



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

MEDICIÓN DEL UMBRAL DE AUDICIÓN EN BAJAS
FRECUENCIAS E INFRASONIDO

AUTOR

Marco Stalin Carrillo Guamán

AÑO

2018



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

MEDICIÓN DEL UMBRAL DE AUDICIÓN EN BAJAS FRECUENCIAS E
INFRASONIDO

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniero en Sonido y
Acústica

Profesor Guía

Dr. Carlos Andrés Jurado Orellana

Autor

Marco Stalin Carrillo Guamán

Año

2018

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido el trabajo, MEDICIÓN DEL UMBRAL DE AUDICIÓN EN BAJAS FRECUENCIAS E INFRASONIDO, a través de reuniones periódicas con el estudiante Marco Stalin Carrillo Guamán, en el semestre 2018-2, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”

Carlos Andrés Jurado Orellana

Doctor en Ingeniería Acústica

C.I. 542886-6

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo, MEDICIÓN DEL UMBRAL DE AUDICIÓN EN BAJAS FRECUENCIAS E INFRASONIDO, del estudiante Marco Stalin Carrillo Guamán, en el semestre 2018-2, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”

Luis Alberto Bravo Moncayo

Doctor en Ingeniería Acústica

C.I. 1711710606

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes”

Marco Stalin Carrillo Guamán

C.I.1716279672

AGRADECIMIENTOS

A Dios, a mi familia especialmente a mis padres por el sacrificio tan grande que han hecho por darme la educación, a Carlos Jurado, a Cristian Garzón, Luis Bravo y a todos mis amigos por su apoyo y aprendizaje de ellos.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo primeramente a Dios, a mis padres y a mi familia, ya que sin ellos no hubiera podido alcanzar este gran logro en vida.

RESUMEN

El tema central de este proyecto es caracterizar la curva de respuesta de umbral de audición del oído humano en baja frecuencia e infrasonido, mediante la implementación y diseño de un sistema que emita tonos de baja frecuencia a niveles altos, y con una baja distorsión armónica, con el fin de realizar fielmente las mediciones correspondientes y obtener resultados absolutos en los experimentos psicoacústicos de manera monoaural.

Se utiliza el software MATLAB para calibrar el sistema de emisión y grabación de tonos, e implementar un programa psicoacústico para que el participante se comunique con el sistema mediante un botón de respuestas con el cual se obtendrá los valores de las mediciones mediante métodos psicofísicos.

Para este proyecto, se contó con 10 participantes con audición normal para obtener las respectivas curvas de umbral de audición de cada individuo.

En este documento se explica a detalle las curvas obtenidas de umbrales de audición en 5 frecuencias principales (5, 10, 15, 20, 40 [Hz]), se analiza y compara con otros estudios que realizaron mediciones de umbrales de audición en esta misma zona frecuencial.

ABSTRACT

The focus of this project is to characterize the response curve of the hearing threshold of the human ear in low frequency and infrasound. Implement and design a system that emits tones at high levels of low frequency and with a low harmonic distortion, in order to faithfully perform the corresponding measurements and obtain absolute results in psychoacoustic experiments in a monaural manner.

Use the MATLAB software to calibrate the tone emission and recording system, and implement a psychoacoustic program, so that the participant communicates with the setup through a response button, obtaining the values of the measurements by psychophysical methods.

For this project, there were 10 participants with normal hearing to obtain the respective hearing threshold curves of each individual.

This document explains in detail the curves obtained from hearing thresholds in 5 main frequencies (5, 10, 15, 20, 40 [Hz]), the analysis and the comparison with other studies that made measurements of hearing thresholds in this same frequency area.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Marco referencial.....	3
1.3. Justificación	5
1.4. Alcance	6
1.5. Objetivos.....	7
1.5.1. Objetivo general.....	7
1.5.2. Objetivo específico	7
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Baja Frecuencia e infrasonido.....	7
2.2. Percepción auditiva.....	8
2.2.1. El oído humano.....	8
2.2.2. Estructura del Oído.....	8
2.2.3. Oído externo.....	10
2.2.4. Oído medio.....	11
2.2.5. Oído interno.....	12
2.3. Umbrales de audición en bajas frecuencias	13
2.4. Curvas isofónicas	16
2.5. ISO 226-2003	17
2.6. Los efectos de la baja frecuencia y el infrasonido sobre el ser humano	18
2.7. Campos sonoros.....	19

2.7.1.	Cámara de presión	19
2.7.2.	Mediante audífonos.	22
2.7.3.	Campo libre.	23
2.8.	Métodos psicofísicos adaptativos	24
2.8.1.	Función psicométrica.....	24
2.8.2.	Método de las constantes.....	25
2.8.3.	Método de los límites.....	26
2.8.4.	<i>Simple up-down</i>	26
2.8.5.	Transformado arriba- abajo (<i>Transformed Up-Down Procedure</i>). ..	28
2.8.6.	Método <i>1up/3down</i>	30
2.9.	Distorsión armónica	30
3.	DISEÑO EXPERIMENTAL	32
3.1.	Equipamiento.	32
3.1.1.	Computador	32
3.1.2.	Interface RME <i>Fireface</i> 802.....	32
3.1.3.	Sonómetro CESVA SC 310	33
3.1.4.	Micrófono de medición GRAS 46A0	33
3.1.5.	Audífonos modificados	34
3.1.6.	Botón de respuestas.....	34
3.1.7.	ER-10C.....	35
3.1.8.	<i>Software</i> (MATLAB).....	36
3.2.	Diseño del <i>setup</i>	36
3.3.	Diseño del método psicoacústico para medición de umbral de audición.....	40
3.4.	Diseño muestral (Número de personas, edad y género)	40

3.5. Distorsión armónica del sistema.....	41
3.6. Calibración del <i>setup</i>	43
3.7. Medición del ruido de fondo.....	44
3.8. Medición de umbrales de Audición.	46
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	51
4.1. Nuevo <i>Setup</i> de audífonos modificados	51
4.2. Respuesta de frecuencia del sistema.....	53
4.3. Comparación de curvas de respuesta de frecuencia entre el nuevo sistema y el sistema anterior.....	55
4.4. Distorsión armónica de los nuevos audífonos modificados.....	56
4.5. <i>Probe check</i>	61
4.6. Umbrales de audición obtenidos.....	64
5. ANÁLISIS ECONÓMICO.....	67
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	69
6.1. Conclusiones.....	69
6.2. Recomendaciones.....	70
REFERENCIAS	72
ANEXOS	77

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El umbral de audición ha sido la característica más investigada del oído humano (Møller y Pedersen, 2004). Varios estudios realizados desde el año 1933 hasta la última década (Levitt, 1971; Fletcher y Munson, 1933; Churcher, King, 1937; Teranishi, 1965; Yeowart, 1967; Landström, 1983; Watanabe, 1993; Takeshima, 2001; ISO 226, 2003; Jurado y Marquardt, 2016), han sido realizados por investigadores para determinar el umbral de audición en determinados rangos de frecuencia. Estos estudios han implementado diferentes métodos psicoacústicos y sistemas para emisión de ondas acústicas. Los resultados obtenidos en estos estudios difieren entre ellos, y datos que caracterizan el umbral de audición exclusivamente en la región de bajas frecuencias e infrasonido son muy escasos.

Todos los días las personas se exponen a fuentes de sonidos naturales o artificiales, que emiten ruido en bajas frecuencias e infrasonido, que pueden afectar el bienestar, dependiendo del tiempo de exposición y el nivel de presión sonora de dichas fuentes (Leventhall et al., 2003).

Tradicionalmente se ha considerado que el rango de la audición comprende sonidos de frecuencias entre 20 y 20 kHz, pero la evidencia actual indica que una persona con audición normal, puede percibir sonidos por debajo de los 20Hz, si el nivel de presión sonora es suficientemente alto (Møller y Pedersen, 2004).

Existen estudios que indican que, la exposición al ruido en bajas frecuencias e infrasonido, puede causar efectos negativos al bienestar tales como angustia, dolor de cabeza, estrés, perturbación del sueño (Fecci et al, 1971; Landström y Byström, 1984). Algunas fuentes de baja frecuencia e infrasonidos son turbinas de viento, compresores, tráfico, sistemas de ventilación, e incluso cuando se conduce un automóvil a gran velocidad con la ventana abierta. Estos tipos de fuentes son difíciles de controlar, debido que las bajas frecuencias viajan

grandes distancias, y la atenuación de estas puede ser muy complicada (Leventhall et al., 2003).

Investigaciones recientes para determinar la percepción humana del sonido en baja frecuencia e infrasonido, han sido realizadas en varios países usando distintos métodos psicoacústicos y condiciones experimentales (Jurado y Marquardt, 2016; Kühler, Fedtke y Hensel, 2015). Esto ha dado lugar a un estándar de valores de umbral de audición que va desde 20Hz hasta los 20kHz. Otro estudio (Møller y Pedersen, 2004) propuso una caracterización de umbral bajo los 20Hz (infrasonido), donde la curva de umbral obtenida, mostró que la sensibilidad de la percepción acústica se reduce abruptamente bajo los 20Hz, e indicó una pendiente alta del umbral. Por ejemplo, para escuchar un tono de 10Hz se requiere aproximadamente 98 dB más de presión sonora que un tono de 1kHz.

Debido a resultados recientes, existe cierta incertidumbre en la forma específica de la curva de umbral de audición en bajas frecuencias, ya que, al comparar los resultados obtenidos en estudios actuales como el de Jurado y Marquardt (2016), con los anteriormente mencionados, se puede observar algunas diferencias de la curva en dicha zona de frecuencias. Esto puede deberse a la implementación de variadas condiciones experimentales y métodos usados en estudios previos.

Debido a lo mencionado anteriormente, es necesario estudiar la estructura fina de umbral de audición más en detalle y las diferencias individuales de la percepción acústica. Por lo que este proyecto está enfocado en caracterizar el umbral de audición utilizando un método eficaz y confiable.

El lugar donde se llevará a cabo este proyecto es en la Universidad de Las Américas, Distrito Metropolitano de Quito.

1.2. Marco referencial

Hoy en día existen fuentes de ruido de baja frecuencia e infrasonido que se pueden encontrar comúnmente en zonas industrializadas (sistemas de ventilación, turbinas de viento, aviación, automóviles, barcos, etc.) que afecta negativamente al bienestar de las personas (Berglund, Hassmen, y Job, 1996; Leventhall et al., 2003).

Por esta problemática se ha visto necesario realizar un estudio más detallado de la percepción auditiva de los seres humanos en baja frecuencia e infrasonido. Países como Alemania e Inglaterra están financiando investigaciones para solucionar y entender más a fondo los efectos negativos que produce el ruido de baja frecuencia en las personas.

Para entender y buscar posibles soluciones a este problema, es necesario examinar el comportamiento de nuestro sistema auditivo frente a dichas frecuencias. El umbral de audición y las curvas isofónicas son las principales herramientas que se han utilizado para cuantificar la percepción auditiva. En estudios como el de Moller y Pedersen (2014), se muestra que la percepción acústica disminuye gradualmente a medida que la frecuencia va bajando, y los infrasonidos solo son audibles a un alto nivel de presión sonora.

Para determinar el umbral de audición en bajas frecuencias e infrasonido, muchos experimentos se han realizado utilizando distintas condiciones experimentales y con variados métodos psicoacústicos. El uso de campo libre y campo de presión, son dos de las condiciones experimentales que se han utilizado comúnmente, siendo el campo de presión el más recomendado, ya que este puede generar tonos de hasta 1Hz con distorsión armónica controlada.

Se han utilizado cabinas de presión, donde una o dos personas son introducidas en una cabina y expuestas a un determinado nivel de presión sonora. Estas cabinas están diseñadas para emitir un campo de presión sonora homogéneo. Pero algunas desventajas de las cámaras de presión, son que se limitan a mediciones binaurales, y para frecuencias menores a 100Hz tienden a formarse

modos de presión sonora, ya que ésta varía con la posición. Por este motivo, algunos estudios como (Kühler, Fedtke y Hensel, 2015) han usado un sistema de emisión de audífonos insertos, el cual se basa en sellar un altavoz herméticamente en una caja amortiguada, de madera o metal, para producir un pequeño campo de presión. Luego ésta se acopla al oído mediante un tubo flexible. Este sistema es capaz de generar frecuencias muy bajas con un alto nivel de presión sonora y con baja distorsión armónica.

Debido a que se han utilizado distintos métodos psicoacústicos y condiciones experimentales con diferente resolución para medir el umbral de audición, existen diferencias en los resultados. Por ejemplo, estudios como los que realizó Marquardt y Pedersen (2010), obtuvieron mediciones con una alta resolución en bajas frecuencias, pero a pocos niveles de referencia. En cambio, otro estudio (Kühler, 2015) realizó mediciones de percepción sonora en baja frecuencias a varios niveles de referencia, pero con una resolución de frecuencia comparativamente menor. Es así que, se observa que los resultados obtenidos por Kühler (2015), difieren de los resultados de Marquardt y Pedersen (2010), dejando una incertidumbre de la percepción auditiva en la zona de baja frecuencia e infrasonido.

Por esta razón es necesario llevar a cabo una caracterización más detallada de umbral de audición con una alta resolución de frecuencias en la zona de baja frecuencia e infrasonido. De esta forma se podrá entender mejor el comportamiento de la percepción humana en esta zona. Se prevé que la metodología psicoacústica y la configuración que serán usadas en este proyecto es útil para investigaciones futuras, y puede aportar para próximas revisiones en los valores estandarizados.

En este proyecto se realizará una implementación para hacer experimentos psicoacústicos, en el que se reclutará a un determinado número de personas voluntarias con audición normal para hacer mediciones de umbral de audición.

1.3. Justificación

El diseño del *setup* pretende ser un paso importante en las técnicas asociadas al estudio y control de bajas frecuencias, ya que implica un proceso complejo en el que se encuentran actividades como: selección adecuada de equipos, materiales y *software*, implementación del *setup* para la medición de curvas isofónicas de bajas frecuencias, control asociado, y la programación y testeo de *software* de control para los experimentos posteriores.

Todos estos procesos aportan de manera significativa al conocimiento relacionado al procesamiento de señales, diseño de experimentos, percepción de bajas frecuencias y temas relacionados.

El interés presentado por dos de las universidades más prestigiosas del mundo como lo es la *University of Cambridge* mediante el doctor Brian Moore y la *University College London* mediante el doctor Torsten Marquardt reflejan el amplio potencial de la instalación a realizarse en la Universidad de Las Américas. Estos investigadores serán guías clave para definir metodologías a aplicar en cada fase del proyecto.

La relación del tema con el área de la salud lo hace aún más interesante ya que se podría trabajar en conjunto con la escuela de ciencias de la salud de la Universidad para determinar si existen cambios fisiológicos en el oído al ser excitados a estas frecuencias. Las conclusiones podrían de esta forma expandirse y ser de gran ayuda para personas afectadas por una exposición prolongada a altos niveles de ruido.

Se espera que el *setup* implementado se convierta en una herramienta tecnológica importante para la universidad puesto que podrá emplearse en investigaciones posteriores. De igual manera, la instalación permitirá reducir costos de ulteriores proyectos y ofrecerá ventajas como: continuación de proyectos de tesis relacionados a las bajas frecuencias y asesoramiento de problemas causados por el ruido de las mismas. Incluso puede servir como elemento didáctico para asignaturas como procesamiento digital de señales e

introducción a la acústica. Estas últimas presentan en su contenido tratamiento de señales y curvas isofónicas respectivamente.

1.4. Alcance

El proyecto involucra el área de psicoacústica, así como de programación, medición de niveles acústicos, electroacústica, métodos estadísticos y matemáticos los cuales en conjunto permiten obtener valores numéricos, variables, tablas y gráficos.

Lo anteriormente hablado procederá a interpretarse y discutirse para que dependiendo de los resultados obtenidos se avance en cada etapa del proceso del proyecto. Así, por ejemplo, tablas de curvas isofónicas presentes en normativas actuales servirán como referencia para emitir un nivel de presión sonora (NPS) adecuado en frecuencias específicas.

Por otro lado, los valores de NPS producidos por audífonos de prueba (medidos con un sonómetro) servirán para determinar valores de constantes de amplitud en el dominio digital. Mediante estos valores de corrección o mediante la convolución de filtros correctivos con la respuesta de frecuencia total del sistema, se logrará obtener una respuesta plana en el rango de frecuencias de interés.

Mediante una correcta configuración de niveles de presión sonora desde el elemento emisor o fuente (programa en MATLAB) se podrán evitar errores de cuantización que se traducen en distorsiones (sobre todo para niveles de audio bajo y señales correspondientes a tonos puros), señales indeseadas y ruido de cuantización como es comúnmente conocido.

El trabajo propuesto culmina programando el *software* y testeando el *setup* de control para que experimentos posteriores sean efectuados a mayor escala, a cargo de otras personas vinculadas al proyecto.

Se decidió utilizar el *software* MATLAB para manejar todo lo relacionado a la programación y procesamiento de señales, debido a la variedad de herramientas

disponibles en este y a que se ha utilizado previamente con éxito en la realización de experimentos similares (Hensel et al., 2007).

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Caracterizar la curva de umbral de audición en bajas frecuencias e infrasonido en personas con audición normal.

1.5.2. Objetivo específico

Implementar un sistema de emisión de ondas acústicas que permita realizar mediciones en bajas frecuencias e infrasonido confiablemente.

Implementar un método psicoacústico eficiente y confiable para la realización de mediciones de umbral de audición.

Comparar los valores obtenidos con otros estudios anteriores y con las curvas estandarizadas, y analizar posibles desviaciones sistemáticas respecto a resultados disponibles en la literatura.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Baja Frecuencia e infrasonido

Los sonidos que están en el rango de 20Hz a 200Hz son considerados como baja frecuencia, mientras que el infrasonido son los sonidos que están por debajo de los 20Hz.

Baja frecuencia (20Hz - 200Hz).

Infrasonido (1Hz – 20Hz).

El rango de frecuencias audible del oído humano va desde los 20Hz hasta los 20kHz. La sensibilidad de la audición va disminuyendo a medida que va decreciendo la frecuencia. Por debajo de los 20Hz se considera que es un sonido inaudible, pero estudios como el de Moller y Pedersen (2014) dictaminan que el

infrasonido puede ser percibido a niveles altos, aunque la tonalidad se pierde por debajo de los 16-18Hz, es posible percibir el sonido que se encuentra en esta zona frecuencial.

Ruido de baja frecuencia e infrasonido

Tanto el infrasonido como el ruido de baja frecuencia, produce diferentes efectos en las personas. No existe un punto de corte que divida los rangos de frecuencia para determinar una frecuencia específica, de donde comienza a generarse dichos efectos, ya que en la práctica esto depende de cada persona y del nivel sonoro que son expuestos.

En nuestra vida diaria es común que el ruido de baja frecuencia e infrasonido se presenten juntos, y muchos de los efectos que produce el infrasonido en las personas, puede deberse al ruido de baja frecuencia en la región de los 20-100Hz.

2.2. Percepción auditiva

2.2.1. El oído humano

El oído es un órgano sensorial que trabaja como transductor, capaz de convertir las señales sonoras en señales eléctricas. Estas señales son enviadas al cerebro, el cual procesa, interpreta y almacena dicha información.

Así también, el oído humano es muy importante para el equilibrio, orientación espacial, y la sensación subjetiva del movimiento.

2.2.2. Estructura del Oído

El oído humano se divide de manera funcional y anatómica en tres partes principales, las cuales, hacen posible que las personas puedan escuchar las ondas de presión sonora e interpretar y procesar en el cerebro, en el medio que nos rodea, en la siguiente tabla se muestra las partes que conforman el oído externo, medio e interno.

Tabla 1.

Partes del oído humano.

OÍDO EXTERNO	1. El pabellón	
	2. El conducto auditivo externo	
OÍDO MEDIO	1. La membrana timpánica	
	2. Las ventanas oval y redonda	
	3. La trompa de Eustaquio	
	4. La cadena de huesecillos	Martillo
Yunque		
Estribo		
OÍDO INTERNO	1. El vestíbulo	Sáculo
		Utrículo
	2. Los canales semicirculares	
	3. El caracol	Rampa vestibular
		Rampa coclear
		Rampa timpánica

Cada sección del oído humano realiza una función específica en el proceso de convertir la energía acústica en energía eléctrica.

