

DISPOSITIVO IOT DE BAJO COSTO PARA EL MONITOREO REMOTO DE RUIDO
AMBIENTAL

MATHIAS ALBERTO CASTILLO MEZA

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2024

DISPOSITIVO IOT DE BAJO COSTO PARA EL MONITOREO REMOTO DE RUIDO
AMBIENTAL

MATHIAS ALBERTO CASTILLO MEZA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
ELECTRÓNICO

DIRECTORES:

ASFUR BARANDICA LÓPEZ, M.Sc.

JOAO LUIS EALO CUELLO, Ph.D.

GRUPO DE INVESTIGACIÓN PSI

GRUPO DE INVESTIGACIÓN MEJORAMIENTO INDUSTRIAL

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2024

Nota de aceptación:

Firma del director del trabajo

Firma del director del trabajo

Firma del evaluador

Firma del evaluador

Santiago de Cali, 13 de diciembre del 2024.

Dedico este trabajo a mi familia, especialmente a mis padres, quienes con su amor incondicional, sacrificios y enseñanzas me han brindado todas las herramientas para necesarias para alcanzar este logro.

A Laura M, cuya compañía y apoyo constante fue fundamental en este proceso. Su dedicación, paciencia y entusiasmo me inspiraron a dar lo mejor de mí mismo y nunca perder de vista la meta.

A mis amigos, que con su compañía y palabras de aliento hicieron más llevadero este recorrido, recordándome siempre la importancia del equilibrio entre esfuerzo y descanso.

A mis profesores, por su capacidad de inspirar curiosidad, disciplina y pasión. Sus enseñanzas fueron más allá de las aulas, dejando una huella profunda en mi desarrollo personal y profesional.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. MARCO REFERENCIAL.....	15
1.1. MARCO TEÓRICO	15
1.1.1. Sonido y ruido.	15
1.1.2. Intensidad sonora.....	15
1.1.3. Presión sonora.	16
1.1.4. Frecuencia sonora.....	16
1.1.5. Parámetros acústicos.....	17
1.1.5.1. Nivel equivalente de ruido (Leq).	17
1.1.5.2. Nivel máximo (Lmax) y nivel mínimo (Lmin).	17
1.1.5.3. Nivel de exposición sonora (LAE o SEL).	17
1.1.6. Normativa sobre ruido.	17
1.1.6.1. Normas ISO sobre ruido ambiental.	18
1.1.6.2. Directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS).	18
1.1.6.3. Normativa en Colombia.	19
1.1.7. Ponderación frecuencial.	20
1.1.7.1. Ponderación A -dBA/dB(A).	20
1.1.7.2. Ponderación C -dBC/dB(C).	20
1.1.7.3. Ponderación Z -dBZ/dB(Z).	21
1.1.8. Tecnologías para medición de ruido.....	21
1.1.8.1. Sonómetros.....	21
1.1.8.2. Micrófonos.....	21
1.1.8.2.1. Micrófonos MEMS.	23
1.1.9. Internet de las Cosas (IoT).	23
1.1.9.1. Protocolos de comunicación IoT.....	24
1.2. ANTECEDENTES	28

2. COMPARACIÓN EXPERIMENTAL DE TECNOLOGÍAS DE MICRÓFONOS	33
2.1. SELECCIÓN DE MICRÓFONOS	33
2.2. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE PRUEBAS	34
2.3. CARACTERIZACIÓN DEL PARLANTE COMO FUENTE DE REFERENCIA	37
2.4. RESULTADOS DE PRUEBAS EXPERIMENTALES POR TIPO DE MICRÓFONO	40
3. DISEÑO Y DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO IOT	42
3.1 REQUERIMIENTOS GENERALES DEL SISTEMA.....	42
3.1.1. Tamaño y forma.	42
3.1.2. Autonomía y energía.	42
3.1.2.1. Duración de la batería.	42
3.1.2.2. Monitoreo del estado de la batería.	42
3.1.3. Comunicación.	42
3.1.4. Funcionales.....	42
3.1.5. Protección y robustez.....	42
3.1.6. Económicos.....	43
3.1.7. Rendimiento de audio.	43
3.1.7.1. Rango dinámico.	43
3.1.7.2. Ancho de banda.	43
3.1.8. Mediciones adicionales.	43
3.2. ARQUITECTURA DE LA SOLUCIÓN	43
3.2.1. Diseño del dispositivo.....	43
3.2.2. Selección de componentes.	44
3.2.2.1. Soporte mecánico.	44
3.2.2.2. Micrófono.	44
3.2.2.3. Sensor de temperatura y humedad.	44
3.2.2.4. Microcontrolador.....	45
3.2.2.5. Transmisión de datos.	45
3.2.2.6. Alimentación.....	45
3.2.2.7. Interruptor.....	46
3.2.3. Plataforma en la nube.	47

3.3. ESPECIFICACIONES DE SOFTWARE	47
3.4. PROCESO DE FABRICACION	51
3.5. COSTOS DEL DISPOSITIVO	55
3.5.1 Componentes accesibles y económicos.....	56
3.5.2. Diseño eficiente.....	57
3.5.3. Tecnología asequible.	57
4. PRUEBAS Y RESULTADOS	59
4.1. PRUEBAS FUNCIONALES.....	59
4.1.1. Sensor de temperatura y humedad SHT40.	59
4.1.2. Micrófono INMP441.....	59
4.1.3. Transmisión LoRaWAN.	60
4.1.4. Visualización datos.....	61
4.2. PRUEBAS DEL DISPOSITIVO.	61
5. CONCLUSIONES	66
6. RECOMENDACIONES	68
BIBLIOGRAFÍA.....	69
ANEXO A. Frecuencias de banda media de un tercio de octava y banda de octava en el rango de audio.	75

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Tipos de micrófonos	22
Tabla 2. Comparación de protocolos de comunicación IoT.	25
Tabla 3. Características micrófonos MEMS bajo prueba.....	33
Tabla 4. Relación de equipos utilizados	35
Tabla 5. Cálculo de duración de batería.....	45
Tabla 6. Librerías utilizadas en la programación del dispositivo de monitoreo de ruido ambiental.	48
Tabla 7. Costos de componentes.....	56
Tabla 8. Comparación de costos con dispositivos comerciales	58
Tabla 9. Comparación del error porcentual en la medición de nivel presión sonora entre dispositivos	63
Tabla 10. Comparación del error porcentual en la medición de nivel presión sonora entre dispositivos.	64

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Ilustración 1. Curvas de ponderación de frecuencia - 'A', 'C' y 'Z'	21
Ilustración 2. Diagrama montaje experimental.....	34
Ilustración 3. Montaje experimental dentro de la cámara anecoica.	35
Ilustración 4. Montaje experimental en el exterior de la cámara anecoica.	36
Ilustración 5. Diagrama de bloques montaje experimental con micrófono calibrado.	37
Ilustración 6. Diagrama de flujo cálculo de presión sonora.....	37
Ilustración 7. Respuesta obtenida con micrófono calibrado, ante emisión de señal sinusoidal en experimento en cámara anecoica.....	38
Ilustración 8. Respuesta obtenida con micrófono calibrado ante emisión de señal sinusoidal de 1 kHz con diferentes niveles de presión sonora en experimento en cámara anecoica.	39
Ilustración 9. Ajuste de una función logarítmica para representar los datos obtenidos experimentalmente.....	39
Ilustración 10. Diagrama de bloques montaje experimental con micrófono MEMS y micrófono calibrado.....	40
Ilustración 11. Respuesta comparativa entre micrófono calibrado y los tres micrófonos MEMS bajo estudio, ante emisión de señal sinusoidal en experimento en cámara anecoica.	40
Ilustración 12. Respuesta comparativa entre micrófono calibrado y los tres micrófonos MEMS bajo estudio, ante emisión de señal sinusoidal de 1 kHz con diferentes niveles de presión sonora en experimento en cámara anecoica.	41
Ilustración 13. Diagrama de bloques del dispositivo	44
Ilustración 14. Componentes que integran el dispositivo.....	47
Ilustración 15. Rutina de flujo del dispositivo	49
Ilustración 16. Rutina de flujo para el ciclo lectura de datos.	50
Ilustración 17. Proceso de elaboración dispositivo.	51
Ilustración 18. Vista inferior – lateral derecho del dispositivo.....	52
Ilustración 19. Diagrama esquemático del dispositivo	53

Ilustración 20. Diseño de PCB	54
Ilustración 21. Montaje final del dispositivo	54
Ilustración 22. Sistema desarrollado	55
Ilustración 23. Prueba funcional del sensor de temperatura y humedad.....	59
Ilustración 24. Prueba funcional del micrófono.	60
Ilustración 25. Centro de control The Things Stack.	60
Ilustración 26. Datos recibidos en plataforma The Things Stack.	60
Ilustración 27. Datos recibidos en la plataforma ThingSpeak.	61
Ilustración 28. Respuesta comparativa entre primer dispositivo, sonómetro y micrófono calibrado ante emisión de señal sinusoidal en experimento en cámara anecoica.	62
Ilustración 29. Respuesta comparativa entre segundo dispositivo, sonómetro y micrófono calibrado ante emisión de señal sinusoidal en experimento en cámara anecoica.	62
Ilustración 30. Diferencia porcentual entre micrófono calibrado, sonómetro comercial y dispositivos contruidos ante emisión de señal sinusoidal en experimento en cámara anecoica.	63
Ilustración 31. Diferencia porcentual entre los dos dispositivos y sonómetro calibrado TASI ante emisión de señal sinusoidal en experimento en cámara anecoica.	64

LISTA DE ANEXOS

pág.

ANEXO A. Frecuencias de banda media de un tercio de octava y banda de octava en el
rango de audio. 75

RESUMEN

La falta de datos sobre los niveles de ruido ambiental impide que las autoridades implementen medidas de control efectivas. Para abordar este problema, se analizaron diversas propuestas de sistemas de monitoreo de bajo costo, lo que sirvió como un primer paso para concebir un sistema que se adapte a nuestro entorno específico. Una vez analizadas estas propuestas, se procedió a la creación de un prototipo que fue evaluado para verificar su eficacia y funcionalidad. Las características esenciales de este dispositivo incluyen un bajo costo, capacidad de operación remota y la integración en un sistema de múltiples sensores, lo que permite un monitoreo más eficiente del ruido ambiental. Este enfoque integral tiene como objetivo proporcionar a las autoridades las herramientas necesarias para implementar medidas de control de ruido más efectivas y basadas en datos precisos.

Palabras clave: ruido, medición de ruido ambiental, sensores de bajo costo, red de sensores, Internet de las cosas (IoT).

SUMMARY

The lack of data on environmental noise levels prevents authorities from implementing effective control measures. To address this problem, various proposals for low-cost monitoring systems were analyzed, which served as a first step in conceiving a system that would adapt to our specific environment. Once these proposals were analyzed, a prototype was created and evaluated to verify its effectiveness and functionality. The essential features of this device include low cost, remote operation capability and integration into a multi-sensor system, allowing for more efficient monitoring of ambient noise. This comprehensive approach aims to provide authorities with the necessary tools to implement more effective noise control measures based on accurate data.

Key words: noise, ambient noise level, low-cost sensors, sensor network, Internet of Things (IoT).

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, en los centros urbanos donde se concentra la mayor densidad poblacional, se ha venido presentando un crecimiento de diversas actividades, desde lo cultural a lo cotidiano, como lo son conciertos, comercio, festividades religiosas, etc. Lo anterior genera una fuerte problemática, el ruido ambiental derivado de los altos niveles de presión sonora que se presentan por el sonido excesivo, conlleva a problemas de salud en las diversas poblaciones tanto partícipes como ajenas que se encuentran dentro del rango de afectación.

En ciudades como Cali, organismos gubernamentales reguladores, como el Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA), utilizan dispositivos para la medición del ruido ambiental conocidos como sonómetros, pero estos equipos tienen un costo elevado y requieren de personas capacitadas para su uso. Aunque existen soluciones propuestas de dispositivos autónomos o semiautónomos para realizar esta labor, muchas de estas mantienen costos elevados o no realizan mediciones de manera confiable. En este contexto, surge la necesidad de desarrollar una solución innovadora y accesible.

Por lo anterior, este proyecto se enfocó en desarrollar un dispositivo IoT que permita el monitoreo del nivel de ruido ambiental de manera confiable y a bajo costo, considerando las regulaciones vigentes, siguiendo los siguientes objetivos:

- Realizar un compendio de las soluciones existentes planteadas a nivel mundial, nacional y local.
- Comparar experimentalmente tecnologías de micrófonos disponibles en el mercado para seleccionar el dispositivo a utilizar en el prototipo.
- Desarrollar la arquitectura general del sistema, requerida para dar solución a la problemática.
- Desarrollar algoritmos para la captura, el procesamiento, transmisión y visualización de los datos obtenidos.
- Diseñar el protocolo de pruebas para evaluar el funcionamiento del dispositivo teniendo en cuenta reglamentaciones vigentes.

El documento se desarrolla en cinco capítulos. En el primer capítulo se introduce al lector al tema de investigación desarrollando un marco referencial donde se abordan los conceptos de acústica relevantes y los antecedentes de soluciones similares existentes. El segundo capítulo presenta la comparación experimental de las diferentes tecnologías de micrófonos con el fin de identificar el más óptimo para el desarrollo del dispositivo,

esto abarca la selección de micrófonos, la metodología de pruebas, la caracterización de la fuente de referencia y los resultados experimentales.

En el tercer capítulo, se describe el diseño y desarrollo del dispositivo IoT, incluyendo los requerimientos generales, la arquitectura de la solución, las especificaciones de software, el proceso de fabricación y el análisis de costos. El cuarto capítulo expone las pruebas funcionales realizadas con el dispositivo y sus resultados obtenidos. Finalmente, en el quinto capítulo se presentan las conclusiones del proyecto.

1. MARCO REFERENCIAL

En este capítulo se establece el marco referencial necesario para el análisis del ruido ambiental, abordando conceptos claves del sonido y ruido, sus parámetros acústicos y normativa relevante a nivel internacional y nacional. También, se exploran tecnologías de medición, como sonómetros y micrófonos MEMS, y el uso del IoT junto con sus protocolos de comunicación, destacando su impacto en la monitorización de ruido ambiental. Finalmente, se presentan antecedentes del monitoreo ambiental entre 2014 y 2024, tanto a nivel nacional como internacional, ofreciendo un contexto evolutivo que respalda el desarrollo tecnológico en la gestión del ruido.

1.1. MARCO TEÓRICO

En esta sección se abordan los conceptos fundamentales relacionados con la medición de ruido ambiental, abordando desde las definiciones físicas de ruido y sonido, los parámetros acústicos, la forma de calcular la presión sonora y las distintas ponderaciones de frecuencia sonora, hasta las tecnologías utilizadas para la medición del ruido ambiental y una revisión de los tipos de micrófonos más relevantes para estas aplicaciones.

1.1.1. Sonido y ruido. El sonido es un fenómeno físico que consiste en una perturbación que se propaga a través de un material elástico, como el aire, que produce una alteración de la presión atmosférica que se transmiten en un rango determinado de frecuencias a través del aire y que resultan perceptibles por el órgano auditivo [1]. Por otro lado, se denomina ruido a todo sonido peligroso, molesto, inútil o desagradable. Cuyas fuentes pueden provenir del tráfico vehicular, tráfico aéreo, comercio, actividades lúdicas y recreativas, construcción, perifoneo, entre otras [2].

El ruido se caracteriza por su irregularidad y su capacidad de impactar negativamente en la salud y el bienestar, especialmente cuando excede niveles aceptables establecidos por normativas [3]. Es un contaminante que tiene el potencial de afectar la salud de las personas y deteriorar su calidad de vida, ya que una exposición prolongada a altos niveles de ruido puede conllevar a la pérdida de la audición o a desarrollar enfermedades como el tinnitus [4].

1.1.2. Intensidad sonora. Es la cantidad de energía que una onda sonora transporta por unidad de tiempo a través de una unidad de área perpendicular a la dirección de propagación del sonido. Esta magnitud mide el flujo de energía sonora que pasa a través de una superficie específica, lo que la hace clave para evaluar cómo se distribuye la energía del sonido en el espacio.

La intensidad sonora es una magnitud vectorial que se mide en vatios por metro cuadrado (W/m^2), que indica la cantidad de energía transportada y la dirección que señala hacia donde fluye la energía. Esto implica que el sonido tiene un flujo de energía en determinadas direcciones, pero no en otras [5].

1.1.3. Presión sonora. Es la diferencia entre la presión instantánea generada por un sonido y la presión atmosférica, medida en Pascales (Pa). Generalmente, los valores de la presión sonora son mucho menores que la presión atmosférica. La intensidad de la presión sonora se expresa en decibelios (dB), una unidad logarítmica que cuantifica la fuerza del sonido por unidad de área. Esta escala logarítmica refleja de manera más precisa cómo percibimos los cambios en la intensidad del sonido, ya que imita la sensibilidad del oído humano. El nivel de presión sonora (L_p) varía entre 0 dB y 120 dB. Los sonidos que superan los 120 dB pueden resultar dolorosos y causar daños auditivos inmediatos e irreversibles [3], [6].

La ecuación para calcular el nivel de presión sonora es:

Ecuación 1. Cálculo de presión sonora

$$L_p = 20 \log \left(P / P_{ref} \right) [dB]$$

Donde P_{ref} es la presión de referencia, regularmente 20 μPa , que corresponde al umbral de audición en el aire y P es la presión sonora medida [7].

1.1.4. Frecuencia sonora. Es el número de variaciones de presión por segundo generada por una onda sonora en un medio como el aire, el agua u otro material, medido en hertzios (Hz). Es la propiedad del sonido que determina su tono característico, las frecuencias bajas producen sonidos graves, mientras que frecuencias altas generan sonidos agudos. El rango normal de audición humana oscila entre 20 Hz y 20 kHz [6].

1.1.4.1. Espectro de frecuencias. Se refiere a las diferentes frecuencias que componen un sonido, representadas junto con sus correspondientes intensidades. El espectro es característico de cada tipo de sonido y permite establecer si el ruido contiene frecuencias bajas (graves), medias o altas (agudas) y distinguir entre distintas fuentes, como la voz humana, señales acústicas específicas o ruidos generados por máquinas o vehículos [3].

El espectro de frecuencias está compuesto de una frecuencia fundamental, que es la más baja del sonido, y una serie de armónicos, que son múltiplos de esta frecuencia. La combinación de estas frecuencias define las propiedades únicas del sonido. Dependiendo de la naturaleza del sonido, el espectro puede clasificarse como espectro discreto, donde las frecuencias individuales son claramente distinguibles, y espectro continuo, donde las frecuencias están distribuidas de manera más uniforme [3].

Para analizar el espectro de frecuencias, se utiliza un enfoque basado en bandas, como octavas o tercios de octava, donde cada banda cubre un rango definido de frecuencias. Por ejemplo, una octava incluye frecuencias cuya relación es de 2:1, lo que permite un análisis más detallado del comportamiento sonoro en diferentes rangos. Este análisis tiene múltiples aplicaciones, como la identificación de fuentes de ruido, la evaluación del impacto acústico en entornos urbanos, el diseño de estrategias para reducir la contaminación acústica, entre otros [3].

1.1.5. Parámetros acústicos. Son indicadores que describen propiedades y características del sonido en diferentes contextos, lo que permite su medición y análisis. En el contexto de la medición del ruido ambiental, los parámetros acústicos más relevantes son aquellos que describen la intensidad y la duración del sonido, permitiendo evaluar su impacto sobre la salud y el entorno [3][8].

1.1.5.1. Nivel equivalente de ruido (L_{eq}). Es el nivel de presión sonora constante que, durante un periodo de tiempo definido, mantiene la misma energía total que el ruido real considerando sus fluctuaciones. El valor L_{eq} puede medirse con un sonómetro profesional, utilizando un filtro de ponderación A. En este caso, este nivel se expresa como L_{Aeq} es decir, el nivel sonoro continuo equivalente obtenido con una red de filtros con ponderación A [9].

1.1.5.2. Nivel máximo (L_{max}) y nivel mínimo (L_{min}). L_{max} y L_{min} son los niveles de sonido máximos y mínimos ponderados en el tiempo que suministran información crucial sobre el cambio de los niveles de ruido durante un intervalo específico de tiempo. Estos, ayudan a evaluar los entornos con ruido más alto y silencioso. El L_{max} permite identificar los picos de ruido más elevados en un entorno, como la bocina de un vehículo o una maquinaria en funcionamiento. Por otro lado, el L_{min} detecta los instantes silenciosos, como en áreas donde se interrumpen las fuentes de ruido. Estas métricas proporcionan información importante en contextos como estudios de ruido ambiental [10].

1.1.5.3. Nivel de exposición sonora (LAE o SEL). Es una medida logarítmica de la exposición a un ruido con respecto a un valor de referencia. Al igual que con el parámetro L_{eq} , la energía sonora total se integra durante un periodo de medida. No obstante, en lugar de promediar a lo largo de todo el periodo de medición, se utiliza como referencia una duración de 1 segundo [9].

1.1.6. Normativa sobre ruido. En el contexto de la medición y control del ruido ambiental, existen diversas normativas y estándares diseñados para establecer parámetros mínimos de control y seguridad en lo que respecta a la emisión de ruido. La normatividad surge en respuesta a la necesidad de abordar un problema que representa un desafío serio y

de orden público, puesto que la emisión de ruido afecta a todos por igual, así como lo hace la emisión de gases tóxicos o los desechos peligrosos [11].

