

Diseño de sistema de diagnóstico de enfermedades auditivas asistido por inteligencia artificial (IA)

Julian David Lagos-Martinez & Mauricio Alejandro Gómez-Figueroa

Universidad Militar Nueva Granada, est.julian.lagos1@unimilitar.edu.co, mauricio.gomez@unimilitar.edu.co

Received: June 28th, 2024. Received in revised form: December 2nd, 2024. Accepted: December 13th, 2024.

Abstract

Audiometry, a crucial technique in hearing evaluation, has been instrumental in diagnosing hearing-related disorders. However, its usefulness has been limited due to the lack of research and innovation in this field. For this reason, we have proposed the design of a portable audiometry system, based on artificial intelligence (IA) parameters, which will provide a pre-diagnosis, with the aim of expanding access to certain vulnerable populations. This design is based on a thorough analysis of the challenges and opportunities associated with the implementation of such a system. In addition to the conceptual design phase, a detailed review of the current landscape of applications of audiometry as a diagnostic method was conducted. This approach encompassed the exploration and presentation of a comprehensive notion, as well as a strategic approach that involved an in-depth analysis of various aspects related to feasibility.

Keywords: audiometry; frequency; intensity; masking.

Design of a system for diagnosis of auditory diseases assisted by artificial intelligence (AI)

Resumen

La audiometría, una técnica crucial en la evaluación auditiva, ha sido fundamental para diagnosticar trastornos relacionados con la audición. Sin embargo, su utilidad se ha visto limitada debido a la falta de investigación e innovación en este campo. Por esta razón, se ha propuesto el diseño de un sistema de audiometría portátil, basado en parámetros de inteligencia artificial (IA), que proporcionará un prediagnóstico, con el objetivo de ampliar el acceso a ciertas poblaciones vulnerables. Este diseño se fundamenta en un análisis exhaustivo de los desafíos y oportunidades asociados con la implementación de dicho sistema. Además de la fase de diseño conceptual, se llevó a cabo una revisión detallada del panorama actual de las aplicaciones de la audiometría como método diagnóstico. Este enfoque abarcó la exploración y presentación de una noción completa, así como un planteamiento estratégico que involucró un análisis profundo de diversos aspectos relacionados con la viabilidad.

Palabras clave: audiometría; frecuencia; intensidad; enmascaramiento.

1. Introducción

La audiometría es crucial para el diagnóstico auditivo, pero enfrenta limitaciones debido a la necesidad de equipos especializados y personal capacitado, lo que resulta costoso y difícil en entornos con recursos limitados. Además, ha habido poca investigación y desarrollo en este campo en comparación con otras tecnologías médicas. Por ello, desarrollar un sistema de audiometría portátil y autónomo surge como una solución efectiva para superar estas barreras, democratizando el acceso a este importante examen auditivo.

Este avance no solo amplía la disponibilidad de la audiometría, sino que también reduce significativamente las barreras económicas y logísticas asociadas con la necesidad de equipos y personal altamente especializado; también como herramienta para potenciar la calidad de vida de aquellos afectados por problemas de audición. De acuerdo con la Encuesta Nacional de Calidad de Vida realizada por el DANE, para el año 2021 en Colombia 459.784 personas se autocalifican como una persona con algún nivel de discapacidad auditiva. ante esto cabe recalcar ciertas patologías que más relación tienen en la pérdida auditiva

How to cite: Lagos, J., and Gómez, M., Diseño de sistema de diagnóstico de enfermedades auditivas (IA). DYNA, 92(235), pp. 181-189, January - March, 2025.

Universidad Nacional de Colombia.

Revista DYNA, 92(235), pp. 181-189, January - March, 2025, ISSN 0012-7353

DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v92n235.115387>

como la otosclerosis que llega a afectar alrededor de tres millones de personas en Estados Unidos [2] y el neuroma acústico que es una enfermedad progresiva que afecta a 1 de cada 100 000 personas en el mundo [3]. El diseño y desarrollo de un sistema de audiometría portátil exige un enfoque multidisciplinario y meticuloso. Requiere la integración de tecnologías de detección y procesamiento de señales de audio de alta precisión, así como la implementación de algoritmos y técnicas de análisis avanzadas. Es imperativo que este sistema garantice resultados fiables y precisos, equivalentes a los obtenidos mediante equipos convencionales. Además, la portabilidad del sistema abre nuevas posibilidades en términos de alcance y aplicación. No solo se contempla su implementación en entornos clínicos, sino también su utilización en ambientes comunitarios, entornos escolares y en el campo de la telemedicina. Este avance tiene el potencial de revolucionar la forma en que se aborda el diagnóstico de trastornos auditivos, al permitir una detección temprana y un monitoreo más frecuente y accesible. Bajo esta premisa el objetivo general de este proyecto es desarrollar un sistema de audiometría portátil que sea viable y realista, con el fin de mejorar el acceso a la audiometría y la calidad de vida de las personas con problemas de audición. Para lograrlo, se plantean realizar una revisión literaria para evaluar la funcionalidad y aplicaciones de la técnica en diversos escenarios, diseñar una interfaz de usuario amigable basada en un sistema de evaluación por parámetros mediante IA, y crear un asistente basado en una API para brindar seguimiento y asesoramiento a los pacientes después de un examen. Ante esto es necesario hacer un hincapié en el cuadro clínico para comprender de mejor manera ciertas patologías que se pueden diagnosticar con la audiometría, para saber el impacto que puede tener sobre la vida de las personas que padecen dichas enfermedades un diagnóstico temprano y oportuno.

1.1 Cuadro clínico (neuroma acústico)

Un neuroma acústico, o "schwannoma vestibular," es un tumor benigno y de crecimiento lento que rodea el nervio vestibular que se extiende desde el oído interno hasta el cerebro [4]. Para diagnosticarlo, se puede usar un audiograma, donde un audiólogo presenta sonidos de diversos tonos al paciente, quien indica cuándo los escucha [5]. Los factores de riesgo incluyen la neurofibromatosis tipo 2, que causa tumores benignos en los nervios de equilibrio y audición tanto en la cabeza como en otros nervios. Las complicaciones del neuroma acústico incluyen pérdida auditiva, problemas de equilibrio y tinnitus [6].

