



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

CARACTERIZACIÓN DE LA PERCEPCIÓN DE INTENSIDAD DEL RUIDO  
FLUCTUANTE DE BAJA FRECUENCIA

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

Profesor Guía

PhD. Carlos Andrés Jurado Orellana

Autores

Iván Ismael Cevallos Contreras

Juan Manuel Velasco Nicolalde

Año

2019

## **DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA**

"Declaro haber dirigido el trabajo, caracterización de la percepción de intensidad del ruido fluctuante de baja frecuencia, a través de reuniones periódicas con los estudiantes Iván Ismael Cevallos Contreras y Juan Manuel Velasco Nicolalde, en el semestre 201920, 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 Acústica

C.I. 542886-6

## **DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR**

"Declaro haber revisado este trabajo, caracterización de la percepción de intensidad del ruido fluctuante de baja frecuencia, de los estudiantes Iván Ismael Cevallos Contreras y Juan Manuel Velasco Nicolalde, en el semestre 201920, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación"

---

Virginia Puyana Romero

Dottorato di Ricerca in Rappresentazione, Tutela e Sicurezza dell' Ambiente e  
delle Strutture e Governo del Territorio

C.I. 1758988354

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA DE LOS ESTUDIANTES**

“Declaramos que este trabajo es original, de nuestra 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”

---

Iván Ismael Cevallos Contreras  
C.I. 1716497753

---

Juan Manuel Velasco Nicolalde  
C.I. 1724231509

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios. A mi padre, mis hermanas y mi tía Myriam por su confianza, sacrificio y apoyo hacia mí. A Carlos Jurado y Darío Gordillo por el acompañamiento y aprendizaje brindado durante el desarrollo del trabajo de titulación. A Juan Velasco por su esfuerzo y trabajo puesto en este trabajo y, sobre todo, por su amistad incondicional. A cada una de las personas que participaron en este proyecto.

Ismael.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia, mis padres y mis abuelos, por su soporte y su confianza. A Carlos Jurado y Darío Gordillo por el acompañamiento y la buena guía durante este trabajo, gracias por transmitirme tanta sabiduría. Gracias Isma, por ser un excelente compañero y más que otra cosa un invaluable amigo para mi. A todos, mi gratitud infinita, no lo hubiese logrado sin ustedes.

Juan.

## **DEDICATORIA**

A mi motivación más grande,  
mi familia. A mi ángel en el  
cielo, mi madre. A mi tía  
Myriam por su amor de  
madre. A Juan, Tito, Jorge,  
Isaac y Ale por su cariño y  
amistad.

Ismael.

## **DEDICATORIA**

A mi motor más grande en la vida que es mi familia. A mis papás y mi hermana, que con suma paciencia me han guiado, a mis abuelos y mi tía que siempre me han brindado su apoyo incondicional; y a mi pareja Mishell que día a día me dio su cariño. A Isma, a Darío y a todos quienes creyeron siempre en mi.

Juan.

## RESUMEN

El presente trabajo ha tenido como objetivo caracterizar la percepción de ruidos fluctuantes de bajas frecuencias en los seres humanos. Para esto, a 24 participantes, hombres y mujeres de entre 19 y 29 años, se les sometió a una experimentación basada en un modelo psicofísico de ajuste. En el experimento, las personas se sometían a dos etapas, una llamada “Prueba de *beating*” y otra denominada “Prueba de *loudness*”. Como parámetros de la prueba, se definieron 4 frecuencias carrier (frecuencias centrales del análisis): 40, 63, 80 y 1000 [Hz], las cuales fueron moduladas por 4 frecuencias llamadas frecuencias de beat: 1, 2, 5 y 12 [Hz]. En la primera etapa, cada sujeto tenía que buscar el punto de máxima fluctuación de un estímulo modulado mediante el ajuste de un tono superior TU y un tono inferior TL, cuya diferencia era igual a la frecuencia de modulación, y su punto medio a la de carrier. En la segunda etapa, en base a las respuestas de la primera parte, el participante tenía que igualar la intensidad de un tono fluctuante (modulado a las frecuencias de beat) a la de su respectivo tono fijo (RMS a 50 [fonos]). Los resultados determinaron que las frecuencias de beat de 1 y 2 [Hz] fueron percibidas en promedio con mayor nivel en comparación al tono fijo, la de 5 [Hz] se percibió en promedio casi igual a dicho tono y, la frecuencia de beat de 12 [Hz] se percibió con menor nivel.

Como un aporte a la investigación, se llevó a cabo la implementación de un subwoofer para infrasonido. De esta manera, se evaluaron dos adaptaciones del *driver* en comparación al sistema anterior, midiendo los parámetros de respuesta en frecuencia (entre 10 y 200 [Hz]) y distorsión armónica (para 4 armónicos de la fundamental). Una vez finalizadas las pruebas, se llegó a la conclusión de que el subwoofer con una adaptación de manguera larga fue el sistema más adecuado para la reproducción de frecuencias menores a 20 [Hz].

## ABSTRACT

The objective of this work was to characterize the perception of fluctuating noise at low frequencies in human beings. In this way, 24 subjects, men and women between 19 and 29 years old, underwent an experimentation based on a psychophysical adjustment model. This procedure had two stages, one called "Beating test" and another called "Loudness test". As parameters of the test, 4 carrier frequencies (central frequencies of the analysis) were defined: 40, 63, 80 and 1000 [Hz], which were modulated by 4 frequencies called beat frequencies: 1, 2, 5 and 12 [Hz]. In the first stage, each subject had to find the point of maximum fluctuation of a modulated stimulus by adjusting a higher tone TU and a lower tone TL, whose difference was equal to the modulation frequency, and its midpoint to that of carrier. In the second stage, based on the responses of the first part, the subjects had to match the intensity of a fluctuating tone (modulated to beat frequencies) to that of its respective fixed tone (RMS to 50 [phons]). The results determined that the beat frequencies of 1 and 2 [Hz] were perceived on average, with a higher level compared to the fixed tone, 5 [Hz] frequency, was perceived on average almost equal to the fixed tone, finally, 12 [Hz] beat frequency, was perceived with a lower level.

As a contribution to the research, the implementation of a subwoofer for infrasound was carried out. In this way, two adaptations of the driver compared to the previous system were evaluated, measuring the frequency response (between 10 and 200 [Hz]) and harmonic distortion (for 4 harmonics). The tests allowed to conclude that the subwoofer with a long hose adaptation was the most suitable system for reproducing frequencies below 20 [Hz].

# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Marco referencial.....	4
1.3. Justificación .....	5
1.4. Alcance .....	6
1.5. Objetivos.....	6
1.5.1. Objetivo general.....	7
1.5.2. Objetivos específicos .....	7
2. MARCO TEÓRICO .....	7
2.1. Sistema auditivo periférico .....	7
2.1.1. Oído externo .....	8
2.1.2. Oído medio.....	9
2.1.3. Oído interno .....	10
2.2 Filtros auditivos .....	11
2.3. Vía auditiva .....	13
2.3.1. Codificación temporal del sonido .....	14
2.3.1.1. <i>Auditory steady-state response</i> (ASSR) .....	14
2.3.1.2. <i>Frequency-following response</i> (FFR) .....	16
2.4. Métodos psicofísicos .....	17
2.4.1. Métodos de medición de umbral.....	18
2.4.2. <i>Transformed up/down procedure</i> .....	21
2.4.3 Método de ajuste .....	21
2.4.4. Métodos de medición de <i>loudness</i> .....	22
2.5. Modelo de <i>loudness</i> .....	23
2.5.1. Función de transferencia del oído METF .....	25
2.6. Baja frecuencia e infrasonido .....	28
2.6.1. Propagación de bajas frecuencias e infrasonidos .....	28
2.6.2. Fuentes naturales y no naturales de bajas frecuencias e infrasonidos	29

2.6.2.1. Características de fuentes artificiales (turbinas de viento) .....	29
2.6.3. Percepción en baja frecuencia e infrasonido .....	30
2.6.3.1. Umbrales de audición .....	30
2.6.3.2. Curvas isofónicas de audición .....	30
2.6.3.3. ISO226-2003 .....	32
2.6.3.4 Niveles audibles de infrasonidos .....	33
<b>3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>35</b>
3.1. Prueba de <i>beating</i> .....	36
3.2. Prueba de <i>loudness</i> .....	39
3.2.1. Exclusión de sujetos .....	40
3.3. Prueba de umbral .....	42
3.4. Calibración del sistema .....	44
3.5. Pruebas de subwoofer para infrasonido .....	45
3.5.1. Adaptación de subwoofer .....	46
3.5.2. Respuesta en frecuencia .....	50
3.5.3. Distorsión armónica .....	51
<b>4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>53</b>
4.1. Resultados de <i>beating</i> .....	55
4.2. Resultados de <i>loudness</i> .....	59
4.3. Mejora de subwoofer para infrasonido .....	67
4.3.1. Medición de respuesta en frecuencia .....	67
4.3.2. Medición de distorsión armónica .....	72
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>78</b>
5.1 Conclusiones .....	78
5.2 Recomendaciones .....	80
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>83</b>

ANEXOS .....	87
--------------	----

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

Actualmente, la influencia del ruido de baja frecuencia ha ido tomando importancia dentro del campo referente a problemas de ruido ambiental, debido a la naturaleza acústica de este tipo de ruido, que es difícil de atenuar y fácilmente percibido dentro de locales y recintos. Acústicamente esta problemática es un factor considerable en el incumplimiento de las diversas normas de ruido, y perceptivamente genera molestia en las personas. De esta manera, al no existir suficiente información acerca de la percepción humana de este tipo de ruido y ante la necesidad de buscar soluciones para los problemas que causa, se ha planteado caracterizar el comportamiento sensorial del ser humano ante el estímulo de bajas frecuencias.

