



Prototipo de Grabadora de Audio para el Monitoreo de Ecosistemas

Daniel Alejandro Rodríguez Mesa

Trabajo de investigación presentado para optar al título de Bioingeniero

Asesor

José David López Hincapié, Doctor (PhD)

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Bioingeniería

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Cita	Rodriguez Mesa [1]
Referencia Estilo IEEE (2020)	[1] D. Rodriguez Mesa, “Desarrollo de un prototipo de grabadora para el monitoreo acústico pasivo: elaboración y evaluación de un prototipo de grabadora basado en Raspberry Pi Pico”, Trabajo de grado profesional, Bioingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2024.



Grupo de Investigación Sistemas Embebidos e Inteligencia Computacional (SISTEMIC).



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Julio César Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: John Fredy Ochoa Gómez.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Dedico con todo mi corazón y profundo agradecimiento este proyecto de investigación a mi familia, cuyo amor, apoyo y sacrificios han sido el pilar fundamental en mi camino hacia la culminación de mis estudios como Bioingeniero.

Agradecimientos

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a cada uno de los docentes que han sido pilares fundamentales en mi formación académica a lo largo de mi carrera. Su dedicación y enseñanzas han sido indispensables para el desarrollo y culminación exitosa de este proyecto. De manera especial, deseo resaltar la invaluable contribución del profesor José David López Hincapié, cuya orientación y sabiduría han sido una fuente de inspiración constante. Trabajar a su lado durante los últimos dos años ha sido una experiencia enriquecedora, repleta de aprendizajes que han moldeado mi desarrollo profesional.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	11
ABSTRACT	12
I. INTRODUCCIÓN	13
II. MARCO TEÓRICO	15
III. OBJETIVOS	19
Objetivo general	19
Objetivos específicos	19
IV. METODOLOGÍA	20
Elección de componentes	20
Placa de desarrollo (Microcontrolador)	20
Micrófonos	21
Módulo para la memoria MicroSD	22
Preamplificador	24
Reloj de tiempo real (RTC)	25
Montaje electrónico	26
Desarrollo del firmware	27
Módulo de código para la lectura del micrófono analógico (Analog microphone)	27
Módulo de código para escribir y leer datos en la memoria MicroSD (FatFs)	29
Módulo de código para el manejo del RTC (DS1307)	30
Módulo de código para la configuración de parámetros de grabación (Config_uart)	30
Módulo de código para el manejo de archivos con formato WAV (Audio_manager)	33
Programa principal (main)	34
Pruebas de funcionamiento	35

Prueba de ganancia variable	35
Prueba de comparación de ganancia máxima entre el prototipo y una grabadora AudioMoth	36
Prueba de identificación de huellas acústicas	37
V. RESULTADOS	38
Prototipo	38
Resultados de la prueba de ganancia variable	39
Resultados de la prueba de comparación de ganancia máxima entre el prototipo y una grabadora AudioMoth	41
Resultados de la prueba de identificación de huellas acústicas	43
VI. DISCUSIÓN	46
VII. CONCLUSIONES	50
REFERENCIAS	51

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 COMPARACIÓN DE PLACAS COMERCIALES	20
TABLA 2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MICROFONOS	22
TABLA 3 CARACTERÍSTICAS DEL MAX9814	24
TABLA 4 VALORES DE GANANCIA TEÓRICOS	25
TABLA 5 CARACTERÍSTICAS DEL RTC DS1307	25
TABLA 6 CONEXIONES ENTRE LA RASPBERRY PI PICO Y LOS COMPONENTES DEL PROTOTIPO	26
TABLA 7 CONFIGURACIÓN DE PARAMETROS	36
TABLA 8 CARACTERÍSTICAS DEL MICRÓFONO SPU0410LR5H-QB	36
TABLA 9 RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LA PRUEBA DE GANANCIA	41
TABLA 10 RESUMEN DE LOS RESULTADOS ESTADÍSTICOS DE LA DIFERENCIA ENTRE LOS DIFERENTES NIVELES DE GANANCIAS	41
TABLA 11 RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LA PRUEBA COMPRATIVA ENTRE EL PROTOTIPO Y LA AUDIOMOTH	43

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Esquemático de pines e interfaces de la placa Raspberry Pi Pico	18
Fig. 2. micrófonos utilizados para el prototipo. (a) micrófono CME-1538-100LB. (b) micrófono CMC-9745-44P	22
Fig. 3. Módulo de memoria MicroSD (data logger).	22
Fig. 4. Memoria MicroSDHC SanDisk de 32 GB.....	23
Fig. 5. Preamplificado MAX9814.....	24
Fig. 6. Reloj en tiempo real (RTC) DS1307	25
Fig. 7. Esquemático del montaje electrónico del prototipo.....	26
Fig. 8. Esquema ejemplo del funcionamiento de buffers circulares	28
Fig. 9. Interfaz de escritorio para la configuración del prototipo.....	32
Fig. 10. Esquema de la transmisión de datos desde el PC al prototipo.....	32
Fig. 11. Diagrama de flujo del programa princila (Main).....	34
Fig. 12. Esquema de prueba de ganancia variable. (a) fotografía de altavoz emisor a una distancia de 1m de distancia del prototipo. (b) esquema teórico de la prueba de ganancia variable	35
Fig. 13. Vista general montaje electrónico en board del prototipo de grabadora de audio.....	38
Fig. 14. Montaje electrónico del prototipo con el micrófono CMC-9745-44P y CME-1538-100LB	38
Fig. 15. Densidad Espectral de Potencia (PSD) en los Tres Niveles de Ganancia, para el micrófono CMC-9745-44P	39
Fig. 16. Densidad espectral de potencia (PSD) en los tres niveles de ganancia, mostrando los picos máximos correspondientes a las frecuencias de los tonos emitidos, para el micrófono CMC-9745-44P.....	39
Fig. 17. Densidad Espectral de Potencia (PSD) en los Tres Niveles de Ganancia, para el micrófono CME-1538-100LB	40
Fig. 18. Densidad espectral de potencia (PSD) en los tres niveles de ganancia, mostrando los picos máximos correspondientes a las frecuencias de los tonos emitidos, para el micrófono CME-1538-100LB.....	40

Fig. 19. Densidad Espectral de Potencia (PSD) en nivel 2 de ganancia, para los micrófonos CMC-9745-44P, CME-1538-100LB y la grabadora AudioMoth42

Fig. 20. Densidad espectral de potencia (PSD) en nivel 2 de ganancia. Mostrando los picos máximos correspondientes a las frecuencias de los tonos emitidos, para los micrófonos CMC-9745-44P, CME-1538-100LB y la grabadora AudioMoth.....42

Fig. 21. Espectrogramas de los audios del ave Troglodytes Aedon captados por el prototipo (con ambos micrófonos de prueba) y de la grabadora AudioMoth.....43

Fig. 22. Espectrogramas de los audios de anfibio Hyla Arborea captados por el prototipo (con ambos micrófonos de prueba) y de la grabadora AudioMoth.....44

Fig. 23. PSD de los audios del ave Troglodytes Aedon captados por el prototipo (con ambos micrófonos de prueba) y de la grabadora AudioMoth44

Fig. 24. PSD de los audios de anfibio Hyla Arborea captados por el prototipo (con ambos microfonos de prueba) y de la grabadora AudioMoth45

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

PAM	Passive Acoustic Monitoring (Monitoreo Acústico Pasivo)
SBCs	Single-Board Computers (Computadoras de Placa Única)
SoC	System on Chip (Sistema en un Chip)
SD	Secure Digital (formato estándar de tarjetas de memoria)
ADC	Analog-to-Digital Converter (Convertidor Analógico a Digital)
WAV	Waveform Audio File Format (Formato de archivo de audio de forma de onda)
GPIO	General-Purpose Input/Output (Entrada/Salida de Propósito General)
I2C	Inter-Integrated Circuit (Circuito Inter-Integrado)
SPI	Serial Peripheral Interface (Interfaz Serial para Periféricos)
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (Transmisor/Receptor Asíncrono Universal)
DMA	Direct Memory Access (Acceso Directo a Memoria)
SDK	Software Development Kit (Kit de Desarrollo de Software)
Vcc	Voltage at the Common Collector (Voltaje en el Colector Común, referencia a la fuente de alimentación positiva en circuitos)
GND	Ground (Tierra, referencia a la fuente de alimentación negativa o tierra en circuitos)
BCD	Binary-Coded Decimal (Decimal Codificado en Binario)
AGC	Automatic Gain Control (Control Automático de Ganancia)
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems (Sistemas Microelectromecánicos)
SNR	Signal-to-Noise Ratio (Relación Señal-Ruido)

RESUMEN

Este informe describe el desarrollo y evaluación de un prototipo de grabadora de audio para el monitoreo acústico pasivo (PAM) utilizando como base la Raspberry Pi Pico. Este prototipo está especialmente diseñado para capturar sonidos dentro del espectro audible, con una capacidad de alcanzar frecuencias de hasta 20 kHz y la posibilidad de ajustar su frecuencia de muestreo hasta un máximo de 48 kHz. Utiliza un micrófono analógico y módulos de interfaz para almacenar datos en una memoria microSD mediante el protocolo de comunicación SPI. También, cuenta con un reloj de tiempo real (RTC) para el manejo del tiempo y la nomenclatura de los datos. Ofrece tres niveles de ganancia digitalmente ajustables, permitiéndole así adaptarse a diferentes entornos de grabación.

El dispositivo permite configurar parámetros de grabación como frecuencia de muestreo, ganancia, tiempo de grabación y tiempo de suspensión, mediante una aplicación desarrollada para computadoras. Para evaluar el desempeño del prototipo, se realizaron pruebas de grabación de audio enfocadas en analizar la respuesta en frecuencia del dispositivo. Además, se efectuaron comparativas con la grabadora comercial AudioMoth, lo que permitió examinar las diferencias en las ganancias máximas alcanzadas a diversas frecuencias según la configuración seleccionada en ambos dispositivos. Los resultados de las pruebas demostraron la capacidad del prototipo para capturar las huellas sonoras de especies animales dentro del espectro audible, resaltando su utilidad en el monitoreo acústico de ecosistemas.

***Palabras clave* —Raspberry Pi Pico, monitoreo acústico pasivo, grabadora de audio, sistemas embebidos.**

ABSTRACT

This report outlines the development and evaluation of an audio recorder prototype for passive acoustic monitoring (PAM) based on the Raspberry Pi Pico. This prototype is specifically designed to capture sounds within the audible spectrum, capable of reaching frequencies up to 20 kHz and allowing its sampling frequency to be adjusted up to a maximum of 48 kHz. It employs an analog microphone and interface modules to store data on a microSD memory using the SPI communication protocol. Additionally, it incorporates a real-time clock (RTC) for time management and data naming. The device offers three digitally adjustable gain levels, thus enabling it to adapt to different recording environments.

The device allows configuring recording parameters such as sampling frequency, gain, recording time, and suspension time, through an application developed for computers. To evaluate the performance of the prototype, audio recording tests were conducted, focusing on analyzing its frequency response. Comparisons were also made with the commercial AudioMoth recorder, enabling an examination of the differences in maximum gains achieved at various frequencies according to the selected settings in both devices. Furthermore, the test results demonstrated the prototype's capability to capture the sonic fingerprints of animal species within the audible spectrum, highlighting its usefulness in ecosystem acoustic monitoring.

Keywords — **Raspberry Pi Pico, passive acoustic monitoring, audio recorder, embedded systems.**

I. INTRODUCCIÓN

El monitoreo acústico pasivo (PAM por sus siglas en inglés) es una técnica empleada para investigar el comportamiento acústico de ecosistemas a gran escala y largo plazo. Esta metodología permite realizar análisis de forma simultánea en múltiples sitios, además de la capacidad de monitorear durante todos los periodos del día [1]. Para llevar a cabo este tipo de monitoreo, se utilizan grabadoras que pueden ser programadas para realizar registros en momentos específicos e intervalos temporales prolongados, evitando así la interferencia directa de un observador [2].

Los estudios de PAM que requieren una gran cantidad de grabadoras se enfrentan a diversos retos, como la adquisición de una cantidad considerable de dispositivos de grabación, que cumplan con requerimientos como tener los componentes necesarios para capturar sonidos emitidos por los animales en diversos rangos de frecuencia. Además, se busca que las grabadoras sean de dimensiones reducidas para facilitar su instalación en campo, así mismo, es esencial que tengan la capacidad de optimizar el gasto de baterías, ya que los estudios se realizan durante largos periodos de tiempo, pueden abarcar desde días hasta semanas.

Por otro lado, es esencial que estas grabadoras tengan la capacidad de mantener la calidad y uniformidad de los datos recopilados en todas las unidades. Esto implica contar con diversas opciones de configuración, como periodos de grabación y duración de las grabaciones. Además, es crucial que esta configuración se mantenga constante a lo largo del tiempo, asegurando la coherencia de los datos y permitiendo análisis precisos en los estudios que utilicen el monitoreo acústico pasivo.

En ecología, el hardware desempeña un rol esencial, principalmente porque de este depende la capacidad para recopilar datos ambientales. Por esto, es fundamental utilizar tecnología de vanguardia, diseñada específicamente para capturar y procesar extensos volúmenes de datos [3]. El significativo crecimiento en la potencia y la reducción de costos de las computadoras de placas únicas (SBCs) y de los sistemas integrados en un chip (SoC) han posibilitado que los investigadores desarrollen dispositivos altamente personalizables y controlables, adaptándose a las exigencias de sus proyectos de investigación [4].