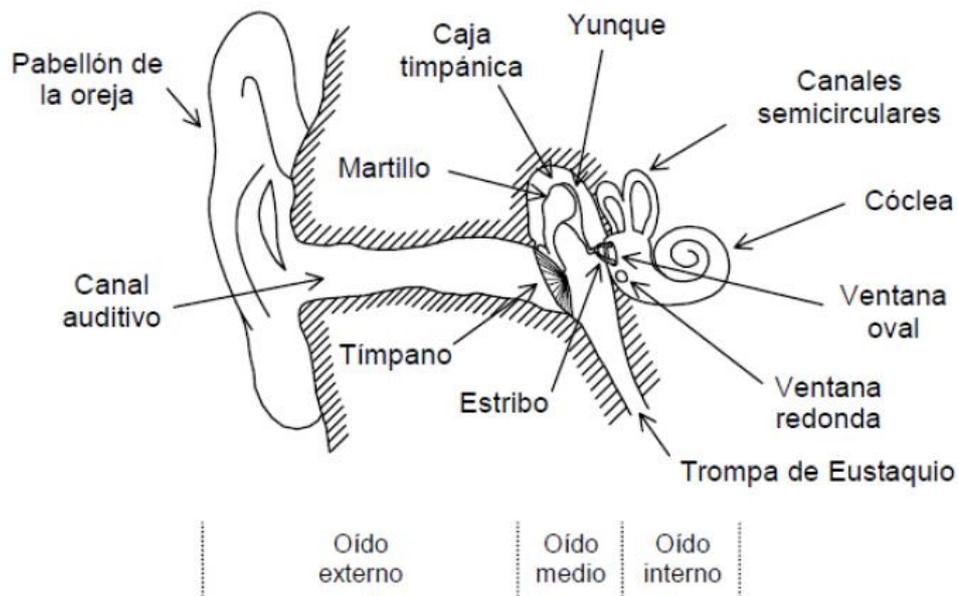


Figura 1. Estructura fisiológica del oído humano.

Tomado de (Miyara, 2006, p. 1)

2.2.3. Oído externo

El oído externo es el principio de la cadena del funcionamiento auditivo y está conformado por el pabellón y el canal auditivo.

El pabellón auditivo es el encargado de recolectar las ondas sonoras que provienen de alguna fuente sonora o un cuerpo, para direccionar y modificar significativamente el sonido, especialmente en las frecuencias altas.

El canal auditivo está situado entre el pabellón auditivo y el tímpano, y su longitud mide entre 25 y 30 milímetros. Este es el encargado de proteger con sus pelos y su secreción de cera al tímpano y el oído medio de daños, así también, mantiene la misma temperatura a los dos lados de la membrana timpánica y guía el sonido o las vibraciones hacia el oído medio.

Esta pequeña cavidad, funciona como un tubo sonoro, el cual, transforma las ondas sonoras que llegan desde el exterior, en ondas planas, para que el siguiente proceso se lleve a cabo en el oído medio.

2.2.4. Oído medio

El oído medio está conformado por el tímpano o membrana timpánica, los huesecillos o cadena osicular y la trompa de Eustaquio. Los huesecillos que conforman la cadena osicular se los conoce como martillo, yunque, y estribo.

La función más importante del oído medio, es la adaptación de impedancias, ya que éste convierte las vibraciones de gran amplitud y poca presión en vibraciones de mayor presión y pequeña amplitud (Miyara 2006, p. 2).

Las ondas sonoras o vibraciones que viajan a través del canal auditivo y llegan al tímpano, hacen que este comience a vibrar de manera rápida o lenta dependiendo de la frecuencia del sonido. Para frecuencias altas, la membrana timpánica vibra más rápido, por el contrario, para frecuencias bajas, las vibraciones se hacen más lentas.

La forma del tímpano es similar a un cono, y está conectado al martillo, uno de los tres huesecillos de la cadena osicular. Con lo cual, un movimiento de la membrana timpánica corresponde a un movimiento del martillo, el cual está fijado al yunque y al estribo. Estos tres huesecillos actúan como una cadena de palancas que enlazan al oído externo con el interno y son sostenidos por ligamentos de la caja timpánica. El último huesecillo de esta cadena (el estribo) está conectado a la ventana oval.

Hay dos pequeños músculos que están asociados con estos huesecillos: el *tensor tímpani* que está unido al martillo y el *estapedio* que está unido al estribo. La tensión de la membrana timpánica depende de estos músculos, para así, transportar las vibraciones del oído externo al interno. También protegen al oído interno de sonidos de gran intensidad que pueden producir daños en la estructura cóclea.

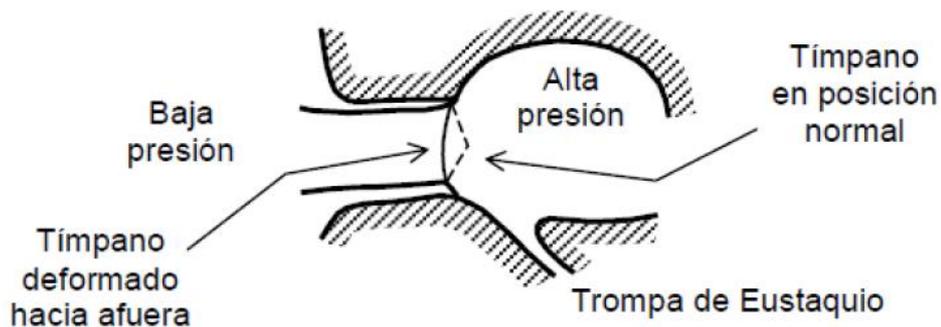


Figura 2. Desviación del tímpano ante cambios de presión atmosférica.

Tomado de (Miyara, 2006, p. 3)

La parte superior de la garganta está conectada a la trompa de Eustaquio. Esta se abre y se cierra cada vez que bostezamos, y su característica principal es igualar la presión del oído medio con la presión atmosférica (Miyara, 2006, p.3).

2.2.5. Oído interno

El oído interno es el encargado de transducir las vibraciones que viajan a través del oído medio en señales eléctricas, luego analiza las vibraciones en la cóclea y transmitir las señales al cerebro. El oído interno también controla el equilibrio estático y dinámico del cuerpo.

El oído interno llamado también como laberinto, está constituido por conductos y cavidades llenos de líquido que contienen células sensoriales de la audición y el equilibrio.

El oído interno está compuesto de dos partes, el laberinto óseo que contiene un líquido llamado perilinfa, y el laberinto membranoso que contiene un líquido llamado endolinfa.

De manera funcional y anatómica el oído interno se divide en dos secciones: el sistema vestibular que tiene que ver con el equilibrio, y el sistema auditivo conformado por la cóclea o caracol, que tiene que ver con la audición.

El oído interno contiene dos ventanas de tejido membranoso llamadas ventana oval y ventana redonda. La ventana oval transmite las vibraciones que provienen de los huesecillos trasladando esta excitación al líquido perilinfático, para luego ser propagado como una onda de presión por todo el laberinto membranoso.

El sistema vestibular y el sistema auditivo se encuentran separados por las membranas basilares y de Reissner, que se mueven como respuesta a las vibraciones.

En la membrana basilar se encuentra el órgano de Corti, cada vez que este órgano vibra, envía impulsos nerviosos al cerebro por medio del nervio auditivo. En este órgano se encuentran las células ciliadas que son las encargadas de transformar las vibraciones en impulsos nerviosos. Este es el último proceso en el funcionamiento de la audición.

2.3. Umbrales de audición en bajas frecuencias

El umbral de audición determina el mínimo nivel de presión sonora de un particular estímulo que una persona puede escuchar o percibir en ausencia de otros sonidos.

El umbral de audición varía según la frecuencia, y su valor depende de factores como, la sensibilidad auditiva del sujeto, la duración del estímulo sonoro y la exposición previa del oyente a otros sonidos.

Dado que existen diferentes métodos para determinar el umbral de audición, es necesario realizar un promedio entre ellos para determinar una estimación acertada de umbral (Scharine, Kara y Tomasz, p.393).

Para describir un umbral de audición, se debe considerar las condiciones en las que fue realizada las mediciones. Hay que determinar si las mediciones se realizaron de manera monoaural o binaural, así también, el tipo de fuente sonora implementado y como se mide el arribo del estímulo al oyente (Scharine et al.,2009).

Hay dos tipos importantes para determinar umbrales de audición: el umbral del mínimo campo audible (MAF), y el umbral de la mínima presión audible (MAP).

El umbral del mínimo campo audible (MAF), utiliza el campo libre como medio de propagación para que las ondas sonoras generadas desde una distanciada fuente sonora como por ejemplo un altavoz, lleguen al oído del participante. Mientras que, en la mínima presión audible, el estímulo llega al participante mediante audífonos intraurales (earphone), donde el canal auditivo es ocluido.

Existen varios estudios desde el año 1958 (Moller y Pedersen, 2004, Yeowart, 1967, Kueller et. Al, 2015, Watanabe y Moller, 1990) hasta la actualidad con respecto a mediciones de umbral de audición en baja frecuencia e infrasonido.

Estos estudios se han realizado con variadas metodologías donde usan como por ejemplo audífonos monoaural/binaural, campo libre y cámara de presión, obteniendo resultados diferentes.

Por ejemplo, el método binaural es más sensitivo que el monoaural, ya que la curva de umbral del método monoaural esta 3dB por encima del binaural.

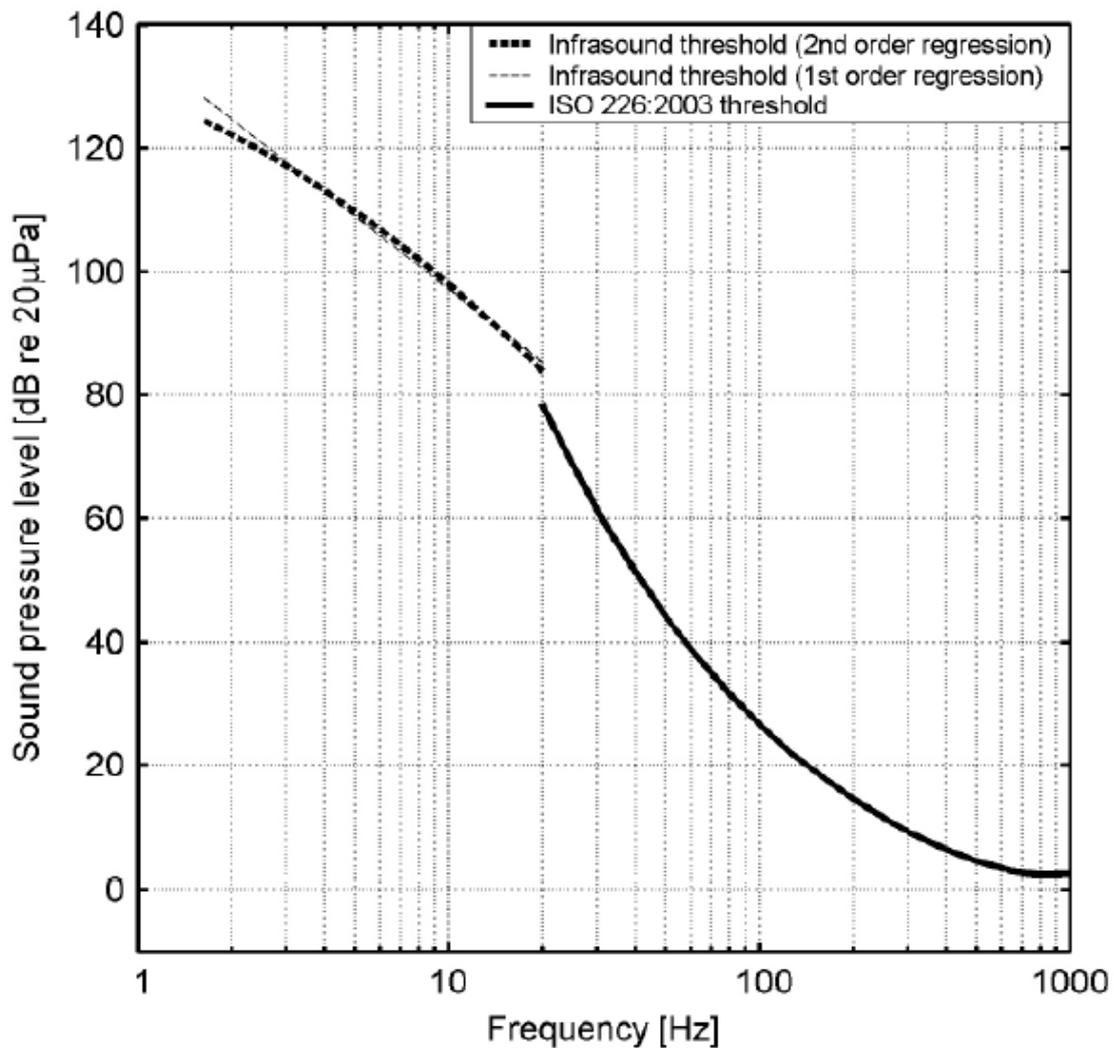


Figura 3. Umbrales de audición propuestos para frecuencias bajo 20Hz y umbral de audición estándar de la ISO 226:2003 sobre 20 Hz.

Tomado de (Moller y Pedersen, 2004, p. 46)

Como se aprecia en la figura anterior, el oído humano tiene una pobre sensibilidad en bajas frecuencias, debido que el sistema mecánico del oído, tanto el odio externo, medio y el interno donde se encuentran las células ciliadas tienen una pobre transmisión de energía para esta zona frecuencial. (Scharine et al., 2009, p.396).

2.4. Curvas isofónicas

Las curvas isofónicas o de igual sonoridad, son curvas que representan a los tonos de igual nivel sonoro (Moller y Pedersen, 2004, p.50).

En el año de 1933, Fletcher y Munson realizaron estudios donde utilizaron un tono de referencia de 1kHz con amplitud fija, y otro tono de diferente frecuencia y su amplitud variable, para que el participante lo ajuste hasta escuchar dos tonos con la misma intensidad sonora. Las curvas de igual sonoridad, se obtienen al graficar los resultados en función de la frecuencia, cuyo nivel va de 0-120 decibeles con pasos de 10 decibeles con respecto al tono de referencia.

Estas curvas isofónicas comparan la intensidad subjetiva entre dos tonos que difieren en su frecuencia e intensidad. Estas curvas las podemos observar en la siguiente figura.

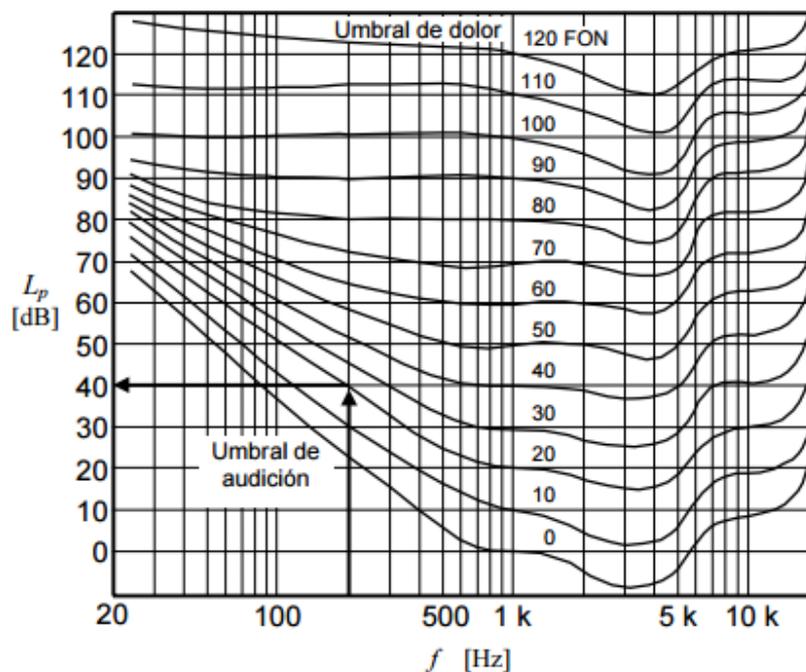


Figura 4. Curvas isofónicas de Flecher y Munson 1933.

Tomado de (Miyara, 2016, p. 21)

2.5. ISO 226-2003

Los datos obtenidos de umbrales en la ISO 226:2003 se basan en estudios realizados en 1996 y posteriormente en investigaciones realizadas en el año 2002 (Moller y Pedersen, 2004, p.45-46). Dichos estudios ayudaron a realizar nuevas revisiones con respecto a los estudios de Robinson y Dadson (1956), el cual no cubría datos por debajo de los 20Hz.

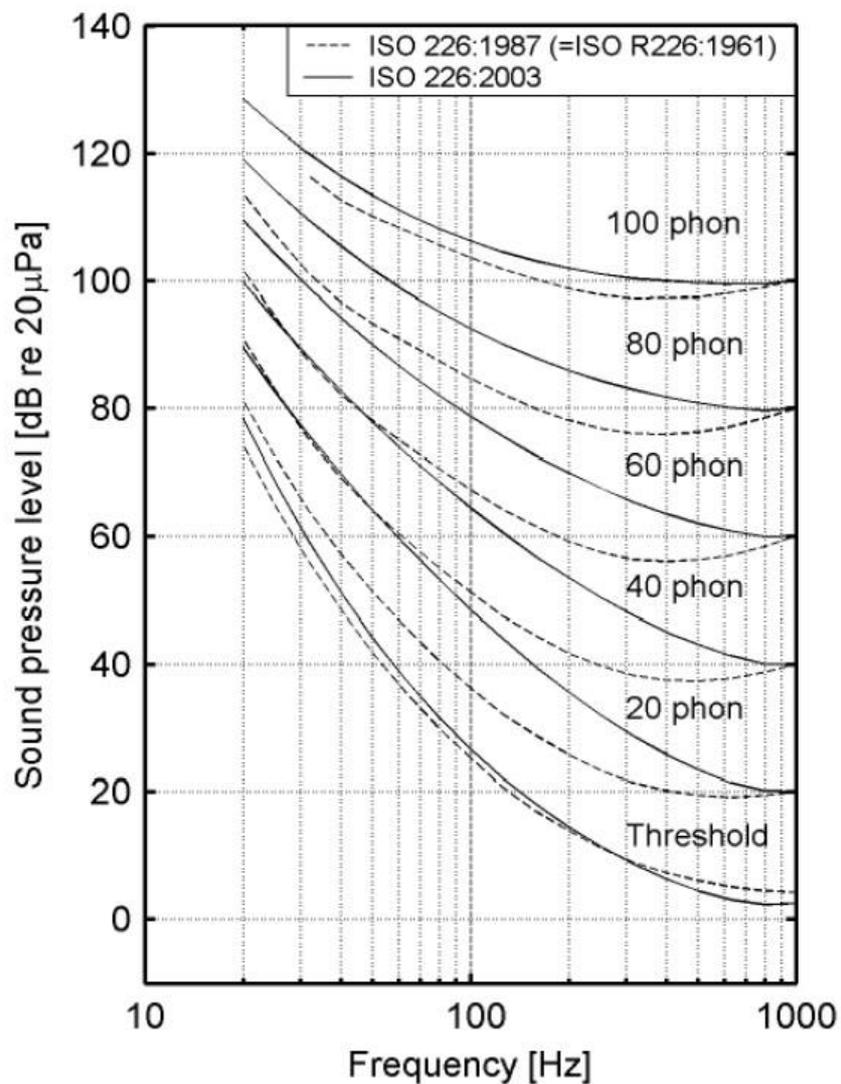


Figura 5. Curvas isofónicas estándar.

Tomado de (Moller y Pedersen, 2014, p.53)

Como se muestra en la figura 4, el rango de frecuencia de las curvas de igual sonoridad es de 20Hz a 1kHz, y se presentan las normativas ISO de los años 1987, 1961 y 2003.

2.6. Los efectos de la baja frecuencia y el infrasonido sobre el ser humano

Todo sonido no deseado es molesto, ya sea para las altas o bajas frecuencias, por lo tanto, el principal efecto del ruido de baja frecuencia e infrasonido sobre las personas es la molestia. Sin embargo, una persona que está expuesta al ruido de baja frecuencia e infrasonido, puede presentar vibración, lo cual agrava la sensación de molestia.

Las fuentes de infrasonido y de ruido de baja frecuencia como los motores, sistemas de aire acondicionado, compresores..., pueden causar fatiga, somnolencia, y dolor de cabeza, lo cual puede afectar al reducimiento laboral (Schust, 2004, p.73-85).

La exposición al ruido de baja frecuencia genera respuestas fisiológicas como vasoconstricción y vasodilatación, presión sistólica, variaciones del ritmo cardiaco y alteraciones del sistema nervioso central. Aunque es improbable que estos efectos generen gran importancia, se deben considerar bajo exposiciones extremas (Qibai y Shi, 2004, p.71-76).

Ruido de baja frecuencia y sueño

La exposición al ruido de baja frecuencia por la noche causa la pérdida de sueño, y el ruido de baja frecuencia bajo otras condiciones induce períodos cortos de sueño (Fecci et al., 1971; Landström y Byström, 1984).

Fecci et al. (1971) monitorearon a los trabajadores expuestos al ruido del aire acondicionado en un laboratorio. La frecuencia mínima del ruido fue 8 [Hz] con un nivel de 80 dB. Se descubrió, que los trabajadores expuestos al ruido presentaban un porcentaje mucho mayor de somnolencia que el encontrado en una población no expuesta.

2.7. Campos sonoros

Los campos sonoros son parte de la metodología para la emisión de baja frecuencia e infrasonido. Hay tres principales campos que son usados comúnmente para la obtención de umbrales de audición.

Cámara de presión

Mediante audífonos

Campo libre

2.7.1. Cámara de presión

En este método, la medición se lo hace dentro de una habitación pequeña, donde se encuentran una determinada cantidad de altavoces en las paredes y el techo. La emisión de ondas sonoras de baja frecuencia por parte de dichos altavoces, se realiza en fase, con el fin de evitar que alguna energía fluya en la habitación (Suzuki y Takeshima, 2004, p.919).