De igual manera, es necesario el desarrollo de modelos matemáticos y computacionales que permitan simular fielmente el procesamiento de la percepción del oído humano tomando en cuenta los detalles del sistema auditivo. De esta forma, los modelos perceptuales de la actualidad toman en cuenta tanto el espectro del sonido como sus características temporales; sin embargo no se conoce mucho acerca de estas cuando el sistema auditivo se somete a bajas frecuencias, lo que ha limitado el uso de estos modelos como una solución al ruido de baja frecuencia. El mayor inconveniente, son las fluctuaciones de amplitud debido a las diferentes condiciones que influyen en el tiempo de integración del oído humano. Esto hace complicado determinar diferencias marcadas entre un nivel peak y un nivel RMS, que son aspectos principales en un estímulo sonoro fluctuante.

El presente trabajo se enfoca en el estudio de la respuesta perceptual del ser humano ante estímulos fluctuantes de bajas frecuencias, con el fin de aportar nuevos modelos que puedan sentar una base en el campo de la investigación correspondiente, aportando a su vez una herramienta para academias y

profesionales enfocados en la problemática. Esta tesis, forma parte del proyecto de investigación del PhD. Carlos Jurado, quien trabaja juntamente con el proyecto EARs II para poder dar un detalle de los efectos que tienen estos estímulos en los seres humanos. Actualmente el análisis del problema involucra a Universidades, institutos de metrología y empresas de mediciones acústicas. De esta manera, el proyecto se enfoca en el marco general del del ruido fluctuante de baja frecuencia aprovechando que en el Ecuador el tema no ha tenido mucho desarrollo.

Los efectos negativos que tienen los ruidos de baja frecuencia sobre el ser humano han sido recopilados en diversos trabajos. Alrededor del mundo, son aquellas sociedades modernas e industrializadas las que se han ido habituando cada vez más, al uso de maquinarias pesadas, aires acondicionados, flujos de aeronaves procesos industriales, turbinas, etc. Debido a la agudeza y el peligro inminente, varios gobiernos financian actualmente investigaciones que ayuden a entender y resolver este tipo de fenómenos. Las principales consecuencias del ruido en la salud radican en el estrés y dificultad para dormir, lo que a su vez, a través de estudios médicos, se ha demostrado que afectan a la salud cardíaca siendo causas principales de paros cardíacos y problemas de presión.

Estudios previos realizados con este mismo propósito, han experimentado de manera invasiva y no invasiva para obtener mediciones fisiológicas y perceptuales (psicoacústicas). Es así como las mediciones fisiológicas que se han realizado hasta ahora han logrado cuantificar la función de transferencia de energía acústica a la cóclea (FTC), en animales, en cadáveres humanos y, no invasivamente en humanos vivos. Los resultados obtenidos apuntan a que los dos principales factores que influyen directamente con la sensibilidad auditiva a bajas frecuencias son el helicotrema y el oído medio; ambos actuando simultáneamente como filtros pasa altos de 6 [dB]/octava cada uno. Así, el primero actúa como filtro pasa altos por debajo de 40 [Hz]; y el segundo, empieza a hacerse efectivo bajo los 500 [Hz].

En segundo lugar, los modelos de *loudness* (nivel subjetivo de intensidad) toman en cuenta no solo estos factores, sino que además le dan gran importancia y consideran cómo el sistema auditivo codifica las características temporales del sonido. Estos modelos poseen varias etapas, que cuentan con tres procesos definidos: la obtención de un patrón de excitación a partir de un banco de filtros auditivos comprensivos, el cálculo del área bajo el patrón de excitación, y, la función de transferencia del oído medio. Es así como la respuesta temporal del oído es simulada mediante la obtención de *loudness* de corto y largo plazo, junto con la aplicación de análisis de espectro de corto plazo. No obstante, hay que mencionar que los parámetros de estos análisis se han basado en datos psicoacústicos obtenidos para frecuencias medias/altas. Debido a esto, para bajas frecuencias, en especial por debajo de los 100 [Hz], no se conoce mucho sobre la respuesta temporal del oído, siendo este un limitante para la aplicación de estos modelos. Datos pilotos obtenidos en los laboratorios de la Universidad de las Américas, sugieren que la constante de integración a bajas frecuencias e infrasonidos es mucho mayor que para frecuencias medias/altas.

Dejando a un lado los modelos a utilizar, se deben también mencionar aspectos metodológicos importantes para la realización de las mediciones a bajas frecuencias. El primero de ellos, implica una dificultad al momento de lograr altos niveles de presión sonora sin distorsión armónica; para esto, se han utilizado las llamadas cabinas de presión a través de altavoces adaptados (en este caso audífonos y un subwoofer). Por sus dimensiones, las cabinas de presión pueden reproducir frecuencias bajas hasta aproximadamente 100 [Hz]. A su vez, por la manera en que están construidas este tipo de cabinas deben ser fijas, aspecto que, junto con la característica anterior, limitan la reproducción y la movilización. Para poder ayudar con el estudio perceptual de bajas frecuencias, los audífonos adaptados con los que se dispone, que son además portátiles y permiten a su vez mediciones monoaurales, se sabe que ya han sido utilizados en estudios más recientes, por lo que su fiabilidad está garantizada. Su funcionamiento, se basa en la reproducción de un pequeño campo de presión, por medio de una cavidad hermética que recubre el auricular, permitiendo emitir los altos niveles

de presión sonora dentro de los parámetros establecidos. Además, a manera de aporte, se ha implementado una nueva y diferente cabina de presión a través de un subwoofer adaptado, pensado para reproducir frecuencias aún más bajas de las que pueden reproducir los audífonos adaptados, ampliando el rango frecuencial hacia abajo para futuras investigaciones. Antes de proceder con las pruebas, se debe definir que una calibración confiable, debe ser medida con la respuesta en frecuencia del oído de los sujetos de prueba, utilizando un micrófono-sonda especial. Este método permite controlar con precisión el nivel de presión sonora en el oído de los participantes.

Finalmente, otro de los aspectos a considerar, es el método psicoacústico a utilizar. Los métodos que se recomiendan, debido a su precisión, son aquellos de tipo adaptativos. El up-down, y el de máxima verosimilitud han sido probados para la duración de estímulos de altas frecuencias; pero al aplicarlos con bajas, la duración de los mismos se vuelve muy extensa, retrasando la experimentación al volverla muy larga y complicada de completar. Este método se basa en el clásico modelo de ajuste, pero con la diferencia de que se ajusta a las limitaciones de la tecnología actual. Se prevé que, aplicando esto el tiempo de los experimentos disminuya considerablemente en comparación con los métodos antes mencionados, facilitando de esta manera la síntesis y procesamiento de datos, además de optimizar el descanso auditivo de las personas sujetas al proceso de medición y prueba.

## 1.2. Marco referencial

En los últimos años, la Organización Mundial de la Salud ha considerado al ruido de baja frecuencia como uno de los problemas más relevantes en cuanto a temas de salud y bienestar debido a los efectos negativos que produce, como molestia, irritación e interrupción del sueño. Tanto en sociedades industrializadas como en sociedades en vías de desarrollo, las fuentes de este tipo de ruido tales como aeronaves, maquinaria pesada, sistemas de ventilación y turbinas de viento

están cada vez más presentes en el día a día, por lo que la calidad de vida de las personas que son objeto de estos estímulos se ve altamente afectada.

Debido a que gran parte del ruido ambiental de baja frecuencia (LF) posee una amplitud que fluctúa en el tiempo, el objetivo principal del presente trabajo es caracterizar la percepción auditiva de las fluctuaciones de amplitud presente en los sonidos de LF, lo cual facilitará proponer límites y principios de aceptación, además de exponer modelos perceptuales capaces de explicar el procesamiento del ruido mencionado, y de predecir su percepción.

Para la obtención de datos es necesario llevar a cabo experimentos psicoacústicos, para los cuales se dispone del Laboratorio de Acústica de la Universidad De Las Américas. El citado laboratorio cuenta con los equipos adecuados y necesarios para realizar mediciones y pruebas auditivas en frecuencias menores a los 100 [Hz].

El presente trabajo de titulación se basa en la realización de una propuesta que complementa al modelo de *loudness* para sonidos fluctuantes de baja frecuencia. Además, los resultados obtenidos de los sujetos de prueba revelarán si existe alguna tendencia común en la percepción de los ruidos por debajo de los 100 [Hz], lo cual puede ayudar a plantear soluciones a las afectaciones en la salud que estos tienen.

### 1.3. Justificación

El ruido de baja frecuencia se ha ido convirtiendo en una problemática de creciente reconocimiento. Esto ha generado que varios gobiernos financien investigaciones para poder buscar soluciones. Actualmente, en Europa mediante el EMPIR, se financian investigaciones sobre este fenómeno. El problema global, resulta atractivo y rico en campos de investigación, por esta razón el presente trabajo ofrece una investigación científica original y necesaria para el avance investigativo sobre la problemática general del ruido de baja frecuencia.

Finalmente, se prevé que los resultados obtenidos de este trabajo aporten al conocimiento tanto nacional como internacional, fomentando así el desarrollo de nuevas áreas y continuidad de las investigaciones desarrolladas en la UDLA.

#### 1.4. Alcance

El trabajo se enfoca en el margen de un proyecto de investigación, el cual posee un enfoque internacional a través de diversos programas investigativos de Europa. Dado que en el Ecuador el tema ha tenido poco desarrollo, el trabajo de titulación, también ayudará a que la UDLA pueda estar a la vanguardia a nivel nacional de los avances investigativos del área.