Dentro del amplio espectro de las SBCs, las Raspberry Pi se destacan notablemente como una de las opciones más populares. Sus principales ventajas radican en la diversidad de modelos disponibles, la capacidad en términos de hardware, y una activa comunidad que contribuye con documentación útil para estas placas. Uno de estos dispositivos de gama baja pero no por esto menos potente de la fundación Raspberry Pi, es la Raspberry Pi Pico, esta se caracteriza por su gran versatilidad y la amplia gama de periféricos que soporta [5], lo que la convierte en una herramienta fundamental para el desarrollo de tecnologías dedicadas a la adquisición de datos.

Este informe detalla el diseño de un prototipo de grabadora de audio para el monitoreo acústico pasivo, el cual está fundamentado en el uso de la Raspberry Pi Pico. Se enfatiza en el hardware empleado para el desarrollo del prototipo, destacando su interacción con los periféricos de dicha placa. Además, se describen las metodologías de software implementadas para lograr la captura de sonidos dentro del espectro audible.

II. MARCO TEÓRICO

El monitoreo acústico pasivo representa un enfoque ecosistémico para evaluar de manera sostenida los cambios en la abundancia, riqueza y diversidad de una o varias especies en el tiempo. Esta metodología se fundamenta en la identificación auditiva de las especies, lo que permite realizar un análisis robusto de la dinámica acústica de las poblaciones emisoras estudiadas [6]. PAM se ha aplicado ampliamente en estudios de ambientes marinos y terrestres. En ambos casos, el enfoque central es rastrear la presencia de individuos, entender la dinámica de las poblaciones, áreas de distribución y los patrones de actividad [7].

El principal objetivo de PAM es registrar el paisaje sonoro de un determinado ecosistema. El término “paisaje sonoro” se puede describir como todos los sonidos presentes, como la biofonía (sonidos ambientales creados por organismos biológicos), la geofonía (sonidos ambientales no biológicos) y la antropofonía (sonidos causados por humanos), que emanan de un paisaje determinado para crear patrones acústicos únicos [8]. Ahora bien, el enfoque en común en muchos estudios es identificar solo la biofonía dentro del paisaje sonoro de un ecosistema, puesto que a partir de este tipo de señales acústicas se consigue identificar la abundancia relativa de especies, también entender sus comportamientos sociales, como la defensa del territorio y el apareamiento [9].

El monitoreo acústico pasivo emplea grabadoras de audio estratégicamente posicionadas en un área, para grabar vocalizaciones que luego serán procesadas [2]. Estas grabadoras funcionan como dispositivos autónomos capaces de llevar a cabo grabaciones periódicas durante días, semanas o incluso meses. Su operación minimiza las intervenciones requeridas, limitándose solo a las configuraciones iniciales, instalación y la recuperación de las grabadoras.

A lo largo del tiempo, las grabadoras de audio empleadas en el monitoreo acústico pasivo han experimentado una notable evolución en consonancia con los avances en componentes electrónicos como los microcontroladores, memorias y sensores. Lo que ha conducido a desarrollar dispositivos de pocos componentes, dimensiones reducidas y alta eficiencia. En la actualidad, las

opciones en cuanto a grabadoras de audio para el PAM son relativamente limitadas. Entre las alternativas más destacadas se encuentran las AudioMoth de Open Acoustic Devices, las Song Meter de Wildlife Acoustic o las Pipistrelle de Omenie. A pesar de sus diferencias en términos de características y costos, estas grabadoras comparten elementos esenciales en su funcionamiento, como la posibilidad de modificar la frecuencia de muestreo, la ganancia y programar los tiempos de grabación.

Los componentes fundamentales que conforman estos dispositivos son los microcontroladores, memorias, periféricos, micrófonos e interfaces para las comunicaciones digitales. Estos componentes determinan los alcances y límites de las grabadoras de audio, tales como la capacidad de muestrear datos a altas velocidades, escribir en memoria sin interrumpir los procesos de muestreo, la eficiencia en el consumo de batería, la capacidad de multiprocesamiento y la integración de múltiples sensores.

Por otra parte, las memorias tienen un rol crucial en el funcionamiento de las grabadoras de audio. Más allá de ser simples contenedores, estas asumen el papel de almacenar a altas velocidades, también de intervenir en la transferencia de datos a fuentes externas como las memorias microSD. Adicionalmente, la memoria de los microcontroladores contiene el conjunto de instrucciones que gobiernan la aplicación que se desea ejecutar, es decir, el firmware [10].

Otra funcionalidad importante de los microcontroladores son los periféricos, ya que son los que permiten la interacción con el entorno externo. Los periféricos están diseñados para aliviar la carga de trabajo del microcontrolador, al ejecutar tareas específicas de manera autónoma en el mismo chip. De esta manera, el microcontrolador solo se encarga de solicitar y supervisar las funcionalidades que los periféricos realizan. Para el diseño de una grabadora de audio, los periféricos más importantes son [11][12]:

- GPIO (Puertos de entrada/salida de propósito general): son los puertos encargados de interactuar con el exterior, tienen la versatilidad de adaptarse como puertos de entrada o de salida.

- I2C, SPI, UART: son los periféricos de comunicación que se encargan de establecer protocolos para la transferencia y recepción de datos con sensores externos o con otros microcontroladores.
- Temporizadores: son periféricos utilizados para el seguimiento del tiempo, lo que permite generar retrasos o medir la duración de un proceso.
- ADC (convertidor analógico a digital): son los encargados de tomar el voltaje analógico que entra en un pin y convertirlo en un número digital, mediante un método llamado muestreo y cuantificación.
- Controlador de interrupciones: este periférico se encarga de detectar señales que entran en un GPIO, las cuales indican que ha ocurrido un evento en particular y requiere atención inmediata del microcontrolador.
- DMA (controladores de acceso directo a la memoria): estos se utilizan para transferir datos entre la memoria y los periféricos, sin la intervención del microcontrolador.

La Raspberry Pi Pico emerge como una solución práctica a todos los requerimientos para la grabación de audio en PAM. Este dispositivo está equipado con un microcontrolador ARM Cortex-M0+ de doble núcleo que opera a una velocidad de 133 MHz [5]. Este microcontrolador ofrece un total de 164 kB de memoria SRAM, lo que brinda espacio suficiente para manejar un alto flujo de datos en tiempo real. Además, la placa Raspberry Pi Pico presenta 30 pines GPIO, de los cuales cuatro son de entrada analógica, es decir, están destinados a la función de conversión analógico a digital (ADC). Dichos pines analógicos tienen la capacidad de muestrear señales a una velocidad de 500 ksp/s.

Con respecto a los periféricos, la Raspberry Pi Pico tiene las siguientes opciones [13]:

- 2 interfaces UART.
- 2 controladores SPI.
- 2 controladores I2C.
- 16 canales de modulación de ancho de pulso (PWM).
- 1 controlador USB.
- 8 máquinas de estado.

En el siguiente esquema se muestra la relación de pines con los GPIOs y los periféricos:

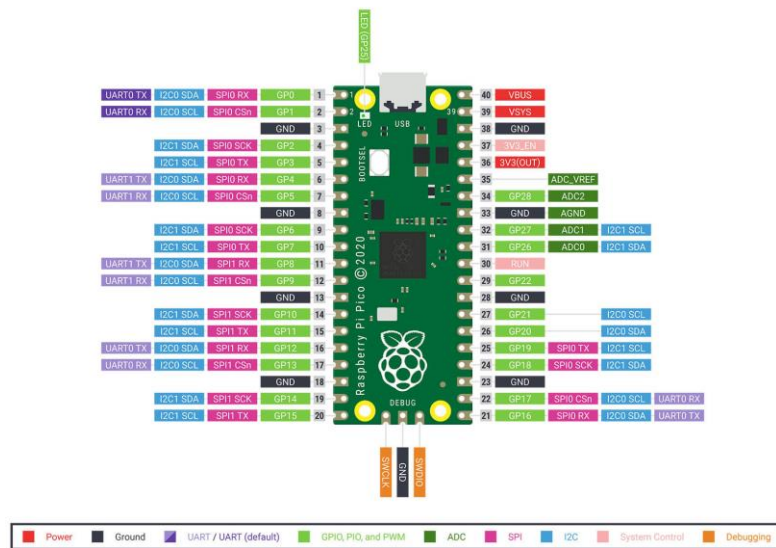


Fig. 1. Esquemático de pines e interfaces de la placa Raspberry Pi Pico

Fuente: <https://raspberrypi.cl/producto/raspberry-pi-pico/>.

La Raspberry Pi Pico ofrece soporte para la programación en los lenguajes C y MicroPython. No obstante, para manipular funcionalidades de bajo nivel, como el control de frecuencia de muestreo del ADC, acceso directo a la memoria y control de periféricos, se recomienda optar por el lenguaje C. Esta preferencia se sustenta en que ciertas funcionalidades específicas no están disponibles o son más complejas de implementar en MicroPython. En contraste, el lenguaje de programación C proporciona un mayor control y flexibilidad para estas tareas avanzadas, en gran parte gracias al SDK (Software Development Kit) de la Raspberry Pi Pico. Este kit de desarrollo proporciona un sistema de compilación de firmware, también proporciona una amplia gama de bibliotecas de alto y bajo nivel que permiten el manejo preciso de aspectos como temporizadores, sincronización y programación multinúcleo, entre otros [14].

III. OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar un prototipo de grabadora de audio para el monitoreo acústico pasivo de ecosistemas. Este prototipo estará basado en la placa Raspberry Pi Pico y tendrá la capacidad de capturar sonidos en el rango de las frecuencias audibles (20 Hz a 20 kHz).

Objetivos específicos

- Diseñar el esquema general de la conexión de todos los componentes encargados del registro y almacenamiento de la señal.
- Diseñar el montaje electrónico que permita capturar señales analógicas a altas velocidades (por encima de los 40 kHz) y almacenarlas en una memoria MicroSD, sin que este proceso interfiera con el continuo muestreo del convertidor analógico a digital (ADC).
- Desarrollar el firmware que permita convertir las señales analógicas capturadas por el micrófono en archivos con formato de audio WAV.
- Desarrollar el firmware que consiga mantener constantes las configuraciones de grabación, tales como frecuencia de muestreo, intervalos y duración de grabación.
- Implementar un diseño electrónico de amplificador analógico de ganancia para las señales capturadas por el micrófono, integrando entradas digitales que permitan ajustar diferentes niveles predeterminados de ganancia según se requiera.
- Desarrollar una interfaz física que permita al usuario final reconocer los diferentes estados de la grabadora, los cuales consisten en grabación, suspensión y fallas.
- Diseñar un software con interfaz para pc que permita al usuario final configurar el periodo de grabación, frecuencia de muestreo y duración de las grabaciones.

IV. METODOLOGÍA

El desarrollo del prototipo de la grabadora de audio basado en la Raspberry Pi Pico se enfocó en la implementación de estrategias de hardware y software, con el objetivo de alcanzar una frecuencia de muestreo de al menos 44.1 kHz. Esta frecuencia es el valor mínimo que se requiere para capturar todo el espectro audible. Por otro lado, un aspecto crítico del diseño consistió en garantizar la continuidad en el muestreo, es decir, la tarea prioritaria del sistema fue asegurar la lectura ininterrumpida del micrófono.

Esta metodología detalla cada una de las fases llevadas a cabo para la construcción del prototipo. Comenzando con la selección de los componentes, el montaje del circuito y posteriormente con el desarrollo del firmware. Por último, las pruebas y comparaciones para validar el funcionamiento del prototipo.

Elección de componentes

Placa de desarrollo (Microcontrolador)

Para el desarrollo del prototipo se evaluaron tres opciones de placas principales: la Raspberry Pi Pico, el PSoC 5LP y el Arduino Mega. A continuación, se presenta una tabla comparativa que detalla las características de cada una de estas placas.

TABLA 1
COMPARACIÓN DE PLACAS COMERCIALES

CARACTERÍSTICA	RASPBERRY PI PICO	PSOC 5LP	ARDUINO MEGA
Procesador	Dual Core ARM Cortex-M0+	ARM Cortex-M3	ATmega2560
Frecuencia máxima de reloj	125 MHz	67 MHz	16 MHz
Tamaño de memoria FLASH	2 MB	256 KB	256 KB
Tamaño de memoria SRAM	264 kB	64 KB	8 KB
EEPROM	No disponible	2 KB	4 KB
Resolución de pines analógicos	12 bits	12 bits - 20 bits	10 bits
Velocidad ADC (en sps)	500 ksps	384 ksps	125 ksps
Dimensiones	51 x 21 mm		101 x 50 mm
Precio	\$ 35.000	\$ 150.000	\$ 70.000

Nota: datos obtenidos de [13], [15], [16].

Se consideraron múltiples factores para la elección de la placa base, siendo la velocidad de muestreo del ADC y la velocidad máxima del microcontrolador criterios decisivos, teniendo en cuenta en todo momento que se iban a utilizar micrófonos analógicos como sensores principales. Como se muestra en la tabla 1, la Raspberry Pi Pico se destacó por ofrecer la mayor velocidad de ADC, alcanzando 500 ksps (500000 muestras por segundos), lo que es equivalente a decir que el ADC tiene una frecuencia de muestreo máxima de 500 kHz, superando ampliamente el rango del espectro audible.

El segundo criterio crucial fue el tamaño de la memoria SRAM. Esta memoria es fundamental para administrar los buffers que almacenan los datos localmente antes de su transferencia a la memoria microSD, impactando directamente en la frecuencia de muestreo del prototipo, ya que se trata de una relación directamente proporcional; a mayor frecuencia de muestreo, mayor es la cantidad de memoria requerida para la gestión de la transmisión de datos. En este sentido, la Raspberry Pi Pico también sobresalió con una capacidad de memoria SRAM superior a las otras placas consideradas.