1.1.6.1. Normas ISO sobre ruido ambiental. La Organización Internacional de Normalización o Estandarización (ISO), se dedica a la creación de normas o estándares técnicos que especifican requisito para asegurar la calidad, seguridad y eficiencia de productos y servicios [12]. Las normas ISO sobre ruido ambiental son:

- **ISO 1996-1:2020:** “Acústica. Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental Parte 1: Magnitudes básicas y métodos de evaluación”. Establece las magnitudes básicas y los métodos esenciales para evaluar el ruido ambiental. Esta norma no define límites específicos, sino que se centra en la metodología para analizar la respuesta comunitaria a la exposición prolongada a diversas fuentes de ruido, como el transporte terrestre, aéreo o industrial. Introduce el concepto de "nivel de evaluación", que combina mediciones acústicas con factores de corrección para reflejar características particulares del ruido, como su tonalidad, impulsividad o contenido en bajas frecuencias. Su aplicación está orientada a áreas residenciales, con el objetivo de prever el impacto social del ruido en comunidades afectadas por actividades humanas [13].
- **ISO 1996-2:2020:** “Acústica. Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental Parte 2: Determinación de los niveles de presión sonora”. Detalla cómo determinar los niveles de presión sonora, ya sea mediante mediciones directas o cálculos extrapolados. Diseñada principalmente para uso en exteriores, también incluye directrices básicas para mediciones interiores. Esta norma abarca aspectos clave como la selección del intervalo de tiempo para las mediciones, la ubicación adecuada de los micrófonos y las condiciones meteorológicas que pueden influir en los resultados. Asimismo, aborda el análisis de fuentes de ruido específicas, como el tráfico rodado, ferroviario, aéreo e industrial, proporcionando herramientas para evaluar parámetros críticos como el nivel de presión sonora equivalente (Leq) y el nivel máximo (Lmax). Además, incluye métodos para corregir condiciones de referencia y gestionar incertidumbres en los resultados, permitiendo extrapolaciones a otras ubicaciones [14].

1.1.6.2. Directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS). La OMS establece directrices para abordar los efectos del ruido ambiental sobre la salud, proporcionando valores de referencia para diversos ambientes y situaciones [15].

En áreas residenciales:

- **Interiores:** se recomienda que el nivel de ruido en interiores no supere los 35 dB LAeq durante el día para evitar molestias, y los 30 dB LAeq durante la noche para evitar alteraciones del sueño.

- **Exteriores:** los niveles de ruido a un metro de la fachada no deben exceder los 45 dB LAeq con ventanas abiertas, considerando la reducción natural del ruido al ingresar al interior. Además, para evitar molestias graves durante el día, el ruido en áreas exteriores no debe superar los 55 dB LAeq.

Efectos sobre la salud:

- **Sueño:** el ruido intermitente con niveles máximos superiores a 45 dB (L_{Amax}) puede generar alteraciones de sueño e interrumpir el descanso, incluso si el nivel equivalente (LAeq) general es bajo.
- **Interferencia en la comunicación oral:** para una percepción clara del habla en interiores, el nivel de ruido de fondo no debe superar 35 dB LAeq.
- **Deficiencias auditivas:** la exposición continua a niveles de ruido superiores a 70 dB LAeq,24h puede causar pérdida de audición a largo plazo. Los niveles de ruido impulsivo no deben exceder 140 dB para adultos y 120 dB para niños.
- **Impacto cardiovascular:** la exposición prolongada a niveles de ruido de tráfico superiores a 65-70 dB LAeq,24h puede contribuir al desarrollo de hipertensión y cardiopatías.

La OMS hace énfasis en la protección de poblaciones vulnerables como niños, ancianos y personas con problemas médicos, dado que son más susceptibles al ruido.

- **Escuelas:** el nivel de ruido en las escuelas no debe superar los 35 dB LAeq en las aulas para evitar la interferencia en la comunicación y el aprendizaje.
- **Hospitales:** se recomienda un nivel máximo de 30 dB LAeq en interiores.
- **Eventos recreativos:** en eventos como conciertos o festivales el nivel máximo no debe exceder los 110 dB L_{Amax}.

Para mitigar los efectos del ruido, la OMS propone estrategias de control acústico en zonas urbanas y realizar evaluaciones de impacto acústico. Además, se recomienda establecer un marco legal para regular y manejar el ruido, que incluya normas de emisión y medidas de control específicas [15].

1.1.6.3. Normativa en Colombia. En Colombia, la regulación del ruido ambiental está establecida por la Resolución 627 de 2006 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Esta resolución fija las normas ambientales mínimas y las regulaciones de carácter general aplicables a todas las actividades de emisión de ruido y establece los estándares de calidad ambiental para ruido en todo el territorio nacional [16].

Entre las disposiciones más relevantes de esta resolución se encuentran los estándares máximos permisibles de ruido ambiental, los cuales varían según la zona y el horario. En zonas residenciales, los niveles no deben superar los 55 dB(A) (ponderación A) durante el día y los 45 dB(A) en la noche. En zonas comerciales, los límites son de 70 dB(A) en el día y 60 dB(A) en la noche. Y en zonas industriales se permiten niveles de hasta 75 dB(A) en el día y 70 dB(A) en la noche [16].

La norma detalla que la metodología de medición debe realizarse con equipos calibrados y utilizando ponderación frecuencial A (dB(A)). Las mediciones deben realizarse en condiciones meteorológicas adecuadas, evitando lluvia y vientos superiores a 3 m/s. El intervalo de tiempo de referencia es de 14 horas para el horario diurno y de 10 horas para el nocturno. Además, se distingue entre ruido específico, generado por una fuente particular, y ruido residual, que se mide con las fuentes específicas apagadas [16].

Adicionalmente, la resolución también exige la elaboración de mapas de ruido ambiental en municipios con más de 100,000 habitantes, los cuales deben actualizarse cada cuatro años. Estos mapas permiten identificar zonas críticas de contaminación acústica, planificar acciones correctivas y servir como base para la ordenación territorial [16].

1.1.7. Ponderación frecuencial. Es un método utilizado para ajustar las medidas sonoras de tal manera que coincidan con el umbral de sensibilidad del oído humano, en sus diferentes frecuencias. La norma IEC 61672-1 define las ponderaciones de frecuencia A, C y Z [17].

1.1.7.1. Ponderación A -dBA/dB(A). La ponderación A ajusta la señal de forma que se asemeje a la respuesta del oído humano ante niveles sonoros medios, basada en la curva de igual sonoridad de 40 dB. Este tipo de ponderación es ampliamente utilizada en casi todas las mediciones de ruido ambiental y está especificada en diversas normas y directrices tanto nacionales como internacionales. Los filtros de ponderación A cubren un espectro de 10 Hz a 20 kHz, lo que corresponde al espectro auditivo completo que los humanos pueden percibir [17].

1.1.7.2. Ponderación C -dBC/dB(C). La respuesta del oído humano varía según el nivel de sonido percibido. La ponderación C se basa en una curva de igual sonoridad de 100 dB y refleja aproximadamente cómo el oído humano responde a sonidos de alta intensidad. Esta ponderación puede ser utilizada en la medición de ruido en espectáculos donde la transmisión de frecuencias bajas, como los sonidos graves, puede representar problemas [17].

1.1.7.3. Ponderación Z -dBZ/dB(Z). La ponderación de frecuencia Z=0 es una respuesta de frecuencia entre 10 Hz y 20 kHz con una variación de solo $\pm 1,5$ dB, excluyendo la respuesta del micrófono [17]. En la Ilustración 1 se presenta el comportamiento de los tres tipos de ponderación.

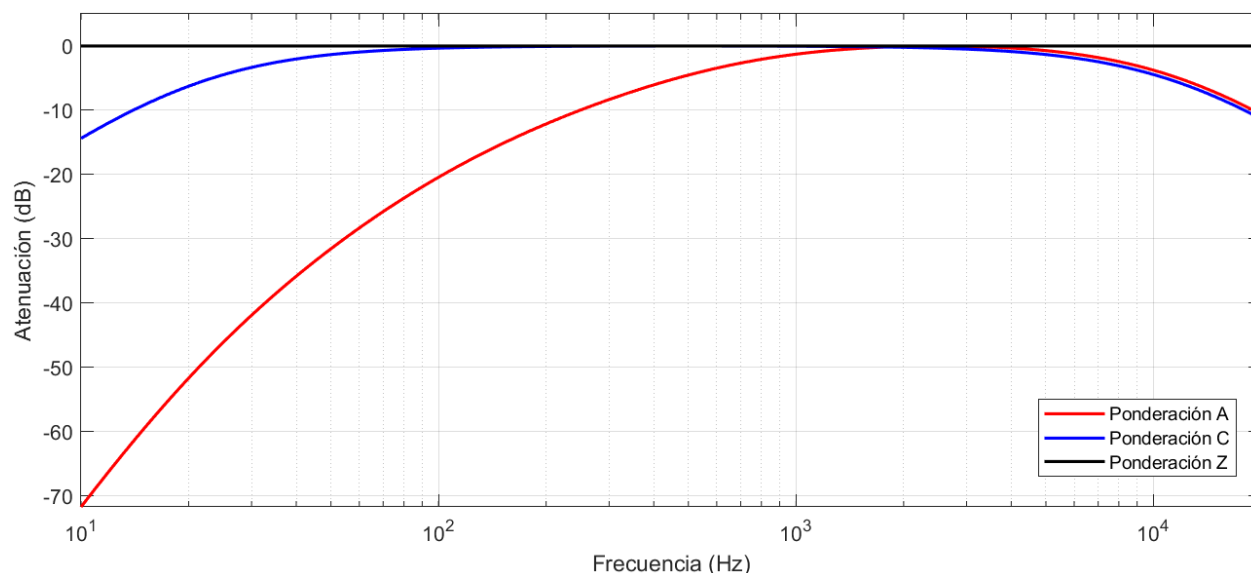


Ilustración 1. Curvas de ponderación de frecuencia - 'A', 'C' y 'Z'.

Fuente: elaboración propia, basado en Brüel & Kjær [17].

1.1.8. Tecnologías para medición de ruido. La medición de ruido es un proceso esencial para determinar la contaminación acústica y su impacto al medio ambiente y la salud de la población. Existen diferentes tecnologías utilizadas para capturar y analizar los niveles de ruido de manera precisa y eficiente, entre estas se incluyen desde micrófonos especializados hasta herramientas avanzadas de monitoreo basadas en el Internet de las cosas (IoT).

1.1.8.1. Sonómetros. Los sonómetros son instrumentos de medición utilizados para determinar el nivel de presión sonora que existe en un determinado lugar y en un momento dado. La unidad con la que trabajan es el decibelio. Los sonómetros se suelen utilizar para medir la contaminación acústica, es decir la cantidad de ruido que hay en un lugar o que se desprende de la realización de una determinada actividad [17].

Los sonómetros están conformados por un micrófono, que transforma las señales sonoras en señales eléctricas, un preamplificador, que aumenta el nivel de la señal eléctrica entregada por el micrófono, un sistema de procesamiento de señal y una pantalla [17].

1.1.8.2. Micrófonos. Los micrófonos son dispositivos esenciales en la captación y medición de sonido en diversas aplicaciones. En el contexto de la medición de ruido

ambiental, existen diferentes tipos de micrófonos disponibles, cada uno con características particulares que los hacen adecuados para diferentes entornos y propósitos [18]. En la Tabla 1, se describen las principales características de los micrófonos de condensador electret, los micrófonos dinámicos, los micrófonos MEMS y los micrófonos piezoeléctricos, explorando sus ventajas, limitaciones y aplicaciones típicas.

Tabla 1. Tipos de micrófonos

Tipo de Micrófono	Características	Ventajas	Limitaciones
Micrófonos de condensador electret	Comunes, compactos y económicos, con una amplia respuesta en frecuencia y alta sensibilidad	Adecuado para en diversas aplicaciones	Requiere un acondicionamiento analógico adicional, lo que introduce mayores fuentes de incertidumbre en el circuito, además de aumentar los costos y el tamaño del dispositivo
Micrófonos dinámicos	Económicos, de larga duración y resistentes a golpes y vibraciones	Ideales para entornos difíciles y no requieren de fuente de alimentación externa	Respuesta limitada en altas frecuencias y baja sensibilidad
Micrófonos piezoeléctricos	Resistentes, soportan ambientes difíciles; adecuados para sonidos de baja frecuencia	Duraderos y fiables en ambientes adversos	Respuesta de frecuencia limitada; menor sensibilidad que otros tipos
Micrófonos MEMS	Poseen un tamaño compacto, bajo consumo de energía y alta sensibilidad.	Alta precisión, portabilidad, y eficiencia energética	Necesitan electrónica adicional para procesamiento

Fuente: Elaboración propia [8][19].

De acuerdo con la comparación de los distintos tipos de micrófonos en la Tabla 1, los micrófonos MEMS resultan ser la opción más adecuada para la de medición de ruido ambiental con dispositivo IoT. Su bajo consumo energético, alta precisión y portabilidad

los hacen ideales para sistemas embebidos y aplicaciones en entornos donde se requiere un monitoreo continuo. Su rendimiento en términos de respuesta en frecuencia y sensibilidad los posiciona como la mejor elección para la captura de datos acústicos con alta fidelidad.

1.1.8.2.1. Micrófonos MEMS. Los micrófonos MEMS (sistemas microelectromecánicos) son componentes versátiles utilizados en diversos dispositivos de consumo, así como en aplicaciones automotrices e industriales. Estos micrófonos integran un sensor acústico con un convertidor A/D en un chip de silicio compacto, que permite conectarlos directamente a un procesador de señales. Entre sus características, se destacan su tamaño reducido, lo cual facilita su integración en dispositivos electrónicos compactos; su bajo consumo de energía los hace ideales para dispositivos portátiles y de baja potencia; su sensibilidad les permite capturar niveles de sonido extremadamente bajos [20].

Además, presentan una respuesta de frecuencia plana, es decir, que tienen la capacidad de capturar con precisión un rango completo de frecuencias de sonido. Algunos modelos de micrófonos MEMS tienen la capacidad de cambiar su patrón de captación para permitir una mayor flexibilidad en la grabación de sonidos en diferentes entornos [20].

Para facilitar la transmisión eficiente de la señal digital generada por estos micrófonos, se emplea el protocolo Inter-IC Sound (I2S). Este estándar de comunicación está diseñado específicamente para la transferencia de datos de audio entre dispositivos digitales, lo que permite una conexión directa y de alta fidelidad entre el micrófono y el procesador o sistema embebido [21].

1.1.9. Internet de las Cosas (IoT). El internet de las cosas es la red de objetos físicos como dispositivos, instrumentos, vehículos y edificios, que están equipados con electrónica, software, sensores y conectividad de red, que les permite recopilar e intercambiar datos entre ellos. El IoT permite que los objetos se reconozcan y controlen de forma remota por medio de la infraestructura de la red, lo que crea oportunidades para una integración directa del mundo físico en los sistemas informáticos, lo que resulta en una mayor eficiencia y precisión en diversos procesos. Una de sus características principales es su capacidad de operar sin intervención humana, fomentando la interacción y comunicación entre dispositivos de manera autónoma [22].

La interconectividad de los dispositivos es un aspecto esencial del IoT, y su arquitectura debe asegurar la interacción fluida entre el mundo físico y el digital. El diseño de esta arquitectura considera múltiples factores, como la configuración de redes, la comunicación entre sistemas, el procesamiento de datos, la seguridad y la escalabilidad. La flexibilidad y la adaptabilidad son fundamentales para garantizar que los dispositivos puedan interactuar dinámicamente y apoyar la comunicación en tiempo real [22].

En el contexto de la medición del ruido ambiental, el IoT se presenta como una herramienta valiosa, ya que permite la implementación de redes de sensores que

recopilen datos de forma autónoma y precisa. Al conectarse a una arquitectura IoT, los sensores facilitan el monitoreo constante del entorno, generando información clave para la gestión de la contaminación acústica.

1.1.9.1. Protocolos de comunicación IoT. Son un conjunto de normas y reglas definen cómo los dispositivos dentro de una red IoT se conectan, comunican y transfieren datos entre sí. Estos protocolos son un componente esencial de la arquitectura IoT, funcionando en distintos niveles, desde el hardware físico hasta las aplicaciones de software. En términos generales, su propósito principal es asegurar la interoperabilidad y un desempeño óptimo de los dispositivos IoT [23].

Los protocolos de comunicación deben cumplir con varias funciones esenciales para garantizar un desempeño adecuado en estos entornos. En primer lugar, deben permitir la comunicación simultánea entre una gran cantidad y variedad de dispositivos, asegurando la transferencia eficiente de mensajes entre equipos con distintos roles, como sensores, actuadores, y dispositivos de procesamiento o almacenamiento de datos. Además, es fundamental que estos protocolos minimicen el acoplamiento entre dispositivos, evitando dependencias directas entre ellos para facilitar la interoperabilidad. También deben fomentar la escalabilidad del sistema, permitiendo añadir o retirar dispositivos sin comprometer el funcionamiento general de la red IoT [24].

La seguridad es otro aspecto crucial: los protocolos deben garantizar comunicaciones protegidas, especialmente en entornos vulnerables como el IoT industrial, complementando las medidas de ciberseguridad implementadas a nivel de dispositivo. Por último, estos protocolos deben facilitar un acceso eficiente a los dispositivos, superando posibles obstáculos como la latencia o la presencia de cortafuegos en la red [24].

Debido a la variedad de dispositivos IoT existentes, han surgido diferentes protocolos IoT para gestionar la comunicación en diferentes contextos. A continuación, en Tabla 2 se mencionan y comparan algunos de los protocolos más utilizados en la comunicación entre dispositivos y redes IoT.

Tabla 2. Comparación de protocolos de comunicación IoT.

Protocolos de comunicación IoT	Características principales	Uso principal	Ventajas	Desventajas
MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)	Protocolo ligero para comunicación M2M en IoT, basado en TCP/IP y un modelo de publicación / suscripción. Requiere un broker como intermediario y soporta niveles de calidad de servicio (QoS) ajustables, optimizado para redes de bajo ancho de banda y recursos limitados.	Ideal para aplicaciones IoT que demandan eficiencia y comunicación en tiempo real, como sensores remotos, monitoreo industrial, hogar inteligente, agricultura y transporte conectado.	Ligero, eficiente en energía y ancho de banda, ideal para dispositivos con recursos limitados. Ofrece escalabilidad, comunicación asíncrona mediante publicación/suscripción, calidad de servicio ajustable (QoS) y amplia compatibilidad con plataformas IoT.	Dependencia del broker, con riesgos si falla. Seguridad limitada sin configuraciones adicionales (TLS/SSL). No apto para grandes volúmenes de datos y vulnerable a ataques de denegación de servicio (DoS).
HTTP/HTTPS (Hypertext Transfer Protocol) / (Hypertext Transfer Protocol Secure)	HTTP: Protocolo de comunicación basado en texto sin cifrar, utilizado para la transferencia de datos en la web. HTTPS: Versión segura de HTTP que utiliza protocolos criptográficos como TLS (Transport Layer Security). Añade una capa de cifrado a la conexión.	HTTP: se utiliza para transferir datos no sensibles donde la seguridad no es prioritaria. HTTPS: es el estándar para comunicaciones seguras en transacciones financieras, manejo de datos sensibles, comercio electrónico y entornos que exigen	HTTP: es sencillo, rápido y fácil de implementar en entornos sin necesidad de seguridad. HTTPS: mejora la seguridad mediante cifrado, autentica al servidor con certificados digitales, garantiza la integridad de los datos y es ampliamente compatible con	HTTP: es inseguro, con datos transferidos en texto plano y marcado como "no seguro" en navegadores. HTTPS: aunque más seguro, requiere configuración compleja, consume más recursos y depende de la renovación de

		privacidad e integridad.	navegadores y aplicaciones modernas.	certificados digitales, lo que puede ser costoso o complicado
CoAP (Constrained Application Protocol)	Protocolo ligero para IoT, basado en RESTful y optimizado para bajo consumo de energía y ancho de banda. Funciona sobre UDP, soporta métodos como GET, POST, PUT y DELETE, y permite comunicaciones punto a punto y multicast	Ideal para redes IoT con dispositivos de bajo consumo y capacidad limitada, utilizado en monitoreo y control en tiempo real en entornos industriales, agrícolas y redes de sensores inalámbricos.	Ligero, eficiente en energía y ancho de banda, compatible con HTTP, soporta multicast, es flexible en su implementación y tiene un diseño simple y de bajo costo computacional.	Tiene seguridad limitada, es menos confiable en redes ruidosas al usar UDP, requiere herramientas específicas para su gestión y presenta vulnerabilidades en proxies al mapear con HTTP.
LoRaWAN (Long Range Wide Area Network)	Protocolo LPWAN diseñado para IoT, que permite comunicación inalámbrica de bajo consumo en distancias de hasta 15 km en zonas rurales y 2-5 km en áreas urbanas. Soporta clases de dispositivos (A, B y C) para diferentes aplicaciones, utiliza tecnología CSS para resistir interferencias y opera en bandas ISM no licenciadas.	Ideal para IoT de bajo consumo y largas distancias, usado en ciudades inteligentes (residuos, iluminación, monitoreo ambiental), agricultura (riego y cultivos), monitoreo industrial y medición de servicios públicos (agua, gas, electricidad).	eficiencia energética, amplia cobertura, escalabilidad, bajo costo, interoperabilidad estandarizada y resistencia a interferencias, ideal para redes IoT de largo alcance y alto rendimiento.	Tiene capacidad limitada para datos pequeños, alta latencia, seguridad básica con vulnerabilidades, dependencia de condiciones geográficas y una retransmisión ineficiente en redes densas u obstructivas.