El principal aspecto que se estudió en el presente trabajo fueron las fluctuaciones de baja frecuencia en el ruido de baja frecuencia, para poder modelar su comportamiento y predecir la percepción del mismo. Para analizar los datos obtenidos, se utilizó el software MATLAB con el toolbox de estadística. Herramientas como la desviación estándar, ANOVA y prueba de comparación múltiple, fueron aplicadas a la hora de encontrar los principales factores que afectan los datos.

Debido a que el tiempo de estímulo de bajas frecuencias sería bastante largo si se aplicara métodos de *loudness* tradicionales, el método escogido para desarrollar la investigación implica un método clásico de ajuste, pero aprovechando la precisión y control que ofrece la tecnología actual. Por último, el alcance de los resultados esperados desemboca en un aporte al conocimiento tanto a nivel nacional como internacional, formando parte de futuras investigaciones y el desarrollo de nuevas soluciones al tema planteado.

#### 1.5. Objetivos

### 1.5.1. Objetivo general

Analizar la percepción de intensidad de sonidos de baja frecuencia y amplitud fluctuante mediante experimentos psicoacústicos.

### 1.5.2. Objetivos específicos

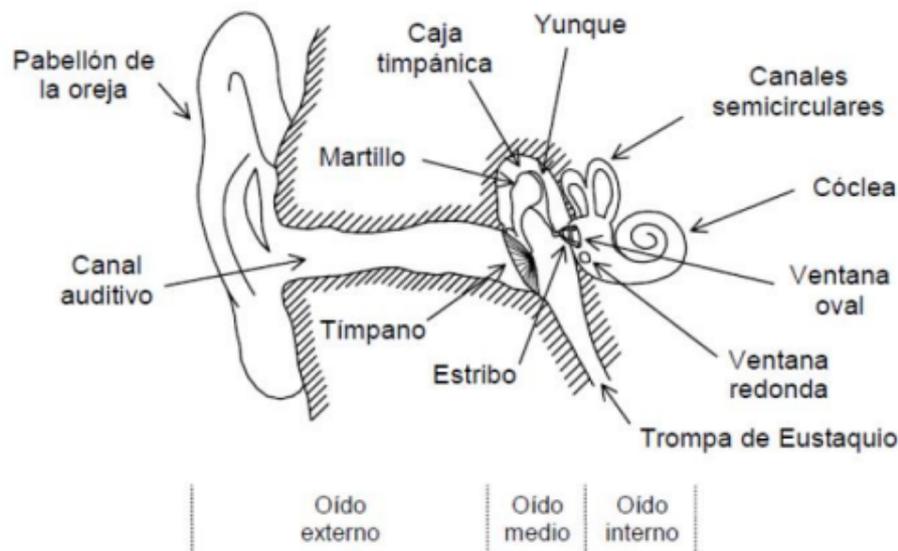
- Obtener una base de datos perceptuales de intensidad describiendo su dependencia de características temporales y espectrales de sonidos de baja frecuencia.
- Implementar el uso de un subwoofer que sirva como mejora para la reproducción de infrasonidos y, por ende, para las investigaciones futuras.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Sistema auditivo periférico

El oído es el órgano del cuerpo humano que acoge el principio de transducción ya que convierte señales acústicas en estímulos eléctricos que son llevados hasta el cerebro para ser procesados e interpretados, constituyendo de esta manera el sentido de la audición.

De manera específica, el sistema auditivo periférico es el encargado de la parte fisiológica del proceso de la audición, proceso que inicia en el oído externo, pasando por el oído medio hasta el oído interno donde se llega al dominio eléctrico y el sistema termina. A continuación, se puede ver su estructura:



*Figura 1.* Estructura fisiológica del oído humano.

Tomado de (Miyara, 2006, p. 1)

### 2.1.1. Oído externo

Está conformado por el pabellón y el canal auditivo, y constituye la etapa inicial del proceso fisiológico de la audición.

La función del pabellón es captar la mayor cantidad de energía acústica para conducirla mediante reflexiones y difracciones hacia el canal auditivo, además de permitir al individuo la localización del foco sonoro.

Por otro lado, el canal auditivo es la vía que conecta el pabellón y el tímpano, y su principal función es la de transportar la energía sonora y vibraciones provenientes del pabellón hacia el oído medio, y transformar esta energía en ondas planas, para de esta manera poder excitar la superficie del tímpano de manera efectiva. Además, este canal, que mide entre 25 y 30 milímetros de largo, tiene la función de proteger el tímpano y el oído medio, ya que su secreción de cerumen sumada a la presencia de pequeños pelos, atrapan polvo, suciedad y cuerpos no deseados, ayudando al mismo tiempo a mantener la temperatura entre el oído externo y el oído medio.

### 2.1.2. Oído medio

El oído medio está formado por el tímpano, los huesecillos u osículos auditivos (martillo, yunque y estribo) y la trompa de Eustaquio. La principal función de este sistema es convertir vibraciones de poca presión y gran amplitud en vibración de mayor presión y menor amplitud, por lo que se puede definir también como un adaptador de impedancias.

El tímpano o membrana timpánica es un receptor elástico que recoge las ondas acústicas provenientes del canal auditivo y las comunica a la cadena de huesecillos a través de vibraciones, ya que dependiendo de la frecuencia la membrana timpánica vibra más lento (frecuencias bajas) o más rápido (frecuencias altas).

El primer hueso en moverse por las vibraciones del tímpano es el martillo que está conectado al yunque y este al estribo, este último conectado a la ventana oval (inicio del oído interno). Estos tres huesecillos están sostenidos mediante pequeños ligamentos y músculos. Es ahí donde el cambio de magnitud y presión de las vibraciones se produce, ya que todo el sistema de huesecillos funciona como una palanca mecánica que posee una ganancia de 1.3, a lo que al agregar la diferencia de áreas entre el tímpano ( $0.6 \text{ [cm}^2\text{]}$ ) y la ventana oval ( $0.4 \text{ [cm}^2\text{]}$ ) nos da una relación entre presiones del tímpano y la ventana oval del orden 20.

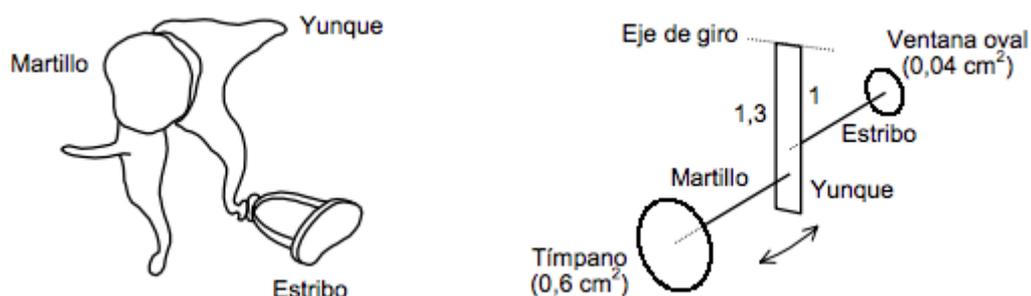
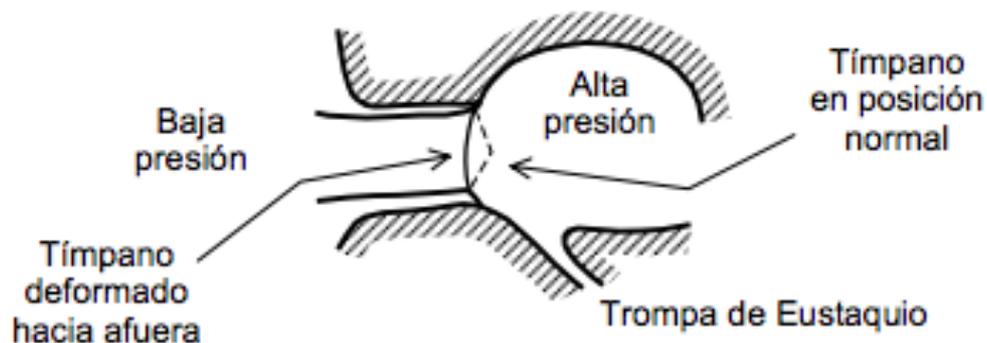


Figura 2. Derecha, huesecillos del oído medio. Su funcionamiento.

Tomado de (Miyara, 2006, p. 2)

La trompa de Eustaquio es un conducto que une la caja timpánica con la laringe y su función es igualar la presión del oído medio con la presión de la atmósfera, lo que asegura la vibración óptima del tímpano, ya que la amplitud resultante de las vibraciones depende justamente de la diferencia de presión exterior con la presión de la caja timpánica.



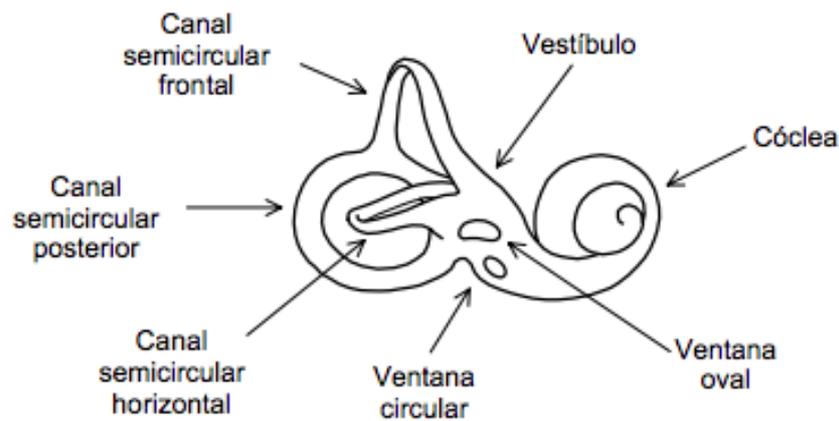
*Figura 3.* Deformación del tímpano ante una disminución relativamente rápida de la presión atmosférica.