Finalmente, el tercer criterio de elección fue el precio y las dimensiones de las placas. Se buscó un equilibrio entre costo de desarrollo y la calidad de los componentes. Además, las dimensiones reducidas fueron preferentes, ya que en este tipo de dispositivos se busca que sean de menor tamaño. Por ejemplo, las grabadoras AudioMoth tienen dimensiones de 58 x 48 mm [17]. La Raspberry Pi Pico resultó ser la opción más ventajosa en estos aspectos, ofreciendo dimensiones menores y un precio significativamente inferior al de las demás. Estos factores consolidaron a la Raspberry Pi Pico como la elección adecuada para el prototipo de la grabadora de audio.

Micrófonos

Una de las consideraciones principales para el desarrollo del prototipo de grabadora fue la elección un micrófono de tipo analógico. Esta decisión se basó en la disponibilidad en el mercado. Además, se pretendía aprovechar la alta velocidad de muestreo que ofrecen las entradas analógicas de la Raspberry Pi Pico. Durante el proceso de desarrollo, se experimentó con dos modelos

específicos de tipo electret (Electret microphone): el CME-1538-100LB y el CMC-9745-44P (también conocido como MIC-9.7 mm).

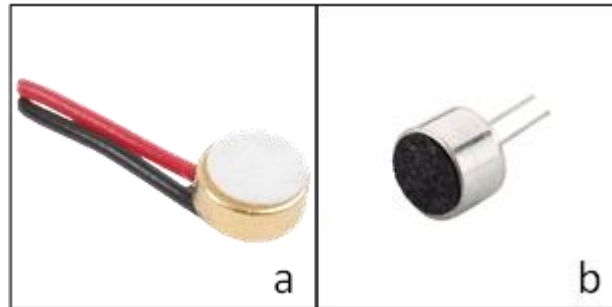


Fig. 2. micrófonos utilizados para el prototipo. (a) micrófono CME-1538-100LB. (b) micrófono CMC-9745-44P

Es importante destacar que todas las pruebas mencionadas en este informe se llevaron a cabo utilizando ambos micrófonos. A continuación, se presentan las características principales de cada uno de estos micrófonos.

TABLA 2
CARACTERISTICAS DE LOS MICROFONOS

Característica	CMC-9745-44P	CME-1538-100LB
Rango De Frecuencia	20 Hz – 20 kHz	100 Hz – 20 kHz
Directividad	Omnidireccional	Omnidireccional
Sensibilidad	-44 dB ± 3 dB	-41 dB a -35 dB
Relación Señal/Ruido (S/N)	60 dB	58 dBA
Voltaje De Operación	3V - 10V	2V - 10V
Impedancia De Salida	2.2 kΩ	2.2 kΩ

Nota: datos obtenidos de [18], [19].

Módulo para la memoria MicroSD

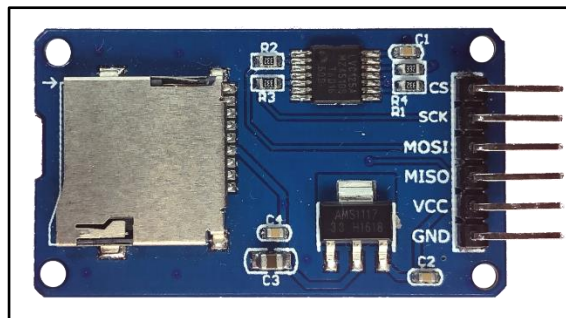


Fig. 3. Módulo de memoria MicroSD (data logger).

Para registrar los datos en la memoria MicroSD fue necesario emplear una interfaz que permitiera tanto la lectura como la escritura de datos. En este contexto, se optó por el uso del “MicroSD Card Adapter Module” (referencia RF SPI), un módulo específicamente diseñado para funcionar como una interfaz para la comunicación SPI entre la memoria microSD y la Raspberry Pi Pico. Este módulo se caracteriza por su versatilidad, ya que es compatible tanto con tarjetas microSD de formato estándar como con las tarjetas microSDHC (High Capacity) de alta velocidad, soportando capacidades de hasta 32 GB.



Fig. 4. Memoria MicroSDHC SanDisk de 32 GB

En relación con la memoria MicroSD empleada en el prototipo, se optó por la SanDisk Extreme de tipo microSDHC (ver Fig. 4), con una capacidad de 32 GB y clasificada como U3 y A1. Esta clasificación indica que la memoria tiene una velocidad mínima de escritura de 30 MB/s [20], lo cual excede los requisitos del prototipo. Es importante destacar que el registro de datos en el prototipo no supera 1 MB/s, por lo tanto, aunque el uso de una memoria microSD de alta velocidad como la SanDisk Extreme aporta beneficios en términos de rendimiento, para este proyecto específico no es estrictamente necesario contar con una memoria de tales características de velocidad.

Preamplificador



Fig. 5. Preamplificado MAX9814

Los micrófonos de electret utilizados para el prototipo entregan una ganancia baja, por lo que se hizo esencial la integración de un preamplificador para incrementar la señal eléctrica antes de su llegada al ADC de la Raspberry Pi Pico. Para esto, se seleccionó el amplificador MAX9814 (ver Fig. 5). A continuación, se presenta una tabla que resume las principales características eléctricas y acústicas:

TABLA 3
CARACTERÍSTICAS DEL MAX9814

Característica	Descripción
Voltaje De Operación	2.7V a 5.5V
Corriente De Operación	3.1mA a 6mA
Frecuencia De Operación	20Hz - 20kHz
Relación Señal-Ruido (SNR)	61 dB
Rango Dinámico (DR)	60dB
Impedancia De Entrada	100 kΩ
Impedancia De Salida	50Ω

Nota: datos obtenidos de [21].

Una de sus características más destacadas es su capacidad para ajustar la ganancia de manera digital en tres valores distintos. Esto se logra mediante una entrada de ganancia que cambia sus valores dependiendo de si está conectada a Vcc (voltaje de alimentación), GND (tierra), o si se encuentra desconectada. Esta funcionalidad proporciona una flexibilidad significativa en el ajuste de la ganancia, lo que permite al prototipo adaptarse a diferentes condiciones de grabación. En la siguiente tabla se presenta los valores de ganancia teóricos en cada una de las configuraciones:

TABLA 4
VALORES DE GANANCIA TEÓRICOS

Configuración (Pin Gain)	Ganancia (Db)	Attack/Release Ratio (ms/ms)
UNCONNECTED	60	1:4000
GND	50	1:2000
VCC	40	1:500

Reloj de tiempo real (RTC)

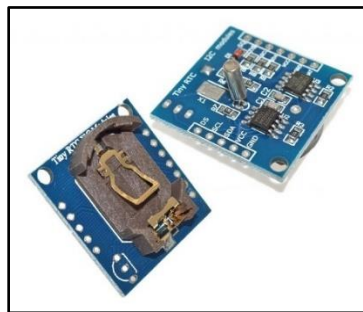


Fig. 6. Reloj en tiempo real (RTC) DS1307

Para asegurar la precisión en los intervalos de tiempo dentro del prototipo, se hizo indispensable la integración de un reloj en tiempo real (RTC). El uso del RTC permitió mantener un conteo de tiempo preciso e independiente del microcontrolador, liberando al procesador de una tarea adicional, mejorando así la eficiencia general del sistema. Para el prototipo se seleccionó el RTC modelo DS1307 (ver Fig. 6), que se destaca por contar con una batería independiente. Esta característica permite que el conteo del tiempo continúe incluso cuando la Raspberry Pi Pico esté desconectada, asegurando la gestión de tiempo constante. En la siguiente tabla se muestran las principales características del DS1307:

TABLA 5
CARACTERÍSTICAS DEL RTC DS1307

Característica	Descripción
Interfaz De Comunicación	I2C
Voltaje De Operación	4.5V a 5.5V
Rango De Voltaje De La Batería	2V a 3.5V
Funciones Del Reloj/Calendario	Cuenta segundos, minutos, horas, día, fecha, mes, año
Memoria	56 bytes de SRAM no volátil
Señal De Salida	Onda cuadrada programable
Consumo En Batería	Menos de 500 nA
Máxima Corriente De Consumo	1.5 mA

Nota: datos obtenidos de [22].

Montaje electrónico

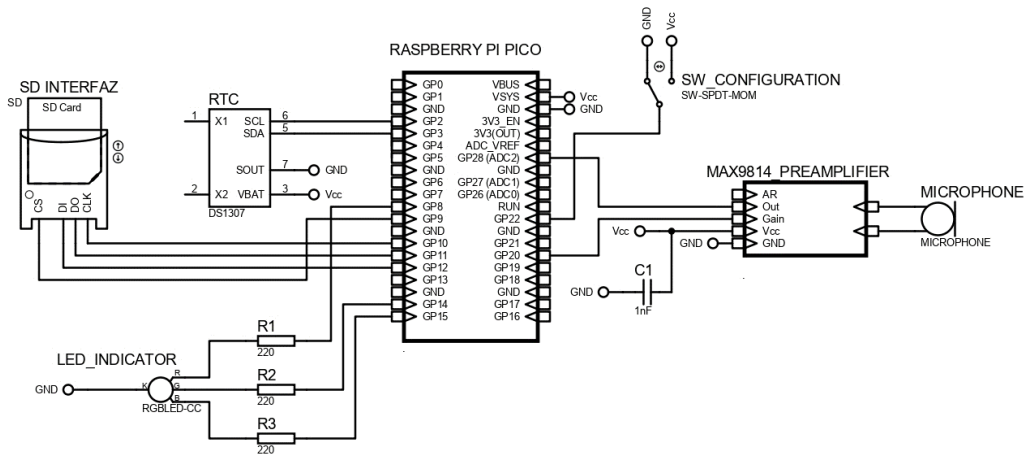


Fig. 7. Esquemático del montaje electrónico del prototipo

En la figura 7 se presenta el esquema electrónico que ilustra detalladamente las conexiones entre la Raspberry Pi Pico y cada uno de los componentes empleados en el prototipo. La tabla 6 ofrece una descripción más exhaustiva del tipo de comunicación que cada componente establece con los periféricos de la placa principal. Además, se especifican los puertos utilizados tanto en la Raspberry Pi Pico como en cada uno de los componentes:

TABLA 6
CONEXIONES ENTRE LA RASPBERRY PI PICO Y LOS COMPONENTES DEL PROTOTIPO

Componente	Tipo De Comunicación	Pin En Componente	Conexión En Raspberry Pi Pico	Pin En Raspberry Pi Pico
Max9814 Preamplifier	ADC	Out	ADC0	GP26
		Gain	GPIO	GP22
		AR	GND	GND
Sd Interfaz	SPI	CS	SPI1 CSn	GP9
		SCK	SPI1 SCK	GP10
		MOSI	SPI1 TX	GP11
		MISO	SPI1 RX	GP12
Rtc	I2C	SCL	I2C1 SCL	GP3
		SDA	I2C1 SDA	GP2
Led Indicator	GPIOs Digitales	RED	GPIO	GP8
		BLUE	GPIO	GP15
		GREEN	GPIO	GP14
Switch Configuration	GPIOs Digitales	OUT	GPIO	GP22

Desarrollo del firmware

Para el firmware desarrollado en el prototipo de grabadora, se adoptó una estructura de código modular. Esto implica que las diversas funcionalidades claves del prototipo se dividieron en módulos independientes, cada uno con su propio archivo de encabezado (".h") y archivo de implementación (".c"), siguiendo las prácticas estándar de programación en C. Esta estructura modular fue elegida con el objetivo de facilitar la comprensión, el mantenimiento y la escalabilidad del código. Los módulos principales son:

1. **Analog_microphone**: se ocupa de todas las operaciones relacionadas con el micrófono analógico, incluyendo el control del ADC, así como la gestión y transmisión de la señal de audio capturada.
2. **FatFs**: proporciona un sistema integral para el manejo de archivos en la memoria MicroSD.
3. **DS1307**: dedicado al control de las funcionalidades del reloj en tiempo real (RTC).
4. **Cofig_uart**: responsable de manejar la comunicación UART, esencial para la configuración de parámetros del sistema.
5. **Audio_manager**: encargado de la gestión y manipulación de los archivos de audio, incluyendo su creación y administración.

Todos estos módulos se integran a través de un archivo principal, denominado "main.c". Este archivo gestiona las definiciones y condiciones iniciales, establece las conexiones entre los distintos módulos, coordina el flujo de trabajo y el bucle de operación del sistema. Para facilitar una comprensión más profunda del funcionamiento global del prototipo, se procederá a explicar en detalle cada uno de los módulos que conforman el firmware desarrollado, destacando sus roles específicos y la manera en que interactúan dentro del conjunto del sistema.

Módulo de código para la lectura del micrófono analógico (Analog microphone)

El módulo para la lectura del micrófono analógico se desarrolló para manejar la captura de señales analógicas desde el ADC. Para el desarrollo de este módulo se utilizó el repositorio "microphone-library-for-pico" desarrollado por el equipo de *Arm Software Developers* [23].

