologies*.

<https://www.digikey.com/es/articles/mems-vs-ecm-comparing-microphone-technologies>

enHealth. (2018). *The health effects of environmental noise*. Commonwealth of Australia.

<https://www.health.gov.au/sites/default/files/documents/2020/02/enhealth-guidance-the-health-effects-of-environmental-noise.pdf>

Envira. (2023). *COGITI: Medir CO<sub>2</sub> en aulas para vigilar la calidad del aire en el inicio del*

*curso*. <https://envira.es/cogiti-medir-co2-aulas-vigilar-calidad-aire-inicio-curso/>

ESPBoards. (s.f.). *ESP32 C3 Super Mini Development Board*.

<https://www.espboards.dev/esp32/esp32-c3-super-mini/>

Espressif Systems. (2024). *ESP32 series datasheet (Versión 4.6)*.

[https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf)

Espressif Systems. (s.f. -a). *ESP32-DevKitC*. [https://docs.espressif.com/projects/esp-dev-](https://docs.espressif.com/projects/esp-dev-kits/en/latest/esp32/esp32-devkitc/index.html)

[kits/en/latest/esp32/esp32-devkitc/index.html](https://docs.espressif.com/projects/esp-dev-kits/en/latest/esp32/esp32-devkitc/index.html)

Espressif Systems. (s.f. -b). *ESP32-S3-DevKitC-1*. [https://docs.espressif.com/projects/esp-dev-](https://docs.espressif.com/projects/esp-dev-kits/en/latest/esp32s3/esp32-s3-devkitc-1/index.html)

[kits/en/latest/esp32s3/esp32-s3-devkitc-1/index.html](https://docs.espressif.com/projects/esp-dev-kits/en/latest/esp32s3/esp32-s3-devkitc-1/index.html)

Fernández-Agüera, J., Campano, M.Á., Domínguez Amarillo, S., Acosta García, I.J. y Sendra,

J.J. (2019). *CO<sub>2</sub> Concentration and Occupants' Symptoms in Naturally Ventilated*

*Schools in Mediterranean Climate*. *Buildings*, 9 (9)

[https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/92473/buildings-09-](https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/92473/buildings-09-00197.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[00197.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/92473/buildings-09-00197.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Figueroa Montaña, A., Orozco Medina, M. G., y Preciado Caballero, N. E. (2012). *Niveles de*

*ruido y su relación con el aprendizaje y la percepción en escuelas primarias de*

*Guadalajara, Jalisco, México*. <https://www.redalyc.org/pdf/467/46725267001.pdf>

Gokhale, P., Bhat, O., y Bhat, S. (2018). *Introduction to IOT*. *International Advanced Research*

*Journal in Science, Engineering and Technology*, 5(1).

<https://doi.org/10.17148/IARJSET.2018.517>

Google. (s.f.). *Firebase*. <https://firebase.google.com/>

Guardino, X. (2015). *Calidad del aire interior*. *Encyclopaedia Of Occupational Health And*

*Safety*. <https://www.iloencyclopaedia.org/es/part-vi-16255/indoor-air-quality>

Guo, M., Yu, W., Sun, Y., Wang, L., Zhou, H., y Zhang, Y. (2023). *Effects of increasing indoor*

*negative air ions on cognitive performance and health of high pure CO<sub>2</sub> level-exposed*

*college students. Environmental Science and Pollution Research.*

<https://doi.org/10.1155/2023/8298339>

Health and Safety Executive. (2023). *Using CO2 monitors.*

<https://www.hse.gov.uk/ventilation/using-co2-monitors.htm>

Health Canada. (2021). *Residential indoor air quality guidelines: Carbon dioxide.*

<https://www.canada.ca/en/health-canada/services/publications/healthy-living/residential-indoor-air-quality-guidelines-carbon-dioxide.html>

InvenSense Inc. (2014). *INMP441: Omnidirectional Microphone with Bottom Port and I2S Digital Output.* (Revision 1.1, Document Number: DS-INMP441-00).

<https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/INMP441.pdf>

Joy-IT. (2022). *COM-LCD16X2 Datasheet.* <https://cdn->

[reichelt.de/documents/datenblatt/A300/COM-LCD16X2\\_DATASHEET\\_2022-03-07.pdf](https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/A300/COM-LCD16X2_DATASHEET_2022-03-07.pdf)

Joy-IT. (2024). *COM-LCD20x4-B Datasheet (EN).* <https://joy-it.net/files/files/Produkte/COM->

[LCD20x4-B/COM-LCD20x4-B\\_Datasheet-EN\\_2024-08-14.pdf](https://joy-it.net/files/files/Produkte/COM-LCD20x4-B/COM-LCD20x4-B_Datasheet-EN_2024-08-14.pdf)

Knowles Electronics. (2014). *SPW2430HR5H-B Top Port SiSonic™ Microphone (Revision A).*

Mouser Electronics. [https://www.mouser.com/datasheet/2/218/SPW2430HR5H-B-1290924.pdf?srsId=AfmBOoq6dMZ\\_xwe-](https://www.mouser.com/datasheet/2/218/SPW2430HR5H-B-1290924.pdf?srsId=AfmBOoq6dMZ_xwe-)