Tomado de (Miyara, 2006, p. 3).

### 2.1.3. Oído interno

El oído interno está constituido por el laberinto (contiene a canales semicirculares), el vestíbulo y el caracol. Los canales semicirculares son los encargados del equilibrio y consisten en tres conductos recubiertos por terminaciones nerviosas y que en su interior albergan líquido endolinfático, el cual permite activar los mecanismos de control de la estabilidad en el cerebro.

El vestíbulo conecta a los canales semicirculares con el caracol y a su vez, conecta el caracol con la caja timpánica a través de dos orificios en su estructura denominados ventana oval (el estribo se encuentra adherido a ésta) y ventana redonda.



*Figura 4.* Representación ideal del oído interno.

Tomado de (Miyara, 2006, p. 4)

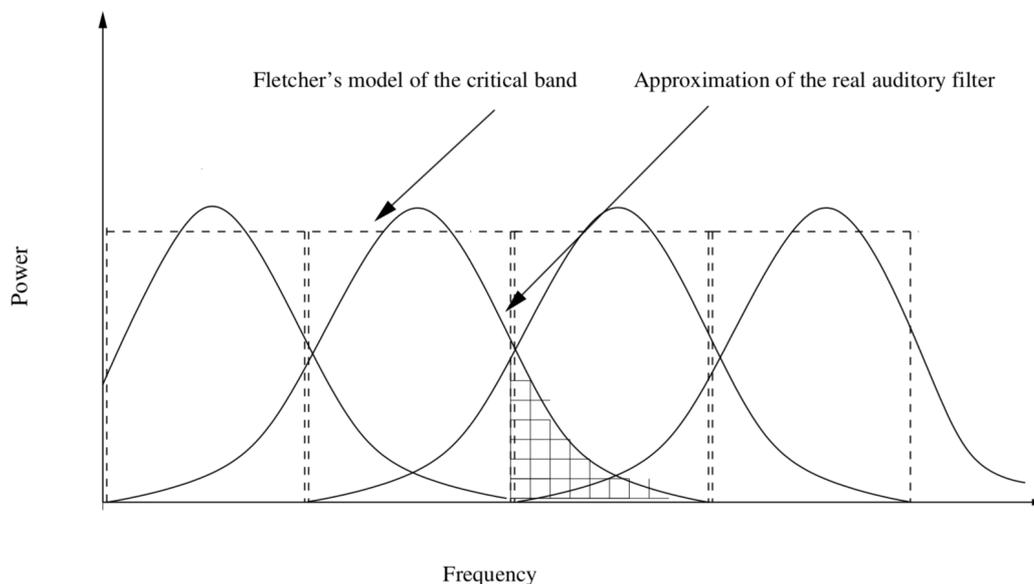
El caracol contiene a la cóclea que es un tubo de dos vueltas y media en espiral, y está compuesta de tres secciones: la rampa timpánica, rampa vestibular (conectada con la rampa timpánica mediante un orificio llamado helicotrema) y la rampa coclear que contiene a la membrana basilar sobre la cual se encuentra el órgano de Corti que es la estructura que contiene células pilosas, las cuales transportan el sonido hacia el cerebro en el dominio eléctrico a través de pulsos.

## 2.2 Filtros auditivos

Partiendo del concepto de que un filtro es un dispositivo que aumenta ciertas frecuencias y atenúa otras, en la audiolología y la psicoacústica se maneja una noción similar. Es conocido, que un filtro pasa banda deja pasar las frecuencias dentro de un ancho de banda determinado, caracterizado por dos pendientes de corte. En el caso del sistema auditivo humano, la membrana basilar es la encargada de discernir entre el espectro audible y, dependiendo de su forma y organización, permite que las diferentes frecuencias resuenen a lo largo de la misma. Esto hace que la sensibilidad de los rangos audibles se distribuya como una organización tonotópica que puede interpretarse como un arreglo de filtros “pasa banda” conocidos como “filtros auditivos”. Se distribuyen a lo largo de la membrana basilar y son los encargados de determinar y discriminar la

sensibilidad de sonidos en la cóclea; también son de carácter no lineal y dependen de un nivel.

En un principio, Fletcher en el año de 1940 introdujo el concepto de banda crítica, que tenía que ver muy de cerca con un fenómeno llamado “enmascaramiento”. Lo que se trataba de explicar, era cómo una onda puede sobreponerse a otra, sin la necesidad de distinguirse como diferentes, siempre y cuando estén dentro de una cercanía. A este intervalo, lo llamaron banda crítica y lo representaron como casillas rectangulares (ERB por sus siglas en inglés) a lo largo del espectro. Estas casillas tenían la característica teórica de dejar pasar la misma cantidad de energía hasta llegar a su límite. Con el tiempo, los estudios avanzaron hasta llegar a los filtros auditivos, que pudieron determinar que el comportamiento de estos casilleros no es de forma rectangular, sino más bien de tipo campana, con menor sensibilidad al llegar a su base.



*Figura 5.* Bandas críticas de Fletcher vs aproximación de filtro auditivo.

Tomado de (Jurado y Robledano, 2007, p. 13)

De este modo, se pudo entender porque cuando se escuchan tonos consecutivos no se distinguen como independientes y, a medida que la separación entre los mismos aumenta, la sensación de escucha que se produce es más bien la de un

batimiento. No obstante, cuando la separación es suficiente para distinguir dos tonos separados, se dice que se ha superado la banda crítica, y dichas excitaciones se encuentran en dos filtros distintos.

Sin embargo, toda la teoría que se conoce sobre los filtros auditivos llega a modelar un comportamiento hasta 100 [Hz]. Por debajo pese a haber varias investigaciones, existen más discrepancias que concordancias entre los diferentes autores. Lo que sí se puede mencionar, es que el ancho de banda de los filtros por debajo de 100 [Hz] es menor que 100 [Hz], como lo había propuesto Fltecher que dijo esto mismo para todo el espectro por debajo de 500 [Hz].

### 2.3. Vía auditiva

Es el sistema que transmite como tal el sentido de la audición, donde la información viaja desde los receptores en el órgano de Corti en el oído interno hasta el sistema nervioso a través del nervio vestibulococlear. Esta vía lleva la información sonora hasta el córtex auditivo, el cual es el encargado de la percepción consciente de los estímulos sonoros. Este sistema está compuesto por dos vías, una primaria por donde la información auditiva llega al córtex, y contiene al ganglio espiral, los núcleos cocleares, el colículo inferior y cuerpo geniculado medial, y una vía secundaria donde se produce la percepción inconsciente, como la atención las respuestas emocionales y los reflejos auditivos.

El ganglio espiral contiene el cuerpo celular de las neuronas de primer orden, que son las que reciben la información proveniente de las células pilosas del órgano de Corti y la llevan a través de la lámina ósea espiral. Los axones centrales de este ganglio forman el principal componente del nervio coclear. El nervio vestibular se une al nervio coclear entrando al meato acústico interno y desde este punto se los conoce como el nervio vestibulococlear.

El nervio coclear se bifurca y lleva la información hacia los núcleos cocleares que se dividen en dos: ventral y dorsal. Ambos núcleos poseen unas fibras cruzadas y otras no, lo que hace que la información de ambos oídos viaje bilateralmente en cada lemnisco lateral.

“El colículo inferior (CI) es el sitio primario de convergencia de las corrientes auditivas dorsal y ventral del tronco del encéfalo, es decir, de la identificación del patrón de sonido y las corrientes de localización del sonido” (Pickles, 2015, p.10). Las fibras del CI se proyectan al cuerpo geniculado medial ipsilateral en el tálamo. El cuerpo geniculado medial tiene conexiones recíprocas con el córtex auditivo y participa en el refinamiento de la información.

### 2.3.1. Codificación temporal del sonido

#### 2.3.1.1. *Auditory steady-state response* (ASSR)

La respuesta auditiva de estado estacionario, también conocida como ASSR por sus siglas en inglés, “es un potencial evocado auditivo (AEP) que se puede usar para estimar objetivamente la sensibilidad auditiva en individuos con sensibilidad auditiva normal y con diversos grados y configuraciones de pérdida auditiva neurosensorial (SNHL)” (Korczak, Smart, Delgado, Strobel y Bradford, 2012, p.146).

Para evaluar una ASSR se utiliza un estímulo basado en una frecuencia portadora y una frecuencia de modulación que permiten evaluar el comportamiento de tonal del sonido en el individuo.

La frecuencia portadora se asocia con la región de la cóclea, donde las células ciliadas se activan en respuesta a la presentación de un estímulo, por otro lado, la frecuencia de modulación es la frecuencia con la que la actividad de la electroencefalografía se sincroniza con la descarga

neuronal. Esto se puede derivar calculando el período de la frecuencia de modulación (Korczak et al., 2012, p.149).

Cuando el estímulo se presenta en rangos de modulación menores a los 20 [Hz], las respuestas son generadas por actividad en el córtex auditivo primario, cuando está entre 20 [Hz] y 60 [Hz] los generadores neuronales subyacentes se activan en la corteza auditiva primaria, el cerebro auditivo medio y el tálamo. Por último, cuando el estímulo supera los 60 [Hz] de modulación, contribuyen el complejo olivar superior, el colículo inferior y los núcleos cocleares. Los parámetros de la prueba, como la tasa de estímulo y los ajustes de filtrado, pueden suprimir las contribuciones de ciertos generadores neuronales subyacentes a la respuesta promediada final (Korczak et al., 2012, p.149).

Cuando las ASSR son registradas utilizando tasas de modulación altas los generadores primarios de la audición ocurren dentro de la región auditiva del cerebro, de manera que los resultados no se ven alterados por el estado y edad del sujeto sometido a estudio.