Comúnmente la mínima presión audible (MAP), se lo realiza en las cámaras de presión, ya que encierra el cuerpo entero del participante. Según Watanabe y Moller (1990, p.114), no existe ninguna diferencia entre los umbrales de audición realizados en campo de presión con respecto a los de campo libre. Y afirman que los datos obtenidos son muy confiables.

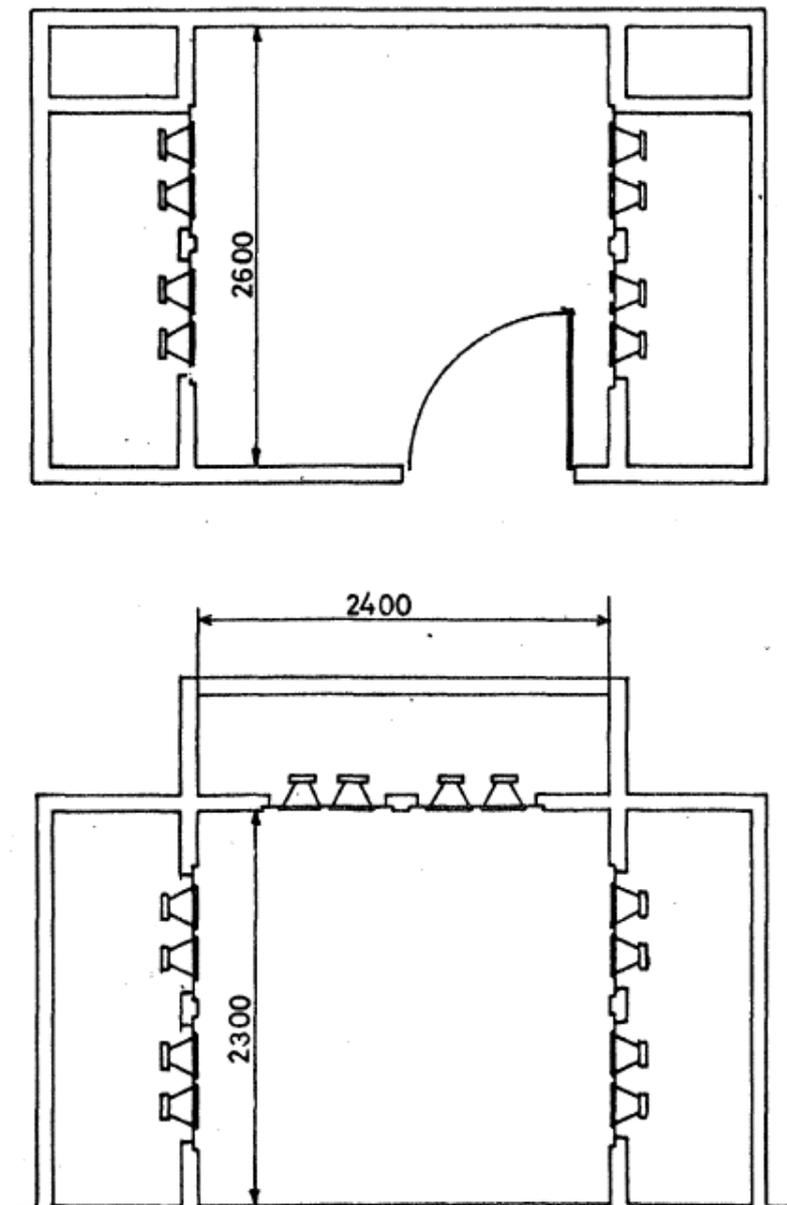


Figura 6. Cámara de prueba para medición de umbrales en baja frecuencia e infrasonido, vista de planta y vista lateral.

Tomado de (Watanabe y Moller, 1990, p.107)



Figura 7. Ejemplo de cámara de presión.

Tomado de (Sakamoto, Yokoyama, Yano y Tachibana , 2014, p.214)

En la siguiente figura se puede apreciar la curva de respuesta de frecuencia de la cámara de presión empleada en 1990.

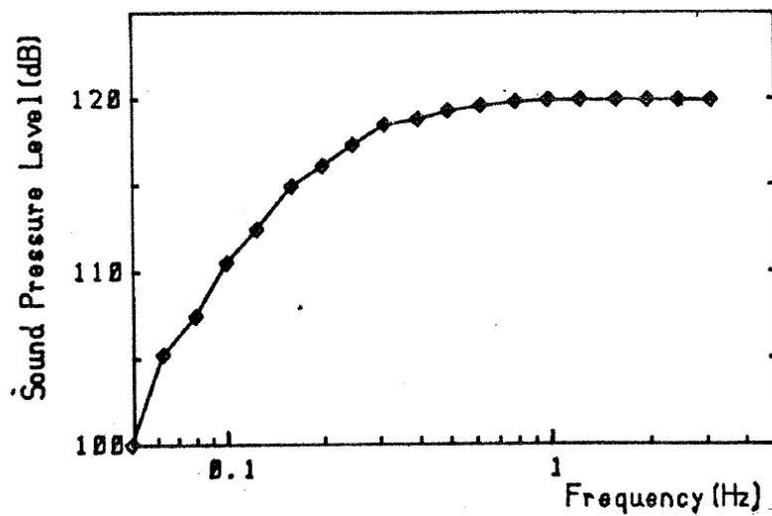


Figura 8. Respuesta de frecuencia de una habitación de prueba, donde se utilizó un amplificador de potencia de voltaje fijo para emitir infrasonido.

Tomado de (Watanabe y Moller, 1990, p.108)

2.7.2. Mediante audífonos

En este método el oído es acoplado a una cavidad muy pequeña, por donde el sonido viaja hasta recaer en el pabellón auditivo. Las audiometrías generalmente usan este método por medio de un audífono supraural. Una desventaja de este método es que, la actividad fisiológica puede generar ruido una vez colocado el audífono, lo que provoca el aumento del umbral especialmente en bajas frecuencias.

Investigadores como Moller y Pedersen (2004) han usado el método de cámara de presión conectado a pequeños tubos que son insertados al oído.

Un método similar fue usado por Kuehler (2015), donde indica que el oído conectado a un tubo, y este a su vez a un volumen cerrado entre la membrana de un altavoz, puede ser considerado como una cámara de presión para bajas frecuencias e infrasonido, donde el tubo acoplado al oído trabaja como un filtro pasa bajos, dando así una pérdida muy pequeña de excitación acústica.

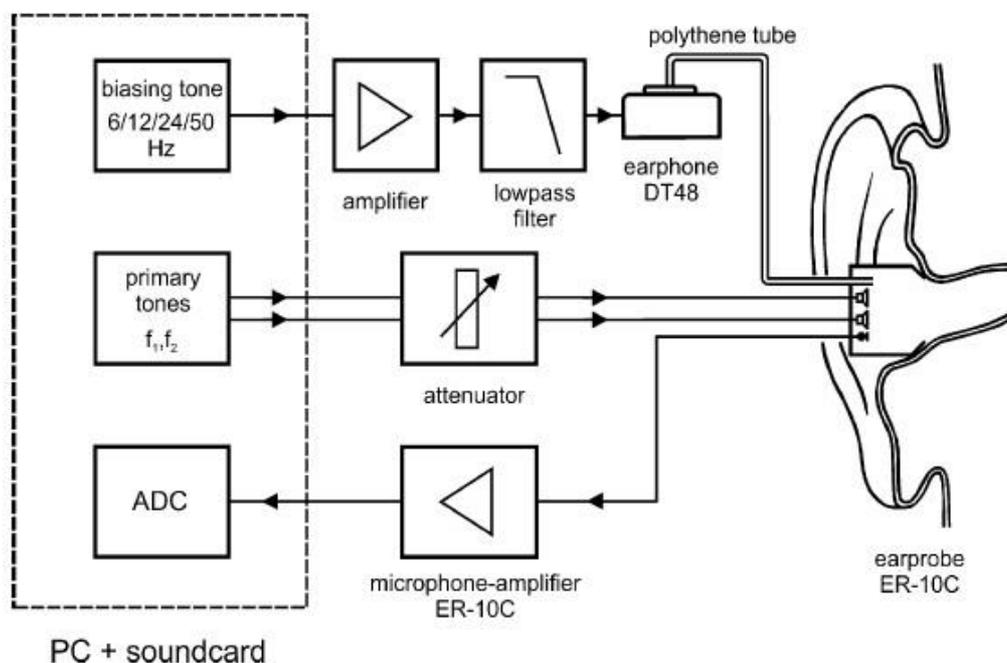


Figura 9. Ejemplo de un sistema de audífonos insertos.

Tomado de (Hensel et al., 2007, p.69)

2.7.3. Campo libre

Como su nombre lo indica, este campo está libre de dispersiones y reflexiones donde el sonido llega al oído del participante desde una única dirección, en donde la posición de la fuente va en relación con el eje central del participante. (Scharine et al., 2009, p.393).

Existe una diferencia entre los umbrales de audición de campo sonoro mínimo (MAF) y la mínima presión audible (MAP) en la zona de altas frecuencias, donde la ausencia o presencia de un participante influye mucho en los datos obtenidos.

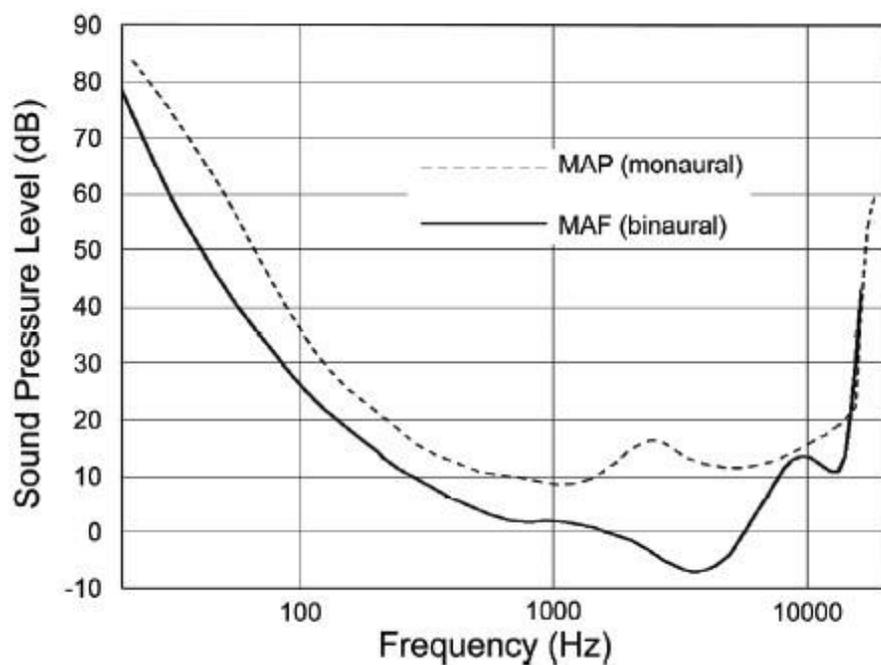


Figura 10. Comparación de umbrales de audición de MAF y MAP.

Tomado de (Scharine et al., 2009, p.386)

Cabe mencionar que en la figura anterior los puntos de referencia de las dos mediciones fueron el centro de la cabeza del participante con este ausente (MAF), y un punto cerca del oído del participante (MAP).

Se aprecia que los umbrales obtenidos en estos dos campos, tienen gran diferencia entre ellos, debido a las reflexiones producidas por la cabeza y el torso

del participante, así también como a la resonancia que existe dentro del canal auditivo con diferentes amplificaciones propias de éste.

Por otro lado, la cabeza y el torso del participante influye muy poco en bajas frecuencias cuando la onda es plana y libre.

Hay cierta incertidumbre con respecto a los valores de umbrales por debajo de los 25 Hz, esto se debe por la dificultad de producir tonos puros de baja frecuencia e infrasonido que tengan un nivel suficientemente alto, y si ese fuera el caso, las paredes de la mejor cámara anecoica resultan reflectivas.

2.8. Métodos psicofísicos adaptativos

Los métodos psicofísicos adaptativos ayudan a que un test psicofísico tenga una mejor eficiencia, así también, reduce el tiempo del test con el fin de que este no sea tedioso.

Estos métodos adaptativos se basan en estimular al participante con tonos sonoros, a un nivel que se adapte a la respuesta del sujeto dependiendo de la respuesta que se obtuvo a estímulos anteriores (Kingdom y Prins, 2010, p.121.).

En estos tipos de métodos, la teoría de detección de señales es muy importante, ya que separa los factores relacionados con el *bias* (criterio, motivación y prejuicio), de los factores que se relacionan directamente con la capacidad auditiva.

Más adelante se presenta algunos métodos clásicos y nuevos métodos para determinar umbrales de audición, las ventajas y desventajas que tiene cada uno, así también, el método que se usó en este proyecto.

2.8.1. Función psicométrica

La función psicométrica viene dada por el nivel del estímulo y el porcentaje de respuestas correctas como se muestra en la siguiente figura.

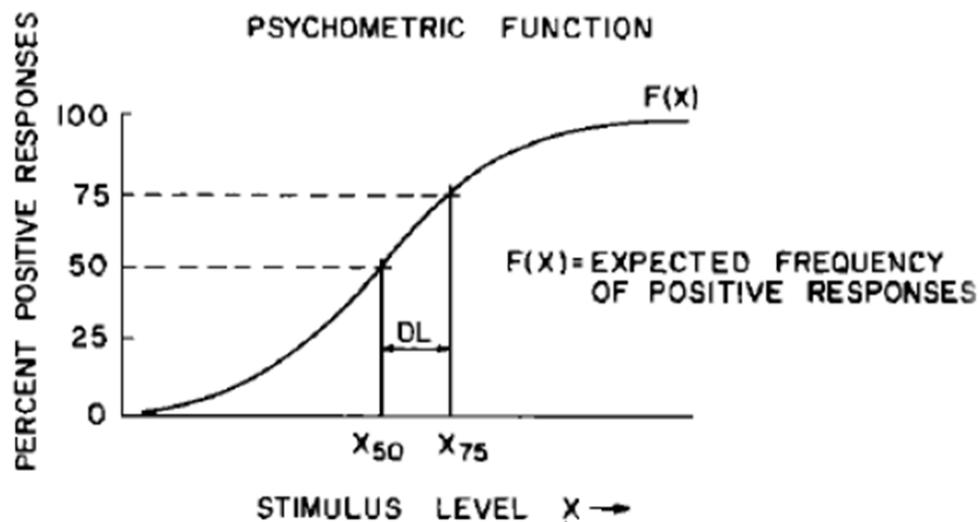


Figura 11. Función psicométrica.

Tomado de (Levitt, 1971, p. 467)

En la figura anterior se puede apreciar la curva que define el nivel del estímulo que corresponde al 50% de respuestas correctas (X_{50}), así también, la distancia (DL) entre dos puntos convenientes en la curva que nos indica el esparcimiento de esta ($X_{75}-X_{50}$; $X_{70}-X_{30}$).

El umbral viene definido por el término X_{50} , mientras que el umbral diferencial se define por el término DL.

En cualquier experimento donde se usan métodos adaptativos hay que tomar en cuenta la ubicación de las observaciones y la estimación de los datos resultantes. Si la ubicación de las observaciones es buena y el método utilizado también lo es, se puede obtener un mejor escenario para realizar el experimento. Por otro lado, el peor escenario es todo lo contrario (Levitt, 1971, p. 468).

2.8.2. Método de las constantes

En el método de estímulos constantes se basa en presentar sonidos o estímulos a varios niveles, donde el experimentador puede escoger entre estos niveles. Los sonidos son constantes y se presentan de manera aleatoria.

Este método obtiene un rango muy amplio de datos, pero es recomendable realizar pruebas preliminares para conocer el rango requerido.

La posibilidad el *bias* se reduce con este método, debido a que el participante no puede anticipar una secuencia.

La desventaja de utilizar este método es que puede causar fatiga auditiva debido a la larga duración del experimento, lo que afecta a la confiabilidad de los resultados.

2.8.3. Método de los límites

En este método se presenta al participante un estímulo con alta posibilidad de ser una respuesta positiva. Si el participante responde positivamente entonces el estímulo disminuye. Si al presentar el estímulo disminuido el participante responde de nuevo de manera positiva, se procede de nuevo a disminuir el estímulo con la misma proporción, esto se conoce como tamaño de paso (*step size*). Este proceso continuo hasta obtener una respuesta negativa por parte del participante. El umbral se obtiene con el promedio de los dos últimos estímulos.

Las desventajas de este método es que el *bias* depende de la elección del nivel de inicio del estímulo y del *step size*, lo cual puede perjudicar al estimado (Anderson, McCarthy, y Tukey, 1946; Brown, 1965).

2.8.4. *Simple up-down*

Este método difiere del método de límites en que cuando se obtiene la respuesta negativa, no termina allí, sino que continua por lo menos hasta que se obtenga seis reversos (Wetherill y Levithh, 1965). En la siguiente figura se observa cada elemento de este método.

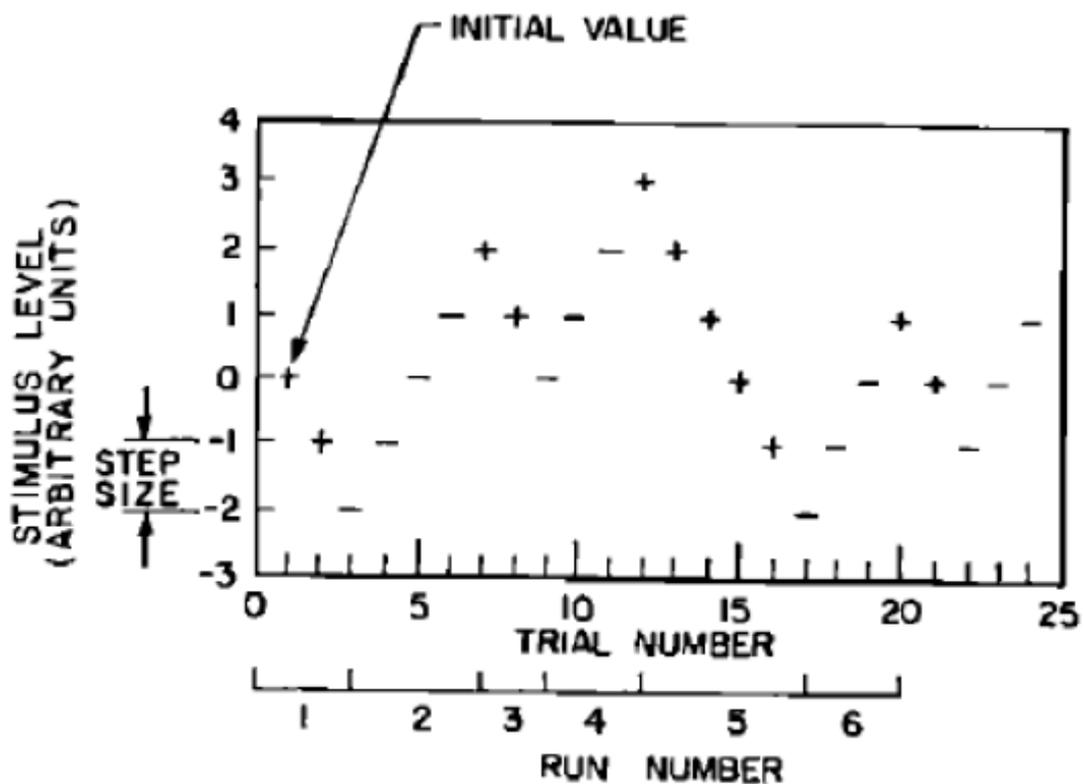


Figura 12. Procedimiento del método *up-down*.

Tomado de (Levitt, 1971, p. 470)

Los pasos (*steps*) son el nivel que se aumenta o disminuye el estímulo. Estos son fijos. El primer nivel con el que se inicia el experimento se conoce como valor inicial (*initial value*). La serie de pasos que corren en una misma dirección se la conoce como corrida (*run*). Por ejemplo, como se puede apreciar en la figura, de la primera a la tercera prueba es la corrida número 1, y de la prueba 3 hasta la 7 es la corrida número 2 y así sucesivamente.

En este método las observaciones están bien ubicadas, ya que están en el punto X50 o cerca de él, lo que beneficia a la estimación del 50% de detección. Si hay acumulación durante el procedimiento de la prueba, la ubicación de las observaciones seguirá esta acumulación.

Las desventajas de este método es que los datos para encontrar otros puntos diferentes a X50 no están bien ubicados, y existe dificultades con respecto a los

pasos (*steps*), ya que, si se utiliza un *step size* muy largo, los datos tendrán una mala ubicación con relación a X_{50} , mientras que con un *step size* muy corto, se malgastan muchas observaciones, debido a que estas convergen a X_{50} .

El análisis *probit* es una técnica convencional que se puede usar para analizar los resultados de los datos obtenidos en este método. Esta técnica llamada *mid-run method* fue desarrollada por Wetherill en 1963. El cual, consiste en tomar un punto medio de cada corrida como estimación x_{50} . Lo que permite que la estimación de la media-corrida sea fuerte, eficiente y con una baja valoración de *bias*.