Para realizar la lectura del ADC con una frecuencia de muestreo de 44.1 kHz, se empleó una estructura de datos conocida como “buffer circular” o “ring buffer”. Esta técnica implica reservar una serie de espacios de memoria temporales que funcionan en una secuencia cíclica. En este enfoque, el último elemento de un buffer se vincula con el primer elemento del siguiente buffer, creando un ciclo continuo de almacenamiento y acceso a los datos [24]. Para este prototipo en particular, se destinaron 5 buffers de tipo *uint16_t* (entero sin signo), cada uno con capacidad para almacenar 1024 muestras. En la siguiente figura se ejemplifica la dinámica de los buffers circulares:

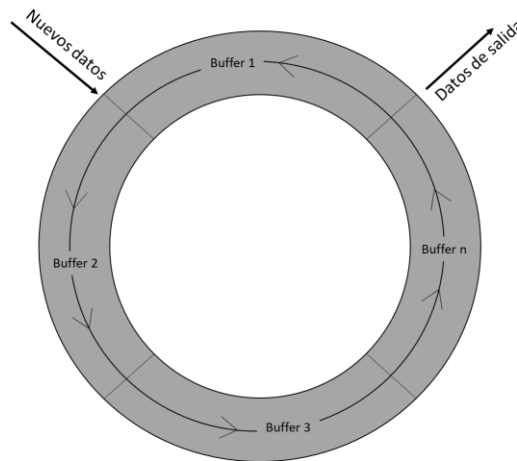


Fig. 8. Esquema ejemplo del funcionamiento de buffers circulares

La figura 8 ilustra un esquema de buffer circular, donde el flujo de datos se desplaza desde el buffer 1 hasta el buffer n. La flecha situada al inicio del buffer 2 señala el comienzo de la captura de nuevos datos en dicho buffer. Paralelamente, la flecha al inicio del buffer 1 indica que los datos allí almacenados están listos para ser exportados, es decir, se iniciará el proceso de escritura de estos datos en la memoria microSD mientras continúa la grabación en el buffer 2. Una vez completada la escritura en el buffer 2, el proceso de entrada y salida se desplaza a este nuevo buffer, en otras palabras, la flecha de entrada apuntará entonces al buffer 3, mientras que la flecha de salida se dirigirá al buffer 2. Este patrón se repite sucesivamente en todos los buffers disponibles.

El uso de esta estructura de datos permitió optimizar el uso de memoria durante la lectura de la señal del ADC. Esta eficiencia garantizó una captura continua e ininterrumpida de la señal

eléctrica proveniente del micrófono, evitando cualquier posible interferencia causada por la escritura y transmisión de datos desde los buffers.

El flujo de ejecución del módulo “Analog microphone” se desarrolla en varias fases. Inicialmente, se llevan a cabo verificaciones en los pines involucrados en la lectura del ADC, así como en el manejo de los DMA y las interrupciones. Además, se realiza la asignación en memoria de cinco buffers destinados a almacenar los datos recogidos. Una vez completada, se inicia la lectura de los datos capturados por el ADC. Estos datos son registrados en los buffers asignados mediante el DMA. Cuando un buffer se llena, se activa una interrupción asociada al DMA. Durante el manejo de esta interrupción, se reasignan las direcciones de memoria para indicar al DMA la ubicación del próximo buffer al que debe enviar los datos. Simultáneamente, se identifica la dirección del buffer que acaba de llenarse, dado que la escritura de los datos en la memoria SD es manejada directamente por el DMA, el microcontrolador no se involucra directamente en este paso. Esto permite que el procesamiento y la transmisión de datos a la memoria microSD se ejecuten en paralelo al proceso de escritura, optimizando así el rendimiento general del sistema y garantizando una captura de audio continua.

Módulo de código para escribir y leer datos en la memoria MicroSD (FatFs)

El módulo “*FatFs*” es una biblioteca de software compacta y eficiente diseñada específicamente para microcontroladores que requieren gestionar sistemas de archivos *FAT/exFAT*, desarrollada por *ANSI C* [25]. En el contexto del prototipo desarrollado con la Raspberry Pi Pico, el módulo “*FatFs*” se empleó para facilitar las interacciones básicas con la memoria MicroSD. Estas interacciones incluyen el conjunto de operaciones fundamentales para el manejo de archivos, las cuales son:

- **Apertura de archivos:** establece el acceso a archivos existentes en la memoria microSD para su lectura o escritura.
- **Creación de archivos:** habilita la generación de nuevos archivos en el sistema de archivos de la tarjeta microSD.
- **Lectura de datos:** extrae los datos de los archivos almacenados en la memoria microSD.
- **Cierre de archivos:** asegura que los archivos se cierren correctamente tras su uso.

- **Manejo de errores:** reporte de errores en las diferentes fases de las operaciones entre el microcontrolador y la memoria.

Módulo de código para el manejo del RTC (DS1307)

Este módulo de código fue diseñado para interactuar con el RTC DS1307, a través de la Raspberry Pi Pico, las funcionalidades de este incluyen:

- **Inicialización de la comunicación:** esta función configura y establece la comunicación entre el microcontrolador de la Raspberry Pi Pico y el módulo DS1307. Se utiliza el protocolo de comunicación I2C, lo que implica inicializar adecuadamente los pines del microcontrolador que están involucrados en esta comunicación
- **Conversión de formatos de datos:** para el RTC utilizado en el prototipo, fue necesario desarrollar esta función que se encarga de convertir los datos de fecha y hora de un formato numérico a Decimal Codificado en Binario (BCD), asegurando así que los datos puedan ser correctamente interpretados y utilizados por el DS1307.
- **Reconfiguración de fecha y hora:** esta función consiste en establecer o actualizar la fecha y hora en el DS1307.

Módulo de código para la configuración de parámetros de grabación (Config_uart)

Esta sección del firmware se implementó para gestionar la comunicación UART entre el prototipo y una computadora, utilizando para ello la conexión USB integrada en la Raspberry Pi Pico. Esta comunicación se realiza a través del puerto "uart0" de la placa. Las funciones para la configuración de los parámetros de grabación incluyen:

- **Frecuencia de muestreo:** el prototipo es capaz de ajustar la frecuencia de muestreo hasta un máximo de 48 kHz. Esto ofrece al usuario la flexibilidad de elegir entre varias opciones, como 8 kHz, 16 kHz, 22.05 kHz, 44.1 kHz y 48 kHz, adaptándose así a diferentes necesidades de grabación.
- **Tiempo de grabación:** se refiere a la duración de la grabación, en segundos, de los futuros archivos de audios.

- **Tiempo de suspensión:** este parámetro define el intervalo durante el cual el dispositivo no realiza grabaciones. Es el tiempo de espera antes de iniciar una nueva sesión de grabación, lo que permite programar grabaciones a intervalos regulares.
- **Configuración de ganancias:** este ajuste permite al usuario establecer el nivel de ganancia del preamplificador. Con tres niveles disponibles, donde 1 es el mínimo y 3 el máximo.
- **Configuración de fecha y hora:** el módulo también es capaz de recibir información de fecha y hora desde la computadora. Estos datos son utilizados para ajustar el RTC del sistema.

El prototipo cuenta con dos modos de funcionamiento, los cuales son “*Configuración*” y “*Grabación*”, para esto se integró un interruptor (switch) en el puerto GPIO 22 (como se muestra en la figura 7). Este interruptor determina el modo de funcionamiento del sistema: cuando el interruptor está conectado a GND, el sistema interpreta que debe comenzar la grabación de audio. Por otro lado, cuando el interruptor está conectado a Vcc, se señala al prototipo que entre en modo de configuración.

Ahora bien, para facilitar el envío de los parámetros de configuración mencionados anteriormente desde una computadora, se desarrolló una aplicación de escritorio para permitir a los usuarios realizar estos ajustes. Esta aplicación, programada en Python, ofrece una interfaz que guía al usuario en la selección de los parámetros de grabación. La siguiente figura ilustra la interfaz de la aplicación desarrollada, mostrando cómo los usuarios pueden interactuar con ella para definir y enviar sus configuraciones:

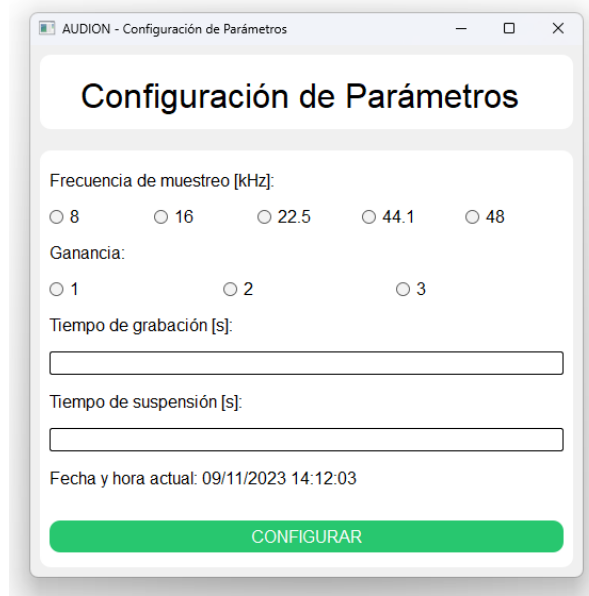


Fig. 9. Interfaz de escritorio para la configuración del prototipo

Tras la selección de los parámetros por parte del usuario, la aplicación los organiza en un formato de texto continuo, estructurado para ser interpretado por el módulo "Config_uart" del prototipo. Este formato consiste en agrupar todos los parámetros en una sola línea de texto, utilizando el punto y coma (;) como separador entre cada parámetro. Por ejemplo, si un usuario configura el prototipo para grabar a una frecuencia de 44.1 kHz, con una ganancia de 2, un tiempo de grabación de 60 segundos y un tiempo de suspensión de 30 segundos, el texto generado y la interpretación se muestra en la siguiente figura:

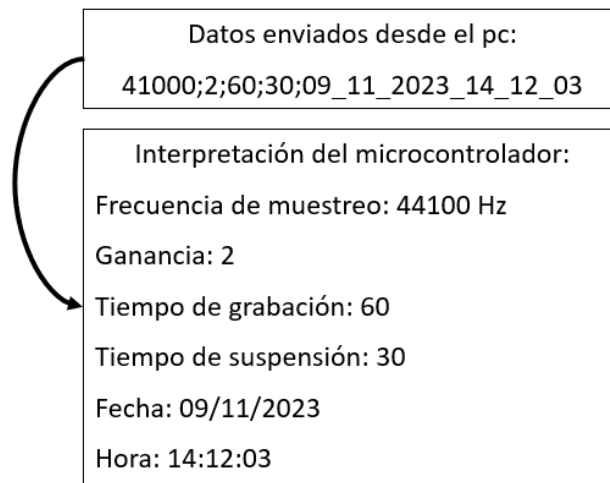


Fig. 10. Esquema de la transmisión de datos desde el PC al prototipo

Es importante mencionar que, para asegurar la persistencia de los parámetros configurados en el prototipo, todos los datos obtenidos a través de este módulo se almacenan en un archivo denominado “CONFIG.txt” en la memoria MicroSD. La finalidad de este procedimiento es conservar los ajustes configurados a lo largo del tiempo. De esta manera, incluso si el prototipo se desconecta de su fuente de alimentación, al reconectarlo, se pueden restablecer automáticamente los parámetros previamente configurados sin la necesidad de repetir el proceso de configuración desde la computadora.

Módulo de código para el manejo de archivos con formato WAV (Audio_manager)

Las funciones del módulo para el manejo de audios se centran en la grabación y procesamiento de los archivos WAV, es decir, se encarga de capturar los valores leídos por el ADC y registrarlos en un archivo WAV almacenado en la memoria microSD. Para cumplir con esta tarea, el módulo ejecuta las siguientes operaciones:

- **Creación de archivos y encabezados de WAV:** esta tarea implica la creación de un nuevo archivo en formato WAV, incluyendo la escritura del encabezado correspondiente. El encabezado del archivo WAV es fundamental, ya que establece las especificaciones del archivo de audio, como la frecuencia de muestreo, el tamaño de la muestra y el tamaño en bits del archivo [26], entre otras especificaciones necesarias para la futura interpretación de audio.
- **Escritura del audio:** tras definir los encabezados WAV, se procede a la tarea de registrar los datos de audio. En esta fase, los valores capturados por el ADC se escriben en el archivo WAV.
- **Cerrar el archivo de audio:** una vez completada la grabación de la señal, se lleva a cabo la tarea de cerrar el archivo de audio y desmontar el sistema de archivos de la tarjeta microSD. Este proceso asegura que todos los datos se hayan guardado correctamente y simultáneamente libera los recursos asociados con el archivo.

Programa principal (main)

Todos los módulos desarrollados para el prototipo de grabadora de audio están integrados en el archivo principal, denominado “main.c”. La figura 11 ilustra el diagrama de flujo general del sistema, este detalla el proceso por el cual el sistema alterna entre grabar audio y recibir nuevas configuraciones. Es crucial destacar que el ciclo de operación del sistema se mantiene activo mientras el prototipo esté conectado a una fuente de alimentación. Esto significa que, en condiciones normales de funcionamiento, el sistema estará continuamente en un bucle, ya sea grabando o esperando una nueva configuración.