Algunos de los tipos de estímulo utilizados para analizar una ASSR son los tonos modulados en frecuencia, los tonos modulados en amplitud, los tonos modulados mezclados y la secuencia de repetición de tono con compuerta (Korczak et al., 2012, p. 150).

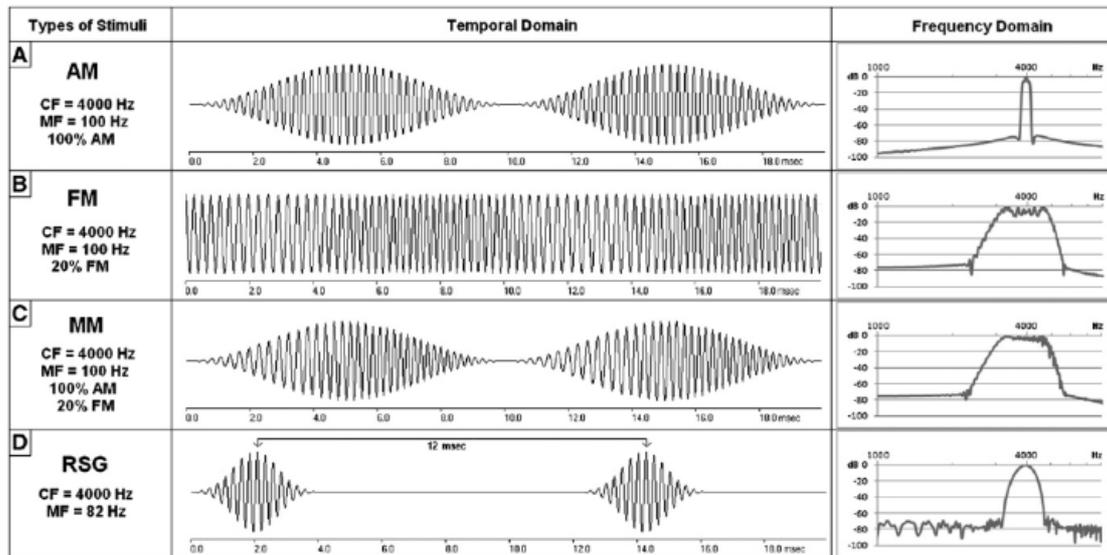


Figura 6. Los tipos más comunes de estímulos utilizados para provocar una respuesta ASSR, en los dominios temporal y de frecuencia.

Tomado de (Korczak et al., 2012, p. 150)

“La amplitud de la ASSR crece de forma no lineal con la intensidad, al igual que las funciones de crecimiento de *loudness* para los participantes con audición normal y con discapacidad auditiva” (Eeckhoutte, Wouters y Francart, 2016, p. 9). Además, a través de otros estudios que la amplitud de la ASSR se correlaciona más con el *loudness* de un estímulo que con su intensidad.

### 2.3.1.2. Frequency-following response (FFR)

Las FFR son potenciales eléctricos prolongados basados en respuestas de bloqueo de fase en las poblaciones de neuronas a estímulos acústicos periódicos de baja y media frecuencia (Du, Kong, Wang, Wu y Li, 2011, p. 2047). Las respuestas de seguimiento de frecuencia (FFR) se caracterizan por formas de onda periódicas que se sincronizan con las periodicidades de los sonidos de baja y media frecuencia, representando estructuras temporales de sonidos armónicos.

Las FFR registradas a través de estudios en la cabeza humana reflejan actividades de bloqueo de fase en una población de elementos neuronales en el

tronco cerebral rostral con un límite superior de frecuencia de alrededor de 1000 [Hz]. El límite superior mencionado disminuye a medida que asciende por las diferentes etapas registradas de la vía auditiva. Cabe recalcar que, aunque las FFR se basan en el bloqueo de fase de neuronas individuales, el límite superior de frecuencia de bloqueo de las neuronas individuales no debe confundirse con el límite superior de las poblaciones de neuronas.

En base a la *volley theory* (teoría de la volea), que propone que una población de fibras del nervio auditivo con ajuste de bloqueo de fase en submúltiplos de la frecuencia estimulante puede producir un patrón de descarga compuesto para representar temporalmente el estímulo, los FFR son capaces de codificar frecuencias mucho más altas con respecto al límite superior de la frecuencia de bloqueo de fase de las neuronas individuales (Du et al., 2011, p. 2048).

Así mismo, según Tichko y Skoe (2017, p. 2) “el bloqueo de fase puede ocurrir en múltiples estructuras auditivas, con una estimulación de baja frecuencia que resulta en una mayor activación de todo el sistema que en las frecuencias más altas”. Además, mencionan que en un sistema de temperamento igual donde los tonos adyacentes están separados por un mismo intervalo, la diferencia absoluta entre las frecuencias adyacentes es más pequeña en el extremo inferior del rango de frecuencia del estímulo y más grande en el superior.

#### 2.4. Métodos psicofísicos

Dentro de la psicología experimental, una de sus ramas vanguardistas es la “psicofísica”. Esta se enfoca en estudiar las relaciones entre lo objetivo y lo subjetivo, en otras palabras, compara las intensidades de diversos estímulos medidos en unidades físicas y las sensaciones que producen. La psicofísica tuvo el mérito de introducir la medición rigurosa y consistente en Psicología y, gracias a ello, el acceso de esta disciplina a las Ciencias Experimentales (Aznar, 2009, p. 2).

Los métodos psicofísicos ayudan y permiten conocer los límites de la sensorialidad, es decir, el umbral absoluto o umbral de conciencia y el umbral relativo o umbral diferencial de cada propiedad que somos capaces de percibir (Aznar, 2009, p. 7). De este modo, estos métodos han resumido las respuestas evaluadas en dos primordiales; la primera llamada componente sensorial o “discriminabilidad” de la señal (estímulo); y la segunda, denominada componente cognitiva o criterio de decisión para la respuesta.

Para poder entender mejor el estudio de la percepción, se le debe analizar desde dos enfoques. El primero sería la captación del estímulo físico, y tiene que ver con la medición de cómo las diferentes células y partes del cuerpo reaccionan a un estímulo. El segundo apunta a relacionar los eventos sucedidos físicamente y lo percibido neuralmente. Por lo tanto, el objetivo primordial de los métodos psicofísicos es intentar explicar las relaciones entre la experiencia perceptiva (sensaciones y percepciones) y la energía física que las provoca (lo que hay ahí fuera, en el mundo exterior) (Pizlo, 2001, p. 3145). Pueden aplicarse a muchos fenómenos, sean estos visuales, sonoros, o cualquier otro que tenga que ver con los sentidos.

#### 2.4.1. Métodos de medición de umbral

La teoría de detección de señales dice que los umbrales absolutos o diferenciales se pueden representar como un punto definido desde el cual hay un cambio en la sensación percibida; sea del tipo: “la sensación varía o no”, o “la sensación se produce o no”. Pero, si se habla de una manera más real, si se altera de una manera continua la magnitud de uno de los parámetros del estímulo, se llega a la conclusión de que no existe un punto, sino una zona de umbral. En esa zona las decisiones del sujeto no sólo dependen de la presencia o no del estímulo, lo que consecuentemente permite determinar el umbral para dicho estímulo, sino que las decisiones dependen también de otros factores relacionados con los procesos de toma de decisiones de los individuos (Moore, 2012, p. 57). Dicho de otra manera, existe esta zona donde el individuo percibe

la presencia o no de un estímulo sonoro, independientemente de la presencia del mismo (si existe o no).

Esta teoría, fue desarrollada a principios de 1940 por ingenieros en comunicación, que analizaron la transmisión de información a través de canales de comunicación ruidosos. Más adelante, se introdujo en la psicoacústica alrededor de 1950. Esta teoría, proporciona una base (derivada de la teoría de decisiones estadísticas) para comprender la manera en que los sujetos toman decisiones cuando la presencia del estímulo es incierta. Por medio de ella se trata de separar la sensibilidad al estímulo de esos otros aspectos del proceso de toma de decisiones.

Entendido esto, los métodos más utilizados son los explicados en breves rasgos anteriormente. El primero de ellos, el MAP, que se mide colocando pequeños altavoces dentro del canal auditivo; y el segundo de ellos, el MAF, que se mide enviando estímulos a través del aire como medio de propagación, dentro de cámaras anecoicas, en ausencia del sujeto y con un micrófono en el centro de la sala donde debería estar situado el mismo.