1.2 Cuadro clínico (otosclerosis)

La otosclerosis es una enfermedad del oído caracterizada por el crecimiento anormal de hueso en el oído medio. Esto puede afectar la movilidad de los huesecillos del oído (martillo, yunque y estribo), lo que a su vez puede conducir a la pérdida auditiva. Esta enfermedad puede causar una disminución gradual de la capacidad auditiva y, en algunos casos, puede provocar sordera. Los síntomas incluyen pérdida auditiva progresiva, zumbidos en los oídos (tinnitus)

y, en algunos casos, mareos. La resonancia magnética puede ser un método de diagnóstico de la otosclerosis, pero al ser más compleja su tecnología, implementación y el personal que requiere para su funcionamiento suele ser con bastante diferencia más caro que otras alternativas de diagnóstico [8].

2.1.1 Análisis de diagnóstico por RM (otoesclerosis)

El estudio imagenológico es necesario cuando el cuadro clínico no es evidente y para excluir otras enfermedades que puedan parecer otosclerosis. Además, proporciona un detalle anatómico del oído útil para futuros tratamientos. Los hallazgos incluyen un foco lítico (destrucción de un área de un hueso debida a una enfermedad) en la esquina superior de la ventana oval como signo temprano de la enfermedad, que luego se extiende alrededor de las ventanas oval, en la fase crónica, aparecen zonas de calcificación. La otosclerosis fenestral obliterante es la obliteración completa de la ventana oval; Si el estudio imagenológico es negativo se debe evaluar la cadena de huesecillos para descartar lesiones congénitas o un proceso inflamatorio que explique la hipoacusia de conducción (lesiones impiden que el sonido sea conducido de manera eficaz al oído interno). Se ha demostrado que la resonancia magnética (RM) es menos sensible que la tomografía computarizada (TAC) en estos escenarios. La RM es útil para evaluar la permeabilidad de la cóclea antes de un implante coclear, aunque no es el método diagnóstico convencional. Durante el seguimiento postoperatorio, se puede usar TCMD o RM según la sospecha clínica [8]. Para personas con otosclerosis, los implantes cocleares son comunes, pero las RM pueden causar desplazamiento del dispositivo debido a los campos magnéticos intensos, lo que podría requerir cirugía para corregirlo. Por esto, el audiograma es una opción inicial factible y debe ser profundizada como técnica.

1.3 Audiograma

Un audiograma funciona como una gráfica que representa la capacidad auditiva de un individuo. En ella se muestran los niveles mínimos de sonido (umbrales) que la persona puede detectar en diferentes frecuencias. El umbral de audición marca el límite inferior de intensidad sonora que una persona puede percibir. A partir de este punto, los sonidos más suaves se vuelven inaudibles. El audiograma se crea a partir de los resultados de una prueba de tonos puros, también conocida como audiometría de tonos puros, que mide la capacidad auditiva a frecuencias específicas [11].

El audiograma se compone de dos ejes principales: el vertical y el horizontal. El eje vertical representa la intensidad del sonido, medida en decibelios (dB). Cuanto más abajo se ubique un punto en este eje, mayor será la intensidad del sonido, similar a subir el volumen de un dispositivo. En el extremo superior del eje se encuentra el decibelio cero, que representa el sonido más suave que el oído humano promedio puede detectar. El eje horizontal representa la frecuencia del sonido, medida en hercios (Hz). Esta frecuencia aumenta progresivamente a medida que se avanza hacia la derecha del eje. Las frecuencias más bajas se encuentran en el lado izquierdo del audiograma, mientras que las más altas se sitúan en el lado derecho.

1.3.1 Interpretación de resultados pacientes con afecciones auditivas

En la interpretación de una audiometría se deben considerar variables como los umbrales auditivos para medir la función auditiva del paciente, comparando umbrales de ambas vías auditivas. Las gráficas de audiometría muestran frecuencias en el eje horizontal e intensidad en el eje vertical, formando la curva audiométrica. Las hipoacusias se clasifican según su localización anatómica:

Hipoacusias de transmisión: Problemas en la transmisión del sonido desde el oído externo al interno, afectando principalmente el oído medio. En la audiometría, la vía ósea es horizontal (0-20 dB) y la vía aérea desciende más de 30 dB en tres o más frecuencias consecutivas [8].

Hipoacusias neurosensoriales: Pérdida auditiva en el oído interno o en las vías nerviosas hacia el cerebro, ya sea congénita o adquirida. En la audiometría, ambas curvas (ósea y aérea) permanecen juntas y paralelas, pero la vía ósea desciende por debajo de los 20 dB.

Para enriquecer la credibilidad y comprensión de la audiometría, es esencial explorar su trayectoria histórica y resaltar su utilidad a lo largo del tiempo. A continuación, se presentan antecedentes que ilustran la versatilidad y relevancia de esta técnica en el ámbito de la salud auditiva:

1.4 Antecedentes

En 2013, un estudio del ISSSTE evaluó la efectividad del audiograma prequirúrgico en pacientes programados para cirugía del estribo por otosclerosis. La audiometría generalmente revela hipoacusia conductiva, clave para el diagnóstico. A medida que la enfermedad avanza, se observa una creciente separación entre la vía aérea y la vía ósea, especialmente en bajas frecuencias, con un GAP aéreo-óseo que puede llegar a 50 dB. El "nicho de Carhart" es una caída en la conducción ósea a 2 kHz, indicativo de otosclerosis. La audiometría confirma hipoacusia conductiva o mixta, determina el grado de lesión coclear y la amplitud del Rinne audiométrico, influenciando la posibilidad de recuperación tras la cirugía. El tratamiento es principalmente quirúrgico y es exitoso en 75-90% de los casos, logrando un cierre de 10 dB [11].