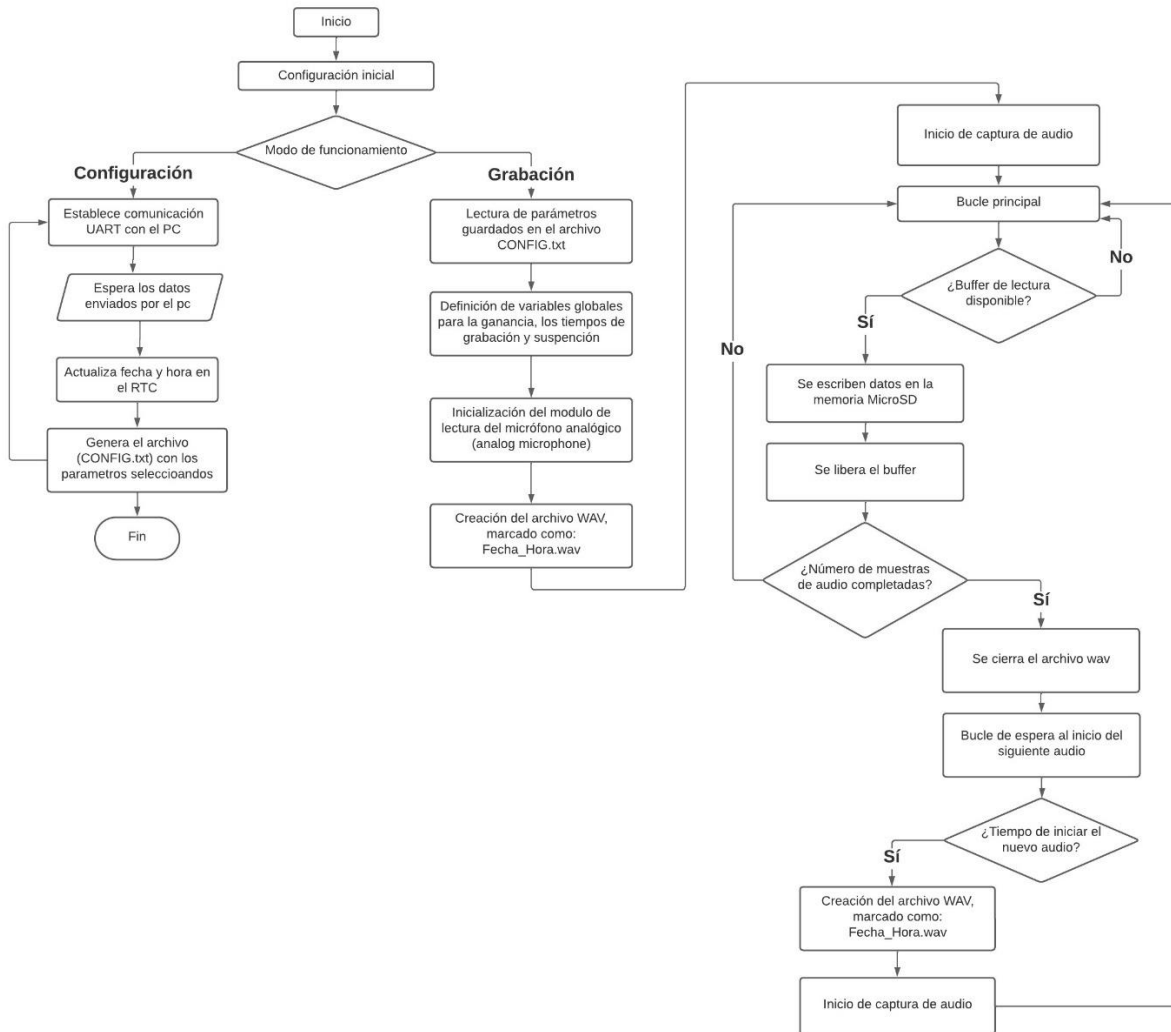


Fig. 11. Diagrama de flujo del programa principal (Main)

Pruebas de funcionamiento

Para verificar el funcionamiento del prototipo de la grabadora se realizaron 3 pruebas, las cuales se enfocan en medir y verificar los diferentes niveles de ganancia, medir ganancias máximas en diferentes frecuencias y analizar su respuesta en frecuencia. A continuación, se explican las pruebas a detalle.

Prueba de ganancia variable

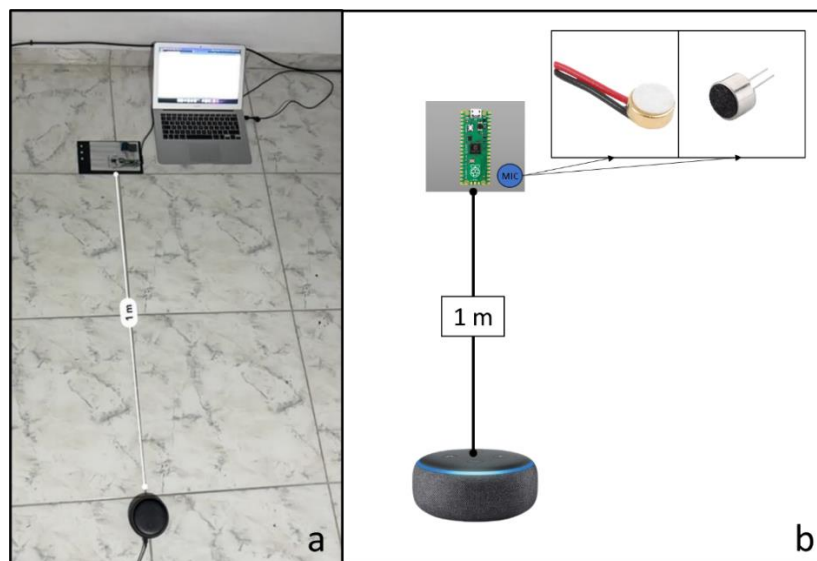


Fig. 12. Esquema de prueba de ganancia variable. (a) fotografía de altavoz emisor a una distancia de 1m de distancia del prototipo. (b) esquema teórico de la prueba de ganancia variable

La prueba fue diseñada específicamente para evaluar la eficacia del prototipo en la captura y discriminación de diferentes frecuencias sonoras bajo los diferentes niveles de ganancia. El procedimiento consistió en colocar el prototipo a una distancia de un metro de un altavoz (ver Fig. 12). El altavoz emitió una secuencia en bucle de cinco tonos de diferentes frecuencias: 1 kHz, 5 kHz, 10 kHz, 15 kHz y 20 kHz, cada uno con una duración de 2 segundos para un total de 5 repeticiones del bucle, es decir que el tiempo de grabación fue de 50 segundos. Esta secuencia se repitió cinco veces, manteniendo un intervalo de tiempo de suspensión de 15 segundos.

Los sonidos fueron grabados utilizando los tres niveles de ganancia, con el objetivo de medir y comparar la ganancia máxima en cada uno de los tonos emitidos para dichos niveles. Este experimento se llevó a cabo utilizando el micrófono CME-1538-100LB y el CMC-9745-44P.

Prueba de comparación de ganancia máxima entre el prototipo y una grabadora AudioMoth

En esta prueba, se replicó el esquema de la figura 12, con la adición de una grabadora AudioMoth ubicada junto al prototipo para grabar simultáneamente, manteniendo idénticos los intervalos de tiempo y las repeticiones de tonos. El objetivo principal fue comparar los valores máximos de ganancia capturados por el prototipo y la AudioMoth en las mismas frecuencias, con el fin de evaluar las diferencias en los niveles de ganancia entre ambos dispositivos. En esta prueba también se utilizaron los dos micrófonos disponibles para el prototipo. En la siguiente tabla se muestra los parámetros configurados en ambos dispositivos para esta prueba:

TABLA 7
CONFIGURACIÓN DE PARAMETROS

Parámetros	Audiomoth	Prototipo
Frecuencia de muestreo	48000 Hz	44100 Hz
Nivel de ganancia	2	2
Tiempo de grabación	30s	30s
Tiempo de suspensión	15s	15s

Para realizar la comparación en esta prueba, es importante tener en cuenta que la grabadora AudioMoth incorpora un micrófono MEMS, específicamente el modelo SPU0410LR5H [27], cuyas principales características se resumen en la tabla siguiente:

TABLA 8
CARACTERÍSTICAS DEL MICRÓFONO SPU0410LR5H-QB

Característica	SPU0410LR5H-QB
Rango De Frecuencia	20 Hz – 80 kHz
Directividad	Omnidireccional
Sensibilidad	-38 dB
Relación Señal/Ruido (S/N)	63 dB
Voltaje De Operación	1.5V-3.6V
Impedancia De Salida	400Ω
Dimensiones	3.76 x 3 x 1.10 mm

Nota: datos obtenidos de [28].

Prueba de identificación de huellas acústicas

Esta prueba se diseñó específicamente para evaluar la eficacia del prototipo en la grabación de sonidos de animales. Se empleó el mismo esquema ilustrado en la figura 12 y, además, se utilizó una grabadora AudioMoth para realizar una comparación de resultados. Durante la prueba, se emitieron sonidos característicos de las siguientes especies:

- **Ave:** Troglodytes Aedon.
- **Anfibio:** Hyla Arborea.

Para cada una de estas especies, se grabaron sus sonidos utilizando los dos tipos de micrófonos disponibles para el prototipo. Tras la grabación, se generaron espectrogramas de cada uno de los registros sonoros. Estos espectrogramas permitieron realizar una comparación visual detallada de las huellas acústicas de los sonidos emitidos por las especies mencionadas.

V. RESULTADOS

Prototipo

En la siguiente figura se muestra el montaje electrónico obtenido del prototipo, señalando todos los componentes utilizados:

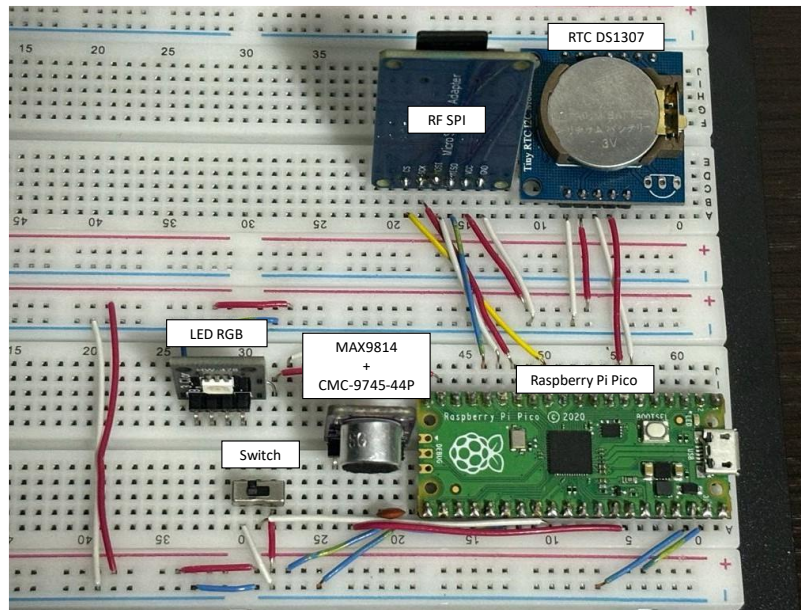


Fig. 13. Vista general montaje electrónico en board del prototipo de grabadora de audio

En la siguiente figura se muestra el prototipo equipado con el micrófono CMC-9745-44P y con el CME-1538-100LB:

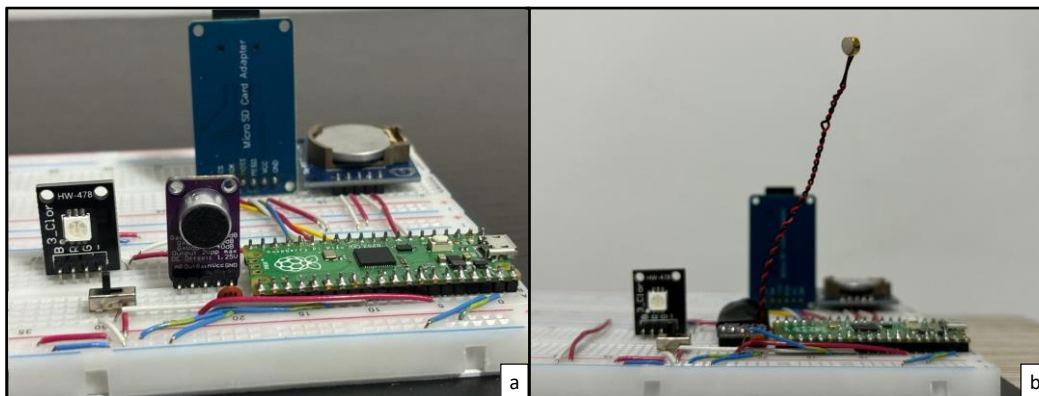


Fig. 14. Montaje electrónico del prototipo con el micrófono CMC-9745-44P y CME-1538-100LB

Resultados de la prueba de ganancia variable

En las figuras 15 y 17 se presenta la densidad espectral de potencia (PSD, por sus siglas en inglés) de las grabaciones realizadas para los distintos tonos en los tres niveles de ganancia del prototipo. Estas PSD se muestran tanto para el micrófono CMC-9745-44P como para el CME-1538-100LB. Además, para facilitar el análisis, en las figuras 16 y 18 se muestran los picos de ganancia correspondientes a las frecuencias emitidas (1 kHz, 5 kHz, 10 kHz, 15 kHz, 20 kHz).