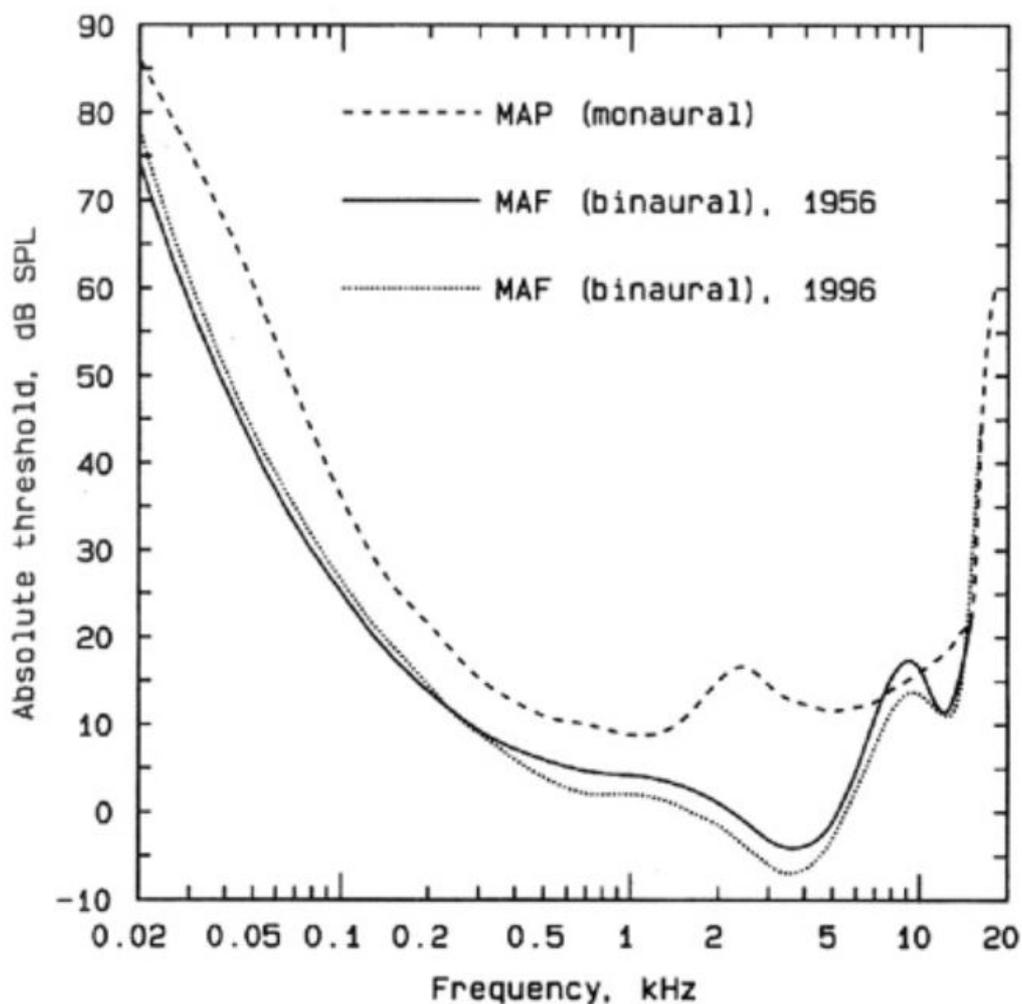


Figura 7. Niveles mínimos audibles según sea MAP o MAF.

Tomado de (Moore 2012, p. 58)

Las diferencias fundamentales entre un método y el otro, radican en la zona entre 1.5 y 6000 [Hz] donde las resonancias del pabellón y canal auditivo hacen que el umbral baje (Moore, 2012, p. 60). Explicándolo mejor, el oído externo aumenta más o menos en 15 [dB] la presión sonora que llega al tímpano en este rango de frecuencias, mientras que el oído medio es más eficiente en frecuencias medias. Por último, se debe también considerar si las mediciones son realizadas de manera monoaural o binaural, debido a que, si se aplica la segunda, se obtiene como resultado, una sensibilidad de 3 [dB] mayor.

#### 2.4.2. *Transformed up/down procedure*

En 1965 Levitt y Whitherill desarrollaron un método (*up/down procedure*) basado en el *up/down*, que plantea que si una respuesta es correcta la intensidad del estímulo baja y si es errónea, sube. A partir de esto, propusieron que la reducción de nivel de un estímulo no venga dada por la última respuesta, sino por una o dos respuestas anteriores. Por ejemplo, un estímulo puede aumentar su nivel una vez que la respuesta sea negativa, pero disminuir después de dos positivas. Este procedimiento se llama *1 up / 2 down*, y se caracteriza por proporcionar un 70,71% de probabilidad de obtener respuestas positivas. Este método puede variar en un *1 up / 3 down*, lo cual aumenta en un 79,37% la probabilidad de una respuesta positiva.

La diferencia primordial entre el método *up/down* y el *up/down procedure*, es que el segundo permite ubicarse en varios puntos de la curva psicométrica para su evaluación. Sin embargo, existen más métodos y variaciones como el *Termination Criteria* o métodos PSI (*Psychological Screening Inventory*). Se puede encontrar más información de los métodos, así como una introducción a su aplicación en MATLAB en *Psychophysics: A practical Introduction*. (Kingdom y Prins, 2010, p.125).

#### 2.4.3 Método de ajuste

Es un método que, sin saberlo, se ha implementado desde ya hace mucho tiempo, es uno de los más antiguos y fundamentales de la psicofísica. Fechner (1960) lo introdujo al describirlo en su obra *Elementos de la psicofísica*, y se le conoce también como “Método del error promedio” o “Método de reproducción”. Su nombre se debe a que el o los sujetos puestos a prueba, deben ajustar o manipular la intensidad del estímulo, hasta que sea capaz de percibirlo (UA) o hasta que iguale a otro estímulo de comparación (UD).

Dentro de todos los métodos psicofísicos, este es el que resulta más natural para los sujetos que lo usan ya que son ellos, y no el experimentador, quienes manipulan personalmente la variación (en intensidad) del estímulo. Se puede tener de dos tipos, los “Ensayos ascendentes” en donde el valor del estímulo va aumentando, y los “Ensayos descendentes” donde en cambio este disminuye; esto hace que los sujetos resulten altamente motivados.

Obtención del UA:

La intensidad física de Umbral Absoluto (UA) es el valor por encontrar en este tipo de métodos. Para esto, la persona que realiza la prueba debe conocer aproximadamente las cifras donde fluctúa UA, lo cual conoce gracias a estudios piloto realizados a un número pequeño de personas (entre 1 y 3), de los que se obtiene una estimación aproximada.

Después, el investigador debe colocar la intensidad de los estímulos por encima o por debajo del UA, y la persona tiene que ir aumentando o disminuyendo su valor hasta poder percibirlo como “Ensayo ascendente” o dejar de hacerlo “Ensayo descendente”. Esto dependerá entonces, de la posición donde se haya situado el supuesto UA (sea por encima o por debajo).

Después de varios ensayos, se recomienda al menos 5 Ascendentes y 5 Descendentes. Se debe calcular un índice estadístico de tendencia central, sean este media aritmética, mediana o media geométrica y ese valor es el valor del UA.

#### 2.4.4. Métodos de medición de *loudness*

La ISO 532-1 y la ISO 532-2 especifican dos métodos diferentes para calcular la sonoridad (*loudness*) que pueden producir resultados diferentes para sonidos dados. Debido a que actualmente no se puede establecer una preferencia general por uno u otro método, es responsabilidad del usuario seleccionar el método que parezca más apropiado para la situación dada. Algunas de las

características principales de cada uno de los métodos se describen a continuación para facilitar la elección.

El primer método describe el cálculo de la sonoridad y el nivel de sonoridad de los sonidos estacionarios y se basa en la norma DIN 45631: 1991. El segundo método de este documento cubre los procedimientos para el cálculo de la sonoridad y el nivel de sonoridad de sonidos arbitrarios no estacionarios (que varían con el tiempo), incluidos los sonidos estacionarios como un caso especial, y se basa en la norma DIN 45631 / A1: 2010.

Basado en el concepto general del método para sonidos estacionarios, el método para sonidos que varían con el tiempo incorpora una generalización del enfoque de Zwicker a los sonidos arbitrarios no estacionarios. Por supuesto, esta generalización es compatible con el método para sonidos estacionarios, ya que proporciona los mismos valores de sonoridad que el método para sonidos estacionarios si se aplica a sonidos estacionarios.

El método de Moore-Glasberg implementado en ISO 532-2 se limita a sonidos estacionarios y se puede aplicar a tonos, ruidos de banda ancha y sonidos complejos con componentes espectrales de líneas nítidas. Sin embargo, mejora la precisión del volumen calculado en el rango de baja frecuencia y permite el cálculo del volumen en condiciones donde el sonido difiere en los dos oídos. Se ha demostrado que este método proporciona una buena coincidencia con los contornos de igual nivel de sonoridad definidos en ISO 226: 2003 y el umbral de referencia de audición según se define en ISO 389-7: 2005.

## 2.5. Modelo de *loudness*

La sonoridad es la impresión subjetiva de la intensidad de un sonido, medida en sones. Esta unidad sono es proporcional a los datos suministrados pues una duplicación en sones corresponde a una duplicación de sonoridad. El silencio se acerca a 0 [sonos], mientras que un tono de 1 [kHz] a 40 [dB] (NPS) es

presentado como una onda plana frontal en un campo libre y tiene una intensidad de 1 tono.

La sonoridad y el nivel de sonoridad son dos atributos perceptivos del sonido que describen sensaciones absolutas y relativas de la fuerza del sonido, percibidas por una persona en condiciones de escucha específicas. Debido a las diferencias individuales inherentes entre las personas, tanto la sonoridad como el nivel de sonoridad tienen la naturaleza de estimadores estadísticos caracterizados por sus respectivas medidas de tendencia central y dispersión determinadas para una muestra específica de la población general. El objetivo de la ISO 532 y la ANSI S3.4-2007 es especificar procedimientos de cálculo basados en las propiedades físicas del sonido para estimar la sonoridad y el nivel de sonoridad percibidos por personas con audición otológicamente normal en condiciones de audición específicas.

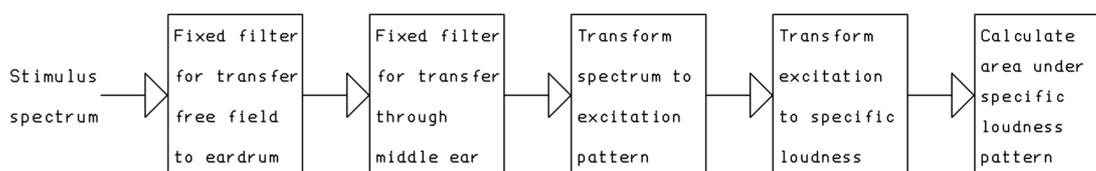


Figura 8. Suma simple de *loudness* en los oídos.