Bluetooth Low Energy (BLE)	Protocolo optimizado para dispositivos de baja potencia en IoT, con una estructura modular, operación en banda ISM (2.4 GHz) y técnicas de salto de frecuencia para evitar interferencias. Soporta difusión y conexión punto a punto, maximizando la duración de la batería en dispositivos portátiles.	se utiliza en redes de sensores para monitoreo de salud, actividad física y dispositivos médicos, domótica y hogares inteligentes, localización y rastreo con balizas, y aplicaciones industriales y agrícolas para monitoreo y control remoto.	bajo consumo energético, compatibilidad universal, alcance de hasta 50 metros, flexibilidad para perfiles personalizados e integración con IPv6 a través de 6LowPAN para conectar con redes más grandes.	capacidad de datos limitada (100-230 kbps), alcance menor que protocolos de largo alcance como LoRaWAN, seguridad básica que requiere configuraciones adicionales y restricciones en la cantidad de nodos por factores de hardware y conexión.
-----------------------------------	---	---	--	--

Elaboración propia basado en [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31]

1.2. ANTECEDENTES

En los cascos urbanos con altas densidades poblacionales, el ruido se concibe como una problemática de suma importancia a tratar, puesto que, si los niveles de ruido exceden los valores límites del oído humano, los daños ocasionados en consecuencia pueden ser de dos tipos: auditivos como la pérdida total o disminución de la audición y no auditivos como afecciones psicológicas [32].

Para abordar esta problemática, los mapas de ruido se utilizan como una herramienta clave para conocer y caracterizar en determinadas condiciones tanto ambientales como de actividad, el grado de contaminación acústica en un área específica que sea de interés. Hay diferentes métodos que se pueden utilizar para la construcción de las curvas de ruido y obtener los mapas acústicos. Usualmente, se efectúan mediciones en el lugar, que posteriormente son procesados para estimar valores desconocidos mediante técnicas de interpolación [33].

En este contexto, se revisan investigaciones y proyectos orientados al monitoreo del ruido ambiental, con énfasis en soluciones basadas en tecnologías IoT y dispositivos móviles. Para garantizar la pertinencia de los hallazgos, se considera únicamente la información generada a partir de 2014, dado el avance constante en nuevas tecnologías. En este análisis, se identificaron diversos estudios y proyectos innovadores, destacando los siguientes:

En 2014, en la Universidad del Valle, Xiomara Perea Escobar y Eduardo Marín Toro desarrollaron el proyecto de grado titulado: “Percepción del ruido por parte de habitantes del barrio gran limonar de la comuna 17 en la ciudad de Cali”, en el cual se evalúa la percepción de la población de dicha comuna frente a la problemática de contaminación auditiva. Para ello, midieron niveles de presión sonora utilizando un sonómetro ambiental CEL-63x (CASELLA®), el cual permite medir los niveles de presión sonora continuo equivalente ponderado A, en tres puntos específicos durante jornadas diurnas y nocturnas. Los resultados mostraron que los niveles de ruido registrados sobrepasaron los límites permitidos por la normativa en los tres puntos de muestreo durante ambas jornadas [34].

En 2015, la Universidad Libre publicó en su revista Entramado el artículo “Revisión de la normatividad para el ruido acústico en Colombia y su aplicación”, desarrollado por Oscar Casas-García, Carlos Mauricio Betancur-Vargas y Juan Sebastián Montaña-Erazo, donde se realizó una revisión de la normativa jurídica y técnica sobre el ruido acústico en las cinco principales ciudades de Colombia: Bogotá, Medellín, Cali, Cartagena y Barranquilla. Analizaron las leyes, decretos y resoluciones que regulan la emisión de ruido ambiental, y se discuten las normas técnicas pertinentes, como las NTC, ANSI e ISO. Además, se presenta un análisis sobre la implementación de estas normativas, incluyendo estudios previos que demuestran la eficacia y los desafíos de la legislación

en la práctica. En los estudios de caso, se mencionan diversas herramientas utilizadas para la medición y monitorización de los niveles de ruido. En Bogotá, se emplearon sonómetros de tipo 1 para captar datos como la presión sonora continua equivalente y los valores máximos y mínimos. En Medellín, se utilizaron dosímetros Quest Q-100 para medir la exposición al ruido en zonas residenciales y de tráfico. Y en Cali, un sonómetro digital Omega modelo 8928 se utilizó para medir los niveles de ruido en la unidad de cuidado intensivo neonatal del Hospital Universitario del Valle [11].

De esta forma se llega a que las normativas reglamentarias en Colombia, para la problemática del ruido son suficientes, pertinentes y están a la par con otras normativas extranjeras coherentes. Sin embargo, hace falta un cumplimiento adecuado de las normas en cuanto a emisión de ruido, ya sea por las autoridades de control o debido a un mismo autocontrol [11].

A nivel internacional, en 2016 la University College Dublin en Irlanda y la University of Hartford, en EE. UU. desarrollaron el artículo académico titulado “Smartphone-based noise mapping: Integrating sound level meter app data into the strategic noise mapping process”, en el que se aborda la integración de datos de aplicaciones de medición de ruido en teléfonos inteligentes en el proceso de mapeo estratégico de ruido. En el estudio, se investigó cómo los datos obtenidos de aplicaciones como SPLnFFT (iOS) podrían utilizarse junto con, o en lugar de, los métodos tradicionales de modelado de ruido, que dependen de datos de tráfico y cálculos de predicción. Los datos obtenidos con la aplicación se compararon con las mediciones realizadas con sonómetros tradicionales como el Brüel & Kjær Type 2250. A partir de esto, los resultados obtenidos mostraron que las aplicaciones de teléfonos inteligentes tienden a subestimar los niveles de ruido y tienen un margen de error mayor en comparación con los sonómetros tradicionales [35].

Existen diferencias significativas entre los mapas utilizando el enfoque tradicional y el basado en teléfonos inteligentes. La tradicional muestra altos niveles de contaminación acústica en la categoría de 70–85 dB. A modo de contraste, el mapa compilado que usa las mediciones de teléfonos inteligentes sugiere que los niveles de contaminación acústica están dentro de la categoría de 65–70 dB; la implicación de los dos enfoques sugiere que el mapeo de ruido basado en los smartphones tiende a subestimar los niveles de ruido ambiental en relación con el proceso de mapeo de ruido estratégico tradicional. Cabe resaltar la evidencia del uso de una alternativa diferente y a bajo costo para la medición de los niveles de ruido ambiental, sin embargo, arroja resultados no tan prometedores, puesto que hay una diferencia bastante notoria entre los niveles arrojados por los smartphones y los medidores de nivel tradicionales [35].

Otro proyecto en el 2016, realizado por la Universidad del Norte en Colombia, titulado “Red Inalámbrica de Sensores para Monitoreo de Ruido Ambiental” presenta un sistema basado en una red inalámbrica de sensores diseñado para medir niveles de ruido ambiental en múltiples ubicaciones de forma simultánea. Su sistema se compone por cuatro nodos sensores y un nodo coordinador, cada nodo sensor incorpora un microcontrolador PIC32MX270F256B, un transceptor Xbee Serie 2 para la comunicación

inalámbrica y un módulo de adquisición de señales. Este módulo utiliza un micrófono electret, una etapa amplificadora y un filtro con red de ponderación A. Los nodos sensores capturan el nivel de ruido en dBA en distintas frecuencias dentro del rango auditivo humano, mientras que el nodo coordinador procesa los datos y los envía a un servidor conectado a Internet [36].

Las mediciones realizadas por este sistema fueron comparadas con las de un sonómetro comercial (American Recorder Technologies SPL-8810). Los resultados mostraron un error máximo de 5.8% a una frecuencia de 5 kHz, lo que lo convierte en una solución viable para monitoreo ambiental. Las pruebas se realizaron en un entorno controlado para minimizar interferencias externas. El artículo concluye que este sistema es una alternativa económica y eficiente para medir la contaminación acústica, utilizando componentes accesibles y de bajo costo [36].

En 2018, el Institute for Digital Media Technology de Alemania, presentó el artículo “A Distributed Sensor Network for Monitoring Noise Level and Noise Sources in Urban Environments”, donde describe el desarrollo de una red de sensores distribuidos para el monitoreo del nivel de ruido y la identificación de fuentes de ruido en entornos urbanos, con un caso de estudio en la ciudad de Jena, Alemania. Este sistema combina micrófonos MEMS y módulos Raspberry Pi 3 en cada nodo sensor, que capturan y procesan datos acústicos con técnicas como transformadas de Fourier y ponderación frecuencial. Los parámetros medidos incluyen niveles promedio de ruido (LAeq), niveles máximos (LAFmax) y ajustes para ruido impulsivo (Ki). El sistema utiliza redes neuronales profundas (CNN) para clasificar escenas acústicas y eventos específicos, como tráfico, conciertos o sirenas, garantizando privacidad mediante el procesamiento local en los nodos. Los datos se transmiten al servidor central mediante el protocolo MQTT, donde se almacenan y visualizan en tiempo real a través de una aplicación web [37].

El Instituto de Mecánica de Skopje, República de Macedonia del Norte publicó en 2021 el artículo de revista “Design of low-cost wireless noise monitoring sensor unit based on IoT concept”, donde se describe el desarrollo de un sistema inalámbrico de bajo costo para monitorear niveles de ruido ambiental, diseñado como una alternativa económica a los sonómetros convencionales. El sistema utiliza micrófonos MEMS conectados a microcontroladores Arduino Uno y módulos LoRaWAN para transmitir datos a la plataforma en la nube ThingSpeak, donde se visualizan y analizan en tiempo real. El sistema fue calibrado con un sonómetro profesional para garantizar precisión, con un error máximo de 5 dB. Los datos recolectados incluyen valores promedio de presión sonora (Leq) en intervalos de 10 minutos, transmitidos de manera eficiente gracias a la tecnología LoRaWAN, que proporciona un alcance de hasta 5 km con bajo consumo energético. Su diseño compacto, autónomo y económico (90 € por unidad) permite su implementación en redes de sensores urbanas para proyectos de ciudades inteligentes, facilitando la creación de mapas de ruido y la gestión de la contaminación acústica [38].

En 2022, durante el congreso Inter-Noise 2022 celebrado en Glasgow, Escocia, se presentó el estudio titulado “MEMs Based Low-Cost Urban Noise Monitoring: Tests and

Case Study", realizado por Weitbrecht, Monteiro, Jacomussi, Borin y Jardim, en São Paulo, Brasil. El artículo presenta un sistema de monitoreo de ruido urbano de bajo costo basado en micrófonos MEMS y una plataforma Raspberry Pi 4 B, diseñado como alternativa económica a los sonómetros profesionales de Clase 1. El sistema utiliza micrófonos digitales como el InvenSense Inmp441, conectados a los pines GPIO de la Raspberry Pi para procesar datos digitales mediante transformadas rápidas de Fourier. El sistema fue calibrado y validado comparándolo con un sonómetro profesional Larson Davis 831, mostrando diferencias menores a 1 dB en niveles equivalentes de ruido (LAeq) en entornos con ruido predominante. Aunque los micrófonos MEMS presentan limitaciones en niveles de ruido bajos (menores a 40 dB) y en los extremos del rango dinámico, el modelo InvenSense destacó por su precisión y desempeño general. El diseño es rentable y práctico, ofreciendo una solución viable para implementar redes de monitoreo continuo de ruido en entornos urbanos y proyectos de ciudades inteligentes [39].

En el trabajo llamado "Evaluation of leisure noise in urban environments, An approach based on low-cost sound monitoring systems and Artificial Intelligence", desarrollado en Sao Paulo en 2022, se aborda la planificación acústica urbana, considerando la mitigación del ruido, la naturaleza subjetiva y cualitativa del sonido. Para ello, desarrollan un dispositivo de monitoreo de bajo costo. El sistema combina micrófonos MEMS conectados a una Raspberry Pi con conectividad 3G para recopilar y transmitir datos de ruido a una plataforma digital basada en la nube. La solución integra inteligencia artificial mediante redes neuronales convolucionales (CNN) para procesar espectrogramas Mel y clasificar fuentes de ruido en 13 categorías, como tráfico, música y construcción. Validado en laboratorio y en campo frente a equipos de Clase 1, el sistema mostró resultados satisfactorios, siendo capaz de medir y analizar tanto datos cuantitativos como experiencias subjetivas relacionadas con el ruido [40].

Durante el monitoreo, las grabaciones de audio de 5 minutos se segmentan en muestras de 4 segundos, que se utilizan como entrada para el modelo. Estas muestras de audio se procesan en un espectrograma de Mel Log, con 64 bandas de Mel para la resolución de frecuencia, utilizando una frecuencia de muestreo de 22050 Hz. El modelo ha demostrado una precisión promedio del 88.1% en la identificación de fuentes de sonido. Este proyecto proporciona una base sólida y una referencia relevante, pues aborda aspectos clave como el costo, la conectividad remota y el monitoreo masivo, al tiempo que incorpora tecnologías como IoT y la inteligencia artificial [40].

En 2024, se presentó en la Conferencia Internacional sobre Sistemas Emergentes y Computación Inteligente (ESIC) de la IEEE el artículo titulado "IoT Based Noise Level Monitor and Controlling System in College", donde se muestra el desarrollo de un sistema de monitoreo de ruido ambiental basado en IoT, diseñado para controlar los niveles de ruido en entornos educativos como bibliotecas y aulas. Este sistema utiliza un microcontrolador ATmega328 y dos sensores de ruido que detectan variaciones en tiempo real. El AT Mega procesa continuamente los niveles de ruido captados por estos sensores, comparándolos por un umbral definido. Los usuarios pueden interactuar con la

pantalla y los botones del dispositivo para establecer los niveles máximos de ruido permitidos en un área específica. El estado del sistema permanece en verde cuando los niveles de ruido están por debajo del umbral establecido. Al superar el nivel predefinido, el sistema activa una alarma sonora y espera a que se reduzca el ruido. Si el ruido persiste, el sistema emite alertas repetidas y muestra un mensaje que indica el nivel de ruido excesivamente alto. Una vez que las personas reconocen el nivel elevado de ruido y mantienen silencio, el sistema vuelve al modo verde. Básicamente, este sistema funciona como un controlador inteligente y automático de la contaminación acústica [41].

2. COMPARACIÓN EXPERIMENTAL DE TECNOLOGÍAS DE MICRÓFONOS

En este capítulo se realiza una comparación experimental de diferentes tecnologías de micrófonos disponibles en el mercado, con el fin de analizar la mejor opción disponible para utilizar en la construcción del dispositivo. Las pruebas realizadas en este apartado se llevaron a cabo con micrófonos MEMS, aunque existen diversas tecnologías para la entrega de los datos, en este trabajo se presentan únicamente los resultados obtenidos con protocolo I2S (*Inter-IC Sound*) debido a la estabilidad de los datos. Otras tecnologías disponibles son la modulación por densidad de pulso (PDM) y con salida analógica (AC); las cuales no se consideraron directamente por ser más susceptibles al ruido y contar con mayor incertidumbre al requerir elementos externos para su correcto funcionamiento.

2.1. SELECCIÓN DE MICRÓFONOS

De acuerdo con la Tabla 1, los micrófonos MEMS son los más adecuados para la medición de ruido ambiental en dispositivos IoT debido a su bajo consumo energético, alta precisión y portabilidad, lo que los hace ideales para sistemas embebidos y de monitoreo y garantiza una captura de datos acústicos fiables. Por esta razón, se decidió trabajar exclusivamente con micrófonos MEMS, evaluando distintas opciones dentro de esta categoría. Finalmente, se seleccionó el modelo que ofrecía el mejor desempeño para la aplicación.

Para las pruebas experimentales se escogieron tres tipos de micrófonos MEMS I2S que se encuentran detallados en la Tabla 3. Estos micrófonos fueron elegidos en base a algunos criterios claves tales como sensibilidad, consumo energético y su costo.

Tabla 3. Características micrófonos MEMS bajo prueba

MICROFONO	SIPEED 140DB	INMP441	SPH0645
Interfaz	I2S	I2S	I2S
Voltaje [V]	1.60 – 3.60	1.62 - 3.63	1.62 - 3.60
Consumo corriente [mA]	0.8	2.2	0.6
temperatura operación [°C]	-40 ~ 100	-40 ~ 85	-40 ~ 100
Nivel de presión sonora [dB SPL]	140	120	120
Sensibilidad [dB, dBFS @1kHz 1Pa]	-26	-26	-26
Relación señal a ruido [dBA]	57	61	65
Costo	\$ 1.83	\$ 1.10	\$ 3.19

Fuente: Elaboración propia, basado en [42], [43], [44].

Una vez seleccionados los micrófonos, se llevó a cabo el proceso de pruebas para evaluar su desempeño. Todas las pruebas se realizaron en condiciones controladas de humedad y viento dentro la cámara anecoica del Laboratorio de Vibraciones y Acústica de la Universidad del Valle. Primero se caracterizó el parlante de referencia, analizando su respuesta en frecuencia y rango dinámico para garantizar una emisión estable y controlada. Luego, el altavoz emitió señales entre 20 Hz y 20 kHz, las cuales fueron capturadas por los micrófonos en pruebas y un micrófono calibrado de referencia. Finalmente, los datos obtenidos fueron procesados y analizados para evaluar el rendimiento de cada dispositivo. Este procedimiento se detalla en las siguientes secciones del capítulo

2.2. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE PRUEBAS

La metodología utilizada para realizar pruebas experimentales consistió en utilizar una fuente de referencia (altavoz estándar), ubicado en una posición fija, y emitir señales conocidas de caracterización dentro del rango audible 20 Hz – 20 kHz y a diferentes niveles de presión sonora. Estas, a su vez, son capturadas por los dispositivos de medida (micrófonos receptores). Todas las pruebas se realizaron en la cámara anecoica disponible en el Laboratorio de Vibraciones y Acústica de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle y tanto el micrófono calibrado como el micrófono en prueba, fueron ubicados a una altura de 40 cm de la rejilla/piso de la cámara y a 175 cm de distancia de la fuente. Ver Ilustración 2.

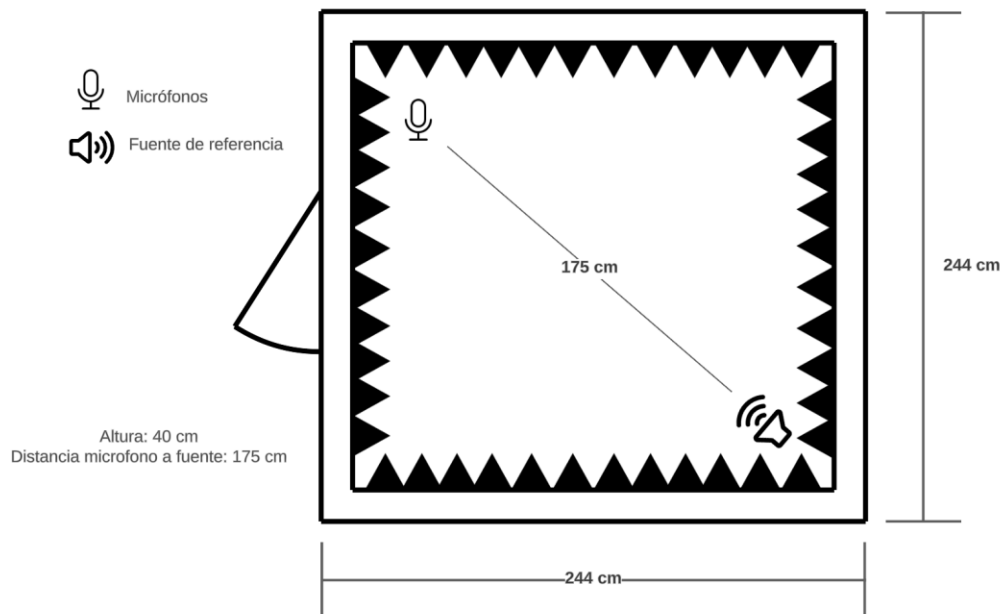


Ilustración 2. Diagrama montaje experimental.

Fuente: elaboración propia, basado en el trabajo de A. Orrego [45].

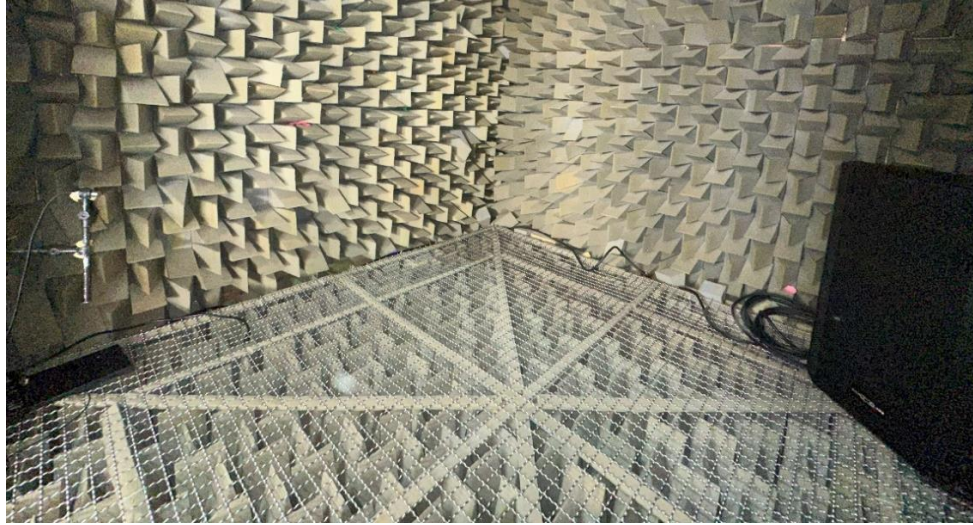


Ilustración 3. Montaje experimental dentro de la cámara anecoica.