Se recomienda usar un *step size* largo al principio de la prueba, y conforme avanza el experimento vaya decreciendo su valor. Levitt recomienda en su publicación *Transformed up down methods in Psychoacoustics* que “un procedimiento conveniente consiste en reducir a la mitad el *step size* después de la primera corrida, tercera, séptima, quinceava, etc.” (Levitt, 1971, p. 471).

2.8.5. Transformado arriba- abajo (*Transformed Up-Down Procedure*).

Es un método desarrollado por Levitt y Wetherill en 1965, el cual a diferencia del *up-down*, la disminución del nivel del estímulo no depende de la última respuesta, sino de dos o más respuestas anteriores.

Este método permite determinar diferentes puntos en la función psicométrica. Hay dos grupos donde las secuencias de observaciones son puestas, el grupo *up* y el grupo *down*.

En la tabla siguiente se aprecia las respuestas estos dos grupos y sus probabilidades de obtener una respuesta positiva.

Cabe mencionar que la entrada uno corresponde al método *simple up-down* y las siguientes son variaciones de este.

Tabla 2.

Grupo de respuestas y probabilidades de los métodos transformed up-down.

Entry	Response sequences		Response groupings	
	UP group increase level after:	DOWN group decrease level after:	Probability of a sequence from DOWN group = $P[\text{DOWN}]$	Probability of positive response at convergence
1	-	+	$P(X)$	$P(X) = 0.5$
2	+ - or -	++	$[P(X)]^2$	$P(X) = 0.707$
3	--	- + or +	$[1 - P(X)]P(X) + P(X)$	$P(X) = 0.293$
4	+ + - or + - or -	+++	$[P(X)]^3$	$P(X) = 0.794$
5	+ + + - or + + - or + - or -	++++	$[P(X)]^4$	$P(X) = 0.841$
6	----	-- - + or - - + or - + or +	$1 - [1 - P(X)]^4$	$P(X) = 0.159$
7	Any group of 4 responses with 1 or more nega- tive responses	++++	$[P(X)]^4$	$P(X) = 0.841$
8	-- - + - + - -	+ + + - + - + +	$[P(X)]^2[3 - 2P(X)]$	$P(X) = 0.5$

Tomado de (Levitt, 1971, p. 471)

Los *steps* o cambios de niveles del estímulo se realizan solo después de una secuencia de observaciones, ya sea del grupo up o del grupo down. Por ejemplo, se puede tomar la entrada 3 de la tabla. En la cual se aprecia que el nivel será incrementado después dos respuestas negativas; mientras que el nivel disminuirá solo después de una respuesta negativa y positiva o solo positiva.

En la siguiente figura se puede apreciar el método 2 *down-1up*, que es una variación del método *simple up-down*.

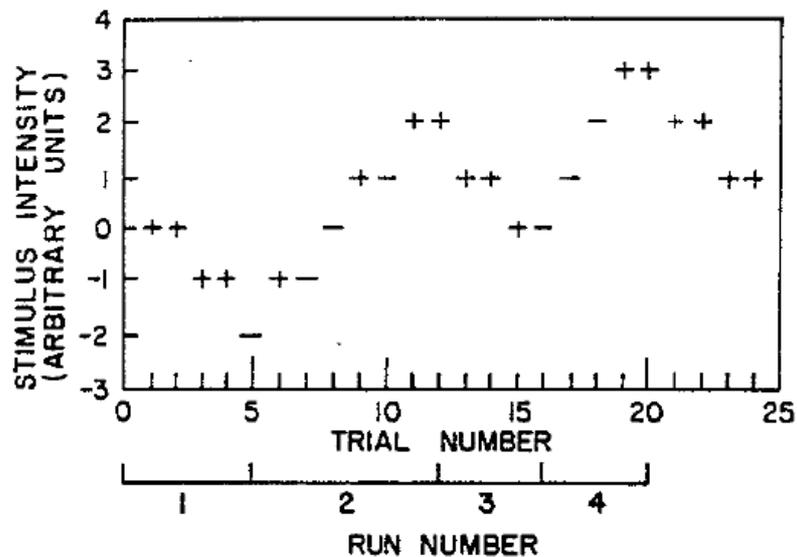


Figura 13. Procedimiento del método *2down-1up*.

Tomado de (Levitt, 1971, p. 472)

Este procedimiento describe la entrada 2 de la tabla anterior la cual converge al punto $X_{70.7}$, esto quiere decir que la posibilidad de obtener respuestas positivas es de una 70,71%. Y se puede apreciar que aumentó el número de pruebas (*trials*) por corridas (*runs*) con respecto al método *simple up-down*.

2.8.6. Método *1up/3down*

Este es el método que se utilizó para medir los umbrales de audición de este proyecto, el cual tiene el 79,37% de probabilidad de obtener una respuesta correcta.

Aquí el nivel del tono aumenta después de dos respuestas positiva y una negativa, o una respuesta y una negativa, o a su vez, solo una respuesta negativa, y esta el estímulo decrece solo cuando se obtiene 3 respuestas positivas por parte del participante.

2.9. Distorsión armónica

Todo sistema eléctrico que emite una señal de audio posee un cierto nivel de distorsión armónica.

Las bocinas sufren de este tipo de distorsión, en donde, al emitir un tono o una señal de audio (tono fundamental f_0), a la salida del sistema, la señal original es deformada en un cierto porcentaje, debido que se añaden nuevas frecuencias (armónicos) con respecto a la señal original, dando lugar a una señal con una amplitud y fase diferente.

La distorsión armónica se genera por asimetrías del sistema de emisión, el “clipping” o deformación de la señal por niveles muy altos, donde la señal original es recortada. Esta se puede medir como un porcentaje o en decibeles.

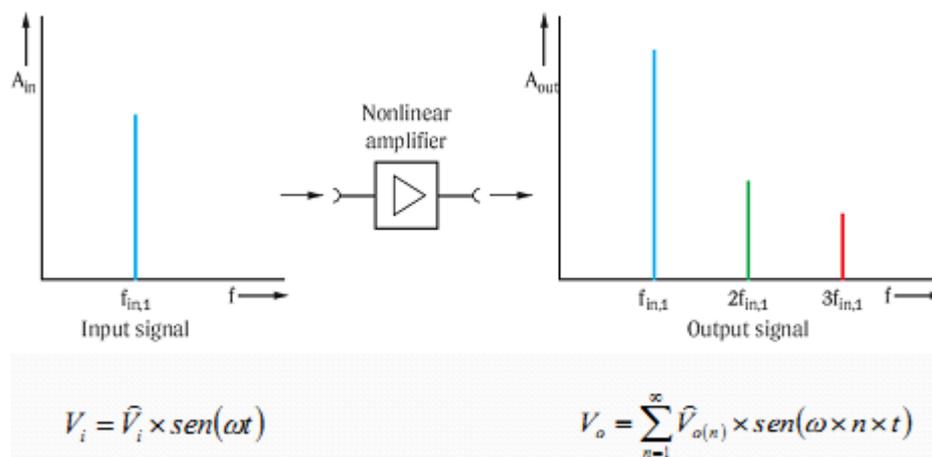


Figura 14. Ejemplo de Distorsión armónica de un tono puro que circula a través amplificador no lineal.

Tomado de (https://es.wikipedia.org/wiki/Distorsi%C3%B3n_arm%C3%B3nica)

Como se observa en la figura 15, se añaden nuevas frecuencias que son múltiplos de la frecuencia fundamental (armónicos).

Se puede decir que un sistema de audio que tiene muy poca distorsión armónica, es aquel que a la salida muestra la señal original muy por encima de sus armónicos, es decir que entre el valor del primer armónico (frecuencia fundamental) y su segundo armónico, hay una diferencia de 30 o más decibeles. Pero cuando esta diferencia es menor de 30 dB, se presenta una alta distorsión armónica.

Para este proyecto se buscó mejorar la distorsión armónica del antigua sistema propuesto por Gordillo y Gallegos (2016), diseñando y elaborando un nuevo sistema de audífonos modificados se será detallado más adelante.

3. DISEÑO EXPERIMENTAL

3.1. Equipamiento

Para la realización de este proyecto se trabajó con una parte del sistema de medición propuesto por Gallegos y Gordillo (2016).

3.1.1. Computador

Se utilizó la computadora del laboratorio de acústica de la UDLA, para la emisión y control de los tonos, este va conectado a la interface *Fireface 802* mediante un puerto USB, que interactúa con el audífono y el micrófono para la calibración del *setup*, como también la emisión y medición de datos de nivel de presión sonora (NPS).

3.1.2. Interface RME *Fireface 802*

Esta interface que se encuentra actualmente disponible en el laboratorio de acústica, se usó para convertir la señal digital a analógica y viceversa, cuyas funciones principales son la emisión de ruido blanco, tonos puros de baja frecuencia e infrasonido, y la medición de NPS captados por el micrófono.

Esta interface dispone de 12 entradas y salidas analógicas.



Figura 15. Vista frontal y posterior de la interface *Fireface 802*.

3.1.3. Sonómetro CESVA SC 310

Este sonómetro y analizador de espectro que se usó en este proyecto, es de clase 1 ampliable a analizador en tiempo real de espectros por tercios de octava.

Para la calibración del *setup* fue necesario realizar varias mediciones acústicas.

Se usó este sonómetro para medir el ruido de fondo del laboratorio donde se llevó a cabo el experimento, también para medir el nivel de presión sonora de algunas frecuencias para verificar la confiabilidad del *setup*.

Se hizo uso del calibrador cuya frecuencia para verificar el correcto funcionamiento del sonómetro fue de 1kHz a 94dB.



Figura 16. Sonómetro CESVA SC 310.

3.1.4. Micrófono de medición GRAS 46A0

Este micrófono es de alta precisión para trabajos de laboratorio, cuya respuesta de frecuencia va de 3.15Hz-20kHz, y su rango dinámico de 25-150 dB con una sensibilidad de 12mV/Pa.

Este micrófono fue usado para la calibración del equipo y medición de distorsión armónica.



Figura 17. Micrófono GRAS46AO

3.1.5. Audífonos modificados

Para el diseño del *setup* se utilizó el canal derecho de los audífonos Beyerdynamic DT 1350. Las respuestas de frecuencias de estos audífonos son de 5Hz- 20Hz.



Figura 18. Audífonos Beyerdynamic DT 1350.

3.1.6. Botón de respuestas

Se utilizó el mismo botón de respuestas del sistema de medición de la tesis que elaboraron Gallegos y Gordillo, el cual ayuda a la interacción tanto del oyente y sus respuestas ante estímulos sonoro para la obtención de datos.

Este equipo se encuentra disponible en el Laboratorio de Acústica de la Universidad de Las Américas.



Figura 19. Botón de respuesta utilizado para la medición de umbral de audición.

3.1.7. ER-10C

Este sistema tipo sonda de bajo ruido se utilizó para interpretar correctamente las mediciones de distorsión que producen la emisión otoacústica (DPOAE).

Las puntas de las orejas (*ear tips*) son fáciles de reemplazar y viene en 8 diferentes tamaños para la oclusión de los oídos.



Figura 20. Micrófono tipo sonda Etymotic ER-10C.

3.1.8. Software (MATLAB)

Es un paquete de software que se utiliza para el desarrollo de cálculos numéricos, operaciones matriciales, para aplicaciones en la ciencia y en la ingeniería. Tiene un lenguaje de programación propio.

Este programa fue usado como plataforma para ejecutar los códigos de programación para medir umbral de audición y distorsión armónica del sistema, así también para realizar las gráficas de curvas de umbrales.

La versión de MATLAB que se usó fue la R2013b.

3.2. Diseño del *setup*

La fuente de infrasonido se basa en la transmisión de sonido a través de un tubo, como Etymotic ER-10C. La fuente puede proporcionar estimulación acústica con una distorsión suficientemente baja en el rango de frecuencia de 5 a 200 Hz hasta un SPL de acuerdo con el contorno aproximado de igual sonoridad de 60

phones (por ejemplo, 127.5dB SPL para 5 Hz). El transductor electroacústico utilizado para esta fuente es un altavoz electrodinámico tomado de los audífonos Beyerdynamic DT 1350 (Bocina Izquierda), El altavoz está montado herméticamente sellado en una caja de aluminio amortiguada, y está acoplado a la oreja por un tubo de polietileno (longitud: 17 cm, diámetro interno: 0.1 cm) y un audímetro auricular ER3-110C, Etymotic Research (Fig. 21).

El volumen encerrado entre la membrana del altavoz, el tubo y la oreja de una persona de prueba, representa una cámara de presión para frecuencias muy bajas ($f < 20$ Hz), lo que permite tener una baja pérdida de la excitación de energía acústica en el infrasonido.

Se rediseño la placa de aluminio del *setup* que presentaron Gallegos y Gordillo (2016), con el fin de reducir la cavidad de aire del sistema para obtener una mejor respuesta de frecuencia con una baja distorsión armónica que permita realizar las mediciones a partir de 5[Hz] del *setup* y especialmente en baja frecuencia e infrasonido.

El diseño de la placa logra que el sonido que emite de la bocina del audífono, viaje a través de un espacio muy pequeño, terminando en el tubo de 0.1 cm de diámetro. Para obtener un mejor control del NPS a un nivel suficientemente alto para realizar las mediciones de umbrales.

La siguiente ecuación describe la relación que hay entre la variación de presión con variación de volumen.

$$\Delta p = -\gamma p_0 \frac{\Delta V}{V}$$

[Ecuación 1]

Con esta ecuación se puede calcular el nivel de presión sonora estimado que existe en el nuevo diseño del *setup* a partir de su volumen.

Las condiciones iniciales son las siguientes:

Constante adiabática=1.4

Presión atmosférica con la altura de Quito (2800[m]) = 72000 pascales

Excursión del cono del driver = 1[mm]

Los datos para el cálculo del volumen total son los siguientes:

Volumen de tubo/manguera de plástico de 15 [cm]= 1.335×10^{-7} [m³]

Volumen del tubo de metal de 2 [cm] = 0.628×10^{-6} [m³]

Volumen del canal auditivo ocluido= 1×10^{-6} [m³]

Volumen entre la bocina y la placa de aluminio= 4.77×10^{-6} [m³]

Con estos datos el volumen total es igual a: $7.0315/1000000$ [m³]

Aplicando la ecuación 1, se obtiene que el nivel estimado de presión sonora que entregara el sistema es de: 178.09 [dB].

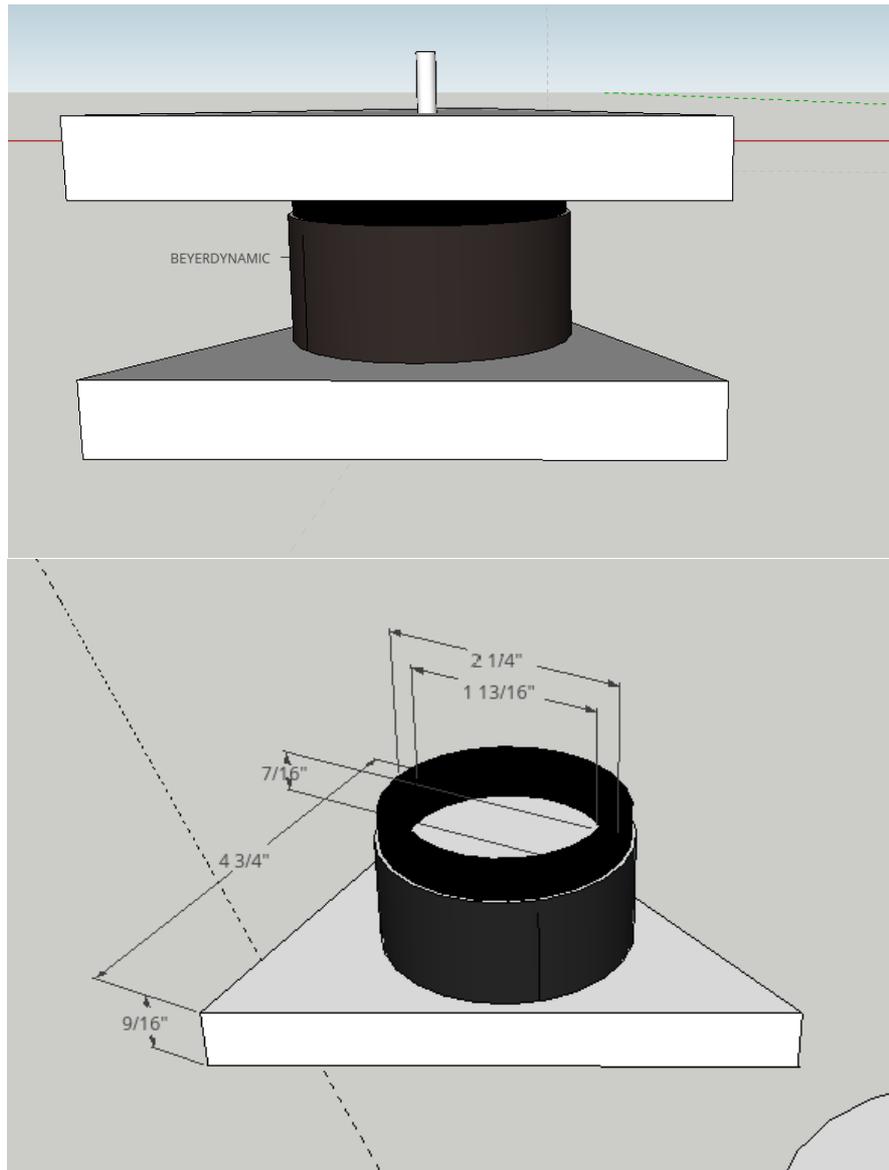


Figura 21. Diseño del nuevo *setup* elaborado en *SketchUp*.

Con las nuevas medidas del diseño del *setup*, se obtendrá una mayor respuesta del sistema, con un nivel suficientemente alto para emitir bajas frecuencias e infrasonido.

3.3. Diseño del método psicoacústico para medición de umbral de audición

Una vez conocidos los diferentes métodos adaptativos psicoacústicos, se optó por escoger el método *Transformed 1Up-3Down*, que tiene una probabilidad de obtener respuestas positivas de un 79.4%.

Se usó el mismo código de la programación de MATLAB para medir umbral de audición, que presentaron Gallegos y Gordillo (2016), donde la señal que se emite tiene una duración de 1.2 segundos. Este es el tiempo de duración que se encenderán los leds uno por uno, con una pausa entre ellos de 400 milisegundos.

El nivel de la señal aumenta y disminuye en pasos de 8, 4 y 2 dB cuando se hayan ejecutado dos cambios de estado (*turnpoints*). Una vez que se hayan ejecutado 8 cambios de estado, estos se promedian para obtener el dato final que corresponde al umbral absoluto de audición del participante.

3.4. Diseño muestral (Número de personas, edad y género)

Para el diseño muestral de personas, se tomó en cuenta a participantes de 18 a 32 años de edad, ya que, en este rango de edad, las personas normales ya tienen desarrollado completamente sus órganos, y su funcionalidad es óptima, en este caso, para nuestro interés, el órgano de la audición. Ya que, si se escogen personas fuera de este rango, pueden presentar pérdida de audición, por causa de una edad avanzada, ya que a medida que envejecemos las células ciliadas van perdiendo su eficiencia para la transmisión de energía acústica. Y en el caso de personas muy jóvenes que están todavía en su etapa de crecimiento los valores de umbrales no sería los valores finales, debido a que el volumen de aire que existe en el conducto auditivo cambiaría a futuro y los valores también cambiarían.

El género de las personas no influye en la medición de umbrales para este rango de frecuencia. Por lo que se escogió 10 personas (4 hombres y 6 mujeres) situadas en el rango de edad mencionado anteriormente.

Tabla 3.

Nombre, edad y género de las personas que participaron en este experimento.

Nombre del participante	Edad	Género
Participante 1	32	M
Participante 2	18	M
Participante 3	28	F
Participante 4	30	F
Participante 5	20	F
Participante 6	19	F
Participante 7	23	F
Participante 8	28	F
Participante 9	20	M
Participante 10	22	M

La mayoría de participantes fueron estudiantes de la carrera de ingeniería en Sonido de la misma institución.

3.5. Distorsión armónica del sistema

Una vez elaborada la placa de aluminio acoplada a los audífonos modificados se procedió a medir la distorsión armónica del *setup*.

Mediante códigos de programación en MATLAB, se utilizó un programa para la emisión y grabación de ruido blanco y tonos puros, así también, para la grabación y análisis de dichos resultados.

Esta medición se la realizó utilizando la interface *FireFace 802*, donde se emitieron tonos puros de 30 segundos cada uno en las frecuencias de 5,6,8,10,12,16, 20 y 40 [Hz], mediante los audífonos modificados, y para la grabación de estos tonos, se utilizó el micrófono GRAS 46AO.

Se simuló el volumen de aire del oído humano mediante una jeringa, en un volumen de 1 centímetro cúbico, el cual se selló con una punta de espuma del micrófono Etymotic que va unido al tubo/manguera que está acoplado a los audífonos modificados. Se configuró el nivel de ganancia de la señal de salida de la interface RME *Fireface 802* en un 15% para evitar saturaciones del nivel de la señal de entrada que es grabada por medio del micrófono GRAS.



Figura 22. Calibración del sistema utilizando un volumen de 1.5 centímetros cúbicos para simular el volumen de la cavidad del canal auditivo.