Tomado de (Moore 2007, p. 2)

Para la investigación, el modelo base utilizado fue el de la ANSI S3.4-2007, debido a que se basa en el modelo de sonoridad desarrollado por Moore, Glasberg y Baer (*Journal of the Audio Engineering Society*, 1997), pero con la función de transferencia de oído medio modificada descrita en Glasberg y Moore (JASA, 2006). Sin embargo, debido a que ahora hay evidencia considerable que indica que la sonoridad no es una simple suma en los oídos, como se supone en ANSI S3.4-2007, el modelo ha sido modificado para incorporar la inhibición binaural como se muestra en el paper de Moore, *Development and current status of the "Cambridge" loudness models* (*Trends in Hearing*, 2014). Además, se incorporó una extensión para tratar con ruidos que varían con el tiempo, y no

solo con ondas estacionarias. Con todo esto, el modelo rediseñado ha podido ofrecer predicciones razonablemente más precisas sobre la percepción de *loudness* de sonidos puntuales y el habla.

### *Block diagram of the model for time-varying sounds*

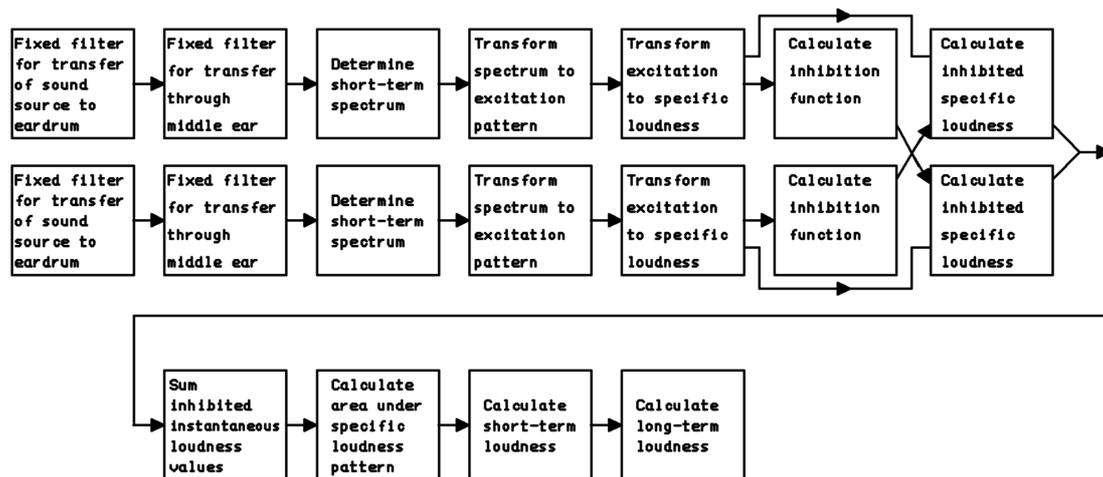


Figura 9. Diagrama de bloques del modelo de *loudness* para sonidos variables en el tiempo.

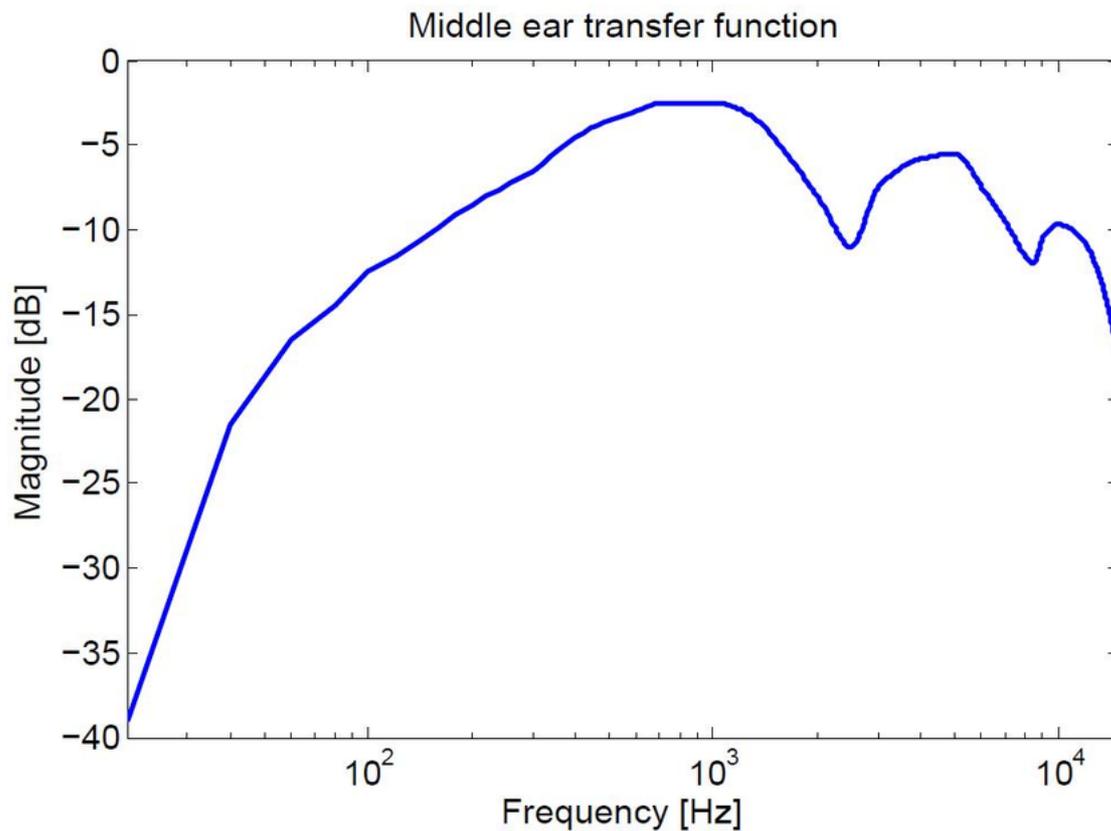
Tomado de (Moore 2007, p. 9)

NOTA: El modelo para los sonidos que varían con el tiempo e incorporan inhibición binaural se propone como una extensión de ANSI S3.4 y como ISO532-3.

#### 2.5.1. Función de transferencia del oído METF

La METF (*Middle Ear Transfer Function*) es una representación matemática de cómo el sonido pasa a través del oído medio hasta llegar a ser interpretado por la cóclea. Explicado con más detalle, se debe argumentar que la audición humana sería muy ineficiente si solo se tratase de pasar las ondas acústicas desde un medio que es el aire, a otro medio líquido que sería la perilinfa. El cambio de impedancia necesario haría que se pierda mucha de la energía de la onda. Por esta razón, el oído medio provee una transformación de impedancia

principalmente debido a la relación en el área del tímpano y el estribo y en una pequeña extensión a la relación de la palanca de los osículos (Møller, 1963, p. 1526).



*Figura 10.* Función de transferencia del oído medio.

Tomado de (Aichinger 2009, p. 13)

Marquardt et al. (2007) describieron una técnica, basada en la supresión de las emisiones otoacústicas del producto de distorsión (DPOAE), que permitió la evaluación no invasiva de la forma del METF hasta 500 [Hz] en humanos. Después, evaluaron la forma de compensar las pérdidas producidas obtenidas por la MTEF, y obtener un METFout.

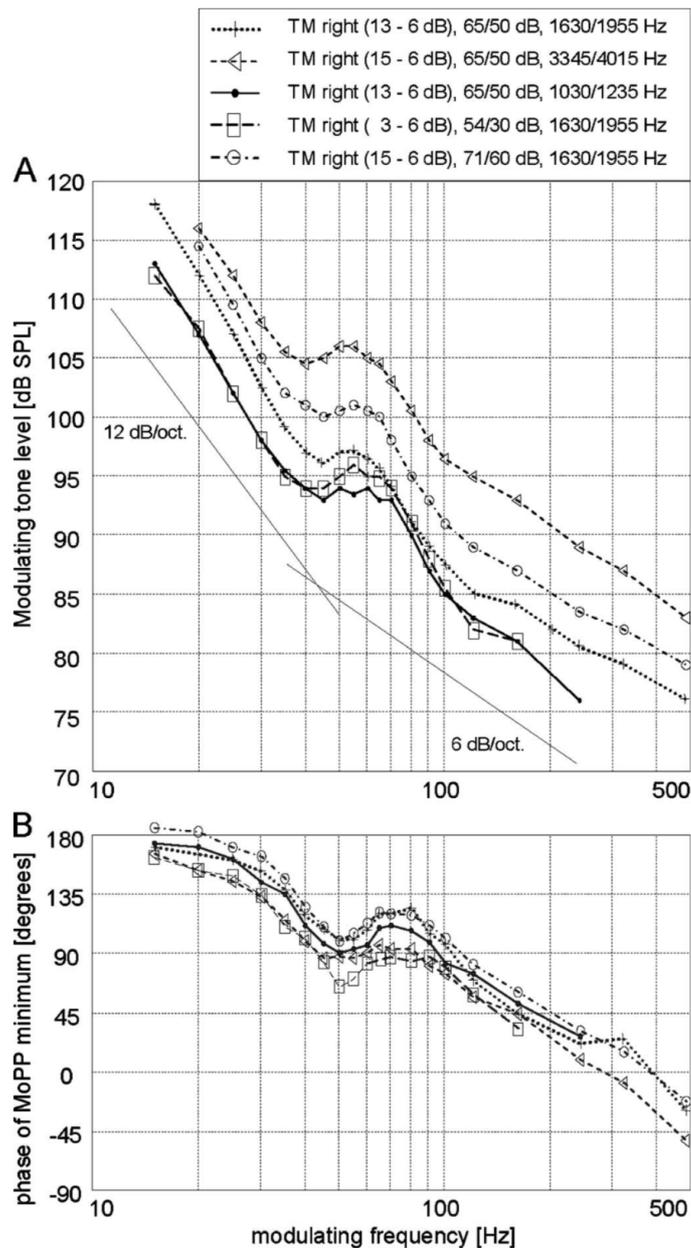


Figura 11. Función METFout para bajas frecuencias.