Fuente: fotografía tomada por el autor.

Durante la prueba, se consideran los 31 valores centrales correspondientes a los tercios de bandas de octava entre 20 Hz y 20 kHz, los cuales se encuentran en el anexo A y se basan en la norma ANSI S1.11 [46]. Además, fue necesario utilizar algunos equipos y dispositivos, que se detallan en la Tabla 4 y se muestran en la figura 4; los cuales son necesarios para la correcta ejecución en cada una de las fases.

Tabla 4. Relación de equipos utilizados

Cabina Pasiva 12" MAXLIN	
Amplificador acondicionador Brüel & Kjær	
Micrófono GRAS 40AE 1/2"	Sensibilidad: 12.5mV/Pa
Generador UNI-T UTG962E	
Amplificador QSC RMX 4050a	Ganancia: 22dB
DAQ NI USB6009	
Osciloscopio GwInstek GDS-2104E	
Asus ZenBook Pro 14 con MATLAB R2023B	

Fuente: elaboración propia.



Ilustración 4. Montaje experimental en el exterior de la cámara anecoica.

Fuente: fotografía tomada por el autor.

La Ilustración 5 muestra un esquema del proceso experimental empleado; la señal sinusoidal es diseñada digitalmente y enviada a un generador de señales arbitrarias a través de conexión USB desde el computador. Se seleccionó una señal sinusoidal porque contiene una sola frecuencia pura, lo que permite evaluar diferentes bandas de frecuencia. Posteriormente, la señal es entregada al amplificador a través de un cable coaxial con conector BNC, una vez la señal es amplificada se transmite al parlante a través de una conexión por cable *Speakon* para ser emitida.

Cuando la señal emitida es capturada por el micrófono calibrado, es entregada al amplificador acondicionador Brüel & Kjær a través de un cable con preamplificador de la misma marca. Este amplificador se utiliza ya que es compatible con el modelo de micrófono utilizado. Además, asegura una respuesta en frecuencia precisa, ya que su diseño permite generar una ganancia controlada, evitando la saturación de la señal y la pérdida de detalles en bajos niveles.

Luego el amplificador se conecta la salida a través de un cable coaxial con conector BNC a la tarjeta de adquisición para realizar la captura de los datos y son transmitidos al computador a través de conexión USB para luego ser procesarlos según el diagrama de flujo de la Ilustración 6; donde la presión sonora se calcula según lo explicado en la sección 1.1.3.

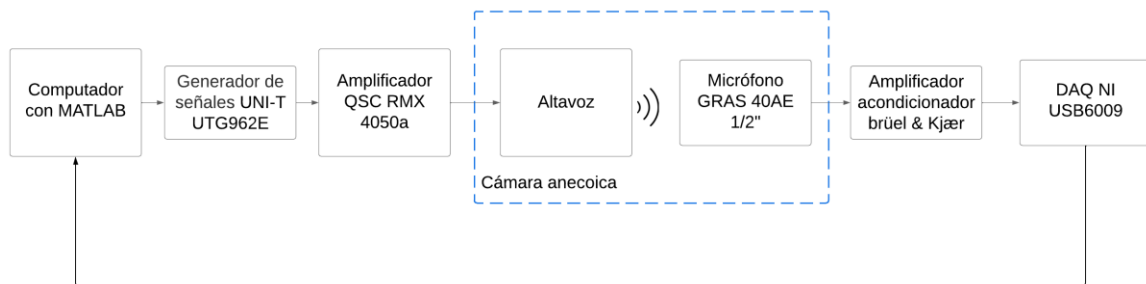


Ilustración 5. Diagrama de bloques montaje experimental con micrófono calibrado.

Fuente: elaboración propia.

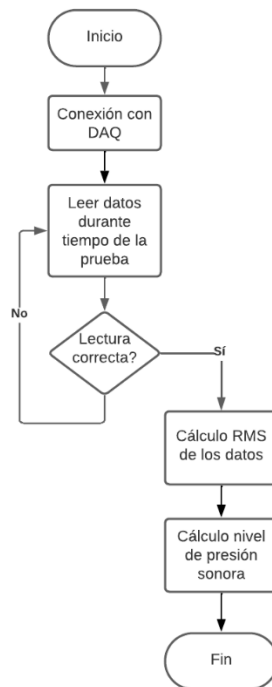


Ilustración 6. Diagrama de flujo cálculo de presión sonora.

Fuente: elaboración propia.

2.3. CARACTERIZACIÓN DEL PARLANTE COMO FUENTE DE REFERENCIA

La primera parte del protocolo de pruebas consistió en realizar una caracterización completa al parlante utilizado, ya que estos valores son la referencia para las pruebas experimentales de los micrófonos. Además, para confirmar que el parlante funcionaba de manera adecuada y cumplía con los estándares de rendimiento esperados.

Se analizó la respuesta en frecuencia del parlante utilizando señales sinusoidales con duración de 30 segundos para cada una de las 31 frecuencias centrales nominales correspondientes a los tercios de bandas de octava (ver anexo A). El nivel de presión sonora Leq_{30s} (dB) se obtuvo capturando la señal entregada por el parlante a través de un micrófono calibrado. Posteriormente, los datos fueron procesados mediante el cálculo del valor RMS a lo largo de 30 segundos de duración. Cabe destacar que no se aplicó ningún tipo de procesamiento adicional, como filtrado o ponderación. Los resultados obtenidos se muestran en la Ilustración 7.

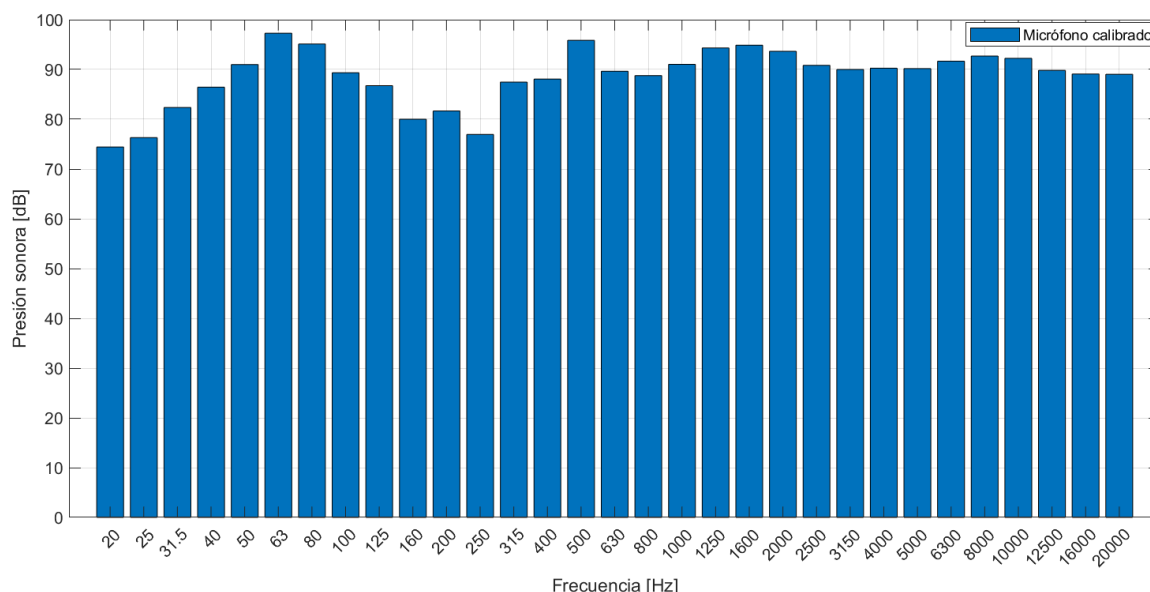


Ilustración 7. Respuesta obtenida con micrófono calibrado, ante emisión de señal sinusoidal en experimento en cámara anecoica.

Fuente: elaboración propia.

La segunda parte consistió en la evaluación del rango dinámico del parlante al variar el voltaje del generador de señales entregado al amplificador QSC RMX a una única frecuencia de 1 kHz. Los resultados obtenidos se muestran en la Ilustración 8. De esta manera, se obtuvo información sobre la capacidad del parlante para adaptarse y reproducir niveles de volumen variables en función de la señal de entrada.

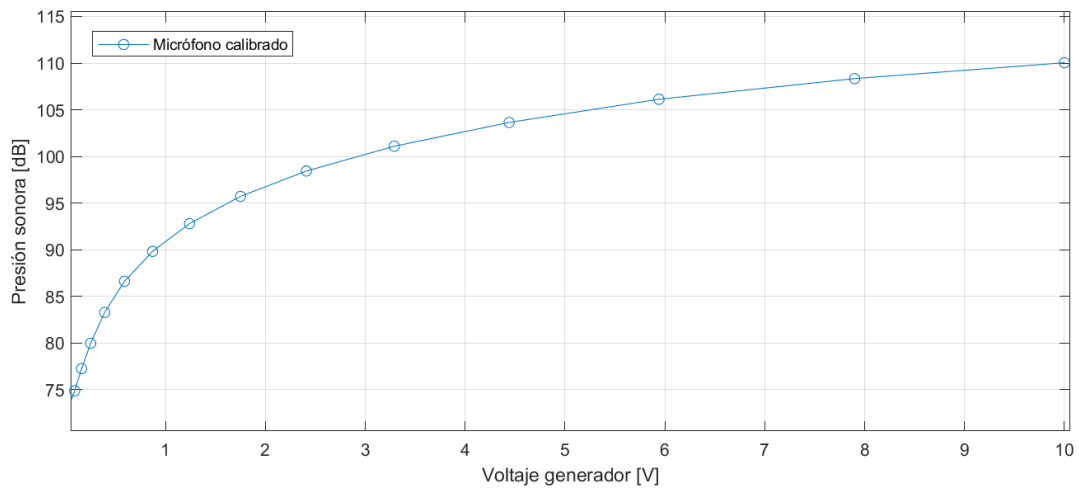


Ilustración 8. Respuesta obtenida con micrófono calibrado ante emisión de señal sinusoidal de 1 kHz con diferentes niveles de presión sonora en experimento en cámara anecoica.

Fuente: elaboración propia.

Para analizar el comportamiento de los datos obtenidos experimentalmente y tener una representación matemática de los mismos, se realizó un modelado logarítmico. En la Ecuación 2 se representa la relación entre las variables de interés y en la Ilustración 9 se puede evidenciar el comportamiento.

Ecuación 2. Modelo logarítmico del comportamiento del parlante.

$$-0.0187 \ln x^4 - 0.2291 \ln x^3 + 0.4601 \ln x^2 + 8.6799 \ln x + 90.7506$$

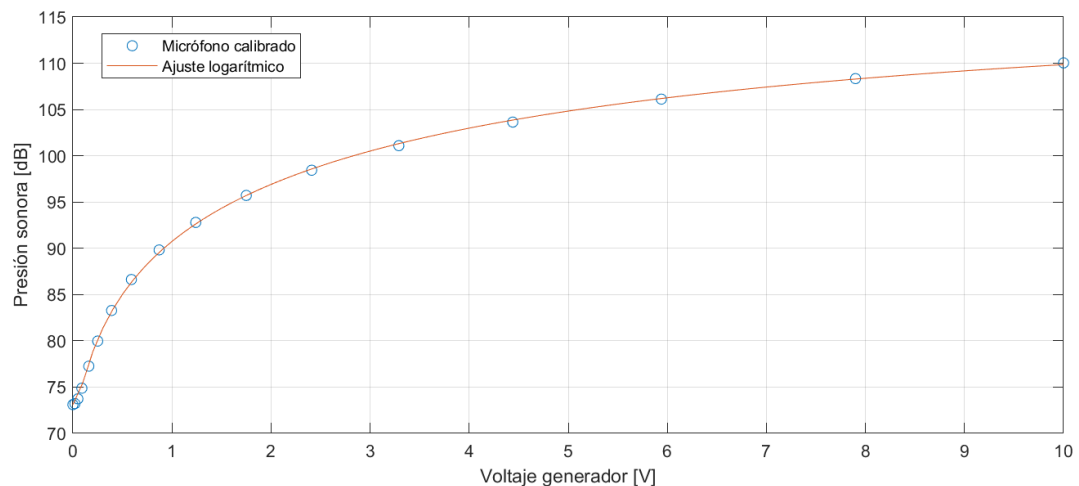


Ilustración 9. Ajuste de una función logarítmica para representar los datos obtenidos experimentalmente.

Fuente: elaboración propia.

2.4. RESULTADOS DE PRUEBAS EXPERIMENTALES POR TIPO DE MICRÓFONO

Ahora, al conocer el comportamiento del parlante como fuente de referencia se procedió a realizar el mismo protocolo de pruebas basado en la Ilustración 5, con la modificación que se evidencia en el diagrama de bloques de la Ilustración 10, donde se agrega el micrófono en prueba que está conectado a un microcontrolador RP2040 y este a su vez conectado al computador mediante conexión USB. El proceso se repitió con cada uno de los micrófonos diferentes relacionados en la Tabla 3.

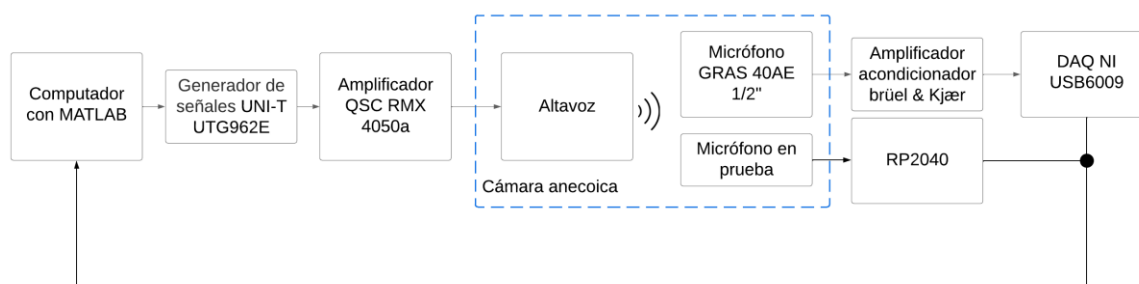


Ilustración 10. Diagrama de bloques montaje experimental con micrófono MEMS y micrófono calibrado.

Fuente: elaboración propia.

Todas las pruebas se realizaron bajo las mismas condiciones y el objetivo principal fue evaluar parámetros claves para el dispositivo tales como la respuesta en frecuencia, la sensibilidad y la capacidad de adaptarse a diferentes condiciones de nivel de presión sonora.

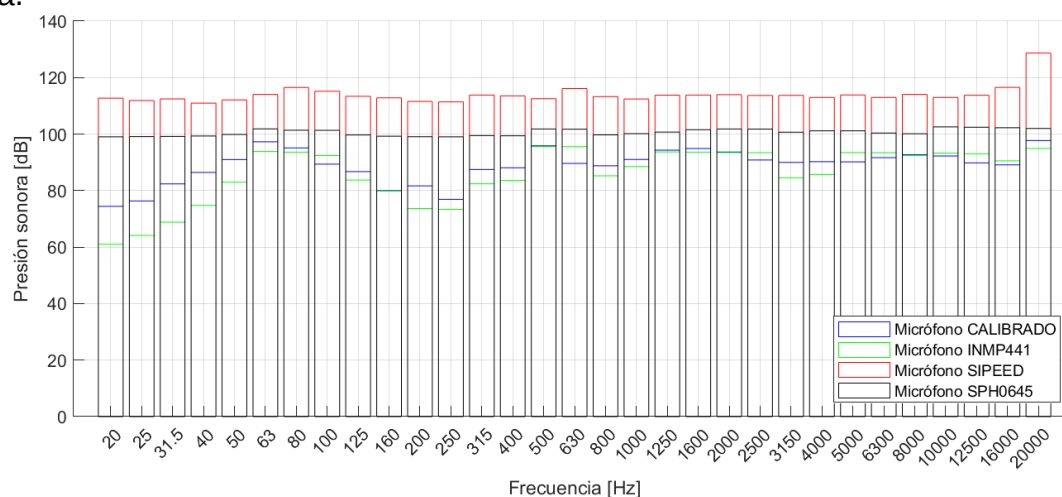


Ilustración 11. Respuesta comparativa entre micrófono calibrado y los tres micrófonos MEMS bajo estudio, ante emisión de señal sinusoidal en experimento en cámara anecoica.

Fuente: elaboración propia.

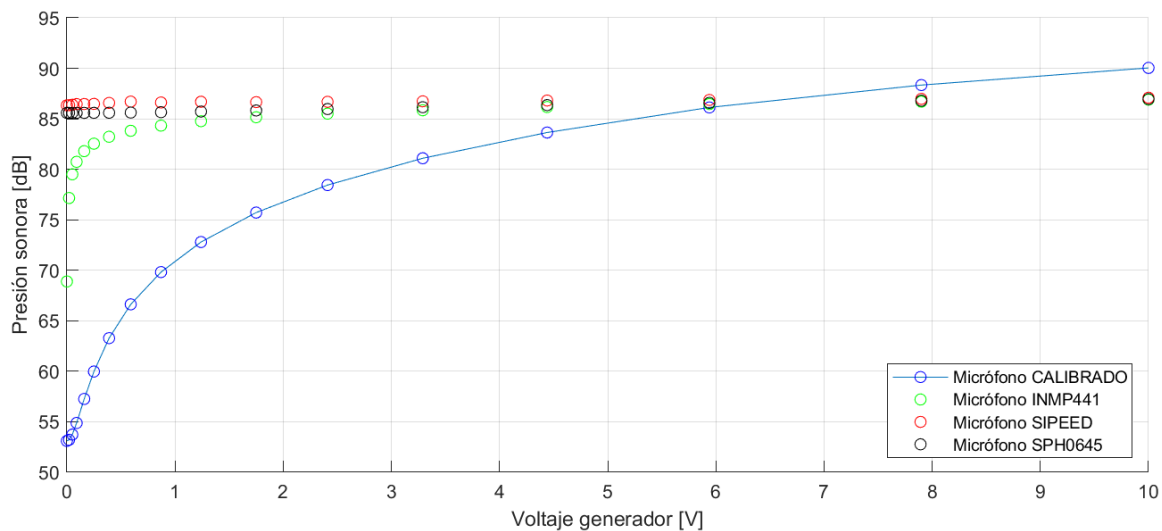


Ilustración 12. Respuesta comparativa entre micrófono calibrado y los tres micrófonos MEMS bajo estudio, ante emisión de señal sinusoidal de 1 kHz con diferentes niveles de presión sonora en experimento en cámara anecoica.

Fuente: elaboración propia.

A partir de los comportamientos observados durante las pruebas, y considerando que los resultados mostrados no cuentan con ningún preprocesamiento como filtrado o ponderación, se concluye que el micrófono que más se acerca a la respuesta en frecuencia de la referencia es el INMP441. Además, el comportamiento consistente ante variaciones de voltaje y frecuencia en el micrófono INMP441 no presenta sobresaturación en los rangos críticos de frecuencia.

En comparación con los otros dos micrófonos, el INMP441 muestra menor distorsión en todo el rango de frecuencias, ya que los valores están más alineados con el micrófono calibrado, mientras que en los otros dos micrófonos se evidencia saturación o ganancia excesiva en todo el intervalo de estudio.

Por otro lado, en la Ilustración 12 se muestra el comportamiento de los micrófonos respecto a la variación de presión sonora emitida por el parlante. A niveles de presión sonora bajos, el micrófono INMP441 detecta variaciones de presión sonora, lo que indica mayor sensibilidad frente a los otros dos micrófonos, los cuales se mantienen alrededor de 87 dB, sin seguir correctamente la referencia del micrófono calibrado.

Finalmente, como el dispositivo esperado es de bajo costo, el micrófono INMP441 es el que más se ajusta a este requerimiento, así como se evidencia en la Tabla 3. Por las razones anteriores se decidió continuar con el diseño de la solución basado en este micrófono.

3. DISEÑO Y DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO IOT

En este capítulo se presenta el diseño y el desarrollo del dispositivo IoT para la medición de ruido ambiental. Se comienza mencionando los requerimientos generales del sistema, los cuales detallan las especificaciones de comunicación, robustez, tamaño y funcionalidad. Estos se consideraron para garantizar la funcionalidad del dispositivo y que cumpla con las necesidades del usuario final. Posteriormente se describe la arquitectura de la solución, lo que incluye el diseño físico y la selección de componentes. Además, se detallan las especificaciones del software que permiten la integración y funcionalidad del dispositivo en su totalidad. Por último, se incluye la descripción del proceso de fabricación y se analizan los costos asociados a la elaboración del sistema.

3.1 REQUERIMIENTOS GENERALES DEL SISTEMA

3.1.1. Tamaño y forma. El dispositivo debe contar con dimensiones que permitan una fácil manipulación y capacidad de adaptación a diferentes entornos. Ya que debe exponerse a diversos ambientes se propone 7 cm x 7 cm x 10 cm, sin contar la antena o sensores.

3.1.2. Autonomía y energía.

3.1.2.1. Duración de la batería. El dispositivo debe contar con la capacidad de trabajar de manera autónoma durante al menos 3 días; pensado en el caso que se requiera monitoreo en alguna zona remota.

3.1.2.2. Monitoreo del estado de la batería. El sistema debe ser capaz de enviar alertas y notificaciones sobre el estado de la batería, todo con el fin de tener la información de en qué momento se debe retirar el dispositivo para realizar la carga de este.