3.6. Calibración del *setup*

Las mediciones de distorsión armónica se realizaron en una cavidad de calibración de 1 centímetro cúbico con el micrófono GRAS 46AO de 0,5 pulgadas que tiene una respuesta plana hasta 5 Hz. Para niveles fundamentales cercanos a 128 dB SPL.

Se utilizó este acoplador de volumen relativamente bajo en lugar de un acoplador de 2 cc, porque se descubrió que reducía las diferencias de nivel de reajuste de acoplamiento (como se ha observado para los auriculares insertados por Bryant, 1972). Se utilizó el micrófono de sonda Etymotic *Research* ER10C para la medición. Inicialmente, se obtuvo la respuesta de frecuencia del ER10C grabando simultáneamente a una señal de ruido blanco de 20 s (reproducida con el auricular de inserción DT-1350 en la cavidad de 1 cc) con el ER10C y con el micrófono GRAS 46AO de 0,5 in (la sensibilidad absoluta del micrófono GRAS se midió con una señal de 94 dB SPL, 1000-Hz generada por un calibrador/pistófono).



Figura 23. Medición de la sensibilidad del micrófono GRAS 46AO.

Las salidas del micrófono se conectaron a las entradas RME 802 *Fireface*, y todo el procesamiento de la señal se realizó mediante un *software* personalizado. Las señales de tiempo medidas con cada micrófono se promediaron a partir de un grupo de 100 bloques, cada uno de 0,2 s de longitud, para mejorar la relación señal / ruido. Estos promedios se transformaron en el dominio de la frecuencia a través de la transformada de Fourier rápida.

El espectro de frecuencia de la salida (promediada) de la sonda ERC10C se dividió por el espectro de la salida de micrófono GRAS 46AO (promediada). De esta manera, la respuesta del auricular insertable DT-1350, junto con la señal de entrada eléctrica (ruido blanco), fueron efectivamente desconvolucionados, y se obtuvo la compleja respuesta de frecuencia de la sonda ER10C.

Se realizó una medición posterior utilizando la cavidad de 1 cc, en la que se reprodujo el ruido blanco con el auricular de inserción DT-1350, mientras se registraba con la sonda ER10C. El espectro de frecuencia correspondiente a la salida promediada de la sonda ERC10C se dividió por el espectro de ruido blanco de entrada y por la respuesta de frecuencia compleja de la sonda ER10C, obtenida previamente. De esta manera, se obtuvo la respuesta de frecuencia compleja del auricular de inserción DT-1350.

3.7. Medición del ruido de fondo

En primer lugar, se realizó la medición del ruido de fondo de la habitación donde se llevó a cabo el experimento (laboratorio LA1).

Esta medición se la realizó en diferentes condiciones iniciales. Es decir, se tomó en cuenta el sistema de aire acondicionado que la habitación de al lado, el sistema eléctrico o de iluminación, y el computador que se encuentra dentro de la habitación.

Se realizó una tabla de las condiciones iniciales de esta habitación, la cual se muestra a continuación.

Tabla 4.

Condiciones iniciales específicas para medir el ruido de fondo.

N° de medición	Pc	Luz eléctrica	Aire acondicionado
1	Encendido	Encendido	Apagado
2	Apagado	Encendido	Apagado
3	Apagado	Apagado	Apagado
4	Encendido	Encendido	Encendido

Con el fin de verificar que la relación señal ruido no vaya a influir en la medición tanto de calibración del equipo, distorsión armónica y umbrales de audición. Se procedió con las mediciones del ruido de fondo con las condiciones descritas en la tabla 4.

Esto se lo realizó con el analizador de espectro por bandas de un tercio de octava del sonómetro CESVA SC 310.

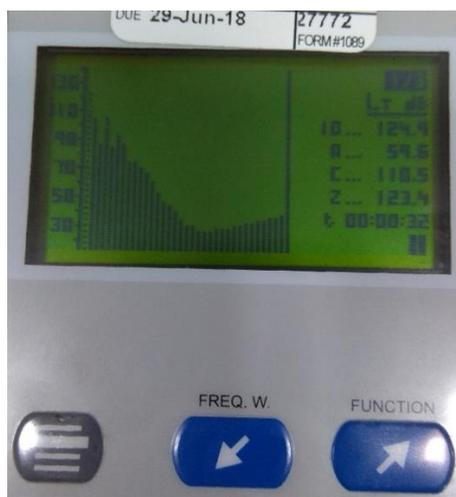


Figura 24. Medición del ruido de fondo con el analizador de espectro en bandas de un tercio de octava del sonómetro CESVA 310.

Cabe mencionar, que, para la medición de ruido de fondo, el sonómetro se ubicó en la misma posición donde los participantes iban a realizar el test.



Figura 25. Medición del ruido de fondo en la misma posición donde el oyente realizó el experimento.

3.8. Medición de umbrales de Audición.

En siguiente figura se aprecia la cadena electroacústica del sistema para medir umbrales de audición en baja frecuencia e infrasonido.

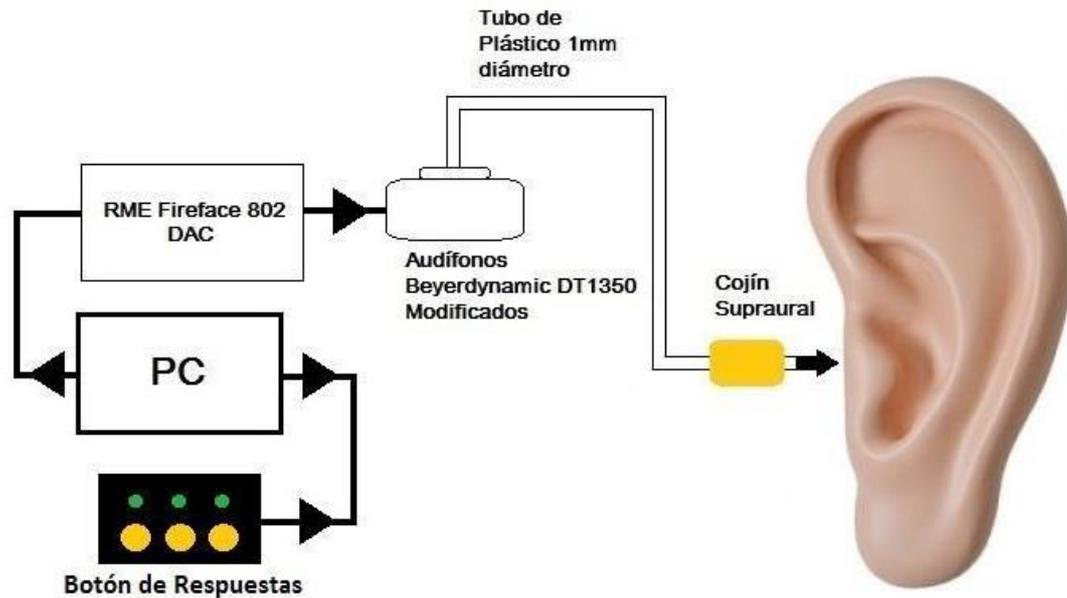


Figura 26. Cadena electroacústica para medición de umbrales de baja frecuencia e infrasonido.

Tomada de (Gordillo y Gallegos, 2016, p. 56)

Para determinar los umbrales de audición, las mediciones se las realizaron de manera monoaural, utilizando una punta de espuma Etymotic. El experimento en sí estaba controlado por medio del software de MATLAB. Todos los estímulos se generaron digitalmente a una frecuencia de muestreo de 96 kHz.

El experimento se realizó en el laboratorio de acústica de la UDLA (LA1), donde se llevó a cabo las respectivas mediciones para obtener los umbrales de audición de 10 sujetos de prueba (6 mujeres y 4 hombres), con edades comprendidas entre 18-33 años (edad promedio de 24 años), en las frecuencias de 5, 10, 15, 20, 40 Hz.

Todos los participantes recibieron instrucciones escritas y habladas previo al experimento, y antes de proceder a las mediciones para la obtención de umbrales, cada sujeto realizó un test de ensayo, para determinar si su audición era normal. Y así, verificar si eran o no aptos para el experimento.

Para proporcionar una eficiente concentración de los sujetos, hubo periodos cortos de descanso de 3 a 4 minutos entre la obtención de umbral de audición de cada frecuencia, y un descanso de 10 minutos al tercer umbral de audición obtenido.

Se realizó dos veces la misma medición en cada frecuencia, para tener un promedio de los valores resultantes, teniendo en cuenta que, si la diferencia entre los valores de la primera y segunda medición era igual o menor a 3dB, el valor que promediaba el software de Matlab era el dato final correspondiente al umbral de audición, y en los casos que la diferencia entre los volares de la primera y segunda medición era mayor a 3dB se realizó una tercera medición, así, por medio del método de exclusión, se eliminaría el valor más lejano entre los tres valores obtenidos, y se promediaba solo los dos valores más cercanos entre sí, para finalmente obtener el valor de umbral requerido.

Para permitir a los sujetos acomodarse a la prueba de audición, la frecuencia inicial que fueron expuestos fue de 40 Hz, ya que dicha frecuencia es fácilmente perceptible como un tono puro ya que está en el rango audible del oído humano. El orden de la estimación de los tonos de prueba restantes se distribuyó de forma aleatoria. El tiempo promedio que duró el experimento para obtener los umbrales de audición en las 5 frecuencias mencionadas, promediado sobre los 10 sujetos, fue de 105 minutos.

Cada prueba consistió en tres intervalos de tiempo, denotados en los tres leds correspondientes a los botones de respuestas, cada intervalo dura 1.2 segundos de longitud, los cuales tienen 0,2 segundos de rampa inicio lineal y desplazamiento ya incluidos, separados por una pausa de 400 ms. Después que el individuo haya respondido, se enciende el led que corresponde a la respuesta correcta. Uno de los intervalos emitía la señal de prueba acústica, mientras que los otros dos comprendían silencio. La tarea de cada sujeto era indicar, mediante los botones de la caja de respuesta, que intervalo contenía la señal de prueba. El sujeto tuvo tiempo ilimitado para responder y recibió comentarios visuales sobre la corrección de su respuesta, luego de lo cual comenzó la siguiente

prueba. La asignación de la señal del tono puro a los tres intervalos se asignó al azar para cada prueba.

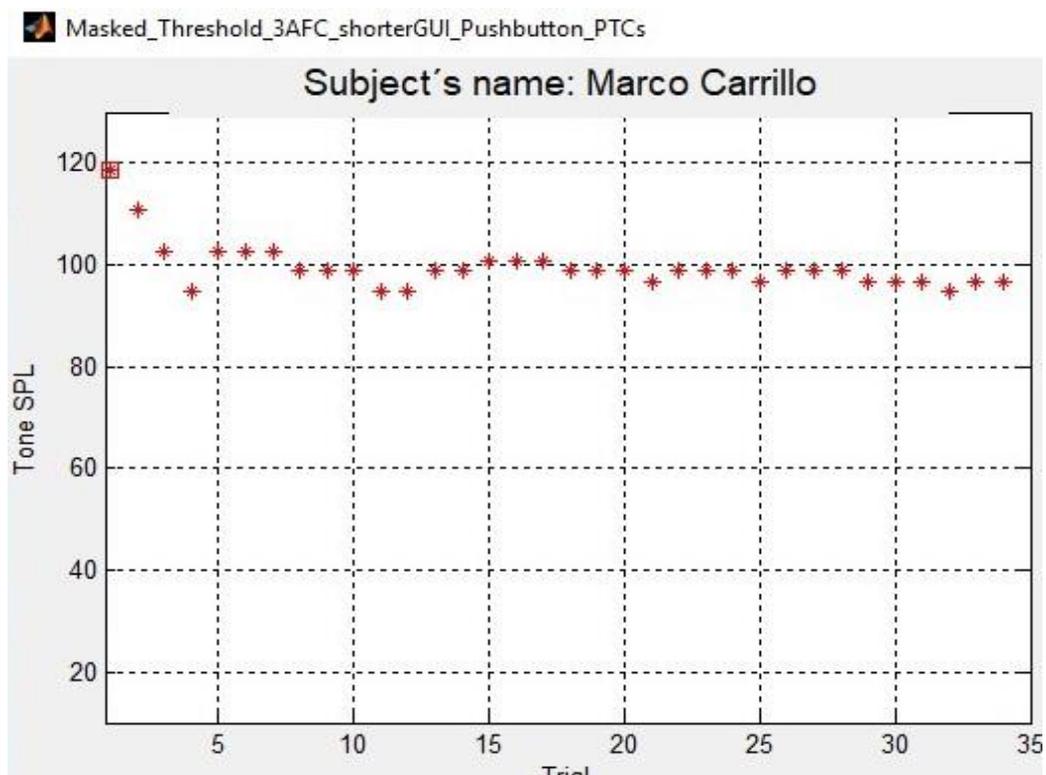


Figura 27. Descripción grafica de los *turnpoints* usados para la medición de umbrales de audición.

En la figura 27, se puede apreciar un ejemplo de los *turnpoints* que arroja el software de medición de umbral de MATLAB, frente a las respuestas del participante. Y también se puede apreciar el método adaptativo utilizado en este test (3down-1up).

Como se muestra en la figura 29, la primera señal que se emite correspondiente a la secuencia inicial, es considerablemente alta, para que todos los participantes puedan escuchar desde el inicio del test.

El nivel de la primera señal emitida para cada frecuencia fue basado en la norma ISO 2006 para mediciones binaurales, por lo que a este valor se le sumó 3dB con el fin de realizar la corrección correspondiente a mediciones monoaurales, y se le sumó 20dB más, para lograr que la primera señal emitida sea audible,

debido que algunos participantes, resultaron tener la audición más sensible que los otros. Por lo que, a algunos de los 10 sujetos, escuchaban la primera señal acústica más alta. Por esta razón se procedió a atenuar la señal la señal del tono en dichos casos, para luego hacer la respectiva corrección.

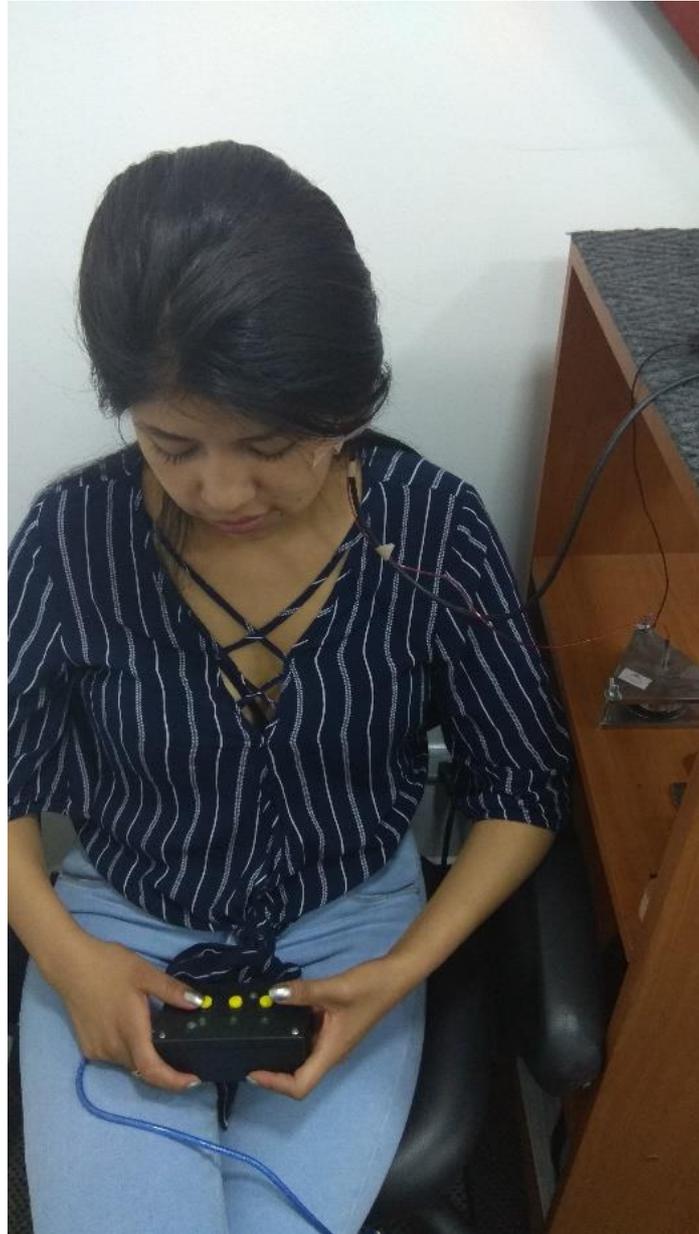


Figura 28. Participante interactuando con la caja de botones de respuestas, para la obtención de umbrales de audición.

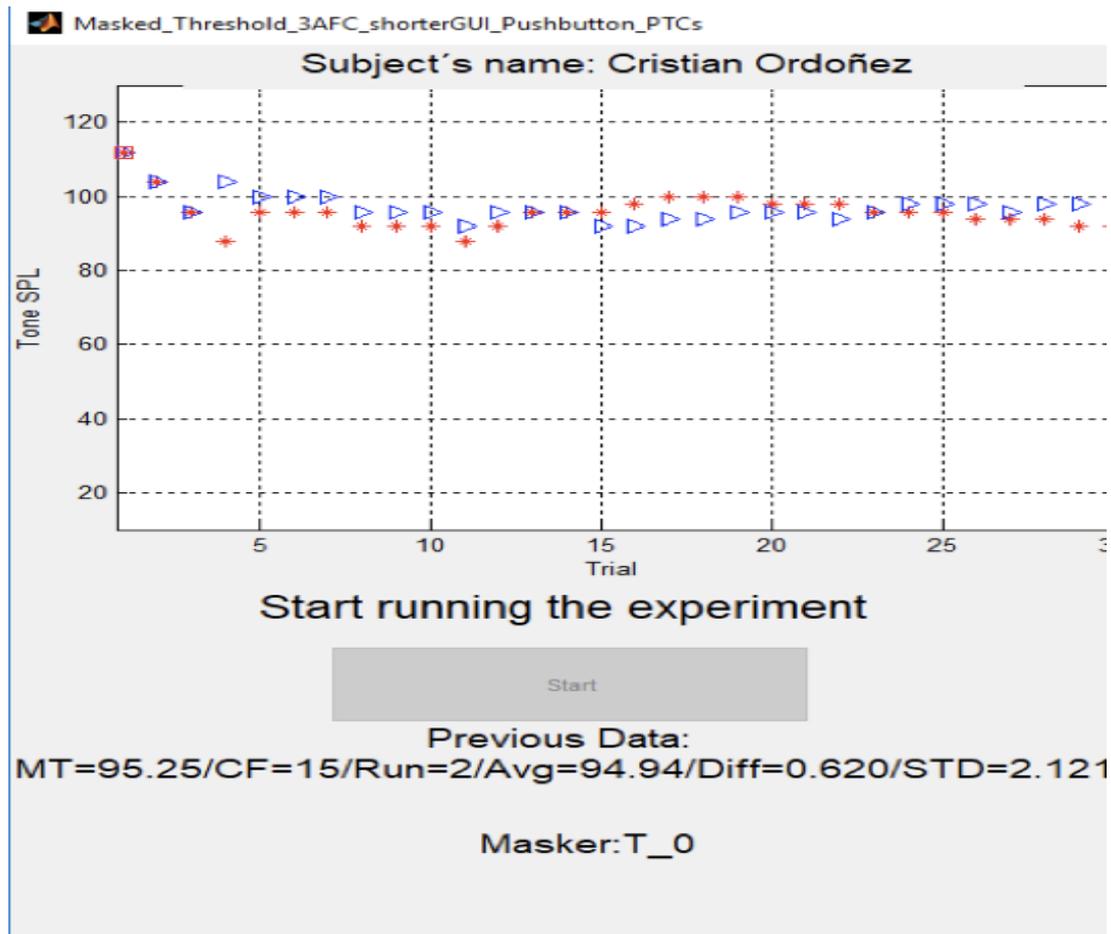


Figura 29. Plataforma del software de MATLAB para medir umbral de audición.

En la figura 29, se aprecia un ejemplo de los *turnpoints* de las dos mediciones de umbral que fue sometido un participante para obtener el umbral absoluto de audición. La diferencia entre los valores de estas dos mediciones fue de 0.620 dB, con lo que no fue necesario realizar una tercera medición.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Nuevo *Setup* de audífonos modificados

El sistema de generación de sonido consistía en un auricular Beyerdynamic DT-1350, acoplado mediante dos placas de metal sellada a un tubo de plástico angosto de 0.8 mm de diámetro, que se insertó en el canal auditivo a través de un tapón de espuma el cual fue perforado, de tal manera que, que el oído quede completamente ocluido. Estos sistemas pueden considerarse como filtros

acústicos pasa bajos, donde el volumen de aire que se desplaza por el diafragma de la bocina, es proporcional a la presión del sonido que se genera dentro de esta cavidad. Debido a esto, se logró emitir señales de audio relativamente altos y con una baja distorsión armónica en bajas frecuencias e infrasonido que se requieren para tener una medición eficiente de umbral de audición.

Al estimular el sonido directamente en el canal auditivo, también evita variaciones espaciales en el nivel de sonido, que generalmente surgen para frecuencias superiores a 100 Hz, como es el caso de las cámaras de presión, donde todo el cuerpo del participante es expuesto a la presión sonora.