Los resultados del estudio mostraron las siguientes curvas audiométricas prequirúrgicas: 161 tipo Bezold, 83 con nicho de Carhart, 37 tipo Lermoyes y 4 tipo Manasse. El GAP prequirúrgico fue de 34.2 dB en el oído derecho (15-60 dB) y de 23 dB en el izquierdo (15-50 dB). Hubo mejoría de la vía ósea en 13 casos (6.4%). Las características de los pacientes, la experiencia quirúrgica y los hallazgos intraoperatorios son factores clave en los resultados audiométricos. Se recomienda realizar el procedimiento de manera bilateral, ya que la audición binaural mejora la localización espacial de los sonidos y la extracción de señales en ambientes ruidosos.

VirtualEar, un sistema diseñado por la Escuela de Ingeniería de Antioquía en 2006 sobre la plataforma LabVIEW 7.1, realiza evaluaciones de la capacidad

auditiva. Para ello, emplea una prueba de audiometría aérea con enmascaramiento, la cual permite detectar la audición cruzada. Esta prueba utiliza tonos puros en frecuencias audibles (de 125 Hz a 8000 Hz) y una intensidad de presión sonora variable que va desde 0 dB hasta 110 dB, el enmascaramiento envía ruido blanco al oído opuesto del evaluado. Los umbrales de presión sonora mínima son detectados por VirtualEar permiten la creación y el almacenamiento de información en tablas, gráficos y reportes, así como la gestión de los archivos de cada paciente y la impresión de los resultados [12].

El sistema de control y funcionamiento del audiómetro VirtualEar permite que el operario del equipo vea las variables de frecuencia e intensidad de cualquier sonido que se emita durante la prueba.

En 2017, la Sociedad Gallega de Otorrinolaringología (SCORL) presentó un estudio sobre casos de sordera neurosensorial en niños con anemia hemolítica. A través de audiometrías, se reveló sordera neurosensorial bilateral en cada paciente. Un caso específico de un niño de 4 años mostró una "curva en forma de barco" en su audiograma. Los potenciales evocados auditivos del tronco cerebral (PEATC) demostraron una onda V de hasta 60 dB en el oído derecho y hasta 80 dB en el izquierdo. El paciente fue rehabilitado con audífonos convencionales en ambos oídos, lo que mejoró su desarrollo del lenguaje y comportamiento [13].

Tabla 1
Ventaja y desventajas de la audiometría

Ventajas	Desventajas
Una de las principales ventajas de digitalizar una audiometría es el ahorro de costes, utilizando las soluciones TIC, ya que resulta ser una solución más productiva, económica y segura.	Al no tratarse de una prueba auditiva peligrosa, no se conocen riesgos que puedan afectar directamente a la salud del oído del paciente
Someterse a revisiones auditivas, es que éstas ayudan a Detectar la Pérdida Auditiva. Al ser capaz de diagnosticarse de manera precoz, se puede frenar su avance a tiempo y mantener una pérdida de audición leve sin que llegue a ser pronunciada.	Posible es un mal diagnóstico, por eso se recomienda acudir siempre a un especialista en la salud auditiva para que delimite con garantías los resultados de dichas pruebas
Permiten hacer un Seguimiento más exhaustivo de la Capacidad Auditiva de cada persona. A partir de los 50 años, inevitablemente ésta comienza a mermar	Al ser un dispositivo de bajo riesgo el mantenimiento suele ser poco frecuente por lo que la variación del porcentaje de error en cada prueba puede variar
La obtención de datos consolidados en Formato digital, fácilmente transmisibles a otros dispositivos y conectados a internet, que permite poder consultarlos cuando se desee	Es susceptible a interferencias del exterior por lo que debe realizarse bajo ciertos estándares clínicos
Mejoran la eficiencia y productividad del personal sanitario. Por esta razón, es recomendable que el especialista trabaje con un dispositivo que permita la realización	Al no tratarse de una prueba más invasiva o que permita al operador indagar más a fondo en el sistema auditivo es una primera opción para el diagnóstico de enfermedades auditivas, pero tampoco la definitiva

Fuente: Autoría propia

Después de llevar a cabo una revisión exhaustiva del estado actual de la audiometría, se procedió a realizar una evaluación detallada, revisando tanto sus ventajas como sus limitaciones. A continuación, se presenta un resumen de estos aspectos, como se observa en la Tabla 1.

2. Métodos

Para implementar una red neuronal, es esencial contar con una base de datos para su entrenamiento. Dado que no se disponía de una base de datos de audiometría, se diseñó un código en Matlab para simular una utilizando patrones de distintos tipos de hipoacusia proporcionados por el acta de otorrinolaringología gallega [8].

- **Parámetros Generales:** Se establecen el número total de pacientes (num_pacientes) y una lista de frecuencias auditivas en Hz (frecuencias).
 - **Inicialización de la Matriz de Datos:** Se crea una matriz base_de_datos para almacenar los datos de los audiogramas, inicializada con ceros y con dimensiones (num_pacientes, longitud de frecuencias).
 - **Inicialización de la Matriz de Estado de Audición:** Se crea una matriz de celdas estado_audicion para almacenar el estado de audición de cada paciente.
 - **Simulación de Audiogramas para Cada Paciente:** Se utiliza un bucle for para iterar sobre cada paciente, generando aleatoriamente diferentes tipos de hipoacusia y ajustando los umbrales auditivos en función de estos tipos. Los umbrales se almacenan en base_de_datos y el estado de audición en estado_audicion.
 - **Creación de una Tabla de Datos:** Se convierten los nombres de las frecuencias auditivas en una matriz de caracteres y se crea una tabla de datos (tabla_datos) utilizando la matriz de audiogramas y la matriz de estado de audición, agregando una columna adicional para el estado de audición.
 - **Guardado de la Tabla en un Archivo Excel:** Se guarda la tabla de datos en un archivo Excel con el nombre especificado en la variable nombre_archivo.
- Luego de ya tener la base de datos por medio del código anteriormente expuesto, es necesario el diseño de un modelo de red neuronal utilizando TensorFlow y Keras esto en el lenguaje de programación Python, para clasificar tipos de audición basados en datos de audiogramas simulados.
- **Importación de Bibliotecas:** Se importan las bibliotecas necesarias como NumPy, Pandas, TensorFlow y otras relacionadas.
 - **Carga de Datos:** Se carga un conjunto de datos desde un archivo Excel llamado 'audiogramas_simulados_con_tipos_corregido.xlsx' utilizando pd.read_excel() de Pandas.
 - **Diseño del Modelo con Keras:** Se añade una capa densa con 10 neuronas y activación 'relu', que espera una entrada de tamaño 6 (el número de características de los datos). La capa de salida tiene 3 neuronas con activación 'softmax', correspondiente a las tres clases de tipos de audición.
 - **Compilación del Modelo:** Se compila el modelo especificando la función de pérdida