3.1.3. Comunicación. Basado en la Tabla 2, se definió que el protocolo IoT óptimo para el desarrollo de este sistema es LoRaWAN ya que permite un mayor alcance y requiere un bajo consumo energético.

3.1.4. Funcionales. El sistema debe ser capaz de enviar alertas en caso de que se presente un daño o desconexión de cualquiera de los sensores del sistema.

3.1.5. Protección y robustez. Ya que el dispositivo puede ser instalado en interiores o en exteriores, se requiere garantizar que todas sus partes estén seguras; por lo tanto, se

debe contar con protección moderada contra el polvo y salpicaduras producidas por lluvia o agentes externos. Siguiendo las clasificaciones IP (*Ingress Protection*) se requiere al menos protección IP53 [47].

3.1.6. Económicos. Debido a que el ideal es que estos dispositivos trabajen de manera autónoma, es decir, sin supervisión deben contar con un bajo costo en caso de daño o hurto. Por esto se plantea que la construcción del prototipo no supere USD \$300, pero teniendo en cuenta que el costo del dispositivo en producción debe ser considerablemente menor.

3.1.7. Rendimiento de audio.

3.1.7.1. Rango dinámico. El dispositivo debe realizar mediciones con precisión niveles de ruido en ambientes moderados de aproximadamente 50dB hasta fuertes ruidos alrededor de los 120dB.

3.1.7.2. Ancho de banda. Según la norma IEC 61672 [48], en la cual se definen las especificaciones para los sonómetros, un sonómetro clase 2 debe tener un ancho de banda comprendido entre 63 Hz y al menos 8 kHz.

3.1.8. Mediciones adicionales. Utilizando un sensor de temperatura y humedad se reporta información adicional sobre las condiciones ambientales.

3.2. ARQUITECTURA DE LA SOLUCIÓN

3.2.1. Diseño del dispositivo. En la Ilustración 13 se presenta el diagrama de bloques de la estructura del dispositivo a nivel general.

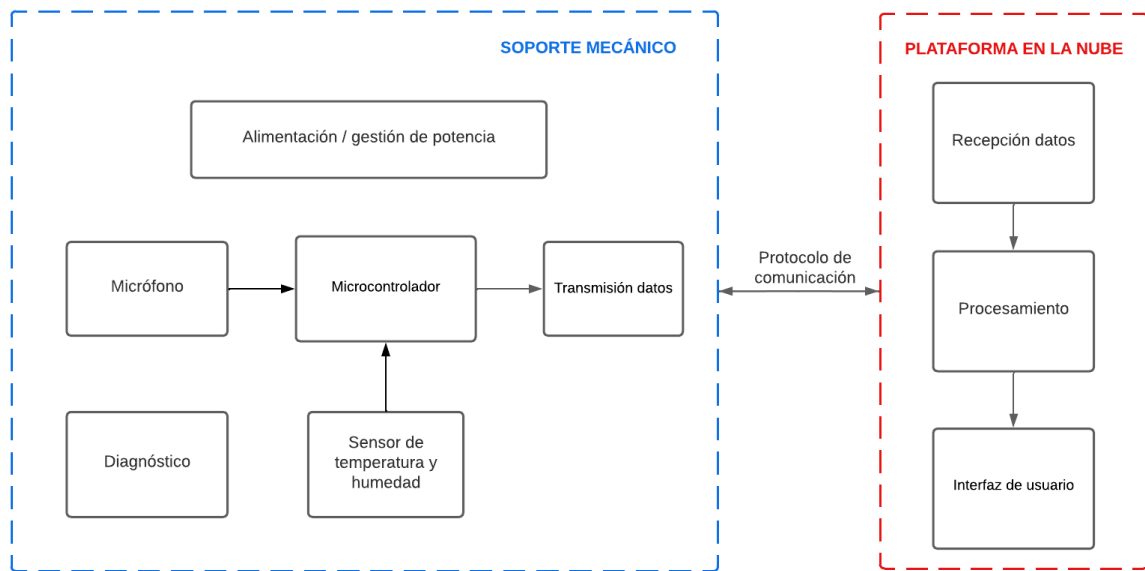


Ilustración 13. Diagrama de bloques del dispositivo

Fuente: elaboración propia.

3.2.2. Selección de componentes. A continuación, se detallan las características de los elementos que componen el sistema, con el fin satisfacer los requerimientos y asegurar que se cumpla la arquitectura del dispositivo.

3.2.2.1. Soporte mecánico. Debe ser una estructura robusta y confiable capaz de almacenar todos los componentes del sistema, creando un entorno seguro para todos los componentes electrónicos. Debe tener un diseño ergonómico y facilitar el acceso a todos los componentes del sistema en caso de ser necesario alguna reparación o reemplazo. En este caso se eligió una caja en policarbonato (PC), que es resistente a los impactos, a diversas condiciones climáticas y los rayos UV. Las dimensiones finales para esta parte del dispositivo son de 90 mm x 50 mm x 42 mm con protección IP68 [47], lo cual cumple con los requerimientos 3.1.1. y 3.1.5.

3.2.2.2. Micrófono. El micrófono INMP441 ha sido seleccionado a través de pruebas experimentales descritas en el capítulo 2 de este documento, ya que cumple con los requisitos para este dispositivo.

3.2.2.3. Sensor de temperatura y humedad. La incorporación de un sensor capaz de medir temperatura y humedad permite aportar información adicional, al describir las condiciones ambientales en las que se realizaron las mediciones de ruido. Para esto, se seleccionó el sensor SHT40, el cual ofrece mediciones precisas de ambas variables, con bajo consumo energético y comunicación mediante protocolo I2C.

3.2.2.4. Microcontrolador. El microcontrolador elegido es el Heltec Wireless Stick Lite [49], el cual es capaz de comunicarse con el sensor de temperatura y humedad a través del estándar I2C, con el micrófono a través del estándar I2S, cuenta con conectividad LoRaWAN y es capaz de gestionar la alimentación desde una batería y a su vez es capaz de controlar la carga de esta.

3.2.2.5. Transmisión de datos. El protocolo de comunicación elegido es LoRaWAN; para esto es necesario contar con tres elementos principales para su implementación: el módulo transmisor que en este caso es el microcontrolador del punto 3.2.2.4. En segundo lugar, una antena de 5 dBi que va conectada al microcontrolador, ideal para proporcionar buen alcance en entornos urbanos. Esta elección se basa en que las antenas de ganancia media como las de 5 dBi presentan un patrón de radiación más redondeado y amplio, lo que mejora la cobertura en áreas con obstáculos como edificios. Este tipo de antena permite un equilibrio entre alcance y estabilidad de señal en condiciones típicas de entornos urbanos densos [50].

Finalmente se requiere un receptor de los datos, conocido como Gateway y se eligió el HT-M7603 [51]; este es producido por el mismo fabricante del microcontrolador y cuenta con 8 canales, ampliando la posibilidad de agregar más dispositivos en un futuro. Estos tres elementos se encuentran configurados en el rango de bandas 915-928 MHz, cumpliendo con la normatividad colombiana donde indica el espectro de las bandas industriales, científicas y médicas (ICM) vigente para Colombia [52].

3.2.2.6. Alimentación. Como se define en la sección 3.1.2.1, el dispositivo debe contar con una batería recargable capaz de suministrar la energía necesaria para garantizar una autonomía de tres días. Dado que las restricciones del soporte mecánico están restringidas, se eligió una batería de 3.7 V 3000 mAh.

Tabla 5. Cálculo de duración de batería.

Categoría	Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
Tiempos del ciclo	Duración total del ciclo	3600	s	Equivalente a una hora
	Transmisión LoRa (audio)	240	s	envíos cada 30 s de 2 s
	Transmisión LoRa (SHT40)	2	s	1 envío por hora
	Tiempo lectura datos SHT40	0.01	s	Lectura de SHT40 + CPU
	Tiempo lectura datos audio	3358	s	Lectura de micrófono + CPU
Consumos	CPU activa	65.9	mA	ESP32-S3 con I2S e I2C
	Micrófono INMP441	2.2	mA	Lectura continua I2S
	LoRa en transmisión	230	mA	Durante envíos de datos
	Sensor SHT40	0.35	mA	Solo durante su lectura
Resultados	Consumo promedio del dispositivo	78.98	mA	Consumo total estimado
	Capacidad de batería	3000	mAh	Batería utilizada

	Autonomía estimada dispositivo	37.98	horas	Autonomía del dispositivo con batería 3000 mAh
	Autonomía estimada dispositivo	1.58	días	Autonomía del dispositivo con batería 3000 mAh
	Capacidad requerida para 3 días	5686.8	mAh	Necesaria para 3 días de autonomía

Fuente: Elaboración propia, basado en [43], [49], [53], [54]

En la Tabla 5 se estimó el consumo promedio del sistema IoT en la transmisión de los datos de audio y del sensor SHT40 por LoRa. Se consideraron los tiempos de actividad de la CPU, micrófono y transmisiones, junto con sus respectivas corrientes. A partir de esto, se calculó cuantas horas puede durar la batería de 3000 mAh y cuanta capacidad sería necesaria para operar durante 3 días continuos. El consumo promedio del dispositivo fue la base para estas estimaciones.

Adicionalmente, el dispositivo debe contar con un puerto de carga; en este caso se decidió instalar un puerto USB tipo C que da al exterior del dispositivo, por lo que cuenta con protección IP68 [47].

3.2.2.7. Interruptor. Se debe contar con un interruptor que permita encender o apagar el dispositivo cuando se requiera.

En la Ilustración 14 se evidencian todas las partes que conforman el dispositivo. Además de estos elementos, se emplearon tornillos para asegurar la sujeción de algunas partes.

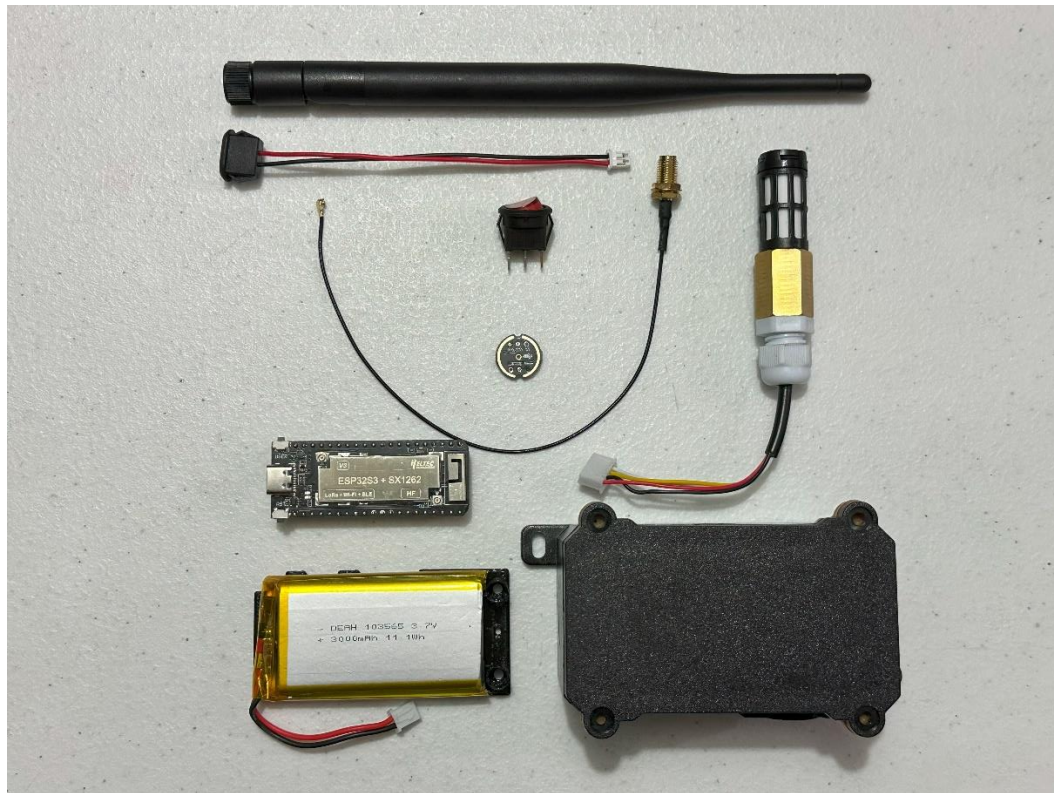


Ilustración 14. Componentes que integran el dispositivo.

Fuente: fotografía tomada por el autor.

3.2.3. Plataforma en la nube. La plataforma escogida para la gestión de los datos es *ThingSpeak*, la cual es una plataforma en la nube diseñada para proyectos del Internet de las cosas (IoT), que permite recopilar, visualizar y analizar datos en tiempo real enviados por dispositivos conectados a internet. Su funcionamiento se basa en la interacción de dispositivos inteligentes como sensores o monitores, que recolectan datos y los envían directamente a la nube utilizando protocolos comunes de IoT. Una vez que los datos llegan a *ThingSpeak*, la plataforma almacena y permite su visualización inmediata mediante gráficos y paneles personalizados.

3.3. ESPECIFICACIONES DE SOFTWARE

En esta sección se explica el funcionamiento a nivel de software del dispositivo, detallando sus interacciones y dinámicas internas que le permiten obtener, procesar y enviar los datos de manera eficiente.

El software se realizó en lenguaje basado en C y C++, en el entorno de desarrollo de Arduino (Arduino IDE), ya que es compatible con el microcontrolador Heltec Wireless Stick Lite y permite continuar el desarrollo en código abierto.

El sistema se compone por diferentes subsistemas que entregan señales digitales originarias del micrófono MEMS y del sensor de temperatura y humedad. Las señales llegan al microcontrolador Heltec Wireless Stick Lite por medio de los protocolos I2S e I2C respectivamente. Adicionalmente, se utiliza el ADC interno para medir el voltaje de la batería utilizada por el microcontrolador. Las librerías utilizadas para la programación del dispositivo se exponen en la Tabla 6.

Tabla 6. Librerías utilizadas en la programación del dispositivo de monitoreo de ruido ambiental.

Librería	Función	Usos comunes
Driver/i2s.h	Manejo del protocolo I2S	Micrófonos MEMS, DACS, salida de audio digital
Wire.h	Comunicación I2C	Sensores (temperatura, humedad) pantallas OLED
Adafruit_SHT4x.h	Control del sensor SHT40	Monitoreo ambiental, IoT
LoRaWan_APP.h	Comunicación LoRaWAN	Redes LoRaWAN, monitoreo remoto

Fuente. Elaboración propia.

A continuación, en la Ilustración 15 se muestra la dinámica de funcionamiento del dispositivo.

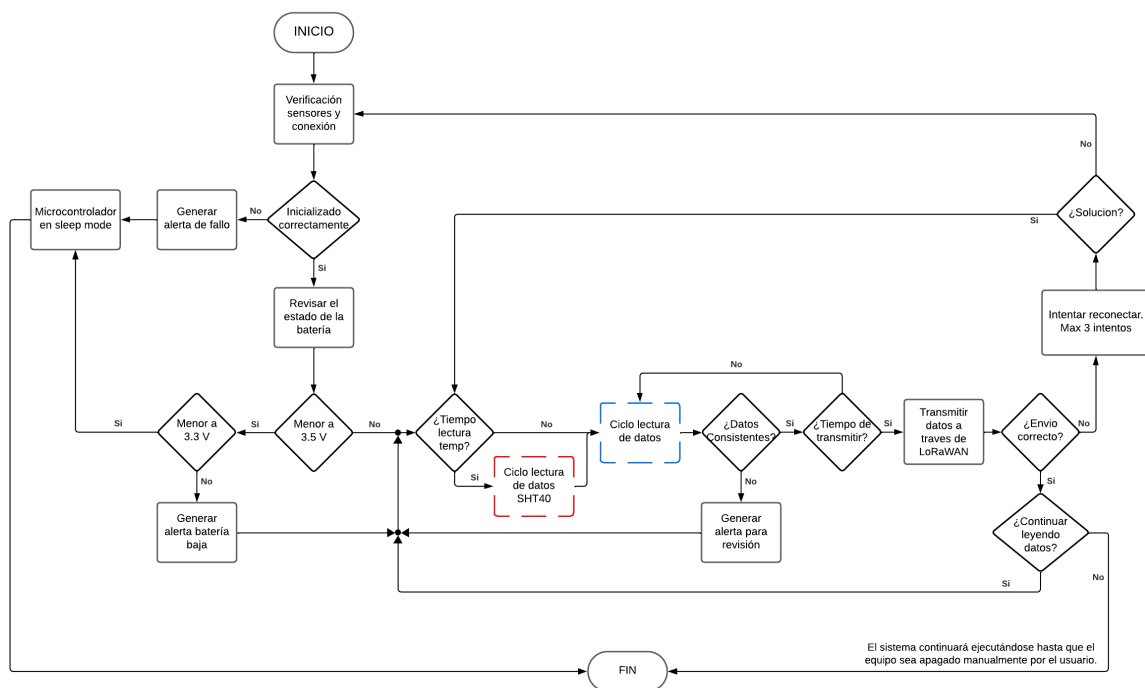


Ilustración 15. Rutina de flujo del dispositivo

Fuente: elaboración propia.

La dinámica de funcionamiento para el sistema IoT empieza con la inicialización de los sensores y la verificación de las conexiones: si alguna conexión falla se genera una alerta de fallo y el sistema entra en modo de bajo consumo (*sleep mode*) para ahorrar batería. Por el contrario, si los sensores se inicializan correctamente, el sistema procede a revisar el estado de la batería: si el voltaje está por debajo de los 3.5 V, pero está por encima de los 3.3 V, se genera una alerta de batería baja. En el caso de que el voltaje descienda de los 3.3 V el dispositivo entra en *sleep mode*.

Si la batería está en un nivel adecuado, comienza el ciclo de lectura de datos: si los datos no son consistentes se emite una alerta y se vuelve a ejecutar el ciclo de lectura. En caso contrario, los datos se transmiten a través de LoRaWAN. En caso de que el envío falle, se reintenta hasta tres veces. En caso de no conseguirlo se vuelve a verificar la conexión del sistema. Si el envío de los datos es exitoso, se seguirá ejecutando el ciclo de lectura hasta que el usuario apague manualmente el dispositivo y de fin al ciclo.

Las señales producidas por el micrófono MEMS y el sensor de temperatura y humedad se procesan dentro de la rutina interna del ciclo de lectura de datos como se muestra en la Ilustración 16.

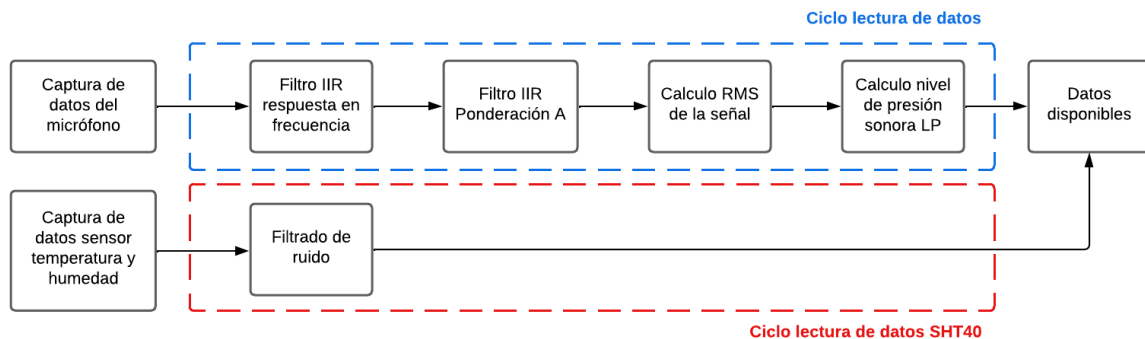


Ilustración 16. Rutina de flujo para el ciclo lectura de datos.

Fuente: elaboración propia.

El micrófono INMP441 se encarga de capturar el nivel de presión sonora en un instante, lo digitaliza en formato PCM (*Pulse Code Modulation*) y lo transmite a través del protocolo I2S (*Inter-IC sound*). Este micrófono tiene varias opciones de configuración, para este dispositivo se utilizó la frecuencia de muestreo estándar para audio de 48 kHz y una resolución de 16 bits; lo que significa que representa valores enteros en un rango de -32768 a 32767. Estos últimos valores representan los niveles de amplitud de la onda de sonido capturada por el micrófono.

Para el procesamiento de la señal entregada por el micrófono, se implementó un filtro IIR pasa bajas de primer orden, con frecuencia de corte en 10 kHz, ya que para un sonómetro clase 2 debe garantizar que incluya todo el contenido relevante hasta 8 kHz. El filtro es el encargado de eliminar el ruido y los componentes no deseados por encima de este umbral, tales como interferencias electromagnéticas generadas por el dispositivo o el entorno. Este filtro permite procesar la señal dentro del mismo microcontrolador con bajo consumo de memoria y procesamiento.

Después, la señal pasa por un segundo filtro IIR con ponderación A, que se encarga de ajustar la señal en base a la percepción del oído humano, lo que permite que los datos muestren los niveles de presión sonora importantes desde el punto de vista auditivo. Para implementar este filtro, se utilizaron los coeficientes calculados a partir de la función de transferencia analógica que se define en la norma IEC 61672-1, que corresponde a la curva de la ponderación A [48].