El audífono modificado fue controlado por el amplificador de audífonos de la interface RME *Fireface* 802 (48.000 muestras / s, 24 bits). La reproducción fue controlada con software de MATLAB personalizado.

El sistema de sonido se configuró para permitir un nivel de escala completa de hasta 127.5 dB SPL a 5 Hz, que fue la frecuencia más baja para medir los umbrales. Sin embargo, el valor exacto del nivel de la señal, varió en cierta medida dependiendo de la colocación de la punta de espuma del auricular de inserción DT-1350 a la oreja.

Una vez elaborado las placas de aluminio con sus respectivas medidas, cuyo diseño no difiere mucho del modelo anterior, el cual fue recomendado por la *University College London* (UCL), se hicieron las respectivas mediciones para verificar si el nuevo sistema es eficiente para medir umbrales de audición en el rango de baja frecuencia e infrasonido.

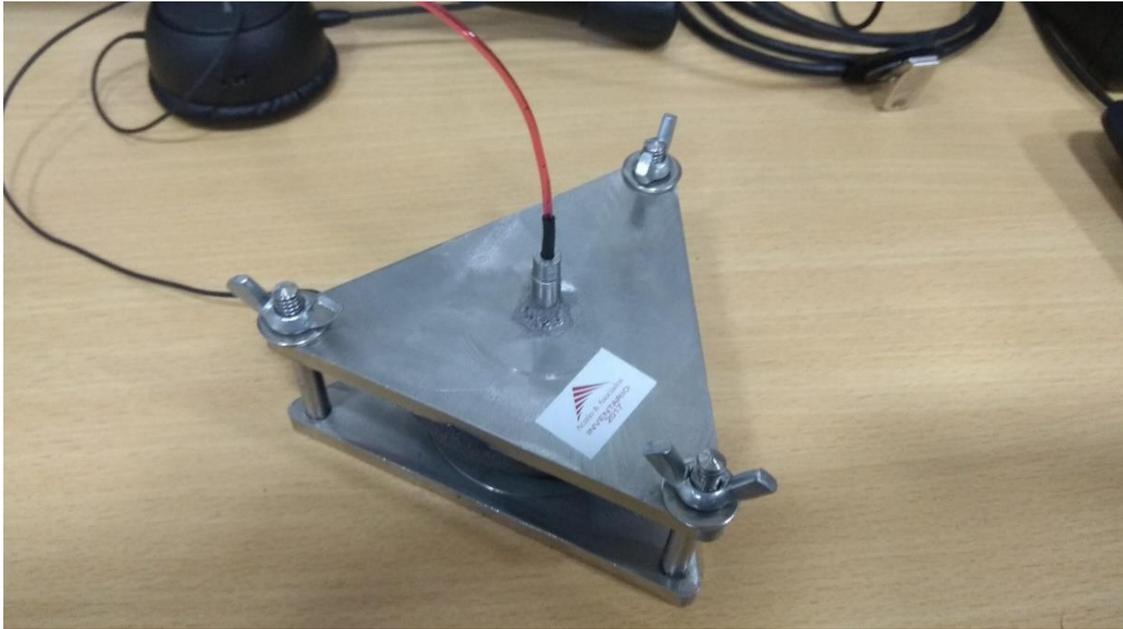


Figura 30. Nuevo *setup* implementado con nuevas medidas de diseño, para la emisión de tonos puros en baja frecuencia e infrasonido.

La empresa CALSEG & SUMINTEC fue la encargada de fabricar el nuevo *setup* con las medidas que se propuso.

4.2. Respuesta de frecuencia del sistema

Dado que el nuevo sistema funciona como un filtro pasa bajos, la respuesta que se obtuvo del sistema en bajas frecuencias, es eficiente para realizar las mediciones de umbrales en dicha zona frecuencial. Ya que los niveles que se obtuvieron sobrepasan los niveles recomendados por Moller y Perdersen (2004) que se aprecian en la figura (4)

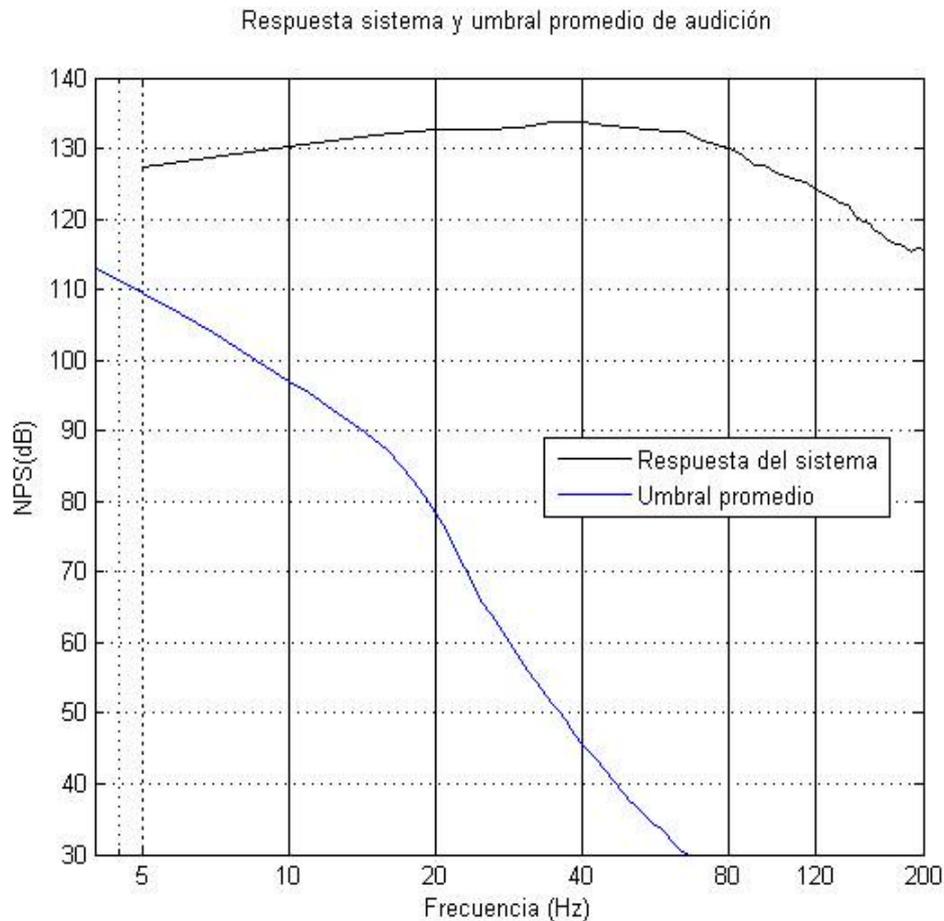


Figura 31. Umbral promedio de audición y la respuesta de frecuencia del sistema.

Como se aprecia en la figura anterior, la respuesta del sistema está por encima del umbral de audición promedio. Por ejemplo, para la frecuencia de 5 Hz el umbral de audición es aproximadamente 109 dB, y la respuesta del sistema para dicha frecuencia, cuenta con un nivel de 127.4 dB.

Dado a la complejidad al generar señales de alto nivel en bajas frecuencias y con baja distorsión armónica, los resultados obtenidos en las mediciones, muestran que el sistema implementado, funciona correctamente y es eficiente para mediciones de umbrales de audición en bajas frecuencias e infrasonido. Lo que permite realizar las mediciones psicoacústicas efectivamente, como umbral de audición, así también, como medición de curvas isofónicas para frecuencias muy bajas, lo cual, en la actualidad se tiene una escasa información.

4.3. Comparación de curvas de respuesta de frecuencia entre el nuevo sistema y el sistema anterior.

Los resultados que se obtuvo de la respuesta de la respuesta de frecuencia del sistema, fue satisfactoria.

Se realizaron las respectivas mediciones para determinar la curva de respuesta de frecuencia del nuevo sistema implementado en este proyecto y el sistema anterior usado por Gallegos y Gordillo (2016), con las mismas condiciones iniciales.

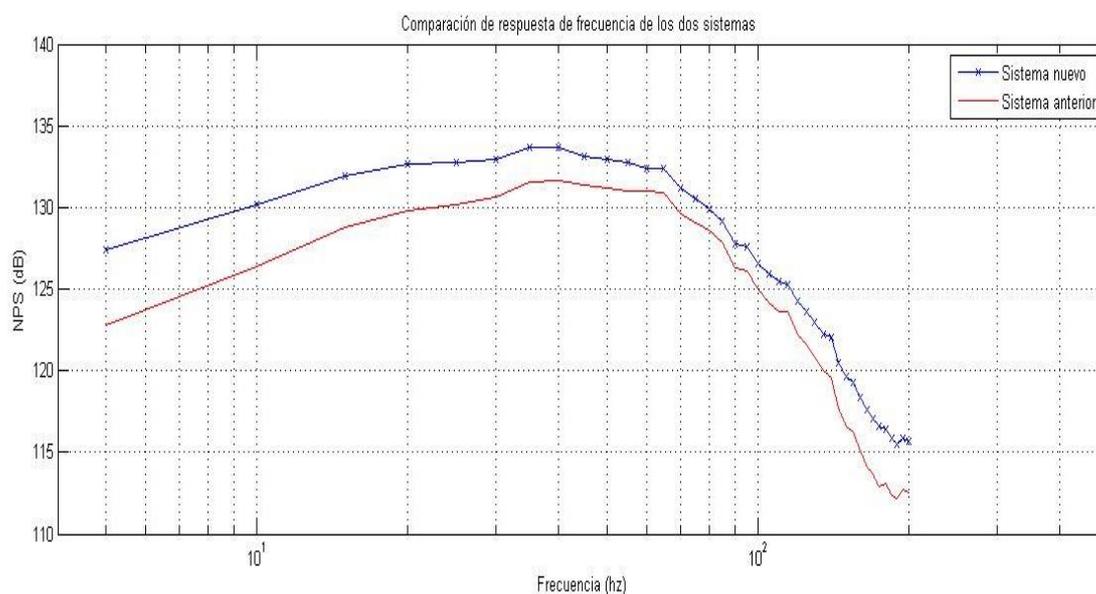


Figura 32. Curvas de respuesta de frecuencia del sistema anterior y el nuevo sistema.

Como se aprecia en la figura anterior, la curva de frecuencia del nuevo sistema obtuvo una respuesta de frecuencia más alto que el sistema anterior, especialmente en la zona de baja frecuencia e infrasonido, entregando 127.5 dB para la frecuencia de 5 Hz. Con estos resultados, se demuestra que el nuevo sistema es eficiente para medir umbrales de audición en la zona frecuencial de interés.



Figura 33. Nuevo sistema y sistema anterior de audífonos modificados.

4.4. Distorsión armónica de los nuevos audífonos modificados.

El nivel de la señal de los tonos puros emitidos para medir distorsión armónica, se lo ajusto en 5 niveles diferentes con respecto al umbral de audición promedio, los cuales fueron:

Nivel 1= umbral de audición +10 dB

Nivel 2= umbral de audición + 5 dB

Nivel 3= umbral de audición + 0 dB

Nivel 4= umbral de audición – 5 dB

Nivel 5= umbral de audición – 10 dB

Las frecuencias, en donde se midió la distorsión armónica con los 5 niveles de señal emitidos fueron: 5, 6, 8, 10, 12, 20, 40 y 80 Hz, por lo que se obtuvo 5 mediciones de distorsión armónica diferentes para cada una de estas frecuencias.

Como se mencionó anteriormente, fabricar un sistema de emisión de infrasonido es muy complejo, y mientras más baja sea la frecuencia de emisión, es más difícil es controlar la distorsión armónica. Por lo consiguiente, se tomó como ejemplo los resultados obtenidos de las mediciones de distorsión armónica para la frecuencia más baja utilizada para el experimento (5Hz).

A continuación, se presenta los resultados obtenidos de la distorsión armónica para la frecuencia de 5 Hz en los 5 niveles de la señal de emisión.

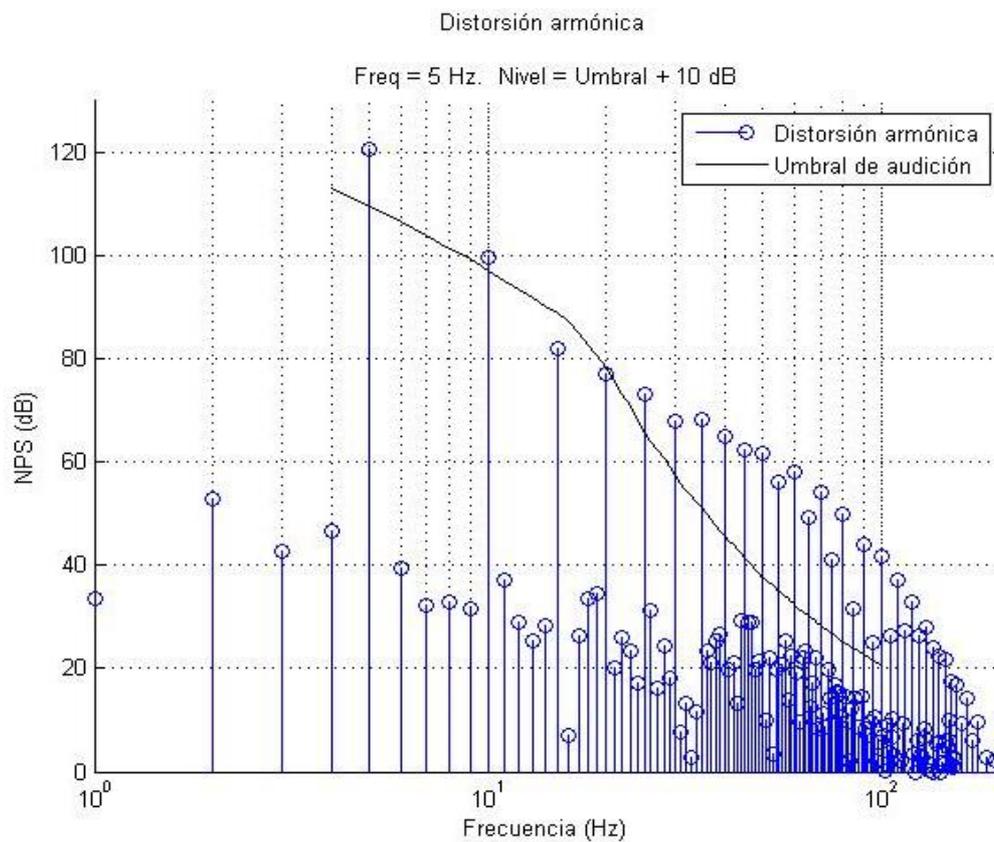


Figura 34. Distorsión armónica de los audífonos modificados en 5Hz con un nivel de señal de 10 dB sobre el umbral de audición promedio.

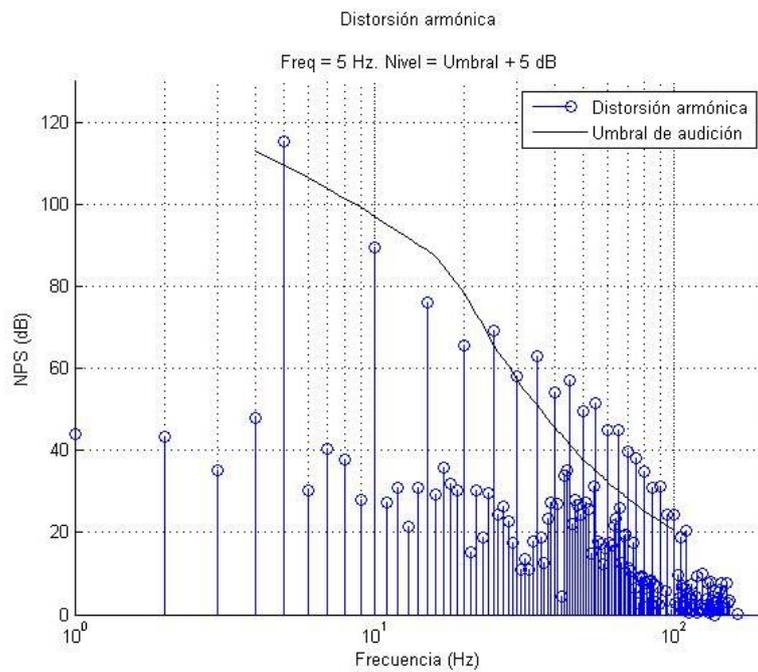


Figura 35. Distorsión armónica de los audífonos modificados en 5Hz con un nivel de señal de 5 dB sobre el umbral de audición promedio.

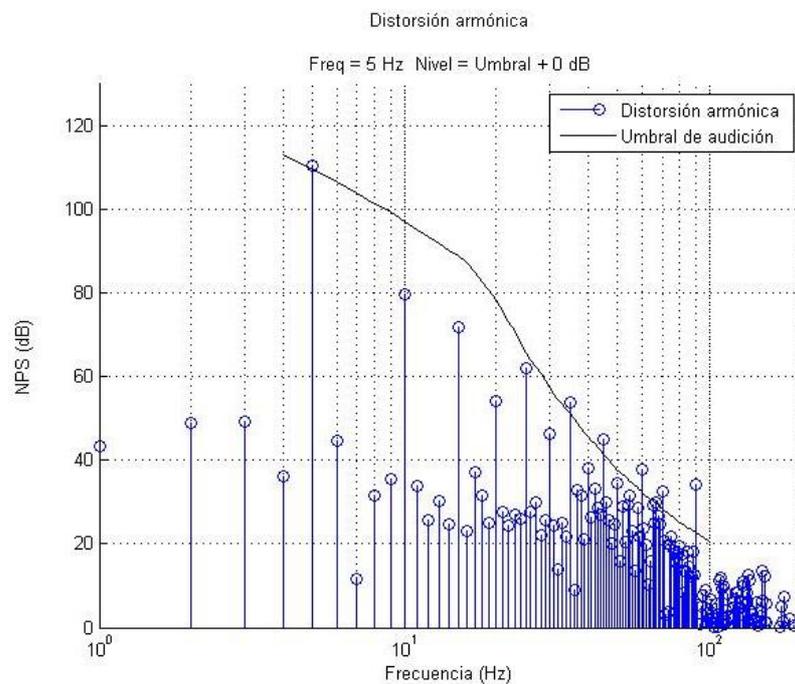


Figura 36. Distorsión armónica de los audífonos modificados en 5Hz con un nivel de señal igual al umbral de audición promedio.

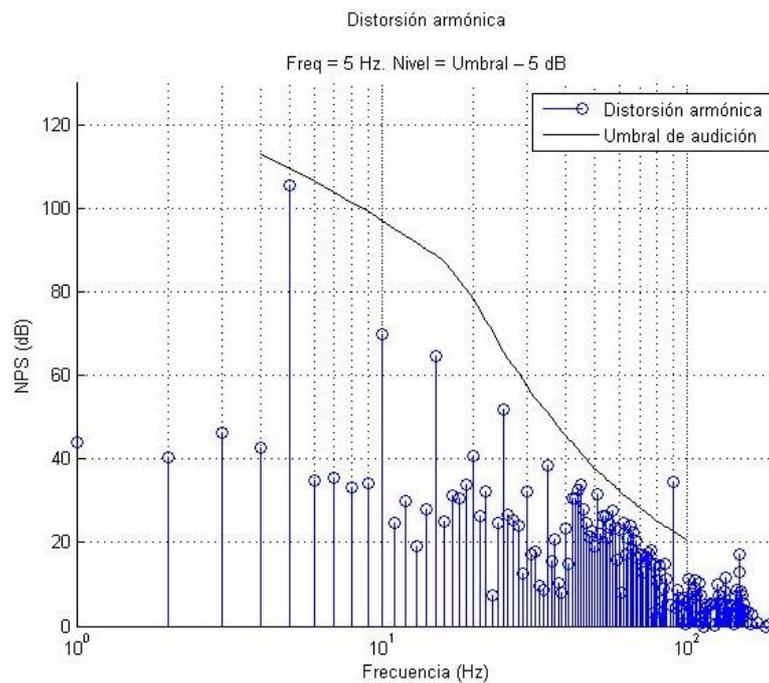


Figura 37. Distorsión armónica del *setup* en 5Hz con un nivel de señal de 5 dB por debajo del umbral de audición promedio.