[KbeyPHyoTbhpM2q4bACovhgRwQpEzWE72faM8ulr](https://www.mouser.com/datasheet/2/218/SPW2430HR5H-B-1290924.pdf?srsId=AfmBOoq6dMZ_xwe-KbeyPHyoTbhpM2q4bACovhgRwQpEzWE72faM8ulr)

Knowles. (n.d.). *SPH0645LM4H-B Rev B Datasheet: I2S Output Digital Microphone.*

<https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/3421/i2S+Datasheet.PDF>

Kodali, R. K., y Mahesh, K. S. (2016). *Low cost ambient monitoring using ESP8266.* In 2016

2nd International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I) (pp.

779-782). IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7918788>

- Lugo, A. Q., Londoño, S. H., y Gaspar, C. A. Á. (2023). *Sistema de monitoreo de la intensidad de ruido en zonas de hospitalización por medio del internet de las cosas*. Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería. <https://doi.org/10.26507/paper.3131>
- Mahetaliya, S., Makwana, D., Pujara, A., y Hanumante, S. (2021). *IoT based air quality index monitoring using ESP32*. International Research Journal of Engineering and Technology, 8(4), 5186-5191. [https://svv-research-data.s3.ap-south-1.amazonaws.com/paper\\_160126\\_1620225357.pdf](https://svv-research-data.s3.ap-south-1.amazonaws.com/paper_160126_1620225357.pdf)
- Mariete. (2023). *La biblia del sensor de CO<sub>2</sub> MH-Z19B*. eMariete. <https://emariete.com/sensor-co2-mh-z19b/>
- Marques, G., y Pitarma, R. (2020). *A Real-Time Noise Monitoring System Based on Internet of Things for Enhanced Acoustic Comfort and Occupational Health*. IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9152026>
- Maxim Integrated Products. (2001). *MAX4465–MAX4469 Low-Cost, Micropower, SC70/SOT23-8, Microphone Preamplifiers with Complete Shutdown (Rev 1)*. <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/MAX4465-MAX4469.pdf>
- Maxim Integrated. (2009). *MAX9814 Microphone Amplifier with AGC and Low-Noise Microphone Bias (Rev 2)*. <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/MAX9814.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2021). *Guía de referencia para la calidad del aire interior(CAI) y prevención de riesgos de transmisión de SARS-CoV-2 (COVID-19)* <https://www.distritoenergetico.com/wp-content/uploads/2021/04/Guia-de-referencia-CAI-2021- compressed.pdf>
- Ministerio de Salud (1983). *Resolución 8321 del 4 de Agosto de 1983. Por la cual se dictan normas sobre Protección y Conservación de la Audición de la Salud y el bienestar de las*

*personas, por causa de la producción y emisión de ruidos.*

<https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=6305>

Ministerio de Salud y Protección Social (2024). *Ruido excesivo en entornos: una de las principales causas para la pérdida auditiva.*

<https://www.minsalud.gov.co/Paginas/Ruido-excesivo-en-entornos-una-de-las-principales-causas-para-perdida-auditiva.aspx>

Moya-López, C., y Malla-Morocho, I. (2022). *Trastornos de aprendizaje y su incidencia en el rendimiento académico de un estudiante: Análisis de caso.* Revista Psicología UNEMI, 6(010), 51-67. <https://doi.org/10.29076/issn.2602-8379vol6iss10.2022pp51-67p>

National Aeronautics and Space Administration. (2024). *Dióxido de carbono: signos vitales del planeta.* NASA Climate. <https://climate.nasa.gov/en-espanol/signos-vitales/dioxido-de-carbono/?intent=111>

National Institute for Occupational Safety and Health (1998). *Criteria for a recommended standard: occupational noise exposure.* DHHS (NIOSH) Publication Number 98-126. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/98-126/>

National Institute for Occupational Safety and Health. (s.f.). *NIOSH Sound Level Meter App / Noise and Hearing Loss.* <https://www.cdc.gov/niosh/noise/about/app.html>

Organización Mundial de la Salud. (2001). *Estimating the burden of disease from noise: A guide for decision-makers.* <https://www.who.int/publications/i/item/9241591927> .

Organización Mundial de la Salud. (2022). *Environmental noise. In Compendium of WHO and other UN guidance on health and environment, 2022 update (WHO/HEP/ECH/EHD/22.01).* Geneva: World Health Organization.

[https://cdn.who.int/media/docs/default-source/who-compendium-on-health-and-environment/who\\_compendium\\_noise\\_01042022.pdf](https://cdn.who.int/media/docs/default-source/who-compendium-on-health-and-environment/who_compendium_noise_01042022.pdf)

Passchier-Vermeer, W., y Passchier, W. F. (2000). *Noise exposure and public health.*

*Environmental Health Perspectives*, 108(suppl 1), 123-131.

<https://doi.org/10.1289/ehp.00108s1123>

Quiroga Barrios, D. (2023). *Implementación de una red inalámbrica de sensores de CO<sub>2</sub> usando IoT como sistema de alerta ante una ventilación deficiente frente al Covid-19 en aulas de clase.* Universidad Antonio Nariño <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/8271>.