El diseño del filtro digital se basó en una aproximación por mínimos cuadrados mediante el método del error en la ecuación. Este procedimiento, desarrollado en trabajos previos de forma heurística permite obtener una representación de la respuesta en frecuencia

deseada, transformando la función analógica a su equivalente digital mediante técnicas de diseños de filtros [55], [56]. Luego de filtrar la señal, se calcula su valor RMS (Raíz Cuadrática Media) para representar la potencia promedio de la señal del micrófono, lo cual es esencial para calcular el nivel de presión sonora L_p en decibeles (dB) utilizando la Ecuación 1 [57].

Adicional a la señal del micrófono, la señal entregada por el sensor de temperatura y humedad se somete a un proceso de filtrado para mejorar su precisión. En este caso, se aplica un filtro IIR de primer orden con el objetivo de eliminar pequeñas fluctuaciones rápidas que no corresponden a variaciones reales del ambiente, las cuales se consideran interferencias eléctricas, errores de conversión analógica- digital o condiciones transitorias del sensor. Este filtro estabiliza la lectura y mejora la precisión y cofinalidad de los datos. Finalmente, los datos procesados de ambos sensores se envían a través de LoRaWAN a la nube para su visualización.

3.4. PROCESO DE FABRICACION

Una vez conocidos todos los requerimientos mecánicos detallados anteriormente en este capítulo, se realizaron diferentes modelos tanto en 2 como en 3 dimensiones con ayuda de herramientas de diseño asistido por computadora (CAD) con el objetivo de optimizar al máximo el espacio, garantizando que todos los componentes quedaran de fácil acceso y al mismo tiempo diseñando sujeciones robustas que impidan el desplazamiento de los elementos cuando el dispositivo esté en uso o siendo transportado.

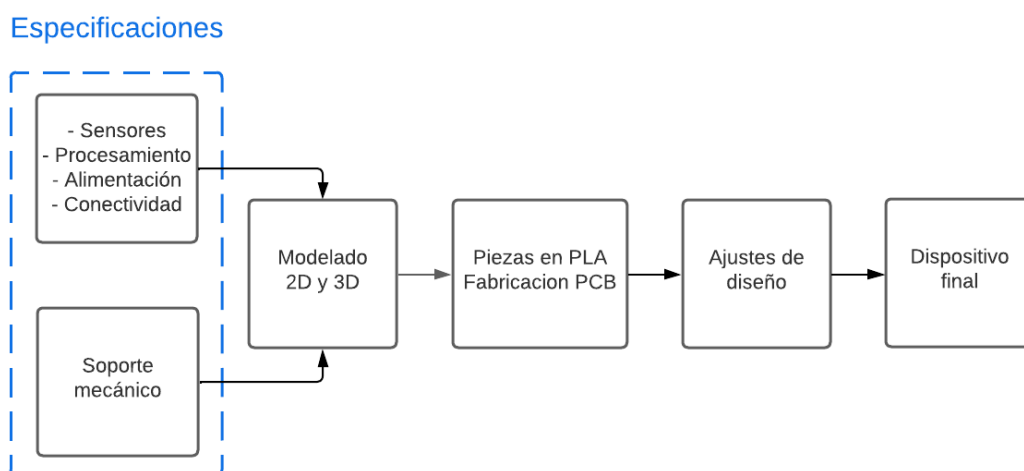


Ilustración 17. Proceso de elaboración dispositivo.

Fuente: elaboración propia.

Parte fundamental durante el modelado asistido por computadora y la fabricación con ayuda de una impresora 3D, fue la construcción del soporte para el micrófono, ya que cumple una función estructural y a su vez protege la electrónica interior del micrófono contra polvo y salpicaduras. Esto puede apreciarse en la parte inferior del dispositivo como se muestra en la Ilustración 18. Además, entre el soporte y la carcasa del dispositivo se incorporó un *O-ring*, el cual permite asegurar firmemente el micrófono al soporte y actúa como una barrera de protección contra el agua, evitando la filtración hacia el interior del dispositivo.

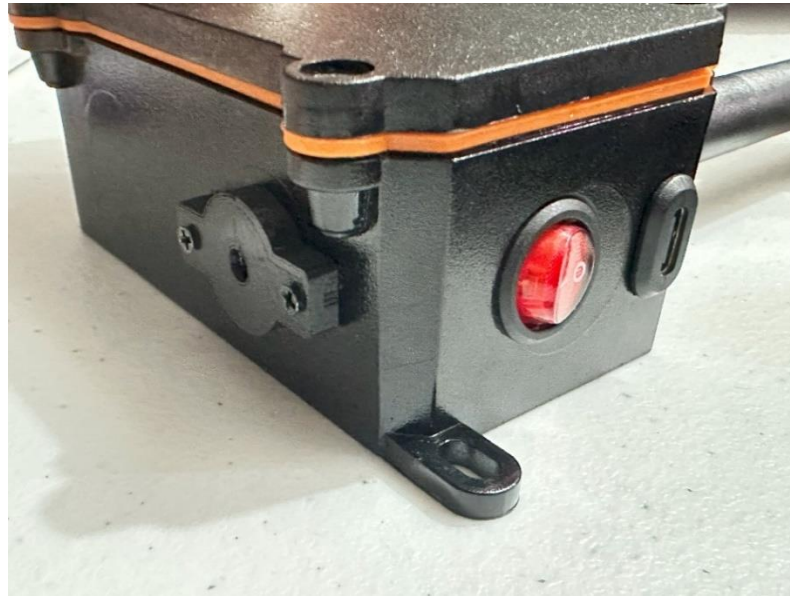


Ilustración 18. Vista inferior – lateral derecho del dispositivo.

Fuente: fotografía tomada por el autor.

Ahora, para la parte electrónica se requerían las conexiones mostradas en la Ilustración 19. Luego de comprobar que todo el sistema funcionaba correctamente según este diseño, se procedió a realizar la implementación en una placa de circuito impreso (PCB). El diseño final y ubicación de cada uno de los componentes se puede observar en la Ilustración 20. La fabricación de la PCB se realizó en baquelita de cobre con ayuda de una máquina CNC.

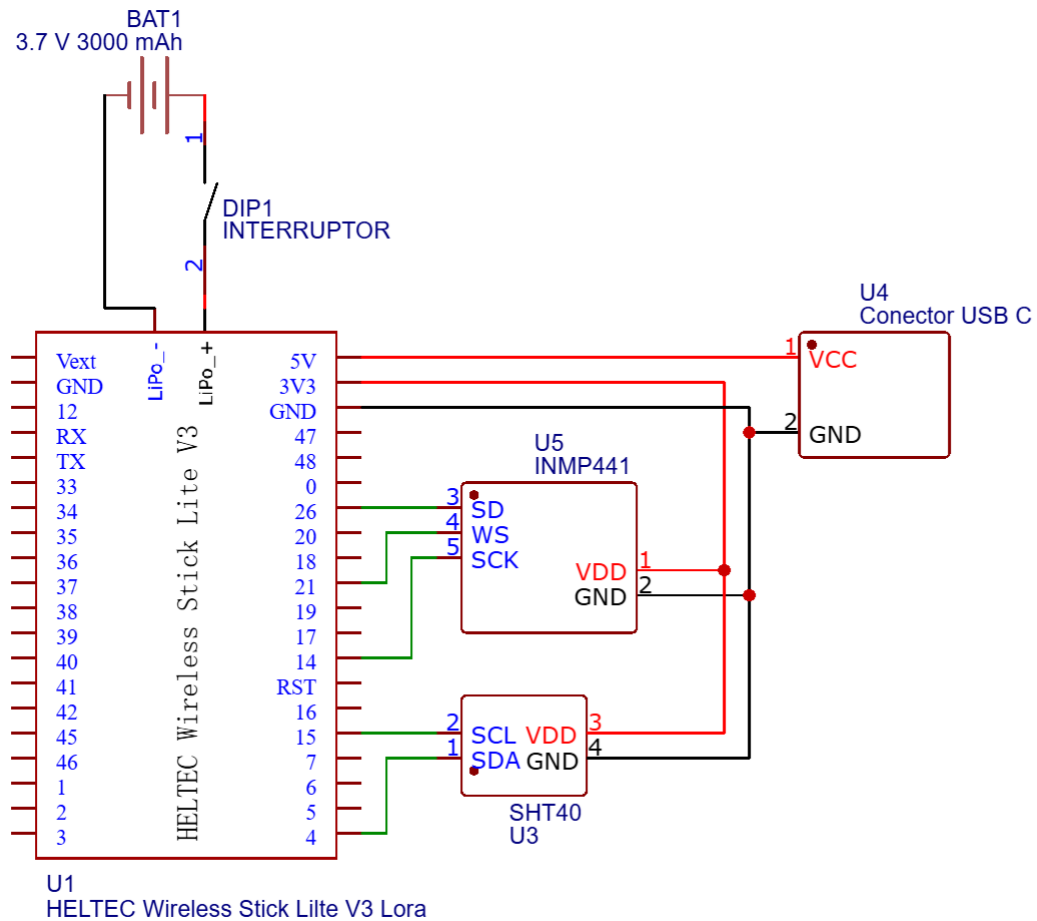


Ilustración 19. Diagrama esquemático del dispositivo

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la Ilustración 19, el dispositivo cuenta con un módulo Heltec Wireless Stick Lite V3, al cual se conectan un micrófono digital INMP441 mediante el protocolo I²S y un sensor de temperatura y humedad SHT40 mediante I²C. Ambos sensores reciben alimentación de 3.3 V y comparten la línea de GND del módulo. Las señales de comunicación están conectadas a los pines GPIO, según se identifican en el diagrama esquemático de en la Ilustración 19. La antena LoRa se conecta al módulo a través del conector IPEX integrado en la placa Heltec, permitiendo la comunicación inalámbrica mediante tecnología LoRa en la banda de 915 MHz.

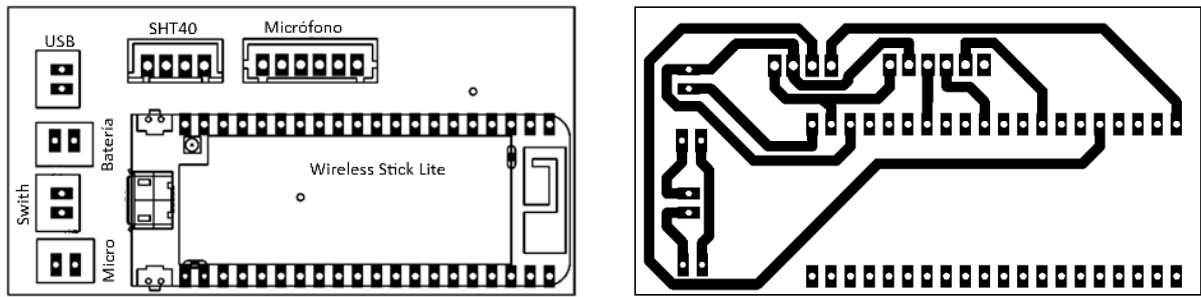


Ilustración 20. Diseño de PCB

Fuente: elaboración propia.

Luego de soldar todos los componentes a la placa y armar el dispositivo, se puede observar en la Ilustración 21 cómo se distribuyen todos los elementos dentro del mismo. Un punto importante, que todos los elementos están acoplados a través de conectores independientes para facilitar, en caso de que se requiera, algún reemplazo ya sea por daño o mejora para el dispositivo.

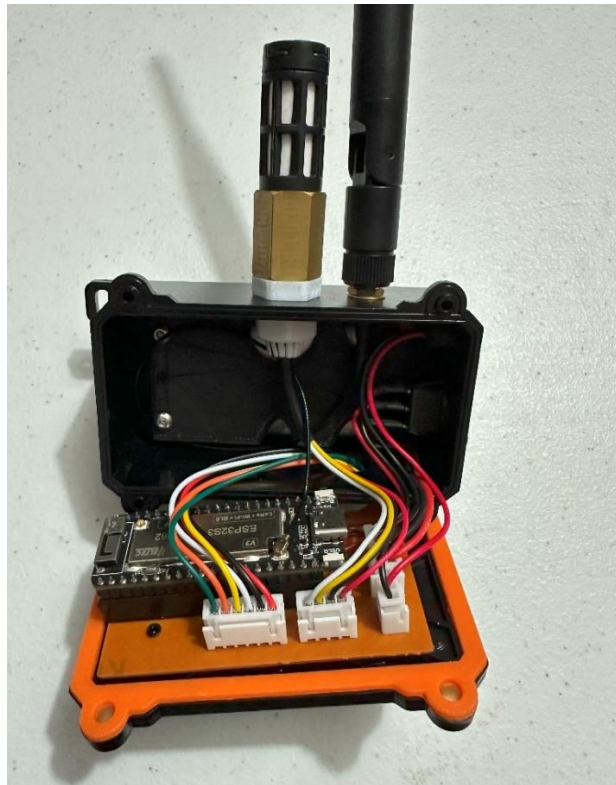


Ilustración 21. Montaje final del dispositivo

Fuente: fotografía tomada por el autor.

Finalmente, se realizaron 2 dispositivos idénticos, los cuales son conectados a un único Gateway, con el fin de dejar abierta la posibilidad de una expansión futura del sistema. Este se puede observar en la Ilustración 22.



Ilustración 22. Sistema desarrollado

Fuente: fotografía tomada por el autor.

3.5. COSTOS DEL DISPOSITIVO

Uno de los propósitos principales en el desarrollo del dispositivo IoT para la medición de ruido ambiental, es mantener un bajo costo sin comprometer la funcionalidad y la precisión. El sistema realizado responde a la necesidad de brindar una solución asequible para usuarios que busquen alternativas económicas a los dispositivos comerciales tradicionales. Se justifica el diseño económico del dispositivo basado en diferentes puntos clave.

3.5.1 Componentes accesibles y económicos. En la sección 3.2.2 se detalla la selección de los componentes utilizados para la elaboración del dispositivo. Esta selección se realizó considerando criterios de accesibilidad y economía, asegurando la disponibilidad en el mercado y una relación costo-beneficio favorable. Se optó por un microcontrolador de bajo costo, accesible y versátil en aplicaciones IoT. El sensor elegido, un micrófono MEMS, brinda un equilibrio adecuado entre precio y rendimiento, superando en términos de costo-beneficio a alternativas más costosas. Adicionalmente, se incorporó la tecnología de comunicación LoRaWAN, que proporciona una solución más económica en comparación con estándares industriales, manteniendo la funcionalidad requerida para la transmisión de datos.

Esta selección de componentes permite mantener un bajo costo general del dispositivo sin comprometer su desempeño ni su capacidad operativa. En la Tabla 7 se muestra el costo en dólares americanos (USD) para cada uno de los componentes del dispositivo.

Tabla 7. Costos de componentes

CANTIDAD	DESCRIPCION	COSTO UNITARIO [USD]	COSTO DISPOSITIVO [USD]	COSTO TOTAL [USD]
2	Puerto de carga USB C resistente al agua	\$ 1.20	\$ 1.20	\$ 2.40
2	Interruptor	\$ 0.80	\$ 0.80	\$ 1.60
2	Batería 3.7 V 3000 mAh	\$ 13.99	\$ 13.99	\$ 27.98
2	Sensor de temperatura y humedad SHT40	\$ 4.25	\$ 4.25	\$ 8.50
2	Antena LORAWAN IPEX1 915MHz	\$ 5.99	\$ 5.99	\$ 11.98
2	Caja IP68 en PC 90X50X42	\$ 8.92	\$ 8.92	\$ 17.84
2	Micrófono MEMS INMP441	\$ 1.10	\$ 1.10	\$ 2.20
2	Heltec Wireless Stick Lite	\$ 14.90	\$ 14.90	\$ 29.80
2	PCB	\$ 2.00	\$ 2.00	\$ 4.00
2	Cables y conectores	\$ 5.00	\$ 5.00	\$ 10.00
1	Gateway LoRaWAN HT-M7603 (8 Ch)	\$ 119.00	\$ -	\$ 119.00
TOTAL			\$ 58.15	\$ 235.30

Fuente: elaboración propia, basado en los costos obtenidos de Amazon [58].

La cuarta columna de la Tabla 7 refleja el valor de cada dispositivo final y la última columna hace referencia al valor total para este proyecto, en el cual se elaboraron dos dispositivos y se hace uso de un único Gateway.

3.5.2. Diseño eficiente. El diseño del dispositivo IoT para la medición de ruido ambiental integra las diversas funciones en un solo módulo para minimizar el número de componentes individuales. El microcontrolador Heltec Wireless Stick Lite fusiona la comunicación LoRaWAN, el ahorro de energía de las baterías y la regulación de protocolos de comunicación I2C e I2S eliminando la necesidad de componentes adicionales para estas funciones, simplificando la arquitectura y reduciendo costos de montaje [49].

Adicionalmente, el diseño de la PCB se perfeccionó para reducir su tamaño, adaptándolo al tamaño del de la caja IP68 seleccionada (90 mm x 50 mm x 42 mm). Esto minimiza el costo de fabricación de la PCB y ayuda a ensamblar las piezas de manera más eficiente, manteniendo al mismo tiempo los componentes electrónicos seguros en el interior de la carcasa. Además, se utilizaron como estándares abiertos I2C para el sensor SHT40 e I2S para el micrófono MEMS INMP441. También, el diseño modular facilita futuras mejoras o cambios de elementos particulares sin alterar el resto de la configuración.

3.5.3. Tecnología asequible. El sistema IoT para la medición de ruido ambiental se diseñó utilizando tecnologías estables y accesibles; lo cual da la posibilidad de equilibrar el costo y el rendimiento, lo que asegura la viabilidad económica.

El microcontrolador Heltec Wireless Stick Lite es programado en el entorno Arduino IDE, la cual es una plataforma *open-source*, conocida por su simplicidad, versatilidad y compatibilidad a diferentes microcontroladores. La elección de este software elimina los costos asociados a licencias de software propietario, fomenta la accesibilidad y facilita el aprendizaje para futuros trabajos basados en este dispositivo. En cuanto a la transmisión de los datos adquiridos, se utiliza la plataforma *The Things Stack*, esta es un servidor de red diseñado para la gestión de datos IOT de LoRaWAN, el cual ofrece el plan Discovery; este permite conectar hasta 10 dispositivos de manera gratuita [59], [60]. Para visualizar los datos se optó por utilizar *ThingSpeak*, ya que también cuenta con un plan de entrada gratuito y gracias a su integración con Matlab permite realizar análisis posteriores de los datos para los que cuenten con esta aplicación [61].

3.5.4. Comparación con alternativas existentes. Con el fin de demostrar la funcionalidad superior del dispositivo y sus componentes de menor costo se compara con dispositivos de medición de ruido ambiental comerciales de clase 2 y con un rango dinámico entre 30 y 130 dB.

Para el dispositivo construido se consideró el costo unitario mostrado en la *Tabla 7* de US \$58.15, aplicando una tasa de cambio promedio de \$4.370 pesos colombianos por dólar.

Tabla 8. Comparación de costos con dispositivos comerciales

Referencia	Batería	Soporta intemperie	Medición temperatura y humedad	Entrega de los datos	Costo [COP]
S8607	3 pilas AAA	NO	NO	Solo visualización en pantalla	\$88.100
GM1356	4 pilas AA	NO	NO	Interfaz USB	\$397.900
LH200	4 pilas AA	NO	NO	Interfaz USB	\$750.000
SL-4023SD	6 pilas AA	NO	NO	Tarjeta SD	\$2.970.000
Dispositivo construido	Recargable	SI	SI	Almacenamiento en la nube	\$254.000

Fuente: elaboración propia, basado en los sonómetros disponibles en MercadoLibre Colombia [62], [63], [64], [65].

Como puede observarse en la Tabla 8, el dispositivo construido ofrece una variedad de ventajas significativas en comparación con los sonómetros comerciales de clase 2 y con un rango dinámico entre 30 y 130 dB. En primer lugar, la adición un sensor de temperatura y humedad, lo que permite un acercamiento a las condiciones ambientales que pueden afectar las mediciones del ruido, lo que lo convierte en un primer paso hacia una solución multifuncional, donde se pueden integrar diferentes sensores meteorológicos para monitoreo del cumplimiento de las regulaciones para medición de ruido ambiental. En segundo lugar, el diseño del soporte mecánico cumple con la clasificación IP (*Ingress Protection*), lo que lo hace resistente al agua y al polvo, favoreciendo la adaptabilidad del dispositivo a zonas externas donde esté expuesto a lluvia y contaminación. Además, tiene la capacidad de fijarse en diferentes superficies y adaptarse a diferentes necesidades operativas.

Otra ventaja con la que cuenta es el uso de baterías recargables, esto además de reducir costos operativos por el cambio constante de pilas, reduce el impacto ambiental. Por otro lado, la capacidad del dispositivo construido de almacenar datos en la nube permite un monitoreo remoto de la información recolectada por el dispositivo, lo cual favorece su gestión, análisis y almacenamiento.

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1. PRUEBAS FUNCIONALES

En este apartado se muestran las pruebas realizadas para cada uno de los subsistemas que componen el dispositivo. Estas se llevaron a cabo por separado para garantizar que cada uno cumpla con los parámetros establecidos. Cada una de las etapas debe entregar determinada señal o dato para garantizar el correcto funcionamiento del dispositivo. En este caso, se usó el dispositivo armado en su totalidad, pero ejecutando pruebas para cada subsistema por separado.

4.1.1. Sensor de temperatura y humedad SHT40. Para esta prueba se debe garantizar la conexión, lectura y consistencia de los datos. Tal como se muestra en la Ilustración 23 se obtienen datos de temperatura en grados centígrados, humedad relativa del ambiente y la duración de la lectura para cada dato.

```
Sensor SHT40 inicializado correctamente.  
Temperature: 23.34 degrees C  
Humidity: 57.57% rH  
Read duration (ms): 10  
Temperature: 23.36 degrees C  
Humidity: 57.59% rH  
Read duration (ms): 11  
Temperature: 23.34 degrees C  
Humidity: 57.59% rH  
Read duration (ms): 11
```

Ilustración 23. Prueba funcional del sensor de temperatura y humedad.