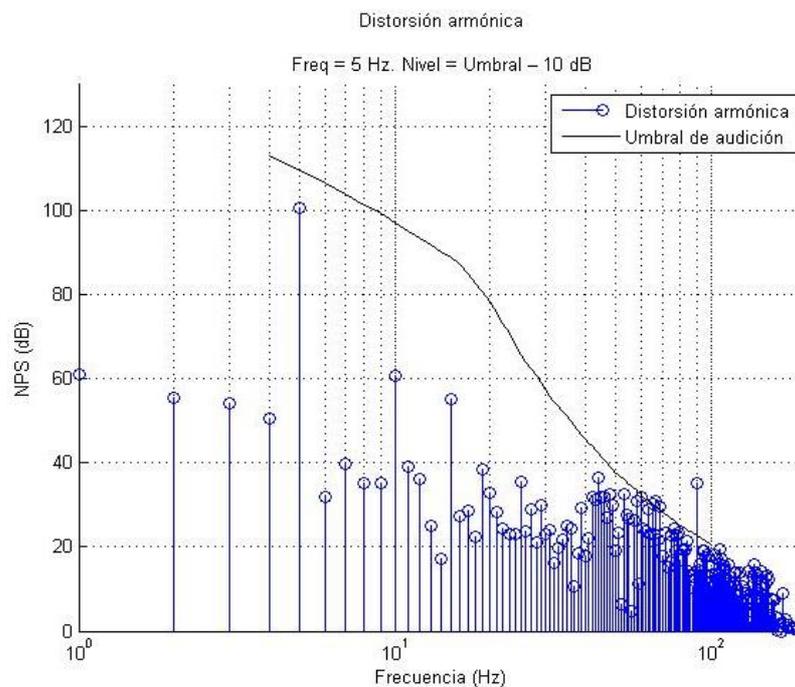


Figura 38. Distorsión armónica de los audífonos modificados en 5Hz con un nivel de señal de 10 dB por debajo del umbral de audición promedio.

Se aprecia en las figuras anteriores (figuras 34-38) como la distorsión armónica en la frecuencia de 5 Hz, varía de acuerdo al nivel de señal del tono de emisión.

La diferencia más baja que se obtuvo entre el tono fundamental (primer armónico) y el segundo armónico, fue cuando la señal del tono de emisión sobrepasaba en 10 dB al del umbral de audición promedio, dicha diferencia es de 21.11 dB (ver figura 34). Según Moller y Pedersen (2004), la diferencia de los niveles recomendados entre el tono fundamental con el segundo, tercer y cuarto armónico, son de 30, 40 y 50 dB. Lo que indica que, para la señal de emisión con 10 dB sobre el umbral de audición promedio, no es la adecuada, ya que el umbral absoluto estaría afectado por las frecuencias armónicas, dando un valor final de umbral irreal.

En los resultados de las 5 mediciones de distorsión armónica con los diferentes niveles de la señal de emisión, se observa claramente que, mientras más bajo sea el nivel de la señal emitida, la diferencia entre el tono fundamental y el segundo, tercer y cuarto armónico son cada vez mayor, lo que indica que la distorsión armónica del sistema va disminuyendo. Como es el caso de la figura (), donde la señal de emisión es igual al umbral de audición promedio, y la diferencia que existe entre el tono fundamental y el segundo armónico es de 30.79 dB (ver anexo). Este resultado, si cumple con los valores recomendados por Moller y Pedersen (2004), con lo cual, el sistema puede generar un tono de 5 Hz a un nivel suficientemente alto para medir umbral de audición, sin que el valor final de este sea afectado por la distorsión armónica del sistema.

El nivel que rara vez se alcanzaba para cualquier condición, los niveles del segundo, tercero y cuarto armónicos para frecuencias 30 Hz eran al menos 30, 45 y 60 dB, respectivamente, por debajo de ese de lo fundamental. Los niveles relativos de los componentes de distorsión fueron mucho más bajos en los niveles de medición reales. Para las frecuencias de 10 y 20 Hz, los niveles relativos correspondientes fueron, respectivamente, 19, 20 y 35 dB, y 23, 38 y 45 dB por debajo de los del fundamental. Para los niveles habituales alcanzados en estas dos frecuencias más bajas para el nivel de referencia de 70 phon (123 y 118 dB SPL, respectivamente), los armónicos segundos a cuarto tenían niveles

de al menos 21, 31 y 36 dB y 31, 40 y 63 dB por debajo de la del fundamental, respectivamente.

En la figura siguiente, se muestra la distorsión armónica para el tono de 10 dB por encima del umbral de audición promedio de 5Hz a 1kHz.

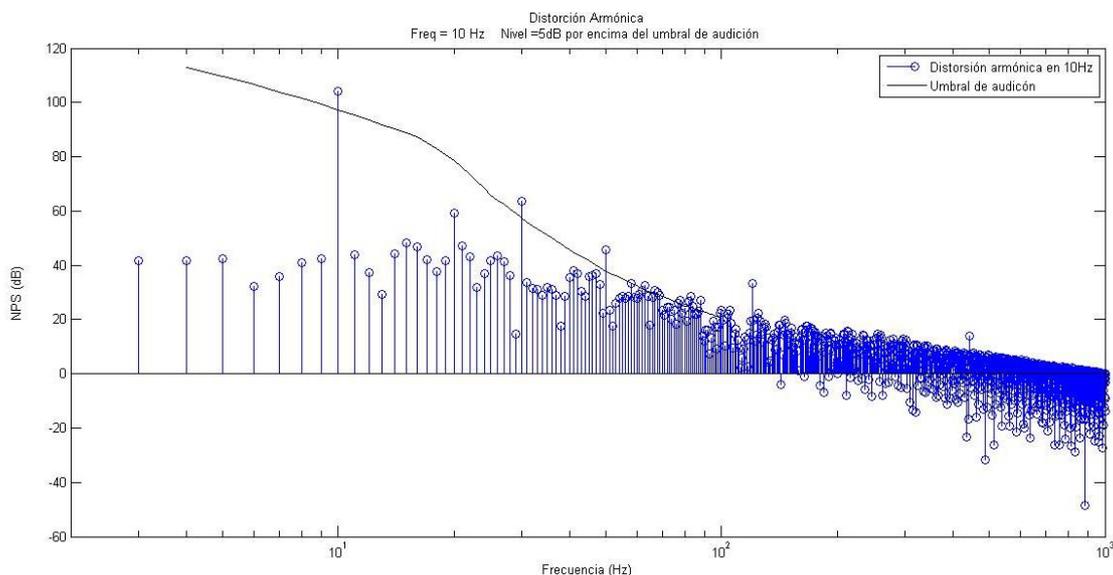


Figura 39. Distorsión armónica para la frecuencia de 10Hz.

Como se puede apreciar en la figura anterior, el tono fundamental o primer armónico (10Hz), es mucho más alto que los demás armónicos, con una diferencia por más de 30 dB. Con lo cual, el sistema es eficiente para medir emitir esta frecuencia sin problemas de distorsión armónica.

Los valores obtenidos de distorsión armónica para las frecuencias de 15, 20 y 40 Hz, son muy aceptables, ya que, para estas frecuencias, la distorsión armónica es muy baja y no afecta para el experimento.

4.5. Probe check

Antes de comenzar las mediciones y después de los descansos, se realizó un procedimiento de *probe check* para determinar la respuesta de frecuencia medida en el canal auditivo, y compararla con la respuesta de frecuencia medida en la cavidad de 1 centímetro cúbico (cavidad de calibración) de cada

participante. El procedimiento fue similar al descrito anteriormente para obtener la respuesta de frecuencia de los audífonos modificados en la cavidad de calibración. Esta comparación, permite, realizar respectiva compensación que dependen de la frecuencia que se aplicaron a las señales de salida eléctrica para generar niveles correctos de sonido en el canal auditivo.

Como se mencionó anteriormente, el nivel de escala completa del sistema (para cada frecuencia) depende de la oclusión del oído. Por lo tanto, se hizo un esfuerzo para obtener un buen ajuste. Esto fue particularmente importante cuando se estimaron los niveles de 5 y 10 Hz para el nivel de referencia usados por la norma ISO 223:2006.

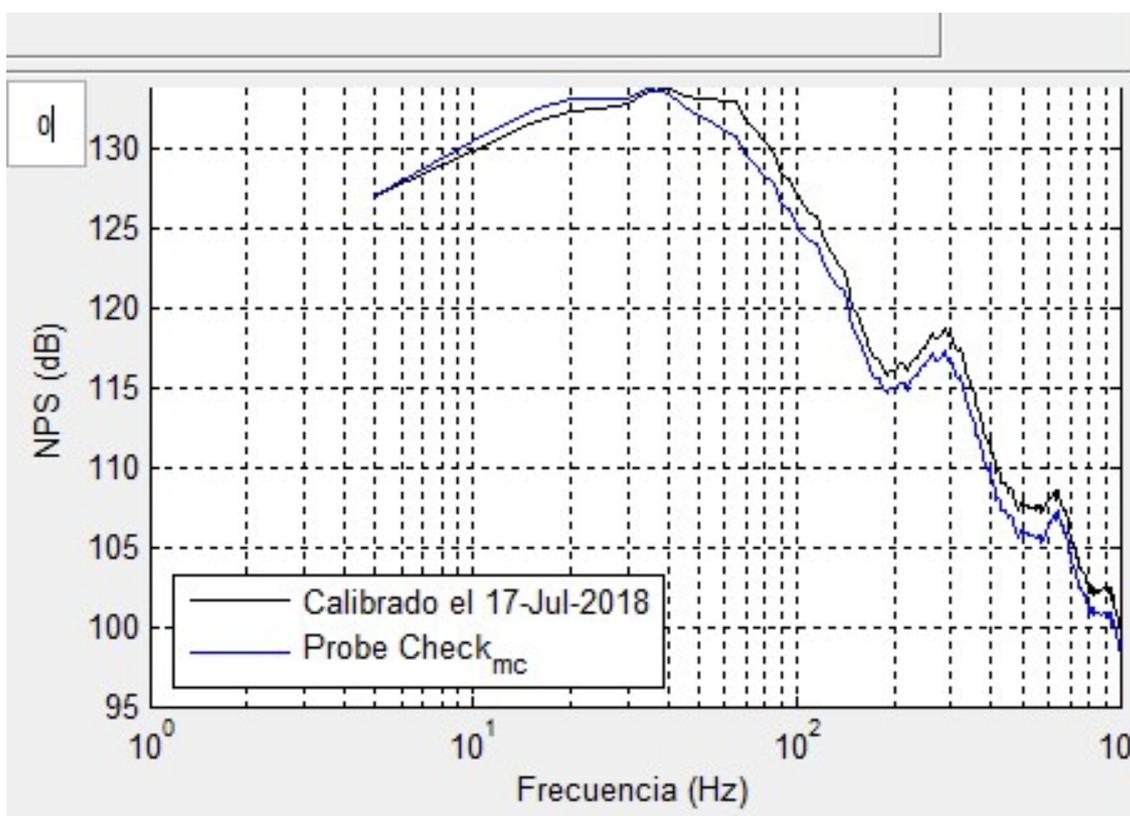


Figura 40. Ejemplo de curvas de respuestas de frecuencia de la cavidad del canal auditivo (*Probe Check*) y la cavidad de calibración (1cc).

Hubo ocasiones donde la respuesta de frecuencia del canal auditivo fue más alta en comparación a la respuesta de frecuencia que se obtuvo en el volumen de calibración y viceversa. Esto se debe a la oclusión del oído con la punta de

espuma y la anatomía del canal auditivo de cada participante. Dando una desviación aproximada de ± 3 dB de los valores obtenidos de las mediciones de *probe check* con relación con la respuesta de calibración de 1cc.

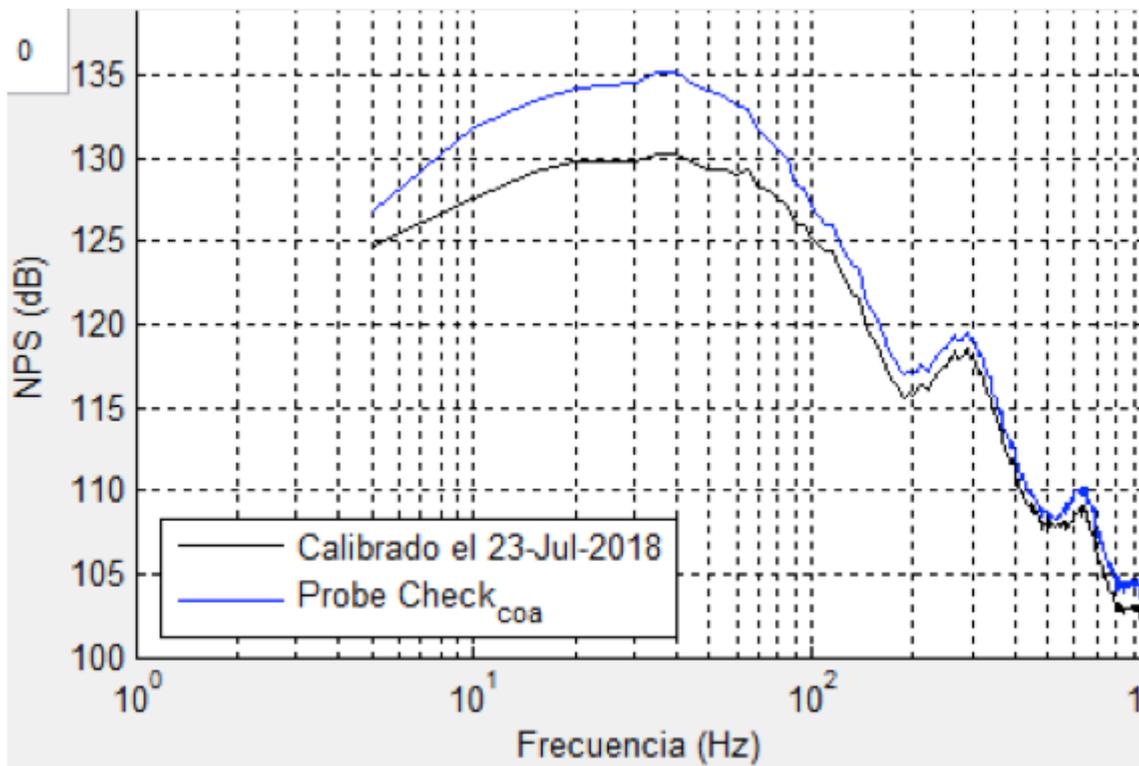


Figura 41. Ejemplo de la diferencia de niveles entre las respectivas curvas de respuesta de frecuencia.

Como se observa en la figura 41, la respuesta de frecuencia de la cavidad del canal auditivo, está por encima de la respuesta de la cavidad de volumen de 1cc. Esta diferencia no altera el valor final de umbral que arroja el software de MATLAB, debido que luego será corregido o compensado como se mencionó anteriormente.

Estas pruebas (*probe check*) también permiten monitorear si el canal auditivo del participante tiene una buena oclusión, y en el caso de no ser así, fijar de mejor manera la punta de espuma en el canal auditivo.

4.6. Umbrales de audición obtenidos

A continuación, se presentan el de umbral de audición y su análisis correspondiente de un participante, para compararlo con el umbral promedio conocido.

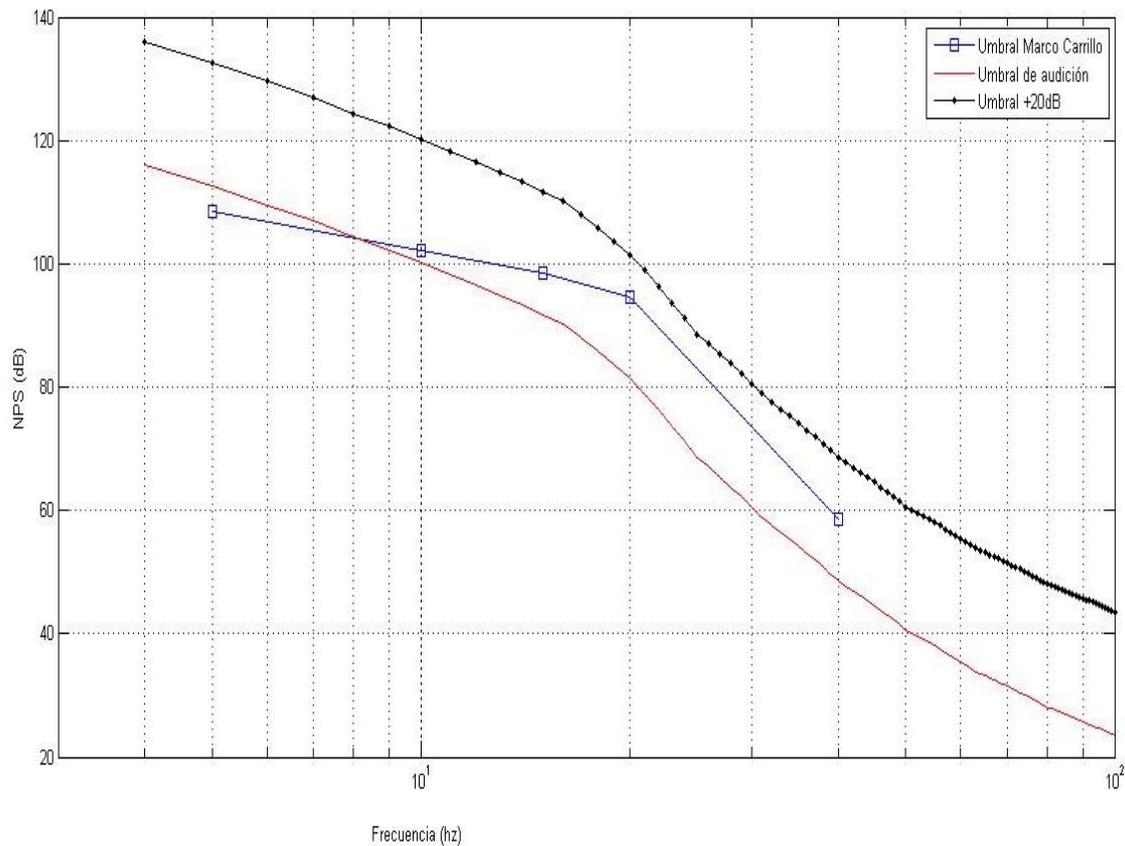


Figura 42. Comparación de las curvas de umbral de audición de un solo participante (umbral correspondiente a Marco Carrillo), con el umbral de audición estandarizado ISO y umbral estandarizado + 20 dB.

Como se muestra en la figura anterior, el umbral de audición del participante, está dentro del rango estandarizado, a excepción de lo que se observa en la frecuencia de 5 Hz. Esto puede deberse a que la percepción del participante en dicha frecuencia es muy sensible. También se muestra que la curva posee un cambio de pendiente en la frecuencia de 20 Hz, donde este cambio no se observa en la curva del umbral promedio.

Tabla 5.

Valores de los umbrales de audición obtenidos en 10 participantes.

Participante	Umbrales de audición (dB)				
	FRECUENCIA (Hz)				
	5	10	15	20	40
1	108,4	102,04	97,25	94,62	58,98
2	107,23	99,3	94,6	84,23	63,46
3	111,1	102,32	101,3	91,3	57,83
4	106,7	101,6	96,66	89,97	63,71
5	109,5	105,6	98,32	85,61	69,57
6	106	101,6	100,1	90,4	66,53
7	109,6	99,73	90,21	83,22	61,6
8	108,1	104,2	97,64	88,12	66,67
9	110,9	105,8	98,93	90,25	70,38
10	110,4	101,1	94,94	88,25	64,48
Umbral promedio	108,793	102,329	96,995	88,597	64,321

En la siguiente figura 43, se muestra la una gráfica de los resultados obtenidos de las mediciones de umbral de audición de los 10 sujetos que participaron en este proyecto, en las frecuencias de 5, 10, 15, 20, 40 Hz, realizado de manera monoaural. También se muestra datos de investigaciones de autores que realizaron mediciones de umbrales en baja frecuencia e infrasonido, como los estudios de Moller y Pedersen (2004), Yeowart (1967), Kueller et. al (2015), y Watanabe y Moller (1990).

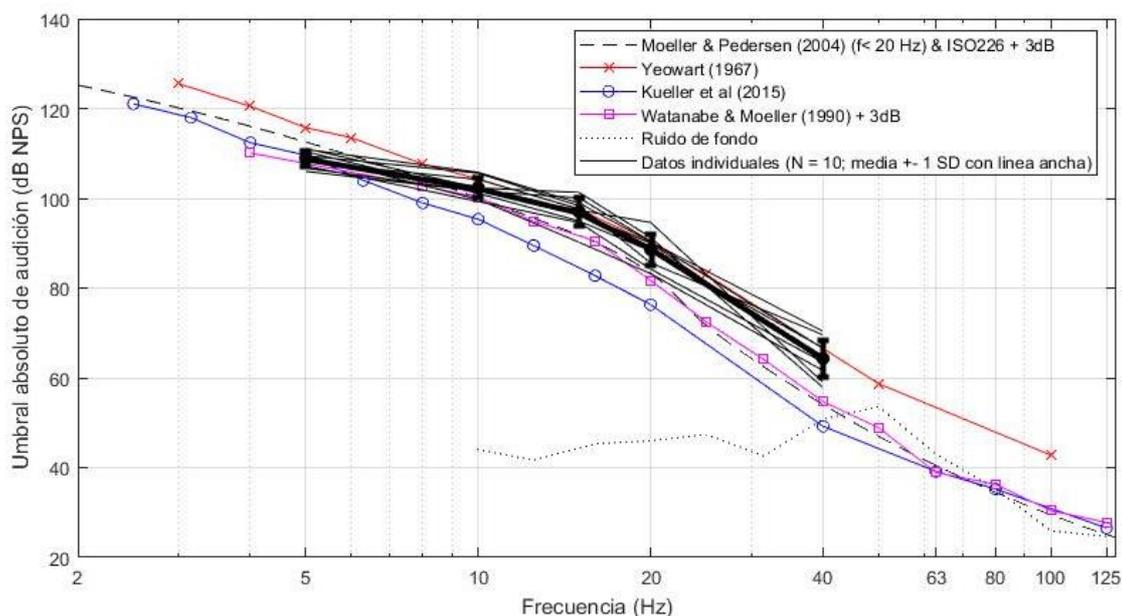


Figura 43 . Comparación de los umbrales de audición obtenidos en este proyecto, con otras investigaciones realizadas previamente.