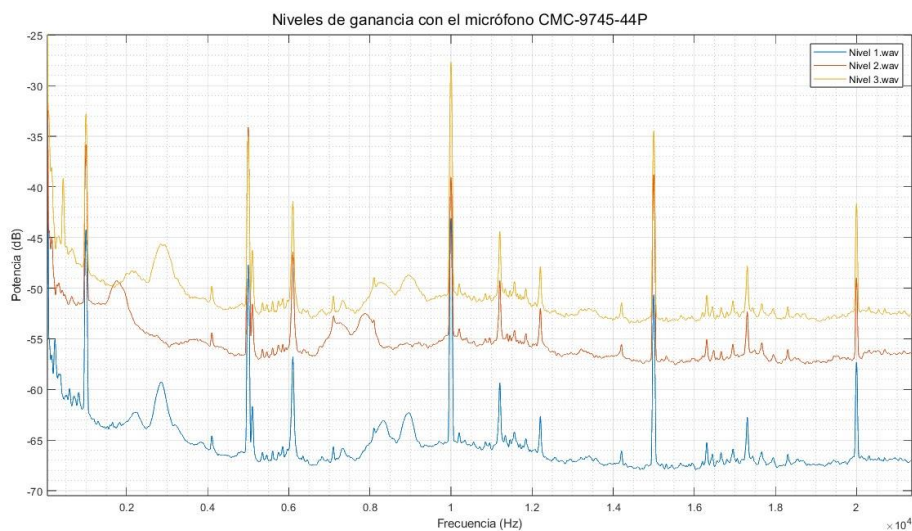


Fig. 15. Densidad Espectral de Potencia (PSD) en los Tres Niveles de Ganancia, para el micrófono CMC-9745-44P

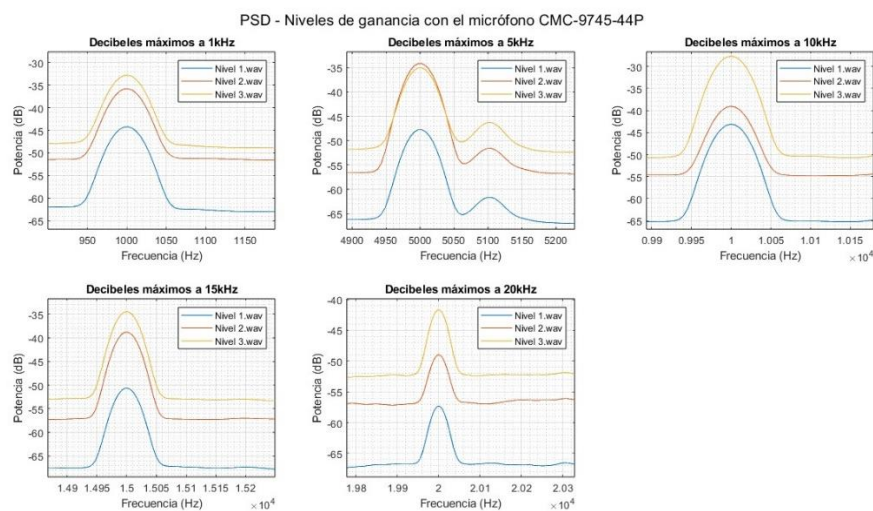


Fig. 16. Densidad espectral de potencia (PSD) en los tres niveles de ganancia, mostrando los picos máximos correspondientes a las frecuencias de los tonos emitidos, para el micrófono CMC-9745-44P.

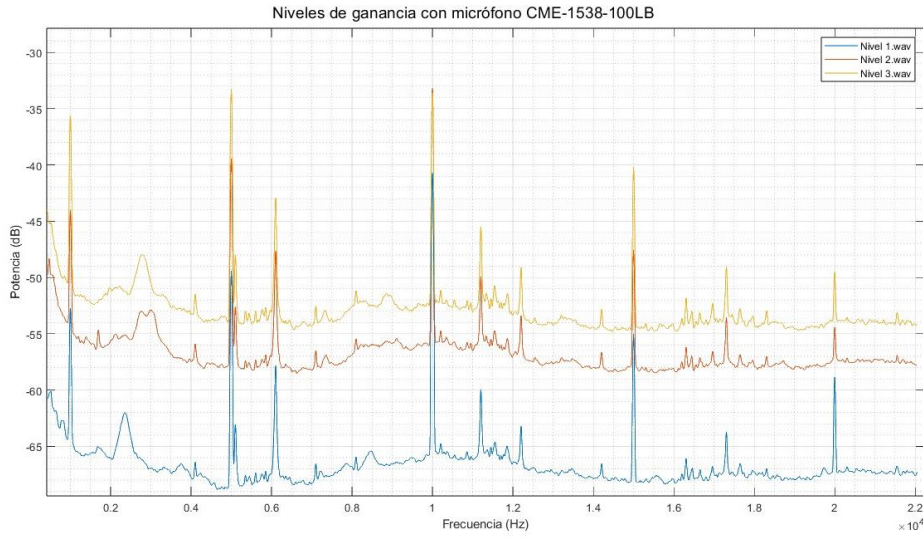


Fig. 17. Densidad Espectral de Potencia (PSD) en los Tres Niveles de Ganancia, para el micrófono CME-1538-100LB

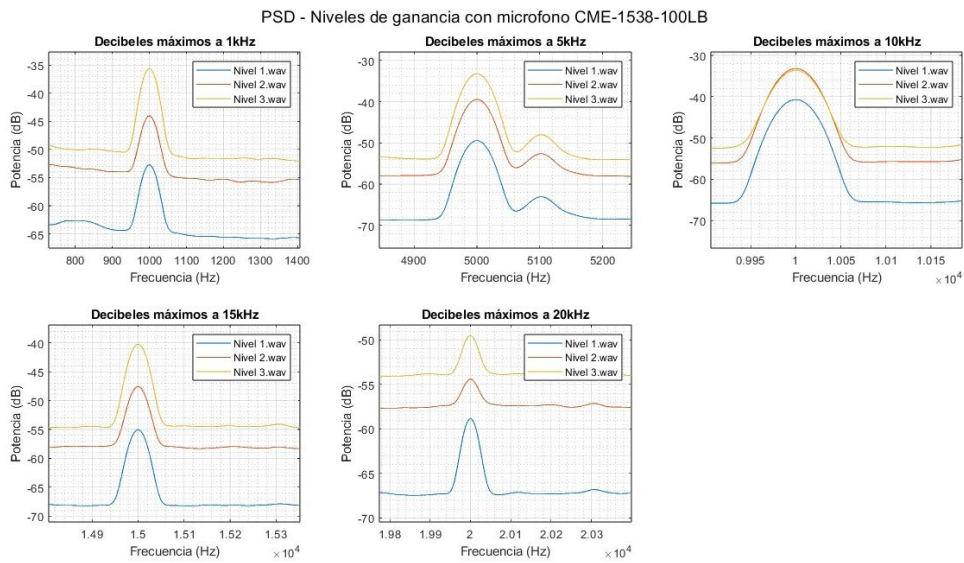


Fig. 18. Densidad espectral de potencia (PSD) en los tres niveles de ganancia, mostrando los picos máximos correspondientes a las frecuencias de los tonos emitidos, para el micrófono CME-1538-100LB

En la tabla 8 se muestra el resumen de todos los valores de las ganancias máximas en decibeles, para cada uno de los tonos emitidos y niveles de ganancias:

TABLA 9
RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LA PRUEBA DE GANANCIA

Micrófono	Frecuencia	Nivel 1 (dB)	Nivel 2 (dB)	Nivel 3 (dB)	$\Delta N2n1$	$\Delta N3n2$
CME-1538-100LB	1 kHz	-52.72	-44.0	-35.61	8.72	8.39
	5 kHz	-49.46	-39.46	-33.26	10	6.20
	10 kHz	-40.69	-33.58	-33.17	7.11	0.41
	15 kHz	-55.06	-47.57	-40.23	7.49	7.34
	20 kHz	-58.90	-54.43	-49.56	4.47	4.87
CMC-9745-44P	1kHz	-44.20	-35.79	-32.78	8.41	3.01
	5kHz	-47.73	-35.03	-34.13	12.7	0.9
	10kHz	-43.10	-39.04	-27.64	4.06	11.4
	15kHz	-50.63	-38.78	-34.45	11.85	4.33
	20kHz	-57.39	-48.96	-57.39	8.43	-8.43

TABLA 10
RESUMEN DE LOS RESULTADOS ESTADISTICOS DE LA DIFERENCIA ENTRE LOS DIFERENTES NIVELES DE GANANCIAS

Micrófono	Variable	$\Delta N2N1$	$\Delta N3N2$
CME-1538-100LB	Promedio	7.56	5.44
	Desviación estándar	2.06	3.10
	Valor mínimo	4.47	0.41
	Valor máximo	10	8.39
CMC-9745-44P	Promedio	9.09	2.24
	Desviación estándar	3.42	7.15
	Valor mínimo	4.06	-8.43
	Valor máximo	12.7	11.40

Resultados de la prueba de comparación de ganancia máxima entre el prototipo y una grabadora AudioMoth

Las figuras 19 y 20 muestra el PSD de las grabaciones de tonos del prototipo con ganancia máxima (nivel 2) en comparación con la grabadora AudioMoth en ganancia nivel 2.

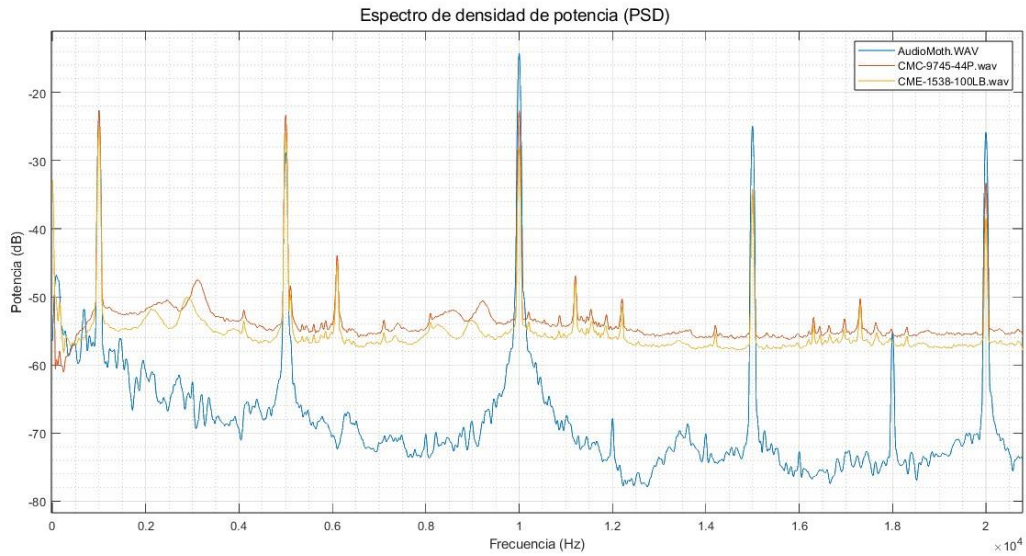


Fig. 19. Densidad Espectral de Potencia (PSD) en nivel 2 de ganancia, para los micrófonos CMC-9745-44P, CME-1538-100LB y la grabadora AudioMoth

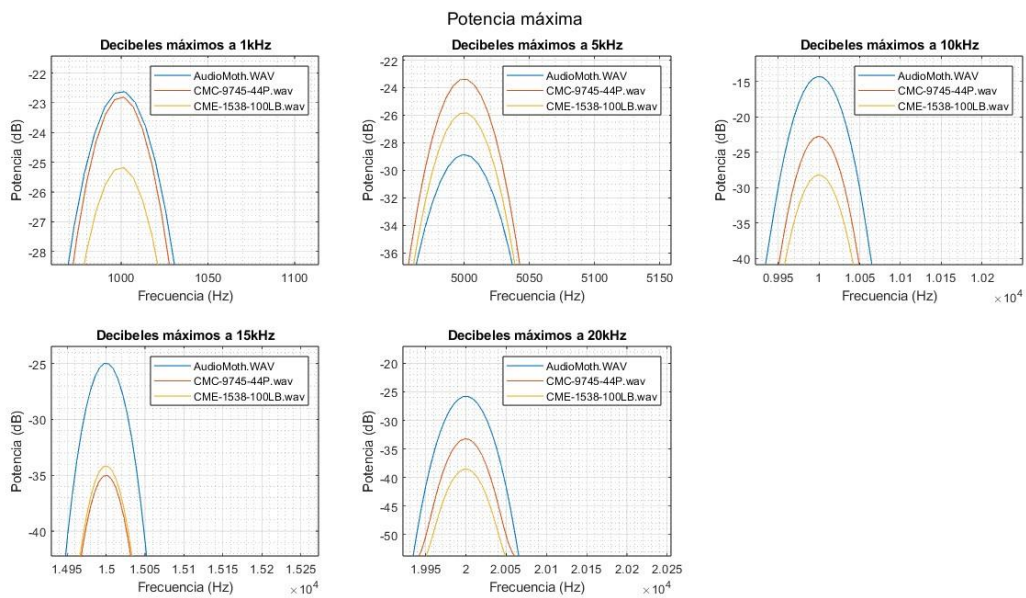


Fig. 20. Densidad espectral de potencia (PSD) en nivel 2 de ganancia. Mostrando los picos máximos correspondientes a las frecuencias de los tonos emitidos, para los micrófonos CMC-9745-44P, CME-1538-100LB y la grabadora AudioMoth

En la tabla 11 se resumen todos los valores de las ganancias máximas en decibeles, para cada uno de los tonos emitidos, para ambos micrófonos y la AudioMoth:

TABLA 11
RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LA PRUEBA COMPRATIVA ENTRE EL PROTOTIPO Y LA AUDIOMOTH

Frecuencia	Audiomoth (dB)	CME-1538-100lb (dB)	CMC-9745-44P (dB)
1 kHz	-22.62	-25.09	-22.72
5 kHz	-28.85	-25.62	-23.18
10 kHz	-14.2	-22.53	-28.14
15 kHz	-24.97	-34.12	-34.96
20 kHz	-25.80	-38.59	-33.29

Resultados de la prueba de identificación de huellas acústicas

Las figuras 21 y 22 exponen los resultados de la prueba de "huellas acústicas", donde se visualizan los espectrogramas de los audios capturados por el prototipo utilizando ambos micrófonos empleados en las pruebas, así como los obtenidos por la grabadora AudioMoth. Adicionalmente en las figuras 23 y 24 se muestra los PSD de estos audios.