Fuente: elaboración propia.

4.1.2. Micrófono INMP441. Para la prueba del micrófono MEMS se garantiza que este funcione correctamente, se obtienen los datos del ambiente y se procesan para entregar el valor RMS promedio en Pascales (Pa). Adicionalmente, se realiza el cálculo del valor de presión sonora en decibeles (dB).

```

RMS Promedio: 0.221930 Pa, dB SPL Promedio: 80.90
RMS Promedio: 0.213859 Pa, dB SPL Promedio: 80.58
RMS Promedio: 0.181681 Pa, dB SPL Promedio: 79.17
RMS Promedio: 0.215903 Pa, dB SPL Promedio: 80.66
RMS Promedio: 0.228875 Pa, dB SPL Promedio: 81.17
RMS Promedio: 0.219752 Pa, dB SPL Promedio: 80.82

```

Ilustración 24. Prueba funcional del micrófono.

Fuente: elaboración propia.

4.1.3. Transmisión LoRaWAN. Se realiza prueba de conectividad entre el dispositivo y el Gateway, para esto se transmite una cadena de 4 datos desde el dispositivo, pasando por el Gateway y recibidos en la plataforma *The Things Stack*.

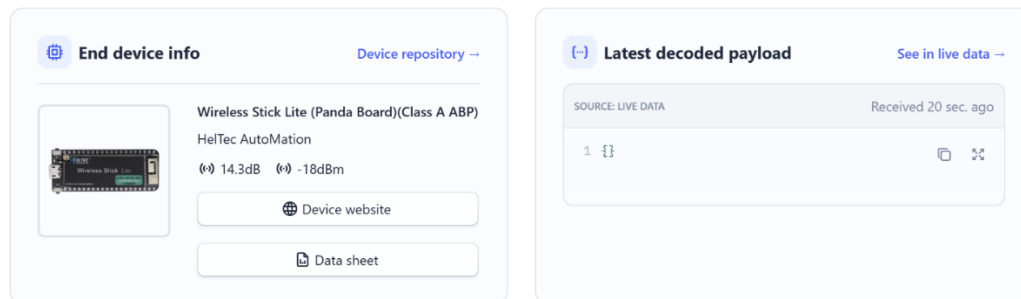


Ilustración 25. Centro de control *The Things Stack*.

Fuente: elaboración propia, visualizado en la plataforma *The Things Stack* [59].

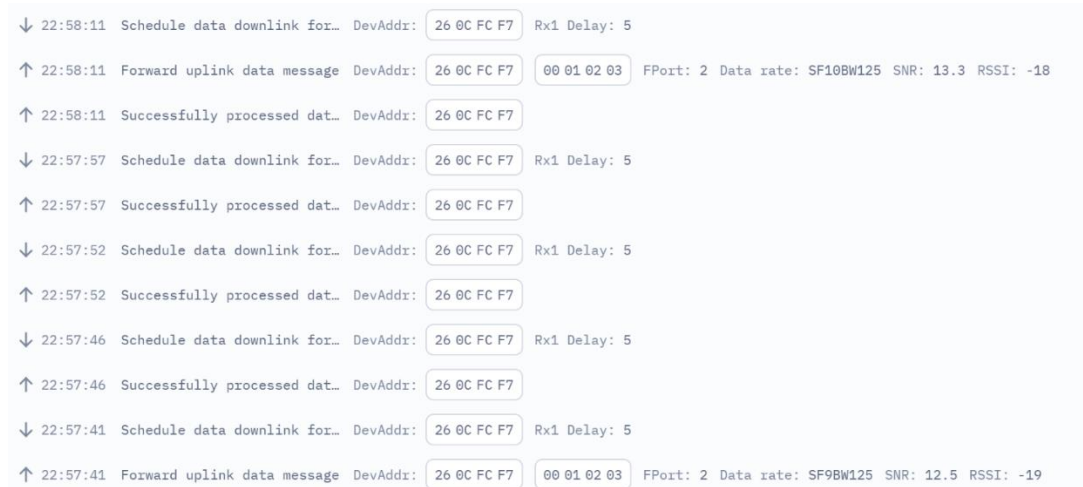


Ilustración 26. Datos recibidos en plataforma *The Things Stack*.

Fuente: elaboración propia, visualizado en la plataforma *The Things Stack* [59].

4.1.4. Visualización datos. Para la prueba de conectividad entre la plataforma servidor *The Things Stack* y la plataforma de visualización *ThingSpeak*, se optó por recibir los datos correspondientes a temperatura y humedad utilizando el sensor SHT40.

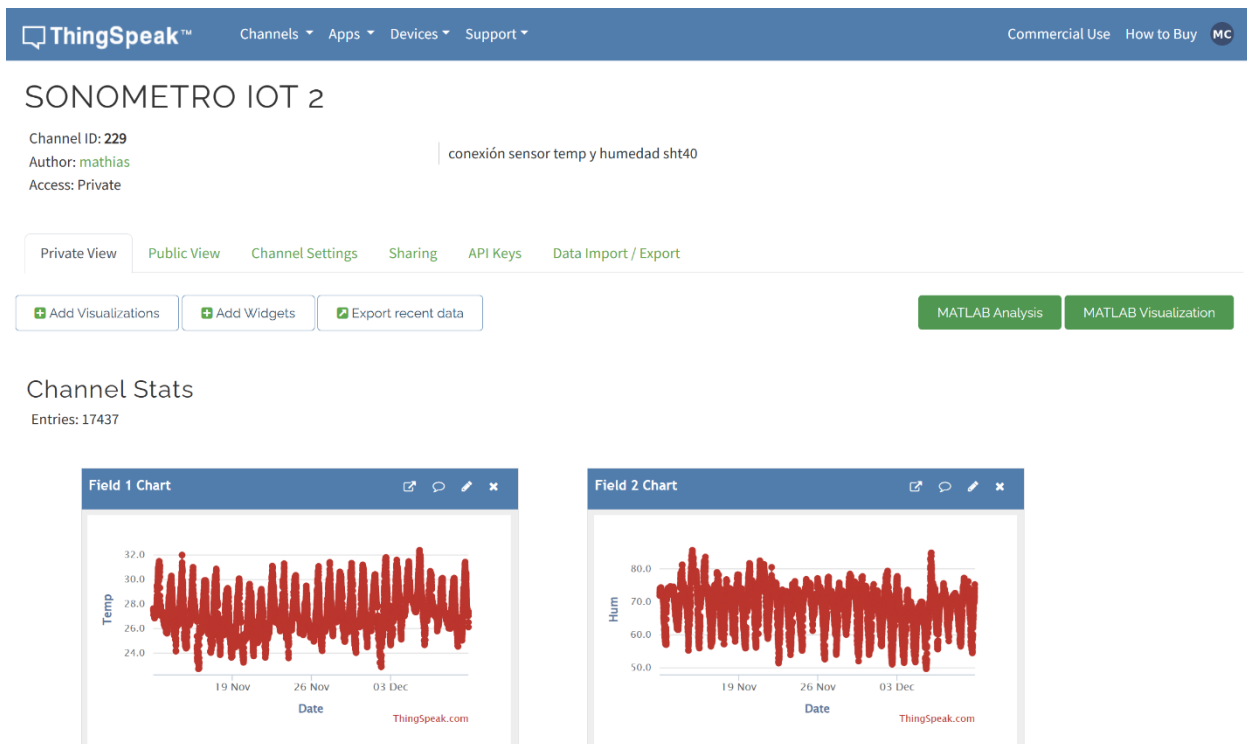


Ilustración 27. Datos recibidos en la plataforma *ThingSpeak*.

Fuente: elaboración propia, visualizado en la plataforma *The Things Stack* [59].

4.2. PRUEBAS DEL DISPOSITIVO.

En este apartado se presentan las pruebas de comparación de los dos dispositivos contruidos, el micrófono calibrado y el sonómetro comercial Tasi TA652B [66]. Esto bajo las pruebas especificadas en el capítulo 2 donde se muestra que las pruebas se realizaron bajo condiciones ideales de laboratorio donde el sistema no está sometido a condiciones climáticas adversas como lluvia o vientos mayores a 3 m/s.

Para las pruebas funcionales se usaron señales sinusoidales con duración de 60 segundos para cada una de las 31 frecuencias centrales nominales correspondientes a los tercios de bandas de octava (ver anexo A). El nivel de presión sonora (dB) se obtiene

capturando la señal entregada por el parlante a través de los dispositivos. Los resultados obtenidos para el primer dispositivo se muestran en la Ilustración 28 y para el segundo dispositivo en la Ilustración 29.

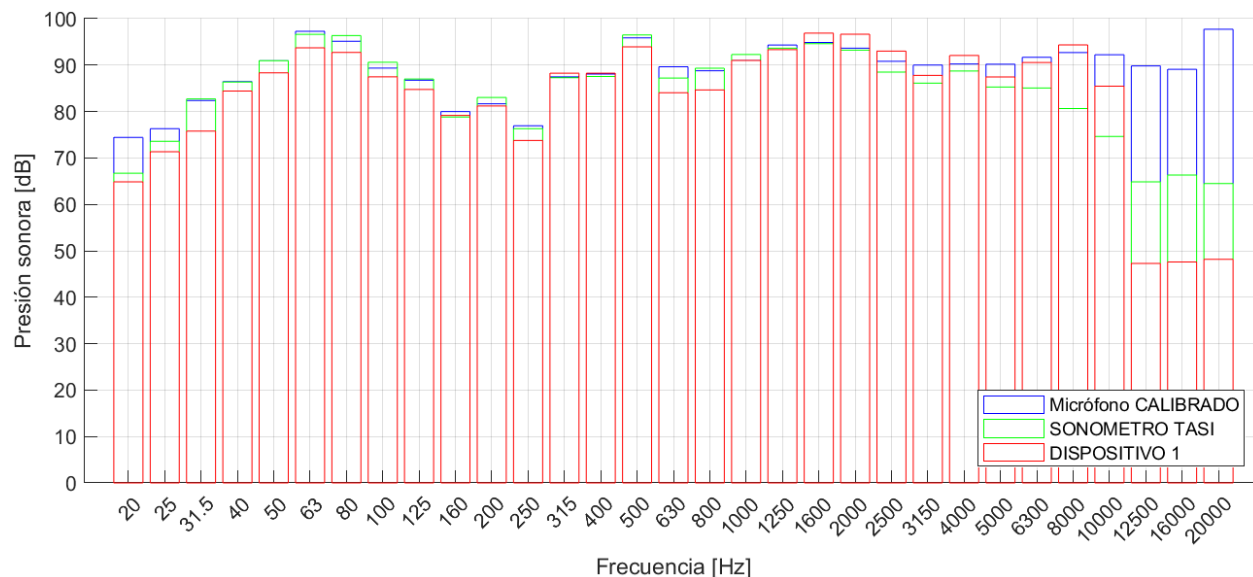


Ilustración 28. Respuesta comparativa entre primer dispositivo, sonómetro y micrófono calibrado ante emisión de señal sinusoidal en experimento en cámara anecoica.

Fuente: elaboración propia.

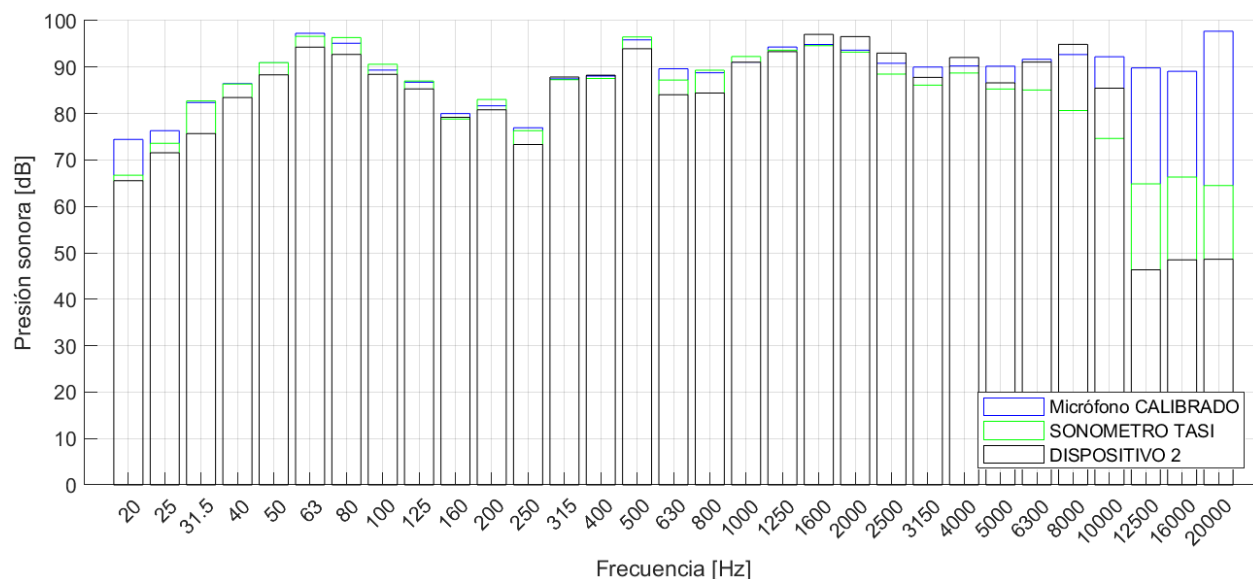


Ilustración 29. Respuesta comparativa entre segundo dispositivo, sonómetro y micrófono calibrado ante emisión de señal sinusoidal en experimento en cámara anecoica.

Fuente: elaboración propia.

En la Ilustración 30 se muestra la diferencia porcentual entre cada uno de los dispositivos construidos y el sonómetro comercial, comparados a la referencia basada en el micrófono calibrado. El eje horizontal representa cada una de las frecuencias nominales correspondientes a los tercios de bandas de octava y en el eje vertical la diferencia porcentual.

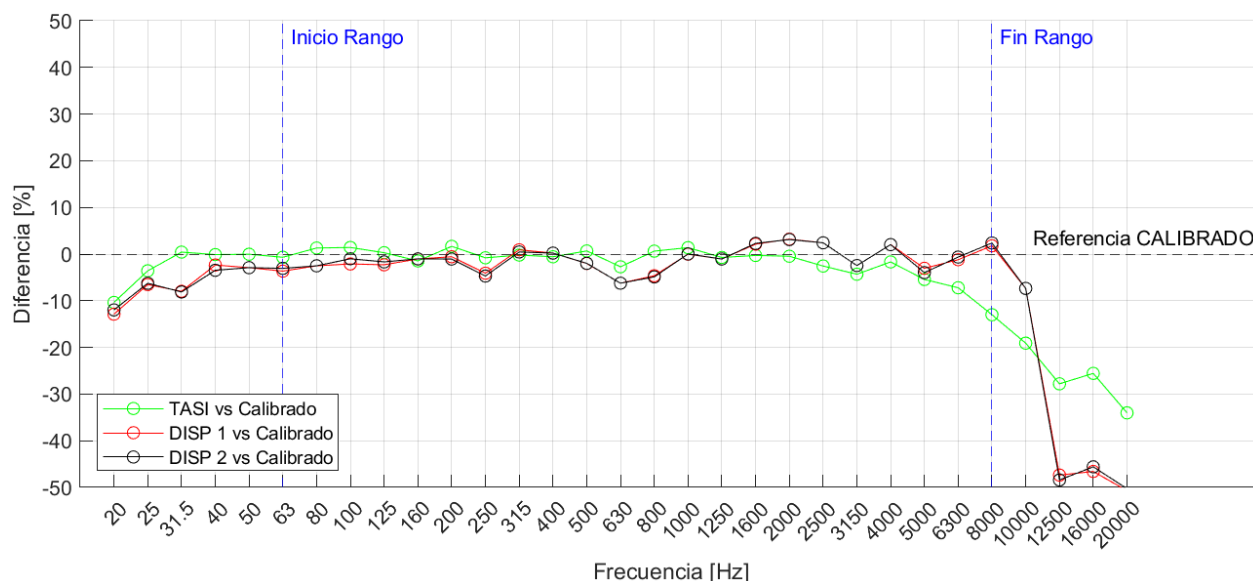


Ilustración 30. Diferencia porcentual entre micrófono calibrado, sonómetro comercial y dispositivos construidos ante emisión de señal sinusoidal en experimento en cámara anecoica.

Fuente: elaboración propia.

La gráfica anterior se resume en la Tabla 9 el valor mínimo, máximo y el error absoluto medio dentro del rango de estudio (63 Hz a 8 kHz), considerando los valores esperados para un sonómetro clase 2.

Tabla 9. Comparación del error porcentual en la medición de nivel presión sonora entre dispositivos

	Mínimo	Máximo	Error absoluto medio
Sonómetro comercial TASI	-13.00 %	1.65 %	2.33 %
Dispositivo 1	-6.24 %	3.19 %	2.19 %
Dispositivo 2	-6.24 %	3.11 %	2.20 %

Fuente: elaboración propia.

En la Ilustración 31 se muestra la diferencia porcentual de los dos dispositivos construidos con referencia del sonómetro comercial TASI. Se logra identificar un mayor porcentaje de discrepancia en las bandas superiores a 5 kHz, ya que como se evidencia en la Ilustración 30, el sonómetro comercial TASI presenta una mayor atenuación a partir de este valor. Adicionalmente, en la comparación únicamente entre los dos dispositivos construidos, utilizando el concepto de error absoluto, se encuentra que entre ambos dispositivos hay un margen de error máximo de ± 0.9883 dB en todo el intervalo de interés.

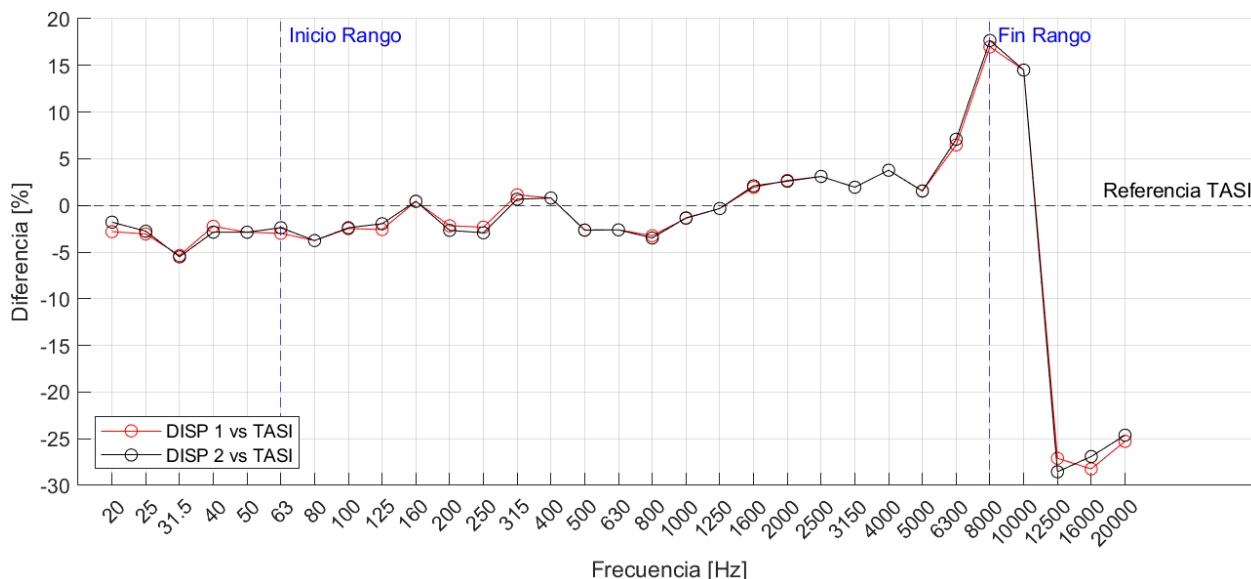


Ilustración 31. Diferencia porcentual entre los dos dispositivos y sonómetro calibrado TASI ante emisión de señal sinusoidal en experimento en cámara anecoica.

Fuente: elaboración propia.

La gráfica se resume en la Tabla 10 el valor mínimo, máximo y el error absoluto medio dentro del rango de estudio (63 Hz a 8 kHz), considerando los valores esperados para un sonómetro clase 2.

Tabla 10. Comparación del error porcentual en la medición de nivel presión sonora entre dispositivos.

	Mínimo	Máximo	Error absoluto medio
Dispositivo 1	-3.77 %	16.99 %	3.06 %
Dispositivo 2	-3.77 %	17.67 %	3.10 %

Fuente: elaboración propia.

Las pruebas realizadas permitieron validar el funcionamiento de los dispositivos desarrollados, comparándolos uno a uno con el micrófono calibrado de referencia y un sonómetro comercial. En los gráficos analizados en este apartado se evidencia el comportamiento para cada una de las 31 frecuencias centrales de los tercios de octava. Además, la repetibilidad observada durante las pruebas en los dos dispositivos construidos demuestra que el sistema entrega valores confiables, lo que permite en una futura etapa de desarrollo para este proyecto; escalar la cantidad de dispositivos en red que se pueden tener sin comprometer la consistencia de los datos.