categorical_crossentropy, el optimizador adam y la métrica accuracy.

- **Entrenamiento del Modelo:** Se entrena el modelo con el método fit(), especificando el conjunto de entrenamiento, número de épocas, tamaño del lote, y datos de validación. Se muestra una barra de progreso durante el entrenamiento (verbose=1).
- **Guardado del Modelo:** Una vez entrenado, el modelo se guarda en un archivo 'modelo_audiometria_multiclase2.h5' utilizando el método save() de Keras. Este archivo contiene la arquitectura del modelo, los pesos y configuraciones de entrenamiento.

Este código realiza varias tareas relacionadas con la predicción del tipo de audiometría de un usuario y la generación de recomendaciones personalizadas para mejorar la salud auditiva. Aquí está la explicación detallada del código:

- **Carga del Modelo Entrenado:** Utiliza la función load_model() de Keras para cargar un modelo de clasificación de audiometría preentrenado desde un archivo .h5.
- **Definición de Nuevos Datos de Audiometría:** Crea un DataFrame de Pandas con valores de frecuencia auditiva arbitrarios para un nuevo conjunto de datos de audiometría.
- **Predicción del Tipo de Audiometría:** Utiliza el modelo cargado para predecir el tipo de audiometría basado en los nuevos datos, calculando las probabilidades de cada clase y determinando la clase predicha con np.argmax().
- **Asignación de Nombres a las Clases Predichas:** Asigna un nombre descriptivo a la clase predicha para proporcionar una etiqueta legible del tipo de audiometría.
- **Configuración de la Clave de API de OpenAI:** Establece la clave de API de OpenAI para utilizar los servicios de generación de texto (GPT-4).
- **Definición del Prompt para Generación de Texto:** Crea un prompt con la información del tipo de audiometría predicha para generar recomendaciones personalizadas con GPT-4.
- **Solicitud de Generación de Texto a GPT-4:** Utiliza la función openai.Completion.create() para solicitar a GPT-4 que genere recomendaciones basadas en el prompt definido, especificando el motor (gpt-3.5-turbo) y ajustando el número máximo de tokens.

Tras alcanzar este punto, se ha desarrollado una interfaz gráfica en Python como se puede ver en la Fig. 1, usando la biblioteca Tkinter para facilitar la generación de tonos para audiometrías. Esta interfaz permite ajustar las frecuencias de los tonos según las necesidades del profesional, proporcionando una plataforma intuitiva para seleccionar y ajustar diferentes frecuencias de manera rápida y fácil. Además de generar tonos de diferentes frecuencias, la interfaz puede controlar el volumen de los tonos, la duración de cada prueba auditiva y presentar los resultados de manera clara y concisa.



Figura 1. Interfaz de usuario
Fuente. Autoría propia



Figura 2. Adaptador RCA A BNC
Fuente. Autoría propia

Para evaluar la funcionalidad de la interfaz en la generación de tonos en diversas frecuencias, se empleó un osciloscopio TEKTRONIX tbs1102b-edu como se evidencia en la Fig. 3, para visualizar las señales resultantes. Además, se utilizó un adaptador RCA a BNC como se puede observar en la Fig. 2, para garantizar una señal más limpia, evitando la necesidad de utilizar un dispositivo embebido adicional

También se dispuso de realizar un análisis de armónicos. Los armónicos de una señal son componentes frecuenciales que tienen una relación entera con la frecuencia fundamental de esa señal. Cuando una onda no es puramente sinusoidal, sino que tiene formas de onda más complejas, como cuadradas o triangulares, se generan armónicos. Estos armónicos constituyen múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. Por ejemplo, si la frecuencia base es 100 Hz, los armónicos serán a 200 Hz (2° armónico), 300 Hz (3° armónico), 400 Hz (4° armónico), y así sucesivamente. Los armónicos pueden ser importantes en diversas aplicaciones, como en la música, la electrónica de potencia y la comunicación, entre otros campos. En música, los armónicos dan forma al timbre de un sonido, mientras que, en electrónica de potencia, pueden causar distorsiones no deseadas en la forma de onda de una señal eléctrica. Para esto se usó el osciloscopio TEKTRONIX tbs1102b-edu, que es capaz de realizar la FFT con cualquier señal.

Posterior a esto se evaluará la capacidad de la IA para predecir el tipo de acúscia que tiene el paciente, en tres escenarios como se evidencia Tabla 2 y Tabla 3.