La figura 43 muestran los umbrales de audición obtenidos para en los 10 participantes involucrados en este proyecto (líneas finas continuas, color negro), el umbral promedio (línea gruesa, color negro), el resultado de los umbrales de diferentes investigaciones mencionados en la en la gráfica anterior (de colores), también se aprecia el ruido de la sala donde se realizó el experimento (línea de puntos).

De acuerdo con estudios previos y con los valores estandarizados, se puede observar que las pendientes de los umbrales obtenidos en este proyecto, son menores que las pendientes que muestran las investigaciones previas en la zona

de 5Hz a 10 Hz, cuyos rangos dinámicos en promedio fueron de 110 dB para la frecuencia de 5Hz y 101 dB para 10 Hz.

La pendiente del umbral obtenido de los 10 participantes para las siguientes frecuencias, se asemeja a las pendientes de umbrales realizados por otros investigadores a partir de la frecuencia de 20 Hz a 40 Hz.

Algo interesante que se presenta en los valores obtenidos, es que el rango dinámico, para la frecuencia de 15 Hz, es más alta comparada con los valores de otros estudios.

5. ANÁLISIS ECONÓMICO.

El costo de este proyecto, con relación a los beneficios que se obtuvo, es totalmente justificable. Debido que los datos finales de esta investigación, muestran una caracterización de umbral de audición en las bajas frecuencias e infrasonido, y esto aportará a futuras investigaciones de prevención de la salud, con respecto a los efectos negativos que genera el ruido en este rango de frecuencias.

Cabe mencionar que algunos equipos que se utilizaron en este proyecto, ya estaban disponibles en el laboratorio de acústica, ya que se utilizó algunos de los equipos implementados para la tesis Gordillo y Gallegos (2016).

Tabla 6.

Detalle de los costos de este proyecto.

Equipamiento	Costo
Audífonos Beyerdynamic DT 1350	\$200
Placas de aluminio para la adaptación de audífonos	\$70
Jeringas para simular canal auditivo	\$2

Silicona	\$5
Fabricación de cables	\$15
Cauchos para acople	\$ 20
Total	\$ 937
Software de MATLAB 2016	\$625

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Con el nuevo *setup*, se pudo comprobar la teoría de presión de aire, en donde, la reducción del volumen de la cavidad que existe entre la bocina, la placa de aluminio, y el canal auditivo, que simula una cámara de presión (MAP), tuvo una mejora en la respuesta del sistema en bajas frecuencias y el infrasonido, permitiendo generar tonos de muy baja frecuencia, a un nivel suficientemente alto para llevar a cabo las mediciones de umbrales de audición.

El nuevo sistema es apto para emitir tonos puros a partir de los 5hz – 200 Hz, pero no es apto para mediciones fuera de este rango de frecuencias, debido que, el sistema funciona como un filtro pasa bajos, lo que da lugar, a una mala respuesta de frecuencia en la zona de medias y alta frecuencia, por lo contrario, este sistema tiene una muy buena respuesta para la zona de frecuencias bajas e infrasonido.

Los niveles de distorsión armónica del sistema implementado cumplen con lo recomendado por Moller y Pedersen (2004), en donde, se obtuvo un valor promedio de 44, 50 y 75 dB para el segundo, tercer y cuarto armónico con respecto al tono fundamental (primer armónico). Por lo que se concluye que el sistema es apto para generar tonos de baja frecuencia e infrasonido a un nivel suficientemente alto y con una baja distorsión armónica.

El nuevo *setup* tiene como objetivo emitir señales con altos niveles de presión sonora, sin embargo, los micrófonos a utilizar para la realización de este tipo de mediciones, deben tener la capacidad de tolerar estos altos niveles. El micrófono que se utilizó en para este proyecto, tolera aproximadamente 137 dB, por lo que, se ajustó el nivel de la señal emitida para que los equipos utilizados, para que las mediciones no saturen.

El método adaptativo psicoacústico utilizado en este proyecto, permitió que las mediciones de umbrales, se lleve a cabo de manera eficiente y evito que esta se vuelva tediosa para los participantes, ya que se realizó pequeños descansos

para evitar la fatiga auditiva. El tiempo promedio que duró la medición de umbrales de audición, fue de 100 min aproximadamente, lo cual, se considera un tiempo muy aceptable para este tipo de mediciones.

Los niveles de ruido de fondo no afectaron a las mediciones del experimento, a excepción del caso que el sistema de aire acondicionado del laboratorio de acústica se encendía, el ruido de fondo de la sala se incrementaba y esto afectaba las respuestas de los participantes. Dado esto, antes de cada medición se cercioró que el sistema de aire acondicionado estuviera apagado, para que el valor absoluto de umbral, no fuera afectado en su valor real.

Se logró caracterizar el umbral de audición para las frecuencias de 5, 10, 15, 20, y 40 Hz en 10 participantes con audición normal, y compáralos con los datos obtenidos en otras investigaciones relacionadas al tema de este proyecto.

La curva de umbral de audición promedio, mostró un comportamiento diferente a las curvas estandarizadas y las curvas de otros investigadores en ciertas frecuencias, especialmente en la zona infrasónica. Esto puede deber a los diferentes métodos adaptativos ya mencionados y los diferentes campos sonoros en los que se realizaron las mediciones de umbrales.

Los datos obtenidos en este proyecto, demuestran que se necesita una revisión en los valores actuales estandarizados del umbral de audición, y así, ampliar la curva en el rango de frecuencia correspondiente al infrasonido.

6.2. Recomendaciones

Se debe tener mucho cuidado con el sellado hermético de la bocina, ya que el diseño y la fabricación de un sistema de emisión en bajas frecuencias e infrasonido, es muy difícil de controlar. Por lo que se recomienda realizar algunas mediciones de prueba para determinar si el sellado está bien realizado y no existan fugas que afecten a la respuesta del sistema. Ya que en las mediciones de pruebas que se realizaron en el laboratorio, era notable cuando existía alguna fuga de aire, debido que los valores de la distorsión armónica aumentaban.

Para medir la distorsión armónica de cualquier sistema, se recomienda hacerlo a diferentes niveles de la señal emitida, esto nos dará un mejor conocimiento del comportamiento del sistema de emisión, con el fin de utilizar el nivel más eficiente para una determinada medición.

Utilizar un método adaptativo adecuado eficiente, es primordial para realizar este tipo de mediciones. Un método de muy larga duración, hará que la medición sea muy tediosa, lo cual puede generar fatiga en los participantes, y esto puede afectar a la medición de umbral absoluto. Por este motivo, se recomienda hacer pausas, (descansos), a medida que va avanzado el experimento.

Se recomienda que antes de cada medición, realizar la calibración del equipo, ya que las condiciones iniciales para empezar a medir, pudieron haber cambiado. Con esto, evitamos posibles errores en los valores de las mediciones.

REFERENCIAS

- Anderson, T., McCarthy P., y Tukey, I. (1946). *Staircase Methods of Sensitivity Testing*. Recuperado el 15 de mayo del 2018 de: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a800298.pdf>.
- Berglund, B., Lindvall, T., Schwela, D., y Goh, K. (2000). *Guidelines for Community Noise*. World Health Organization. Recuperado el 5 mayo del 2018 de: <http://apps.who.int/iris/handle/10665/66217>.
- Bryant, H. (1972). *Comparable coupler and real-ear measurements on supraaural- and insert-type earphones*, *The Journal of the Acoustical Society of America*. Recuperado el 17 de mayo del 2018 de: <https://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.1913292>.
- Brown, A. (2005). *Measurement of Auditory Thresholds*. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Recuperado el 21 de mayo del 2018 de: <https://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/1.1909623?journalCode=jas>.
- Churcher, B. y King, A. (1937). *The performance of noise meters in terms of the primary standard*. *The Journal of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 81, p. 57-90. <http://dx.doi.org/10.1049/jjee-1.1937.0114>.
- Fletcher, H. y Munson, W. (1933). *Loudness, its definition, measurement and calculation*, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 5, p. 82-108. <https://doi.org/10.1121/1.1915637>.
- Fecci, R., Barthelemy, R., Bourgoïn, J., Mathias, A., Eberle, H., Moutel, A. y Jullien, G. (1971). *Effects of infrasound on the organism*. *La Medicina del Lavoro*, vol. 62, p. 130-150.
- Full revision of international standards for equal-loudness level contours (ISO 226) - Criteria for noise rating and evaluation of audio equipment

brought closer to human auditory perception. [Consulta: 29 octubre 2011]. Traducción del comunicado de prensa AIST el 22 octubre 2003

Gallegos, P. y Gordillo, D. (2016). Diseño e implementación de un sistema para la medición de curvas isofónicas a bajas frecuencias. Universidad de las Américas, Quito.

ISO 226:2003, *Normal equal-loudness level contours*, International Organization for Standardization, Genève.

Hensel, J., Scholz, G., Hurttig, U., Mrowinski, D., y Janssen, T. (2007). *Impact of infrasound on the human cochlea. Hearing research*, vol. 233, p. 67-76.

Jurado, C. y Marquardt, T. (2016), *The effect of the helicotrema on low-frequency loudness perception. The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 140, p. 3799. <https://doi.org/10.1121/1.4967295>.

Jurado, C., Pedersen, C. y Moore, B. (2011). *Psychophysical tuning curves for frequencies below 100 Hz. The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 129(5), p. 3166-3180. <https://doi.org/10.1121/1.3560535>.

Kingdom, F, y Prins, N. (2010), *Psychophysics: A practical introduction*. London: Academic Press; Elsevier.

Kuehler, R., Fedtke, T., y Hensel, J. (2015). *Infrasound and low-frequency insert earphone hearing threshold. The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 137(4), EL347-EL353. <https://doi.org/10.1121/1.4916795>.

Landström, U., Lundström, R. y Byström, M. (1983), *Exposure to infrasound - Perception and changes in wakefulness*, *J. Low Freq. Noise and Vib.*, vol. 2(1), p. 1-11. <https://doi.org/10.1177/026309238300200101>.

- Landström, U. y Byström, M. (1984): Infrasonic threshold levels of physiological effects effects. *J. Low Freq. Noise and Vib.*, vol 3, p. 167-173. <https://doi.org/10.1177/026309238400300402>.
- Leventhall, G. (2003). *A Review of Published Research on Low Frequency Noise and its Effects*. Department for Environment, Food and Rural Affairs. Londres Inglaterra.
- Levitt, H. (1971). *Transformed up-down methods in psychoacoustics*. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 49, p. 467-477. <https://doi.org/10.1121/1.1912375>.
- Marquardt, T. y Pedersen, C. S. (2010). *The influence of the helicotrema on low-frequency hearing*. *The Neurophysiological Bases of Auditory Perception*. New York- USA.
- Miyara, F. (2006). Introducción a la Psicoacústica. Recuperado de <http://www.analfatecnicos.net/archivos/04.IntroduccionPsicoacusticaFedericoMiyara.pdf>
- Moller, H y Pedersen, C. (2011), *Hearing at low and infrasonic frequencies*. Recuperado de <http://www.noiseandhealth.org/article.asp?issn=1463-1741;year=2004;volume=6;issue=23;spage=37;epage=57;aulast=Moller>.
- Qibai, C. y Shi, H. (2010). *An Investigation on the Physiological and Psychological Effects of Infrasound on Persons*. <https://doi.org/10.1260/0263092041456828>
- Robinson, D. y Dadson, R. (1956). *A re-determination of the equal-loudness relations for pure tones*. *British Journal of Applied Physics*, vol. 7, p. 166-181. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0508-3443/7/5/302/meta>.

- Sakamoto, S., Yokoyama, S., Yano, H. y Tachibana, H. (2014). *Experimental study on hearing thresholds for low-frequency pure tones. Acoustical Science and Technology*, vol. 35, p. 213-214.
<https://doi.org/10.1250/ast.35.213>
- Scharine, A., Kara, D. y Tomasz, L. (2009). *Auditory Perception and Cognitive Performance*. PsycEXTRA Dataset. Print.
- Schust, M. (2004). *Effects of low frequency noise up to 100 Hz. Noise Health*. Recuperado el 28 de abril del 2018 de:
<http://www.noiseandhealth.org/article.asp?issn=1463-1741;year=2004;volume=6;issue=23;spage=73;epage=85;aulast=Schust>.
- Suzuki, Y. y Takeshima, H. (2004). *Equal-loudness-level contours for pure tones, The Journal of Acoustics Society of America*, VOL. 106, p. 918–933.
<https://doi.org/10.1121/1.1763601>
- Takeshima, H., Suzuki, Y., Fujii, H., Kumagai, M., Ashihara, K., Fujimori T. y Sone, T. (2001), *Equal-loudness level contours measured by the randomized maximum likelihood sequential procedure*, *Acustica - acta Acustica*. Recuperado el 2 de junio del 2018 de:
https://www.researchgate.net/publication/263722674_Equal-Loudness_Contours_Measured_by_the_Randomized_Maximum_Likelihood_Sequential_Procedure
- Teranishi, R. (1965), *Study about measurement of loudness: On the problems of minimum audible sound. Researches of the Electrotechnical Laboratory*, No. 658, Tokyo, Japan.
- Yeowart, N., Bryan, M. y Tempest, W. (1967), *The monaural M.A.P. threshold of hearing at frequencies from 1.5 to 100 c/s*. *The J. Sound Vib*. Recuperado de <http://adsabs.harvard.edu/abs/1967JSV.....6..335Y>.

Watanabe, T. y Møller, H. (1990), *Low frequency hearing thresholds in pressure field and in free field*, *J. Low Freq. Noise Vib.*, vol. 9, p. 106-115.
<https://doi.org/10.1177/026309239000900303>.

Watanabe, T., Ozawa, K., Suzuki, M., Uematu, T., Kosaka, T. y Yamada, S. (1993), *A study on the psychological evaluation of low frequency noise*. *The Journal of the INCE of Japan*, vol. 18, p. 14-16.
<https://doi.org/10.11372/souonseigyō1977.18.42>.

ANEXOS

Anexo 1.

Medición del ruido de fondo de la sala en las diferentes condiciones iniciales.

	Frecuencia (Hz)													
Medición	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200
N° 1	44	41.7	45.3	46	47.4	42.6	50.8	53.6	43.0	35.3	25.9	24.7	26	18.9
N° 2	45.8	44.5	48.5	48.9	51.8	47.1	51.4	53.5	44.8	39	33.8	32.1	32.8	27.7
N° 3	42.8	42	47.4	49.8	46	43.2	48.6	51.7	42.9	35.2	26.8	24.7	26.1	19.8
N° 4	51.1	47.6	53.7	47.9	45.6	51.3	53.1	45.9	38.2	31.2	36.0	34.8	29.9	

Anexo 2. Distorsión armónica del sistema con un nivel de señal 10 dB sobre el umbral de audición promedio.

Distorsión armónica (nivel de señal = umbral+10 dB)							
Frecuencia (Hz)	f1	f2	f3	f4	Diferencia entre el tono fundamental y segundo armónico (dB)	Diferencia entre el tono fundamental y tercer armónico (dB)	Diferencia entre el tono fundamental y cuarto armónico (dB)
5	120,7	99,59	81,87	77,16	21,11	38,83	43,54
6	118,1	91,85	79,51	68,71	26,25	38,59	49,39
8	113,4	78,32	77,06	53,97	35,08	36,34	59,43
10	109,1	66,49	72,01	43,81	42,61	37,09	65,29
12	105,5	57,34	66,46	34,73	48,16	39,04	70,77

16	99,18	43,09	52,06	22,06	56,09	47,12	77,12
20	90,48	30,26	19,69	16,39	60,22	70,79	74,09

Anexo 3. Especificaciones técnicas de la interface FIREFACE 802



Fireface 802

60-Channel 192 kHz High-End USB & FireWire Audio Interface

- 30 Input / 30 Output channels
 - 12 x Analog I/O
 - 4 x Mic/Instrument Preamp
 - 1 x AES/EBU I/O
 - 2 x ADAT I/O (or 1 x ADAT I/O plus 1 x SPDIF I/O optical)
 - 1 x Word Clock I/O
 - 1 x MIDI I/O
- FireWire or USB operation
- TotalMix FX



Anexo 4. Especificaciones técnicas de los audífonos beyerdynamic.

DT 1350 DT 1350 CC

Dynamic Headphone



FEATURES

- Ideal for studio applications
- Excellent ambient noise attenuation
- Tesla technology with highest efficiency
- Swivelling ear cups 90°
- Single-sided cable

APPLICATIONS

The DT 1350/DT 1350 CC opens up new dimensions with its excellent sound quality and superior materials. Despite the compact, supraaural ear pads, the DT 1350/DT 1350 CC provides an extraordinary high ambient noise attenuation and due to the enormous maximum sound pressure level, this headphone is perfect for sound engineers, musicians and DJ's.

The efficient Tesla transducers ensure a perfectly balanced and analytical sound. Their extremely high level of efficiency is useful for users in loud environments such as sound engineers when listening to PA systems or musicians. The comfortable, replaceable ear pads and the spreadable headband ensure superior comfort for a long period of time and an absolutely safe fit. The swivelling ear cups (90°) allow listening with one side; the supplied bag ensures easy transport.

With its reduced shape, the DT 1350/DT 1350 CC is visually impressing and characterised by simplicity and elegance.

The single-sided connecting cable is provided with a gold plated 3.5 mm stereo jack with 1/4" inch adapter, and is therefore suitable for use with almost all headphone amplifiers.

VERSIONS

DT 1350	Headphone, 80 Ω, with straight cable	Order # 702.072
DT 1350 CC	Headphone, 80 Ω, with coiled cable	Order # 703.575

TECHNICAL SPECIFICATIONS

Transducer type	Dynamic
Operating principle	Closed
Frequency response	5 - 30,000 Hz
Nominal impedance	80 Ω
Sound pressure level	109 dB
Max. SPL	129 dB
T.H.D.	< 0.2%
Power handling capacity	100 mW
Sound coupling to the ear	Supraaural
Ambient noise attenuation	approx. 23 dBA
Nominal headband pressure	approx. 5.5 N
Length and type of cable	
DT 1350	1.5 m / straight cable, single-sided
DT 1350 CC	2.5 m / coiled cable, single-sided
Connector	Gold plated mini stereo jack plug (3.5 mm) and 1/4" adapter (6.35 mm), in-flight adapter 2 x mini jack (3.5 mm)
Weight (without cable)	174 g

SPARES AND ACCESSORIES

Ear pads (pair)	Order # 910.376
Cable curler (spiral)	Order # 906.816
1/4" jack adapter (6.35 mm)	Order # 906.824
In-flight adapter 2 x 3.5 mm	Order # 906.832
Bag	Order # 906.840
Headband pad	Order # 913.200
Straight cable (DT 1350)	Order # 908.045
Coiled cable (DT 1350 CC)	Order # 913.219

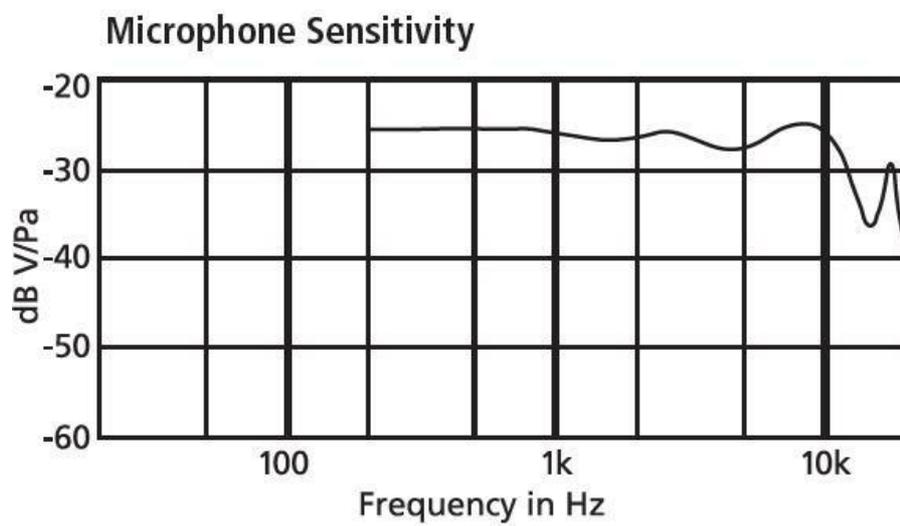
1 of 1

beyerdynamic GmbH & Co. KG
Theresienstr. 8 | 74072 Heilbronn - Germany
Tel. +49 (0) 71 31 / 617 - 0 | Fax +49 (0) 71 31 / 617 - 204
info@beyerdynamic.de | www.beyerdynamic.com

For further distributors worldwide, please go to www.beyerdynamic.com
Non-contractual illustrations. Contents subject to change without notice. E4 / DT 1350 (07.14)

beyerdynamic 

Anexo 5. Respuesta de frecuencia del micrófono de sonda.



Anexo 6. Niveles de calibración de la interface FireFace 802