Renke (2024). *CO<sub>2</sub> Sensors: definition, types, and how to choose?* <https://www.renkeer.com/co2-sensors-types-and-choose/>

Satish, U., Mendell, M. J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S., y Fisk, W. J.

(2012). *Is CO<sub>2</sub> an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO<sub>2</sub>*

*Concentrations on Human Decision-Making Performance.* *Environmental Health*

*Perspectives*, 120(12), 1671-1677. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104789>

ScioSense. (2022). *ENS160 Datasheet (Version 1.1, SC-001224-DS-7).*

<https://cdn.sparkfun.com/assets/3/c/7/5/5/SC-001224-DS-7-ENS160-Datasheet.pdf>

Sensirion AG. (2024). *SCD4x: Breaking the size barrier in optical CO<sub>2</sub> sensing (Version 1.6).*

[https://sensirion.com/media/documents/48C4B7FB/66E05452/CD\\_DS\\_SCD4x\\_Datasheet\\_D1.pdf](https://sensirion.com/media/documents/48C4B7FB/66E05452/CD_DS_SCD4x_Datasheet_D1.pdf)

Shahnaz, N., Brown, S. (2024). *How Accurate Are These Smartphone Sound Measurement*

*Apps?.* *Canadian Audiologist.* <https://canadianaudiologist.ca/feature-4/>

Svantek. (2024a). *Nivel de presión sonora (SPL) | Svantek Academy.* SVANTEK - Sound And

Vibration. <https://svantek.com/es/academia/nivel-de-presion-sonora-spl/>

Svantek. (2024b). *Nivel equivalente continuo de sonido Leq* | Academia Svantek. SVANTEK - Sound And Vibration. <https://svantek.com/es/academia/nivel-equivalente-continuo-de-sonido-leq/>

Telegram Core. (s. f.). *Bots*. <https://core.telegram.org/bots>

TextmeBot. (s. f.). *WhatsApp API*. <https://textmebot.com/>

ThingSpeak (s.f.). *Precios de ThingSpeak: Estándar*.

[https://thingspeak.mathworks.com/prices/thingspeak\\_standard](https://thingspeak.mathworks.com/prices/thingspeak_standard)

ThingSpeak. (s. f.). *ThingSpeak Documentation - MathWorks América Latina*

<https://la.mathworks.com/help/thingspeak/index.html>

Twardella, D., Matzen, W., Lahrz, T., Burghardt, R., Spegel, H., Hendrowarsito, L., Frenzel, A.

C., y Fromme, H. (2012). *Effect of classroom air quality on students concentration:*

*Results of a cluster-randomized cross-over experimental study.*

[https://www.protectededucation.com/wp-content/uploads/2022/06/1ii-Effect-of-classroom-air-quality-on-students-concentration\\_results-of-a-cluster-randomized-cross-over-experimental-study-1.pdf](https://www.protectededucation.com/wp-content/uploads/2022/06/1ii-Effect-of-classroom-air-quality-on-students-concentration_results-of-a-cluster-randomized-cross-over-experimental-study-1.pdf)

Twilio. (s.f.). *Precios de mensajería de WhatsApp*. [https://www.twilio.com/es-](https://www.twilio.com/es-mx/whatsapp/pricing)

[mx/whatsapp/pricing](https://www.twilio.com/es-mx/whatsapp/pricing)

Ubidots. (s.f.). *Ubidots : IoT industrial potente pero sencillo*. <https://es.ubidots.com/>

Vishay. (2017). 128 x 32 Graphic OLED (Document Number: 37894).

<https://www.vishay.com/docs/37894/oled128o032dlpp3n00000.pdf>

Vishay. (s.f.). *OLED 128 x 64 Dots Graphic Display*.

<https://www.vishay.com/docs/37902/oled128o064dbpp3n00000.pdf>

Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd. (2015). *MQ135 Gas Sensor (Ver 1.4)*

*Manual*. [https://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Semiconductor%20Gas%20Sensor/MQ135%20\(Ver1.4\)%20%20Manual.pdf](https://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Semiconductor%20Gas%20Sensor/MQ135%20(Ver1.4)%20%20Manual.pdf)

Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd. (2016). *Intelligent Infrared CO<sub>2</sub> Module*

(*Model: MH-Z19B*) *User's Manual (Version: 1.0)*. [https://www.winsen-sensor.com/d/files/infrared-gas-sensor/mh-z19b-co2-ver1\\_0.pdf](https://www.winsen-sensor.com/d/files/infrared-gas-sensor/mh-z19b-co2-ver1_0.pdf)

Zhou, L., He, Y., Zhang, Q., y Zhang, L. (2021). *Carbon dioxide sensor module based on NDIR*

*technology*. *Micromachines*, 12(7), 845. <https://doi.org/10.3390/mi12070845>

## Apéndices

### Apéndice A

*Código Fuente en GitHub del Sistema de Monitoreo*

<https://github.com/profesormundial/esp32-co2-noise.git>