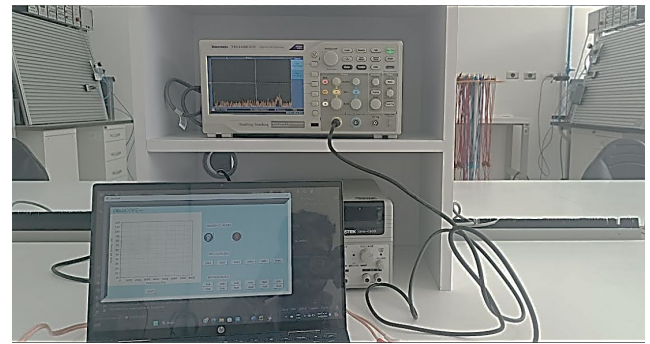


Figura 3. Osciloscopio TEKTRONIX tbs1102b-edu 99B
Fuente. Autoría propia

Tabla 2.
Valores oído izquierdo.

Normoacusia	Hipoacusia de leve transmisión	Hipoacusia moderada neurosensorial
250Hz(14dB)	250Hz(27dB)	250Hz(40dB)
500Hz(15dB)	500Hz(29dB)	500Hz(45dB)
1000Hz(16dB)	1000Hz(30dB)	1000Hz(50dB)
2000Hz(17dB)	2000Hz(37dB)	2000Hz(55dB)
4000Hz(21dB)	4000Hz(22dB)	4000Hz(60dB)
8000Hz(22dB)	8000Hz(28dB)	8000Hz(65dB)

Fuente: Autoría propia.

Tabla 3.
Valores oído derecho.

Normoacusia	Hipoacusia de leve transmisión	Hipoacusia moderada neurosensorial
250Hz(14dB)	250Hz(22dB)	250Hz(22dB)
500Hz(18dB)	500Hz(27dB)	500Hz(34dB)
1000Hz(19dB)	1000Hz(32dB)	1000Hz(37dB)
2000Hz(22dB)	2000Hz(35dB)	2000Hz(42dB)
4000Hz(22dB)	4000Hz(26dB)	4000Hz(55dB)
8000Hz(24dB)	8000Hz(22dB)	8000Hz(70dB)

Fuente: Autoría propia.

Para el caso de la API se copiará únicamente la respuesta dada para cada escenario ya que al ser tan larga no se logra visualizar en la interfaz.