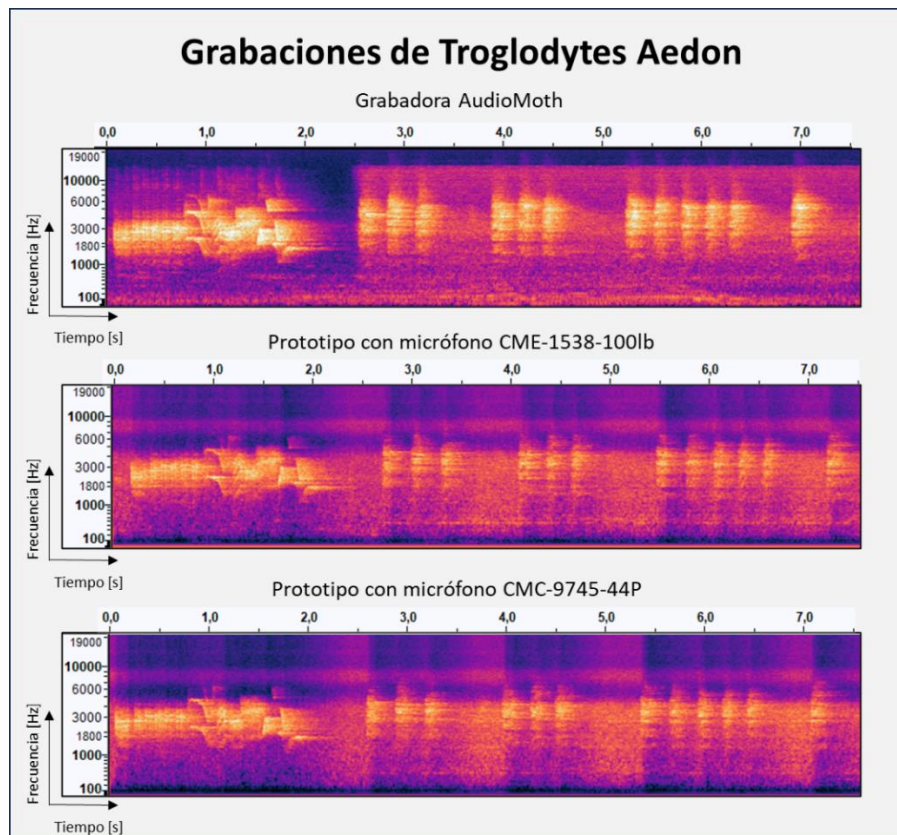


Fig. 21. Espectrogramas de los audios del ave Troglodytes Aedon captados por el prototipo (con ambos micrófonos de prueba) y de la grabadora AudioMoth

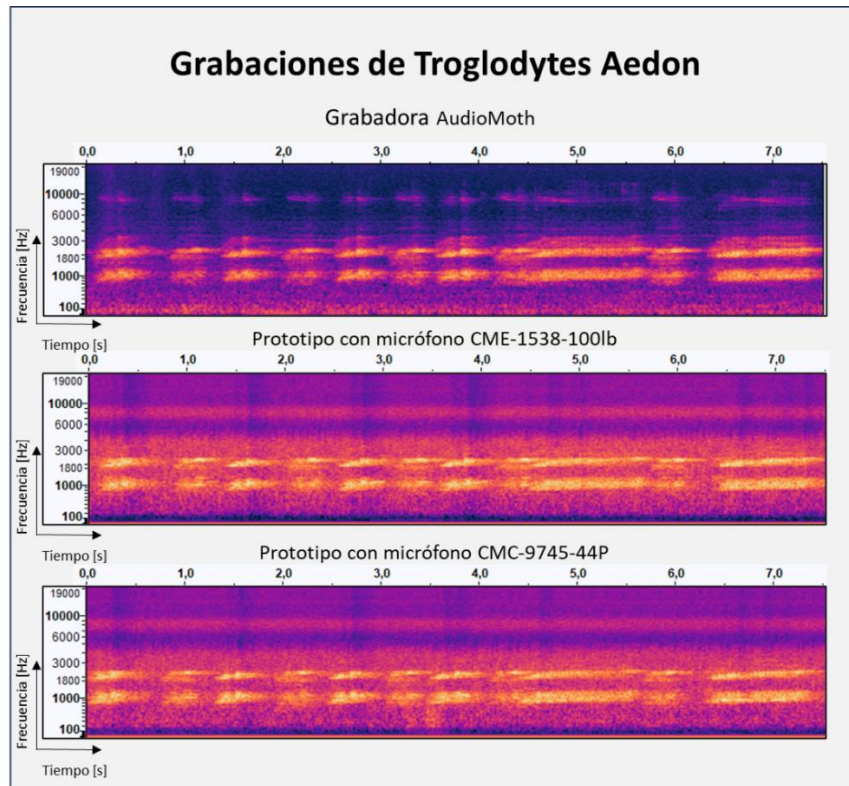


Fig. 22. Espectrogramas de los audios de anfibio Hyla Arborea captados por el prototipo (con ambos micrófonos de prueba) y de la grabadora AudioMoth

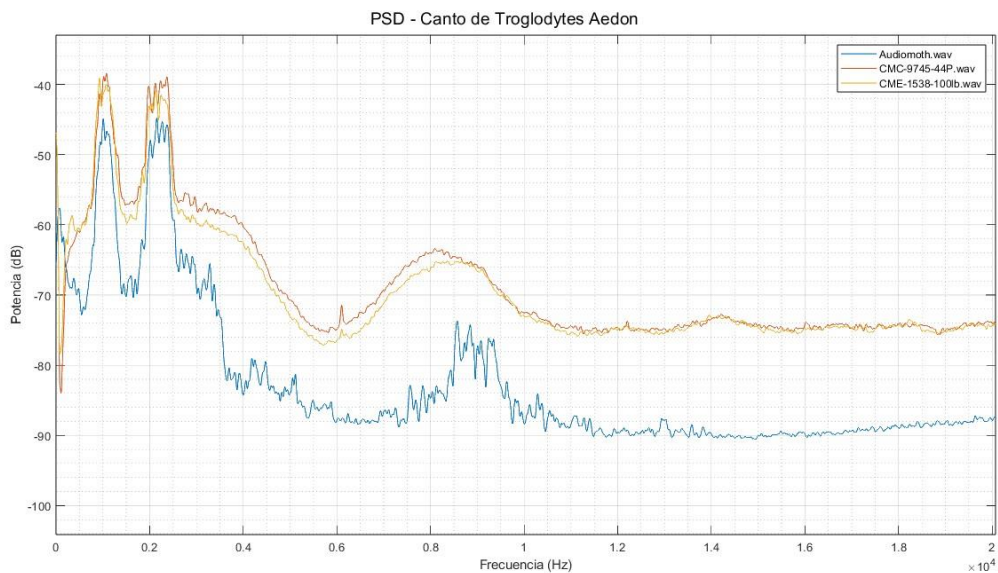


Fig. 23. PSD de los audios del ave Troglodytes Aedon captados por el prototipo (con ambos micrófonos de prueba) y de la grabadora AudioMoth

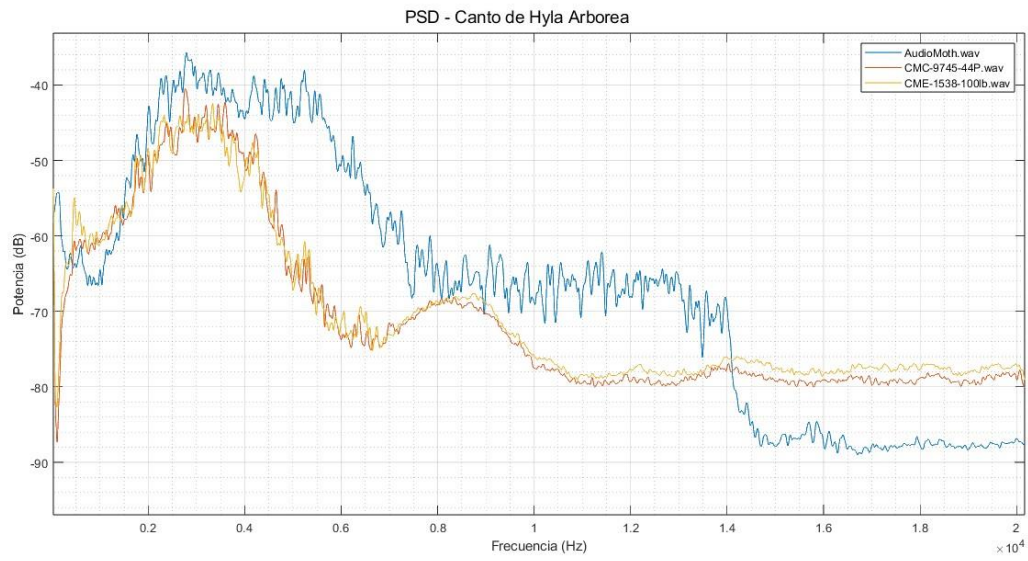


Fig. 24. PSD de los audios de anfibio Hyla Arborea captados por el prototipo (con ambos microfones de prueba) y de la grabadora AudioMoth

VI. DISCUSIÓN

La metodología de buffer circular implementada en este proyecto demostró ser eficiente para la grabación de audio con frecuencias de muestreo de hasta 48 kHz. Las pruebas de funcionamiento permitieron determinar que, para evitar la pérdida de datos y los artefactos acústicos no deseados, como interrupciones o ruidos en los audios, era esencial establecer una proporción adecuada entre el tamaño de los buffers y la frecuencia de muestreo, ya que una calibración imprecisa de esta relación podía causar interrupciones en el flujo de datos durante el proceso de escritura en la memoria microSD. Para mitigar esto, se encontró que el tamaño óptimo de los buffers para mantener el proceso era del 10% de la frecuencia de muestreo. Por ejemplo, a 48 kHz, se asignó un tamaño de 4800 muestras por buffer. Este parámetro de diseño facilitó un ajuste automático de los buffers, resultando esencial para mantener la integridad de las grabaciones y asegurando una transmisión fluida de los datos a la memoria microSD.

Las figuras 15 y 16 muestran los PSD para los tres niveles de ganancia en los micrófonos de prueba. Estos resultados revelan las diferencias en los niveles de ganancia esperadas, donde el nivel 1 es el más bajo, seguido por el nivel 2 con una ganancia intermedia, y finalmente el nivel 3, que muestra la ganancia más alta. De acuerdo con las especificaciones del preamplificador MAX9814, se esperaría una variación de 10dB entre estos niveles de ganancia. Los datos obtenidos reflejan que la variación de ganancia entre los niveles 1 y 2 es consistente con la teoría. Sin embargo, la variación entre los niveles 2 y 3 es notablemente menor de lo esperado. Esta observación se detalla en las tablas 8 y 9, en las cuales se muestra que en el caso del micrófono CME-1538-100LB, la variación en los picos de ganancia entre los niveles 1 y 2 fluctúa entre 4.47dB y 10dB, con un promedio de 7.56dB. Entre los niveles 2 y 3, la variación va de 0.41dB a 8.39dB, con un valor promedio de 5.44dB. Para el micrófono CMC-9745-44P, la diferencia en los picos de ganancia entre los niveles 1 y 2 varía de 4.06dB a 12.7dB, con un promedio de 9.09dB. Entre los niveles 2 y 3, la variación oscila entre -8.43dB y 11.40dB, con un promedio de 2.24dB.

Esta disminución en la variación de ganancia entre los niveles 2 y 3 podría explicarse por la presencia del control automático de ganancia (AGC) en el preamplificador MAX9814. El AGC

ajusta de manera automática la amplitud de la señal para nivelar las variaciones de volumen, siendo capaz de amplificar la señal hasta 20dB o comprimirla hasta los 0dB [21]. Por lo que en el nivel 3, donde se está aplicando la máxima amplificación, es probable que el AGC actúe comprimiendo la señal al exceder ciertos umbrales de intensidad. De esta manera, el AGC podría ser el causante de que la variación entre los niveles 2 y 3 sea menos pronunciada que entre los niveles 1 y 2.

Al analizar el PSD en la figura 19, se observa que la señal del prototipo muestra una línea de base elevada, posiblemente debido a un voltaje offset, ruido electromagnético o al efecto del AGC, ya que, al ajustar la intensidad, lo que hace es manipular “hacia arriba o hacia abajo” la señal, intentando mantener la mejor relación señal-ruido (SNR) [29]. En contraste, la señal de la AudioMoth destaca por sus picos más altos de ganancia en la mayoría de los casos, como se muestra en la figura 20. Reflejando una amplificación superior y una mejor captura de sonidos de baja intensidad, con un ruido de fondo menor. Estas características se atribuyen a la mayor sensibilidad y al amplio rango de frecuencia del micrófono MEMS de la AudioMoth.

Las especificaciones de los micrófonos utilizados en el prototipo reportan que la sensibilidad de estos se mantiene estable hasta los 15 kHz. Para el modelo CME-1538-100LB, la sensibilidad se sostiene cerca de -38dB [18], mientras que para el CMC-9745-44P, se sitúa en -44dB [19]. Más allá de los 15 kHz, ambos micrófonos experimentan una variabilidad en la sensibilidad, tendiendo a la baja y mostrando un comportamiento fluctuante.