En la norma IEC-61672-1, la frecuencia de 1 kHz se considera como la frecuencia de referencia para las mediciones con sonómetros. A esta frecuencia se debe presentar la máxima precisión y se utiliza como punto base para verificar diversos parámetros, como la calibración acústica. En los sonómetros clase 2, existe un límite de tolerancia de $\pm 1,4$ dB en la banda de 1 kHz, en el caso del dispositivo 1 se tiene un valor de +0.03 dB y el dispositivo 2 un valor de -0.02 dB, respecto al micrófono calibrado [48].

Es importante resaltar que el dispositivo IoT se encarga exclusivamente del monitoreo de los niveles de ruido ambiental y transmite los datos a la plataforma *ThingSpeak*. Sin embargo, la verificación de las condiciones meteorológicas adecuadas según la normatividad vigente (evitando lluvias y vientos superiores a 3 m/s) es responsabilidad del usuario que analiza la información recibida. Adicionalmente, el dispositivo cuenta con un sensor de temperatura y humedad que actúa como un indicador de variaciones en estas variables. Aunque este sensor no es un criterio definitivo para descartar mediciones, sí proporciona información adicional que puede ser útil para el análisis y la contextualización de los datos registrados.

5. CONCLUSIONES

El sistema desarrollado en este trabajo de grado constituye una herramienta apropiada para la medición de ruido ambiental, ya que la integración del micrófono con un sensor de temperatura y humedad genera datos precisos y contextuales sobre el entorno, utilizando tecnología de bajo costo y de fácil acceso. Las pruebas realizadas en cámara anecoica demuestran que los dispositivos desarrollados ofrecen un desempeño confiable, con errores absolutos medios dentro de los límites establecidos por la norma IEC-61672-1 para sonómetros clase 2. Se observó una alta precisión en la frecuencia de referencia a 1 kHz y una buena repetibilidad en los datos obtenidos, lo que valida la estabilidad del sistema. Si bien, se identificaron diferencias en frecuencias superiores a 5 kHz frente al sonómetro comercial TASI, estas se atribuyen a limitaciones propias del equipo de referencia. En general, los resultados respaldan el uso del sistema desarrollado como herramienta de monitoreo ambiental de bajo costo, escalable y adecuado para futuras implementaciones en redes de medición.

El sistema propuesto no solo cumple con criterios técnicos de precisión y estabilidad, sino que también considera los lineamientos normativos aplicables al monitoreo ambiental. El diseño toma como referencia la norma IEC 61672-1 y es capaz de ajustarse a las condiciones de operación definidas en la normativa colombiana. Los resultados obtenidos en las pruebas con los dos dispositivos fabricados muestran una diferencia mínima entre ellos, lo que evidencia una buena repetibilidad y la posibilidad de escalar el sistema sin comprometer la calidad de los datos. Estas características consolidan al dispositivo como una buena alternativa técnicamente válida y normativamente coherente para la implementación de redes IoT de monitoreo de ruido ambiental.

La conectividad inalámbrica y la capacidad de monitoreo remoto destacan como las principales ventajas del dispositivo desarrollado. Gracias al tamaño compacto y conectividad LoRaWAN es posible implementar dispositivos en múltiples ubicaciones, tanto en interiores como en exteriores, con el fin de monitorear diferentes lugares al mismo tiempo sin necesidad de estar presente en el punto de medición.

El uso de la ponderación A como filtro de señal acústica en el dispositivo desarrollado asegura que las mediciones de ruido ambiental sean representativas al impacto en el oído de los seres humanos. Además de contribuir a la prevención de daños auditivos y apoyar al cumplimiento de las normativas vigentes.

La incorporación de un sensor de temperatura y humedad al sistema IoT de monitoreo de ruido ambiental representa un avance significativo frente a los sonómetros comerciales, que generalmente se limitan a registrar únicamente niveles de presión sonora. Esta integración permite obtener información adicional sobre las condiciones ambientales en el lugar de medición, lo que enriquece el análisis de los datos acústicos y mejora la interpretación de resultados. Además, abre la posibilidad de futuras ampliaciones del sistema con sensores climáticos adicionales, que permitan detectar de manera más precisa variables como velocidad del viento o presencia de lluvia, generando así un contexto más completo para la evaluación del entorno acústico.

6. RECOMENDACIONES

A futuro, para garantizar una interpretación mucho más precisa de las mediciones de ruido ambiental, es fundamental complementar la información proporcionada por el dispositivo IoT con datos sobre las condiciones meteorológicas. Una estrategia recomendada es la consulta de estaciones meteorológicas disponibles en la zona donde se encuentra instalado el dispositivo, ya sea a través de bases de datos oficiales o mediante sistemas locales que proporcionen información actualizada sobre el clima. Esto permite identificar eventos climáticos como lluvias o vientos fuertes que podrían afectar la calidad de las mediciones.

En cuanto a desarrollo tecnológico se puede evolucionar hacia un sistema de monitoreo ambiental más completo mediante la integración de sensores adicionales que permitan capturar una mayor cantidad de variables ambientales. Entre las opciones recomendadas se encuentran sensores de velocidad del viento, que facilitarían la detección de ráfagas superiores a 3 m/s, y sensores de lluvia, que permitirían identificar precipitaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. L. Beranek, *Acoustics*. 1954.
- [2] Universidad de Zaragoza, “Ruido, Definiciones - Unidad de Prevención de Riesgos Laborales,” uprl.unizar.es. Accessed: Nov. 06, 2024. [Online]. Available: <https://uprl.unizar.es/higiene-industrial/ruido-definiciones>
- [3] I. Soto Molina, “Introducción al ruido ambiental. Conceptos y fundamentos básicos Introduction to Environmental Noise. Basic Concepts and Fundamentals,” 2024.
- [4] Ministerio de salud y protección social, “Ruido excesivo en entornos, una de las principales causas para pérdida auditiva,” *Boletín de Prensa No050 de 2015*, Bogotá, Mar. 02, 2015. Accessed: Nov. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.minsalud.gov.co/Paginas/Ruido-excesivo-en-entornos-una-de-las-principales-causas-para-perdida-auditiva.aspx>
- [5] Brüel & Kjær, “Intensidad sonora: Teoría y cómo medirla Presión sonora y potencia sonora,” www.bksv.com. Accessed: Nov. 28, 2024. [Online]. Available: <https://www.bksv.com/es/knowledge/blog/sound/sound-intensity>
- [6] Brüel & Kjaer, “¿CÓMO SE MIDE EL SONIDO?,” www.bksv.com. Accessed: Nov. 28, 2024. [Online]. Available: <https://www.bksv.com/es/knowledge/blog/sound/what-is-sound>
- [7] European Business School, “¿Qué es la presión sonora?,” www.ceupe.com. Accessed: Nov. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-presion-sonora.html>
- [8] Brüel & Kjær, “RUIDO AMBIENTAL,” 2000, *Brüel & Kjær*.
- [9] Brüel & Kjær, “LEQ Y LAE/SEL,” www.bksv.com. Accessed: Nov. 28, 2024. [Online]. Available: <https://www.bksv.com/es/knowledge/blog/sound/leq-lae-sel>
- [10] Svantek Academia, “Nivel equivalente continuo de sonido Leq,” svantek.com. Accessed: Nov. 28, 2024. [Online]. Available: <https://svantek.com/es/academia/nivel-equivalente-continuo-de-sonido-leq/>
- [11] O. Casas-García, C. M. Betancur-Vargas, and J. S. Montaña-Erazo, “Revisión de la normatividad para el ruido acústico en Colombia y su aplicación,” *ENTRAMADO*, vol. 11, no. 1, pp. 264–286, 2015, doi: 10.18041/entramado.2015v11n1.21106.
- [12] ISOTools Excellence, “Normas ISO.”
- [13] Asociación Española de Normalización, “Norma Española UNE-ISO 1996-1 Acústica: Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental Parte 1: Magnitudes básicas y métodos de evaluación,” Oct. 2020.
- [14] Asociación Española de Normalización, “Norma Española UNE-ISO 1996-2 Acústica: Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental Parte 2: Determinación de los niveles de presión sonora,” Oct. 2020.
- [15] B. Berglund, T. Lindvall, and D. H. Schwela, “GUÍAS PARA EL RUIDO URBANO,” Londres, 1999.

- [16] V. Y. D. T. MINISTERIO DE AMBIENTE, *MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL RESOLUCIÓN NÚMERO (627)*. Colombia: www.minambiente.gov.co, 2006.
- [17] Brüel & Kjær, “¿QUÉ ES UN SONÓMETRO?,” www.bksv.com. Accessed: Nov. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.bksv.com/es/knowledge/blog/sound/what-is-a-sound-level-meter>
- [18] Academia Svanetek, “Micrófono: tipos, características y usos,” svantek.com. Accessed: Nov. 06, 2024. [Online]. Available: <https://svantek.com/es/academia/microfono/>
- [19] Audio-Technica, “Una Breve Guía de Micrófonos-¿Qué Hace un Micrófono?,” www.audio-technica.com. Accessed: Nov. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.audio-technica.com/es-ar/support/una-breve-guia-de-microfonos-que-hace-un-microfono#:~:text=Los%20micr%C3%B3fonos%20din%C3%A1micos%20son%20reconocidos,a%20medida%E2%80%9D%20en%20aplicaciones%20especiales>
- [20] C. Mydlarz, E. Rosenthal, S. Nacach, M. Temple, H. Park, and A. Roginska, “The implementation of MEMS microphones for urban sound sensing Acoustical barriers in schools View project Sound Around You View project The implementation of MEMS microphones for urban sound sensing,” Los Angeles: AES 137th Convention, Audio Engineering Society, Oct. 2014. [Online]. Available: www.aes.org.
- [21] Microsoft Learn, “Use I2S en aplicaciones en tiempo real.” Accessed: Mar. 28, 2025. [Online]. Available: <https://learn.microsoft.com/es-es/azure-sphere/app-development/i2s-rt?view=azure-sphere-integrated>
- [22] O. Bhat, P. Gokhale, and S. Bhat, “Introduction to IOT,” *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology ISO*, vol. 3297, no. 1, 2007, doi: 10.17148/IARJSET.2018.517.
- [23] E. Canle Fernández, “Conociendo los protocolos de comunicación en IoT,” www.tokioschool.com. Accessed: Dec. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.tokioschool.com/noticias/iot-protocolos-comunicacion/>
- [24] Barbara, “Protocolos de comunicación IoT que debes conocer - Barbara,” www.barbara.tech. Accessed: Dec. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.barbara.tech/es/blog/protocolos-iot-que-deberias-conocer>
- [25] S. M. Kayode and I. Nurudeen, “ANALYZING VULNERABILITIES IN NETWORK PROTOCOLS USING WIRESHARK: A CASE STUDY ON HTTP AND HTTPS,” *International Journal of Advanced Research in Multidisciplinary Sciences (IJARMS)*, vol. 4, Jun. 2024, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/385744283>

- [26] D. Dinculeană and X. Cheng, "Vulnerabilities and limitations of MQTT protocol used between IoT devices," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, no. 5, 2019, doi: 10.3390/app9050848.
- [27] S. Calzavara, R. Focardi, M. Nemec, A. Rabitti, and M. Squarcina, "Postcards from the Post-HTTP World: Amplification of HTTPS Vulnerabilities in the Web Ecosystem," *IEEE Symposium on Security and Privacy*, 2019. doi: 10.1109/SP2019.00053.
- [28] D. M. Rathod and D. Rathod, "Security Analysis of Constrained Application Protocol (CoAP): IoT Protocol," *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED STUDIES IN COMPUTER SCIENCE AND ENGINEERING IJASCSE*, vol. 6, 2017.
- [29] J. Růžicka, M. Sliacky, Z. Purkrábková, and E. Hajčiarová, "Opportunities of LoRaWAN Technology for Smart Cities-A Review," in *2023 Smart Cities Symposium Prague, SCSP 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. doi: 10.1109/SCSP58044.2023.10146207.
- [30] S. N. Ilmani Binti Mohd Yusoff and Y. Binti Mohd Yusoff, "Analysis of Security Vulnerabilities in LoRaWAN Smart City," in *IEEE Symposium on Wireless Technology and Applications, ISWTA*, IEEE Computer Society, 2022, pp. 35–40. doi: 10.1109/ISWTA55313.2022.9942752.
- [31] J. Tosi, F. Taffoni, M. Santacatterina, R. Sannino, and D. Formica, "Performance evaluation of bluetooth low energy: A systematic review," *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 12, Dec. 2017, doi: 10.3390/s17122898.
- [32] OMS, "La OMS publica una nueva norma para hacer frente a la creciente amenaza de la pérdida de audición," Ginebra, Mar. 02, 2022.
- [33] European Acústica, "Mapas de ruido. ¿Qué son? ¿Para qué se usan?," www.europeanacustica.com. Accessed: Nov. 26, 2024. [Online]. Available: https://www.europeanacustica.com/mapas-de-ruido-que-son-para-que-se-usan/?utm_source=chatgpt.com
- [34] X. Perea Escobar and E. Marín Toro, "PERCEPCION DEL RUIDO POR PARTE DE HABITANTES DEL BARRIO GRAN LIMONAR DE LA COMUNA 17 EN LA CIUDAD DE CALI.," Universidad del Valle, Cali, 2014.
- [35] E. Murphy and E. A. King, "Smartphone-based noise mapping: Integrating sound level meter app data into the strategic noise mapping process," *Science of the Total Environment*, vol. 562, pp. 852–859, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.04.076.
- [36] G. Vilorio, J. Niño, and M. Calle, "Red Inalámbrica de Sensores para Monitoreo de Ruido Ambiental," *IBERSENSOR*, Oct. 2016. doi: 10.1007/978-1-4684.
- [37] A. Jakob *et al.*, "A Distributed Sensor Network for Monitoring Noise Level and Noise Sources in Urban Environments," in *Proceedings - 2018 IEEE 6th International Conference on Future Internet of Things and Cloud, FiCloud 2018*, Institute of

- Electrical and Electronics Engineers Inc., Sep. 2018, pp. 318–324. doi: 10.1109/FiCloud.2018.00053.
- [38] M. Anachkova, S. Domazetovska, Z. Petreski, and V. Gavriloski, “Design of low-cost wireless noise monitoring sensor unit based on IoT concept,” *Journal of Vibroengineering*, vol. 23, no. 4, pp. 1056–1064, 2021, doi: 10.21595/jve.2021.21709.
 - [39] P. Weitbrecht, L. Jacomussi, M. Borin, C. Monteiro, and C. Jardim, “MEMs Based Low-Cost Urban Noise Monitoring: Tests and Case Study,” Sao Pablo: Inter-Noise 2022, Aug. 2022.
 - [40] P. Weitbrecht, C. Monteiro, C. Jardim, M. Borin, M. Holtz, and L. Jacomussi, “EVALUATION OF LEISURE NOISE IN URBAN ENVIRONMENTS An approach based on low-cost sound monitoring systems and Artificial Intelligence,” Sao Pablo: NUTAU 2022 14° INTERNATIONAL SEMINAR, 2022.
 - [41] G. Srikanth, B. H. V. N. Bindu, D. Sukanya, C. Jyothi, and D. V. Gopal, “IoT Based Noise Level Monitor And Controlling System In College,” in *ESIC 2024 - 4th International Conference on Emerging Systems and Intelligent Computing, Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024, pp. 393–398. doi: 10.1109/ESIC60604.2024.10481656.
 - [42] MEMSensing Microsystems Co. Ltd, “Data Sheet MSM261S4030H0,” 2015.
 - [43] InvenSense, “INMP441 Omnidirectional Microphone with Bottom Port and I 2 S Digital Output.” [Online]. Available: www.invensense.com
 - [44] knowles, “SPH0645LM4H-B I2S Output Digital Microphone,” 2015.
 - [45] A. Orrego Gonzáles, “DISEÑO DE UNA CAMARA ANECOICA PARA EL LABORATORIO DE VIBRACIONES Y ACÚSTICA (LAVA) DE LA ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA DE UNIVALLE (EIME UNIVALLE),” Universidad del Valle, Santiago de Cali, 2015.
 - [46] A. National Standards Institute, *ANSI S1.11: Specification for Octave, Half-Octave, and Third Octave Band Filter Sets*. 2009.
 - [47] Fractal Tech S.L, “¿Qué son los Grados de Protección IP?” Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.fractal.com/es/mantenipedia/que-son-los-grados-de-proteccion-ip>
 - [48] Asociación Española de Normalización y Certificación, *NORMA INTERNACIONAL IEC -61672-1-Electroacustica-Sonometros*. 2002.
 - [49] HelTec Automation, “HTIT-WSL_V3 LoRa Node Development Kit,” Sep. 2022. [Online]. Available: <https://heltec.org>
 - [50] LoraAntenna, “Antena LoRa palabras clave.” Accessed: Mar. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.loraantenna.com/es/antenna-gain-explanation/>
 - [51] Heltec Automation, “HT-M7603 Indoor LoRa Gateway,” May 2023. [Online]. Available: <https://heltec.org>

- [52] Agencia Nacional del Espectro, “Agencia Nacional del Espectro - Bandas LoRa,” Apr. 2019.
- [53] ESPRESSIF, “ESP32-S3 Datasheet,” 2024.
- [54] Sensirion, “SHT4x 4 th Generation, High-Accuracy, Ultra-Low-Power, 16-bit Relative Humidity and Temperature Sensor Platform Device Overview Functional Block Diagram,” Oct. 2020. [Online]. Available: www.sensirion.com/D1
- [55] “Design of a digital A-weighting filter with arbitrary sample rate.”
- [56] A. N. Rimell, N. J. Mansfield, and G. S. Paddan, “Design of digital filters for frequency weightings (A and C) required for risk assessments of workers exposed to noise,” *Ind Health*, vol. 53, no. 1, pp. 21–27, 2015, doi: 10.2486/indhealth.2013-0003.
- [57] I. Kostoski, “ESP32-I2S-SLM Sound Level Meter with Arduino IDE, ESP32 and I2S MEMS microphone,” [hackaday.io](https://hackaday.io/project/166867-esp32-i2s-slm). [Online]. Available: <https://hackaday.io/project/166867-esp32-i2s-slm>
- [58] Amazon.com, “Amazon.” Accessed: Dec. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/>
- [59] thethingsindustries.com, “The Things Stack Documentation,” www.thethingsindustries.com. [Online]. Available: <https://www.thethingsindustries.com/docs/>
- [60] thethingsnetwork.org, “We are a global collaborative Internet of Things ecosystem that creates networks, devices and solutions using LoRaWAN®,” www.thethingsnetwork.org. [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org>
- [61] thingspeak.mathworks.com, “ThingSpeak for IoT Projects ThingSpeak for Students and Educators,” thingspeak.mathworks.com. [Online]. Available: <https://thingspeak.mathworks.com>
- [62] Mercado Libre, “Sonometro Digital Tipo 2 Grandes. Mediciones,” articulo.mercadolibre.com.co. Accessed: Dec. 09, 2024. [Online]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-454813057-sonometro-digital-tipo-2-grandes-mediciones-_JM#polycard_client=search-nordic&position=8&s...
- [63] Mercado Libre, “Sonometro, Ruido Tester 30-130db Medidor Ruido Software,” articulo.mercadolibre.com.co. Accessed: Dec. 09, 2024. [Online]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-451628678-sonometro-ruido-tester-30-130db-medidor-ruido-software-_JM#is_advertising=true&position=3&...
- [64] Mercado Libre, “Medidor De Nivel De Sonido Digital Con Simulación De Sonido,” articulo.mercadolibre.com.co. Accessed: Dec. 09, 2024. [Online]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-562115308-medidor-de-nivel-de-sonido-digital-con-simulacion-de-sonido-_JM?searchVariation=8171598192...
- [65] Mercado Libre, “Sonometro Medidor De Ruido Tipo li,” <https://articulo.mercadolibre.com.co/>. Accessed: Dec. 09, 2024. [Online]. Available:

https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-566501018-sonometro-medidor-de-ruido-tipo-ii-_JM?searchVariation=73995889989#polycard_client=search...

- [66] TASI, "China Data Logging Sound Level Meter Manufacturers Suppliers Factory - Customized Service," www.tasimeter.com. Accessed: Dec. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.tasimeter.com/environmental-tester/sound-level-meter/data-logging-sound-level-meter.html>

ANEXO A. Frecuencias de banda media de un tercio de octava y banda de octava en el rango de audio.

Band number x	Base-ten exact f_m ($10^{x/10}$), Hz	Base-two exact f_m ($2^{(x-30)/3}$)(1000), Hz	Nominal midband frequency, Hz	Octave
14	25.119	24.803	25	
15	31.623	31.250†	31.5	*
16	39.811	39.373	40	
17	50.119	49.606	50	
18	63.096	62.500†	63	*
19	79.433	78.745	80	
20	100.00†	99.213	100	
21	125.89	125.00†	125	*
22	158.49	157.49	160	
23	199.53	198.43	200	
24	251.19	250.00†	250	*
25	316.23	314.98	315	
26	398.11	396.85	400	
27	501.19	500.00†	500	*
28	630.96	629.96	630	
29	794.33	793.70	800	
30	1,000.0†	1,000.0†	1 000	*
31	1,258.9	1,259.9	1 250	
32	1,584.9	1,587.4	1 600	
33	1,995.3	2,000.0†	2 000	*
34	2,511.9	2,519.8	2 500	
35	3,162.3	3,174.8	3 150	
36	3,981.1	4,000.0†	4 000	*
37	5,011.9	5,039.7	5 000	
38	6,309.6	6,349.6	6 300	
39	7,943.3	8,000.0†	8 000	*
40	10,000†	10,079	10 000	
41	12,589	12,699	12 500	
42	15,849	16,000†	16 000	*
43	19,953	20,159	20 000	