3. Resultados

3.1 Resultados frecuencias y voltajes

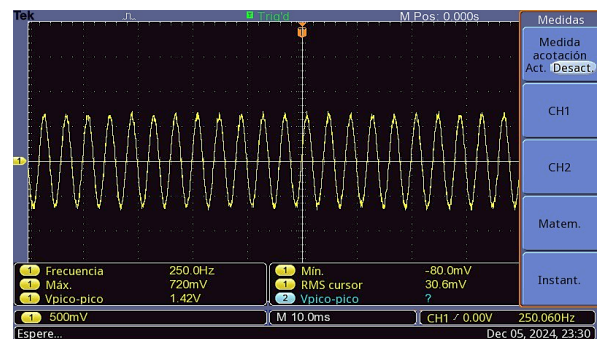


Figura 4. Adquisición de datos 250 Hz
Fuente. Autoría propia

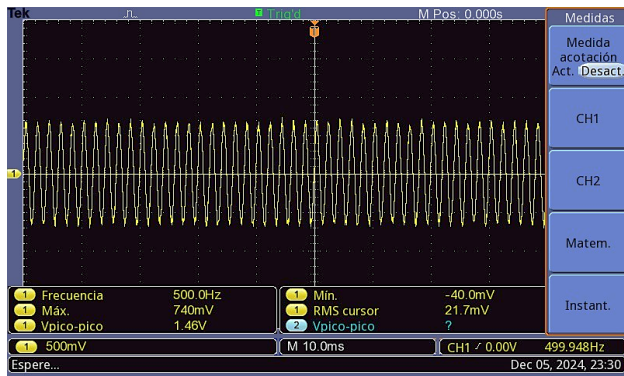


Figura 5. Adquisición de datos 500 Hz
Fuente. Autoría propia

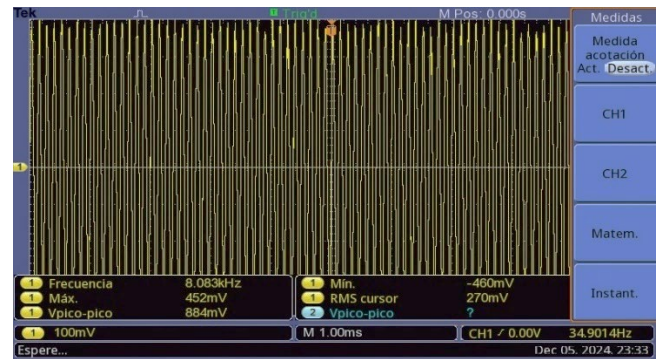


Figura 9. Adquisición de datos 8000 Hz
Fuente. Autoría propia

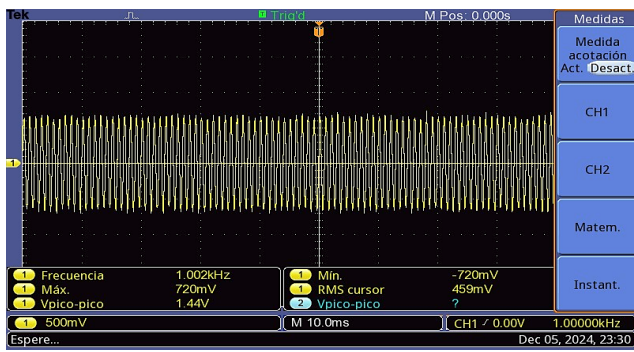


Figura 6. Adquisición de datos 1000 Hz
Fuente. Autoría propia

3.2 Resultados armónicos

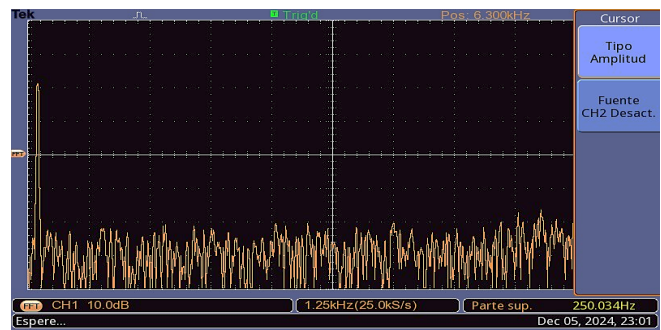


Figura 10. Armónico 250 Hz
Fuente. Autoría propia

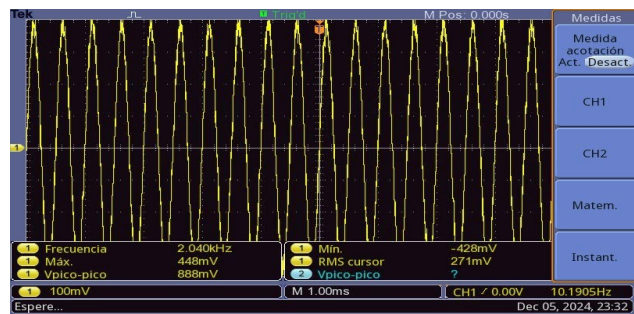


Figura 7. Adquisición de datos 2000 Hz
Fuente. Autoría propia

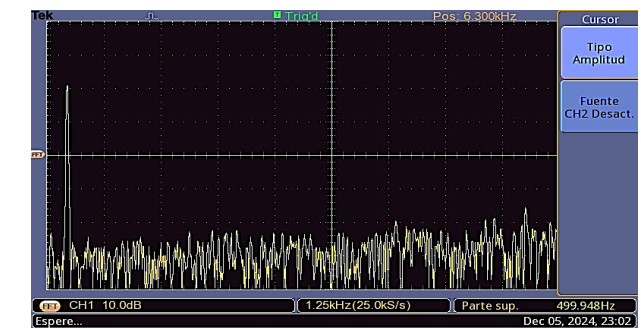


Figura 11. Armónico 500 Hz
Fuente. Autoría propia

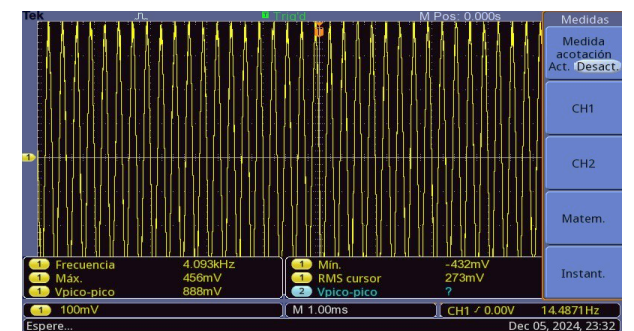


Figura 8. Adquisición de datos 4000 Hz
Fuente. Autoría propia

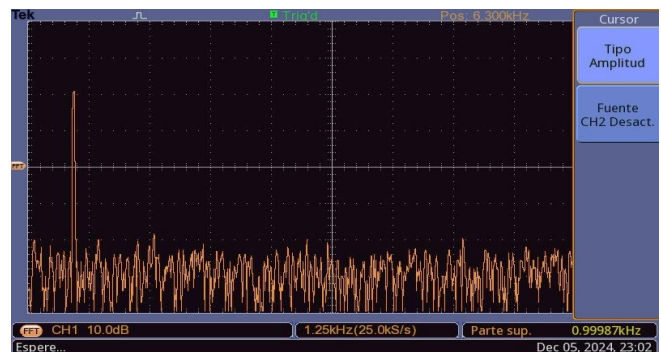


Figura 12. armónico 1000 Hz
Fuente. Autoría propia

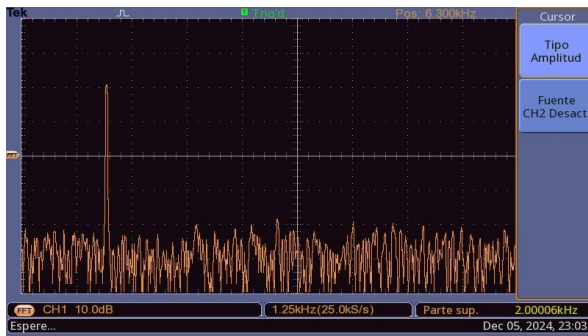


Figura 13. armónico 2000 Hz
Fuente. Autoría propia

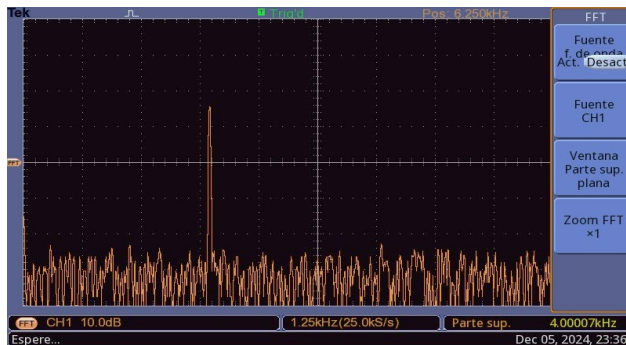


Figura 14. armónico 4000 Hz
Fuente. Autoría propia

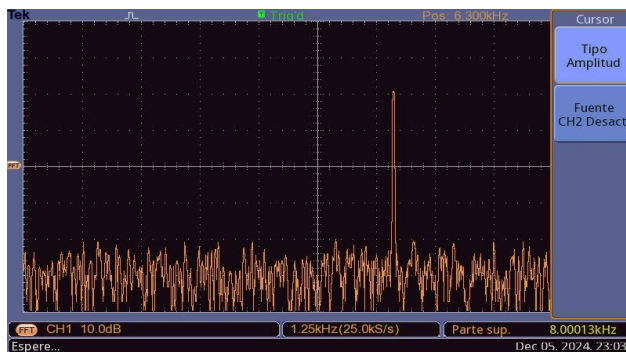


Figura 15. Armónico 8000 Hz
Fuente. Autoría propia

3.3 Resultados diagnostico IA

```
1/1 [=====] - 0s 83ms/step
Probabilidades de clases: [[3.8720050e-20 1.0000000e+00 3.7065142e-24]]
Clases predichas: [1] normacusia
```