Por otro lado, Las especificaciones del micrófono SPU0410LR5H reportan que la sensibilidad permanece constante en -38dB desde los 0Hz hasta los 10 kHz. A partir de los 10 kHz, la sensibilidad aumenta, alcanzando un pico cercano a los 23 kHz, con un valor máximo de alrededor de -27dB [28].

La sensibilidad superior de la AudioMoth se refleja en picos más definidos y una menor captación de ruido de fondo en sus grabaciones. Está claro que esta grabadora tiene un micrófono de características mucho más avanzadas en comparación con los micrófonos utilizados en el prototipo, también cuenta con un preamplificador de mayor calidad y una construcción con componentes soldados que reducen la interferencia de ruido. Por todo esto, la AudioMoth establece

un alto estándar de referencia. Aunque los micrófonos del prototipo no alcanzan este nivel de calidad, se observó que son capaces de capturar señales con una ganancia considerable y una riqueza de información sonora. A pesar de un nivel de ruido más elevado, los micrófonos del prototipo demostraron su habilidad para identificar y amplificar sonidos significativos, lo cual fue claramente apreciado durante la prueba.

En los datos presentados en la figura 20, se observa que el micrófono CMC-9745-44P logró una ganancia superior en la mayoría de las frecuencias probadas en comparación con el CME-1538-100LB, con la excepción de 15 kHz, donde mostró una ganancia aproximadamente 1dB menor que la del CME-1538-100LB. Partiendo de que ambos micrófonos tienen características similares, esta variación en los resultados puede explicarse por la adaptación específica que se hizo del micrófono CME-1538-100LB al preamplificador MAX9418. Cabe señalar que el preamplificador viene configurado de fábrica para el micrófono CMC-9745-44P, lo que llevó a realizar ajustes en la placa del preamplificador para acomodar el CME-1538-100LB. Durante esta adaptación, se aplicó una cantidad de soldadura superior a la habitual debido a que los cables son más delgados que los del micrófono original, lo cual pudo afectar la impedancia del micrófono y, como consecuencia, reducido su ganancia en ciertas frecuencias.

Con respecto a los resultados de la prueba de “huellas sonoras”, en la figura 21, se observa que la grabadora AudioMoth capturó con mayor definición los segmentos característicos del canto del ave Troglodytes Aedon, especialmente entre los segundos 0 y 2, donde se identifica un patrón distintivo del canto dentro del rango de frecuencias de aproximadamente 1.5 kHz a 4 kHz. Esta observación es consistente con los datos de la PSD mostrados en la figura 23, que indican que la potencia máxima capturada se sitúa precisamente dentro de este rango de frecuencias. En comparación, los espectrogramas de los micrófonos del prototipo reflejan una definición menos nítida en dichas frecuencias, con una disminución notable en la claridad por debajo de 1.8 kHz y por encima de 5 kHz. Sin embargo, se observa en la PSD una mayor ganancia en los micrófonos del prototipo, comportamiento que se puede atribuir a una mayor captación de ruido ambiental.

Posterior al segundo 2.5, los segmentos constantes del canto son fielmente capturados por la AudioMoth en la misma banda de frecuencia que el segmento inicial, con una intensidad que

incrementa al comienzo de cada segmento y disminuye progresivamente hacia el final. En contraste, según el espectrograma de los micrófonos del prototipo (figura 21) registran estos segmentos con una intensidad menor. Aunque en los espectrogramas de ambos micrófonos es posible identificar el comienzo de los segmentos, la intensidad decae rápidamente, perdiéndose parte de la huella sonora, que solo se hace evidente nuevamente al inicio del segmento siguiente.

Los resultados de la huella sonora de la rana *Troglodytes Aedon* mostrados en la figura 22 y figura 23, revelan que la frecuencia característica de su canto se sitúa aproximadamente entre los 1 kHz y los 6 kHz. En los espectrogramas, se percibe claramente la forma característica del canto, el cual consiste en dos líneas paralelas, donde una oscila entre los 800 Hz y 1.3 kHz y otra entre los 1.7 kHz a 2.5 kHz. La grabación de la AudioMoth demuestra una mayor nitidez en estas bandas, atribuible a una superior relación de señal-ruido. En comparación, la grabación del prototipo con el micrófono CMC-9745-44P exhibe una definición más cercana a la AudioMoth, aunque se aprecia una mayor presencia de ruido ambiental que parece solapar el canto dentro de una banda de ruido más amplia, que va desde los 100 Hz hasta aproximadamente los 5 kHz. Por otra parte, el micrófono CME-1538-100LB muestra una menor definición en las bandas del canto, posiblemente debido a una ganancia reducida en estas frecuencias, como se observa en los segmentos entre los segundos 0.5 y 1.5. Esto podría explicarse por la mayor sensibilidad del micrófono CMC-9745-44P a las bajas frecuencias, como se muestra en la figura 16, donde el nivel de ganancia a 1 kHz alcanza aproximadamente -34.5 dB, en contraste con el micrófono CME-1538-100LB que registra cerca de -40.9 dB.

El PSD asociado al canto del anfibio mostrado en la figura 24 revela que la grabadora AudioMoth registra una ganancia considerablemente más alta en el rango de frecuencias de 9 kHz a 14 kHz. Este incremento corresponde con un segmento distintivo del canto que fue capturado en el espectrograma de la figura 22, en el cual se aprecian líneas paralelas que se asemejan a la huella sonora principal y que podrían ser interpretadas como parte del canto característico de la rana o, alternativamente, como armónicos resultantes de la interacción del sonido con el entorno que rodeaba la grabadora en el momento de la prueba.

VII. CONCLUSIONES

La Raspberry Pi Pico demostró ser una plataforma de desarrollo eficaz para la captura de señales de audio dentro del espectro audible. Su ADC integrado permitió capturar señales de audio a frecuencias de hasta 48 kHz. También el tamaño de su memoria SRAM fue suficiente para realizar el procesamiento y gestión de los datos capturados antes de su almacenamiento en la memoria microSD.

La implementación de la técnica de buffer circular resultó suficiente para la gestión de tareas simultáneas, como la de capturar señales de audio y el registro de datos en la memoria microSD. Lo cual consiguió realizar la transferencia de datos a la memoria sin interrumpir significativamente el muestreo continuo del ADC.

Los micrófonos CMC-9745-44P y CME-1538-100LB teóricamente tienen características iguales, solo difieren ligeramente en términos de sensibilidad. Esta similitud quedó evidenciada en los resultados de la respuesta en frecuencia de ambos micrófonos, ya que fue prácticamente igual. Sin embargo, el micrófono CME-1538-100LB mostró una ganancia ligeramente menor, lo cual se atribuye al acoplamiento realizado entre este micrófono y el preamplificado MAX9814.

El uso del preamplificador MAX9814 mostró ser efectivo para amplificar las señales captadas por los micrófonos. No obstante, este dispositivo por su forma de realizar la amplificación de las señales también incrementó significativamente el ruido de fondo. Dado que es un amplificador de uso general, es decir, no es un amplificador diseñado para tareas como el monitoreo acústico pasivo, se notaron distorsiones tales como la amplificación y compresión de señales en bandas de frecuencias no deseadas. Por consiguiente, para futuras versiones del prototipo, se recomienda considerar alternativas de preamplificación que equilibren la amplificación del sonido deseado y la minimización del ruido.

REFERENCIAS

- [1] J. W. Ribeiro, K. Harmon, G. A. Leite, T. N. de Melo, J. LeBien, and M. Campos-Cerqueira, "Passive Acoustic Monitoring as a Tool to Investigate the Spatial Distribution of Invasive Alien Species," *Remote Sensing* 2022, Vol. 14, Page 4565, vol. 14, no. 18, p. 4565, Sep. 2022, doi: 10.3390/RS14184565.
- [2] J. Diego Tovar García and O. Acevedo-Charry, "Conjunto de datos de monitoreo acústico pasivo en la Reserva Natural Los Yátaros, Gachantivá, Boyacá, Colombia. Dataset of passive acoustic monitoring at the Nature Reserve Los Yátaros, Gachantivá, Boyacá, Colombia," 2021, doi: 10.21068/c2021.v22n01a13.
- [3] B. M. Allan, D. G. Nimmo, D. Ierodiaconou, J. VanDerWal, L. P. Koh, and E. G. Ritchie, "Futurecasting ecological research: the rise of technoecology," *Ecosphere*, vol. 9, no. 5, p. e02163, May 2018, doi: 10.1002/ECS2.2163.
- [4] J. W. Jolles, "Broad-scale applications of the Raspberry Pi: A review and guide for biologists," *Methods Ecol Evol*, vol. 12, no. 9, pp. 1562–1579, Sep. 2021, doi: 10.1111/2041-210X.13652.
- [5] "Buy a Raspberry Pi Pico – Raspberry Pi." Accessed: Dec. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-pico/>
- [6] A. Farina, "Ecoacoustics: A Quantitative Approach to Investigate the Ecological Role of Environmental Sounds," *Mathematics* 2019, Vol. 7, Page 21, vol. 7, no. 1, p. 21, Dec. 2018, doi: 10.3390/MATH7010021.
- [7] L. S. M. Sugai, T. S. F. Silva, J. W. Ribeiro, and D. Llusia, "Terrestrial Passive Acoustic Monitoring: Review and Perspectives," *Bioscience*, vol. 69, no. 1, pp. 15–25, Jan. 2019, doi: 10.1093/BIOSCI/BIY147.
- [8] B. C. Pijanowski *et al.*, "Soundscape Ecology: The Science of Sound in the Landscape," *Bioscience*, vol. 61, no. 3, pp. 203–216, Mar. 2011, doi: 10.1525/BIO.2011.61.3.6.
- [9] I. Melo, D. Llusia, R. P. Bastos, and L. Signorelli, "Active or passive acoustic monitoring? Assessing methods to track anuran communities in tropical savanna wetlands," *Ecol Indic*, vol. 132, p. 108305, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.ECOLIND.2021.108305.
- [10] "e-REdING. Biblioteca de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla." Accessed: Aug. 19, 2023. [Online]. Available:

- <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/11301/fichero/Memoria%252FCap%C3%ADulo+2.pdf>
- [11] “Microcontroller Peripherals.” Accessed: Aug. 19, 2023. [Online]. Available: <https://www.labcenter.com/blog/sim-microcontroller-peripherals/>
- [12] “9 Essential Microcontroller Peripherals Explained – Embedded Inventor.” Accessed: Aug. 19, 2023. [Online]. Available: https://embeddedinventor.com/9-essential-microcontroller-peripherals-explained/#3_Pulse_Width_Modulation_PWM_controllers
- [13] “Raspberry Pi Documentation - RP2040.” Accessed: Aug. 19, 2023. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.com/documentation/microcontrollers/rp2040.html>
- [14] “GitHub - raspberrypi/pico-sdk.” Accessed: Aug. 19, 2023. [Online]. Available: <https://github.com/raspberrypi/pico-sdk>
- [15] “PSoC ® 5LP: CY8C58LP Family Datasheet Programmable System-on-Chip (PSoC ®) General Description”, Accessed: Dec. 16, 2023. [Online]. Available: www.cypress.com
- [16] “Arduino® MEGA 2560 Rev3”.
- [17] A. P. Hill, P. Prince, J. L. Snaddon, C. P. Doncaster, and A. Rogers, “AudioMoth: A low-cost acoustic device for monitoring biodiversity and the environment,” *HardwareX*, vol. 6, p. e00073, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.OHX.2019.E00073.
- [18] “CME-1538-100LB de CUI Devices Hoja de datos | clave digital.” Accessed: Dec. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.digikey.com/en/htmldatasheets/production/749480/0/0/1/cme-1538-100lb>
- [19] “MECHANICAL DRAWING units: mm FREQUENCY RESPONSE CURVE MEASUREMENT CIRCUIT”.
- [20] “Guía de las categorías de velocidad de las tarjetas SD y microSD - Kingston Technology.” Accessed: Dec. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.kingston.com/es/blog/personal-storage/memory-card-speed-classes>
- [21] “MAX9814 - Microphone Amplifier with AGC and Low-Noise Microphone Bias,” 2022, Accessed: Dec. 15, 2023. [Online]. Available: www.analog.com
- [22] “GENERAL DESCRIPTION”.
- [23] “ArmDeveloperEcosystem/microphone-library-for-pico: Capture audio from a microphone on your Raspberry Pi Pico or any RP2040 based board. 🎤.” Accessed: Dec. 15, 2023.

-
- [Online]. Available: <https://github.com/ArmDeveloperEcosystem/microphone-library-for-pico/tree/main#readme>
- [24] “What is a ring buffer? | Redisson.” Accessed: Dec. 15, 2023. [Online]. Available: <https://redisson.org/glossary/ring-buffer.html>
- [25] “carlk3/no-OS-FatFS-SD-SPI-RPi-Pico: A FAT filesystem with SPI driver for SD card on Raspberry Pi Pico.” Accessed: Dec. 15, 2023. [Online]. Available: <https://github.com/carlk3/no-OS-FatFS-SD-SPI-RPi-Pico>
- [26] “Wav (RIFF) File Format Tutorial.” Accessed: Dec. 15, 2023. [Online]. Available: <http://www.topherlee.com/software/pcm-tut-wavformat.html>
- [27] “Replace the MEMS microphone | openacousticdevices.” Accessed: Dec. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.openacousticdevices.info/support/device-support/replace-the-mems-microphone>
- [28] “Zero-Height SiSonic TM Microphone”.
- [29] R. Hui, “Optical amplifiers,” *Introduction to Fiber-Optic Communications*, pp. 155–207, 2020, doi: 10.1016/B978-0-12-805345-4.00005-6.