Figura 16. Escenario 1 normoacusia
Fuente. Autoría propia

```
1/1 [=====] - 0s 75ms/step
Probabilidades de clases: [[3.8720050e-20 1.0000000e+00 5.5434214e-08]]
Clases predichas: [2] Hipoacusia Leve de Transmisión
```

Figura 17 Escenario 2 hipoacusia de leve transmisión
Fuente. Autoría propia

```
1/1 [=====] - 0s 147ms/step
Probabilidades de clases: [[0.0000000e+00 1.2241879e-04 9.9987757e-01]]
Clases predichas: [3] Hipoacusia Moderada Neurosensorial
```

Figura 18. Escenario 3 hipoacusia moderada neurosensorial
Fuente. Autoría propia

3.4 Resultados API

3.4.1 escenario 1 normacusia

Recommendations APPI=¡Hola! Si has recibido el diagnóstico de normacusia, significa que tu audición se encuentra dentro de los límites normales. ¡Felicidades! Es importante continuar cuidando tu audición para mantenerla en óptimas condiciones a lo largo del tiempo. Aquí tienes algunas recomendaciones para ayudarte a preservar tu salud auditiva:

Protege tus oídos del ruido excesivo: Aunque tu audición esté en buen estado, es importante proteger tus oídos del ruido fuerte y prolongado. Usa protectores auditivos en situaciones ruidosas, como conciertos, eventos deportivos o al trabajar con maquinaria ruidosa.

Mantén un volumen seguro: Al escuchar música con auriculares o en sistemas de sonido, ajusta el volumen a un nivel seguro. Evita escuchar música a un volumen muy alto durante períodos prolongados, ya que esto puede causar daño auditivo con el tiempo.

Hazte chequeos auditivos regulares: Aunque tu audición esté bien en este momento, es importante hacerse chequeos auditivos periódicos. Esto ayuda a detectar cualquier cambio en tu audición de manera temprana y tomar medidas preventivas si es necesario.

3.4.2 escenario 2 hipoacusia de leve transmisión

Recommendations APPI= ¡Hola!, dados los datos del audiograma proporcionados, esta pérdida auditiva parece ser de leve a moderada en las frecuencias de 250 Hz a 4000 Hz, con una pérdida auditiva moderada en la frecuencia de 8000 Hz. Una recomendación inicial sería que este paciente consulte a un otorrinolaringólogo o a un audiólogo para un diagnóstico completo y una evaluación más detallada de su audición. Dependiendo de los resultados de esa evaluación y de los factores individuales del paciente, se podrían explorar opciones de tratamiento como audífonos, terapia auditiva, o intervenciones médicas si es necesario. En resumen, la recomendación sería buscar atención médica especializada para una evaluación completa y un plan de tratamiento personalizado.

3.4.3 escenario 3 hipoacusia neurosensorial

Recommendations APPI=¡Hola! Si has sido diagnosticado con hipoacusia neurosensorial, es importante tomar medidas para proteger tu audición restante y mejorar tu calidad de vida. Aquí tienes algunas recomendaciones para ayudarte a enfrentar los desafíos asociados con esta condición:

- Consulta a un especialista en audición: Es fundamental consultar a un otorrinolaringólogo o a un audiólogo para

obtener un diagnóstico preciso y recibir información sobre los tratamientos disponibles.

- Considera el uso de dispositivos auditivos: Los dispositivos auditivos, como los audífonos o los implantes cocleares, pueden mejorar significativamente la calidad de vida y la capacidad auditiva dependiendo del grado de pérdida auditiva. Un audiólogo puede ayudarte a encontrar el dispositivo más adecuado para tus necesidades.
- Aprende técnicas de comunicación: Amplía tus opciones de comunicación para superar las barreras en entornos desafiantes. Explora alternativas como el lenguaje de señas, la lectura de labios o aplicaciones de transcripción en tiempo real, que te permitirán mantener una comunicación fluida incluso en lugares ruidosos o con dificultades auditivas.
- Evita la exposición a ruidos fuertes: La hipoacusia neurosensorial puede hacer que seas más susceptible a los daños por ruido. Por lo tanto, es importante evitar la exposición a ruidos fuertes y utilizar protectores auditivos en situaciones ruidosas para proteger la audición restante.

4. Discusion y conclusiones

Teniendo los resultados anteriores es necesario recalcar como en el apartado de generación de tonos, la interfaz logro generar cada uno de los 6 tonos con gran precisión como se logra observar en las Figs. 4-9, ya que las frecuencias son las que se esperaban en un inicio. Se encontró que las frecuencias utilizadas en la interfaz estaban en general en línea con los estándares reconocidos. En el estudio de los armónicos es necesario recalcar que la señal original es una onda sinusoidal, se identificaron los picos en el espectro de frecuencia correspondientes a los tonos fundamentales y sus armónicos en las frecuencias de interés, la aplicación de la FFT en el análisis de señales de audiometría permitió identificar con precisión los tonos fundamentales y sus armónicos en las frecuencias evaluadas. Los resultados obtenidos proporcionan información valiosa sobre la composición espectral de los tonos audibles en cada frecuencia como se evidencia en las Figs. 10-15, lo que puede ser relevante para la evaluación y diagnóstico de la audición en pacientes. Este enfoque analítico podría ser útil en la calibración y ajuste de audiómetros, así como en la investigación de trastornos auditivos y la evaluación de la eficacia de tratamientos auditivos.

Basándonos en las predicciones proporcionadas por el modelo de IA en los tres escenarios evaluados, el modelo de IA muestra una alta precisión como se logra observar en la Fig. 16 para normoacusia, en la Fig. 17 para hipoacusia de leve transmisión, y en la Fig. 18 para hipoacusia moderada neurosensorial. Sin embargo, es necesario mejorar su entrenamiento y realizar pruebas exhaustivas para validar su utilidad clínica. La robustez del modelo depende de su capacidad para generar predicciones precisas y consistentes en diversas condiciones. Los resultados son prometedores,

pero es esencial seguir refinándolo mediante entrenamiento y validación continuos. Para garantizar su fiabilidad en aplicaciones clínicas, se requiere una evaluación exhaustiva en diferentes situaciones clínicas y con diversos conjuntos de datos. Además, es fundamental considerar la interpretación y aplicación ética de las predicciones del modelo en la práctica médica y su incorporación a la toma de decisiones clínicas. Las recomendaciones proporcionadas por la API demostraron un nivel notable de precisión y utilidad en el contexto evaluado. Sin embargo, es fundamental tener en cuenta ciertos aspectos adicionales que influyen en su implementación efectiva. Es relevante recordar que el acceso y uso de una API conllevan un costo asociado, ya sea en términos de licencias de software, tarifas de suscripción o consumo de recursos computacionales. Por lo tanto, aquellos que consideren integrar esta API en sus sistemas o aplicaciones deben evaluar cuidadosamente cuántos tokens desean generar para obtener respuestas de la misma. Esta consideración financiera es crucial para garantizar una implementación sostenible y rentable a largo plazo. Al proporcionar recomendaciones preventivas, la API no solo contribuye a mejorar la conciencia y la educación auditiva, sino que también puede ayudar a reducir la incidencia de enfermedades auditivas.

Referencias

- [1] Bahamon, T., Rehabilitación auditiva en Colombia, un problema de salud pública con poca escucha. Periódico UNAL [Online]. 2023. [fecha de consulta 10 de abril de 2024]. Disponible en: <https://periodico.unal.edu.co/articulos/rehabilitacion-auditiva-en-colombia-un-problema-de-salud-publica-con-poca-escucha>
- [2] Taha, A., Otosclerosis. msdmanuals (msdmanuals 2024), Vanderbilt, Tennessee, [online]. 2024. Available at: <https://www.msdmanuals.com/es/professional/trastornos-otorrinolaringologicos/trastornos-del-oido-medio-y-la-membrana-timpica/otosclerosis>
- [3] Cleveland Clinic medical professional. Acoustic Neuroma (Vestibular Schwannoma). (Cleveland Clinic 2023), Cleveland, Ohio, [online]. 2023. Available at: <https://my.clevelandclinic.org/health/diseases/16400-acoustic-neuroma>
- [4] Mayo Clinic. Neurinoma del acústico - Síntomas y causas. (Mayo Clinic 2023). Jacksonville, Florida, [online]. 2023. Available at: <https://www.mayoclinic.org/es-es/diseases-conditions/acoustic-neuroma/symptoms-causes/syc-20356127>
- [5] Mayo Clinic. Neurinoma del acústico - Diagnóstico y tratamiento. (Mayo Clinic 2023). Jacksonville, Florida, [online]. 2023. Available at: <https://www.mayoclinic.org/es-es/diseases-conditions/acoustic-neuroma/diagnosis-treatment/drc-20356132>
- [6] Vazques, S., Neurinoma del acústico: síntomas, tratamiento y complicaciones. Barnaclinic Grup Hospital Clinic. (Barcelona 2022), Barcelona, Anzoátegui. [online]. 2022. Available at: <https://www.barnaclinic.com/blog/rehabilitacion/neurinoma-del-acustico/>
- [7] Miranda, G., Otosclerosis: análisis imagenológico con tomografía computada multicorte. Centro de Imagenología HCUCh. [Online]. 17, pp. 356-359, [fecha de consulta 12 de abril de 2023]. Disponible en: <https://www.redclinica.cl/Portals/0/Users/014/14/14/Publicaciones/Revista/otosclerosis.pdf>
- [8] Gredilla, J., Mancheño, M., Guinea, L., Arévalo, S., y Báez, N., Actualización en el diagnóstico radiológico de la otosclerosis, Sociedad Española de Radiología Médica, 58(4), pp. 246-256, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rx.2016.04.008>

- [9] Cochlear, Precauciones en resonancia magnética con implante auditivo (Cochlear 2021). [online]. Colombia 2021. Available at: <https://escucharahoraysiempre.com/blog2/resonancia-magnetica-con-implante-coclear/>
- [10] Lewy, A., and Shapiro, S., Functional examination hearing. Arch Otolaryngol, 41(3), pp. 220-240, 1945. DOI: <https://doi.org/10.1001/archotol.1945.00680030246012>
- [11] Gimeno, A., Audiograma – ¿Qué es un audiograma y cómo se interpreta?, hear-it.org., Alicante, [online]. 2023. Available at: <https://www.hear-it.org/es/Audiograma-3>
- [12] Ortiz, G., Vélez, A., Vanegas, Z., y Correa, J., VirtualEar: diseño y construcción de un audiómetro virtual, Revista Ingeniería Biomédica EIA-CES. [Online]. 1(1), [fecha de consulta 12 de abril de 2023]. Disponible en: https://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-97622007000100011&lng=en&tlng=
- [13] Gonçalo, J., Nóbrega, P., and Santos, M., Surdez sensorineural em crianças com anemia hemolítica. Acta Otorrinolaringológica Gallega, [Online]. 10, pp. 68-73, 2017. [fecha de consulta 25 de abril de 2024]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6121201.pdf>

J.D. Lagos, es estudiante de Ingeniería Biomédica en la Universidad Militar Nueva Granada - campus Cajicá.
ORCID: 0009-0006-9891-0337

M.A. Gomez, es MSc. en Administración de Empresas con énfasis en innovación y prospectiva tecnológica de la Universidad Externado de Colombia, en 2021. Esp. en Bioingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, en 2010. Es Ing. Electrónico de la F. Universitaria Los Libertadores, en 2008 y Profesional en Finanzas y Negocios Internacionales por la Universitaria del Área Andina, en 2024. ORCID: 0000-0002-0253-8379.