Tomado de (Marquardt 2007, p. 5)

Se puede observar en la *Figura 11(A)* cómo la tendencia que describe la curva es de carácter negativo (desde 10 hasta 40 [Hz] de -12 por octava y de ahí en adelante hasta 500 [Hz] de -6 [dB] por octava), esto sugiere que en la METF se va perdiendo sensibilidad a medida que disminuye la frecuencia. De aquí nace entonces, la utilización dos frecuencias para el experimento, TU (*Tone Upper*) y TL (*Tone Lower*). Si lo que se desea, por ejemplo, es analizar la respuesta de

una persona en 40 [Hz] con 5 [Hz] de *beating*, lo que se hace es tomar un tono de 42.5 y de 37.5 [Hz], primero entonces, se deja fijo TL y se varía TU; después se invierte, y el promedio de las diferencias, arrojaría el valor del resultado de la persona.

## 2.6. Baja frecuencia e infrasonido

El sistema de audición está diseñado para escuchar frecuencias desde 20 [Hz] a 20 [kHz]. Sin embargo, para poder entender mejor la diferencia tonal percibida por el ser humano, se ha dividido este espectro en 3 zonas fundamentales:

- Frecuencias bajas: aquellas que están por debajo de los 256 [Hz] hasta los 20 [Hz].
- Frecuencias Medias: las comprendidas entre 256 [Hz] y 2 [kHz].
- Frecuencias altas: las que van desde 2 [kHz] hasta 20 [kHz].

De esta manera, a medida que la frecuencia disminuye, la sensibilidad de la audición va decreciendo. Por esta razón, y por el desgaste y fallecimiento de células pilosas, es normal que una persona adulta requiera de intensidades mayores para poder percibir sonidos por debajo de 100 [Hz].

Por otro lado, están también los denominados “infrasonidos”, que hacen referencia a todas aquellas frecuencias por debajo de los 20 [Hz]. Si bien es cierto, la percepción tonal se pierde entre los 18 y 16 [Hz], análisis y trabajos como el de Moller y Pedersen (2014), indican que los infrasonidos a niveles altos pueden no escucharse, pero si percibirse.

### 2.6.1. Propagación de bajas frecuencias e infrasonidos

La propagación del sonido en el aire está dominada por la ley del inverso al cuadrado que explica la atenuación del sonido debido a la distancia, en donde se reduce 6 [dB] cada vez que se duplica la distancia. En el medio existen

también otros factores de atenuación como el rozamiento del aire, la absorción de superficies y la producida por barreras tanto artificiales como naturales; en el caso de las frecuencias bajas, al tener una longitud de onda considerable, hacen que la atenuación por aire, absorción y barreras sea despreciable (Leventhall, Pelmear y Benton, 2003, p. 8).

#### 2.6.2. Fuentes naturales y no naturales de bajas frecuencias e infrasonidos

Las fuentes naturales tienen como principal característica el hecho de que su causa es ajena a procesos realizados por el hombre, además de que poseen una gran dimensión y potencia, haciendo que su absorción en la atmósfera es mínima. Debido a sus características físicas, la detección, monitoreo y obtención de datos de estos eventos naturales de baja frecuencia pueden ser realizadas a grandes distancias entre foco y fuente, tal como sucede con los sismos o erupciones volcánicas.

Las fuentes artificiales tienen lugar debido a procesos o eventos que son generados por maquinaria o artefactos creados y manejados por el ser humano. Si bien hay máquinas cuyo objetivo es generar frecuencias bajas como aquellas dedicadas a sondeo o radares, la mayoría de éstas no tienen como objetivo generar frecuencias bajas o infrasonido, sino que son resultado del mecanismo o estructura de las mismas, teniendo así a turbinas, generadores, máquinas de impacto, etc.

##### 2.6.2.1. Características de fuentes artificiales (turbinas de viento)

La principal característica de propagación en fuentes artificiales es la presencia de emisiones sonoras de amplitud modulada, como por ejemplo en las turbinas de viento, donde este fenómeno se origina debido al batimiento de las hélices. La emisión sonora de amplitud modulada es un factor determinante en respuestas subjetivas sobre la percepción del sonido.

La sensibilidad del ser humano a ruidos de banda ancha con amplitud modulada es mayor para frecuencias de modulación comprendidas entre 2 y 10 [Hz] con valor peak en 4 [Hz]; esto debido a las tasas de modulación típicas del habla humana. Los estudios realizados en turbinas de viento de gran escala reflejan que el rango de frecuencias que modulan la amplitud de sus emisiones está comprendido entre 0.5 y 1.5 [Hz], por lo que es necesario el estudio de la sensibilidad humana a la amplitud modulada en el rango de infrasonidos (Perkins, Lotinga, Berry, Grimwood y Stansfeld, 2016, p. 7).

Por otro lado, Las turbinas de viento presentan 2 tipos de modulación de amplitud, una por silbido de las hélices y otra por golpe de las hélices contra el viento, siendo la modulación por golpe la más influyente. Por este motivo, el ruido de estas turbinas causa más molestia que otros ruidos ambientales del mismo nivel. La cizalladura del viento explica la modulación por golpe (efecto van den Berg), mientras que la diferencia entre el máximo y el mínimo del nivel ponderado A medido en la fuente caracteriza a esta modulación (Makarewicz y Gołębiowski, 2018, p. 1).

### 2.6.3. Percepción en baja frecuencia e infrasonido

#### 2.6.3.1. Umbrales de audición

Un umbral de audición hace referencia al mínimo nivel de presión sonora que debe tener un sonido para que una persona pueda escucharlo. Por supuesto, esto depende de varios factores como son la frecuencia, sensibilidad del sujeto, nivel de cansancio auditivo del mismo, y duración del estímulo sonoro. Para poder estudiar esta respuesta de manera general, se deben citar las curvas propuestas por Fletcher y Munson en 1993.

#### 2.6.3.2. Curvas isofónicas de audición

Estas curvas, calculan la relación que existe entre frecuencia e intensidad (en [dB]), de dos tonos puros, para que estos sean percibidos igual de fuertes por el oído humano. (Hernández, Fernández, Cueto, Lubián, & Alonso, 2012, p. 2).

Alrededor del año 1933, aparecen las primeras curvas isofónicas proporcionadas por los científicos Fletcher y Munson; los cuales, pusieron a varios participantes a comparar la intensidad constante de una frecuencia fija, con la intensidad variable del resto de frecuencias audibles. Para poder graficar las curvas, se iba aumentando de 10 [dB] en 10 [dB] la intensidad del tono constante, en este caso 1 [kHz], desde 0 [dB] hasta 120 [dB]. De este modo, se obtuvieron 13 curvas que ponían al mismo nivel de sonoridad las frecuencias dependiendo de la intensidad de la frecuencia referencial. Estas mismas, se pueden apreciar en la siguiente figura:

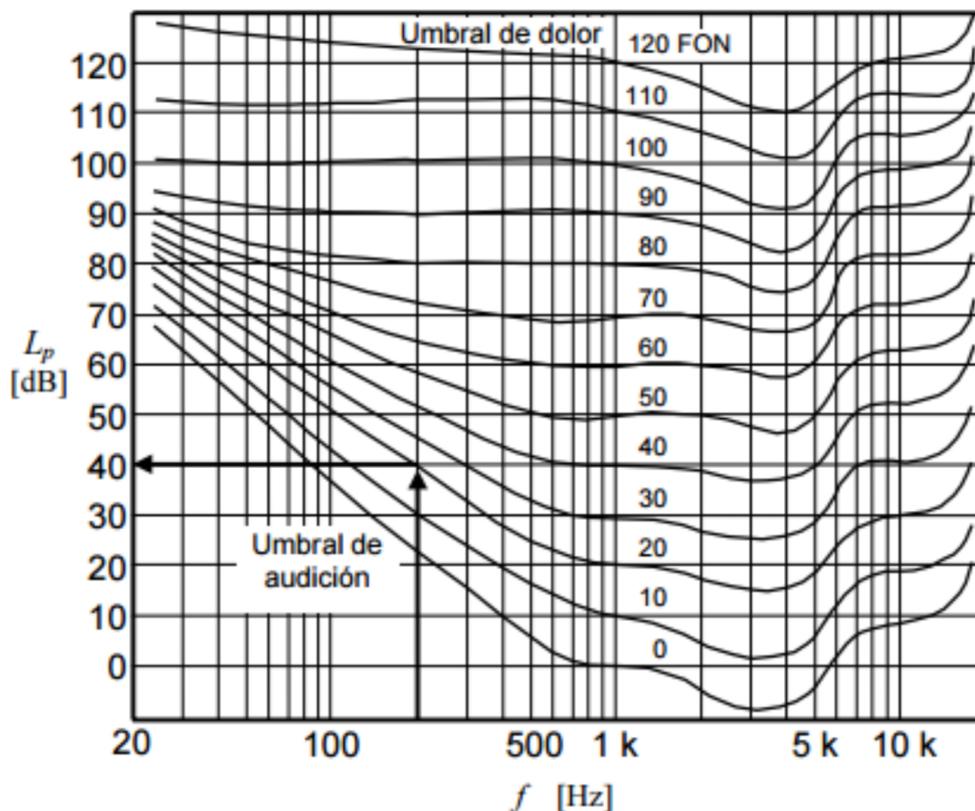


Figura 12. Curvas de Fletcher y Munson, año 1933.

Tomado de (Miyara., 2007, p. 21)

Más adelante, en investigaciones como las de Jurado, Gallegos, Gordillo y Moore en 2017, se han extendido las curvas hasta niveles por debajo de 20 [Hz], obteniendo las curvas siguientes:

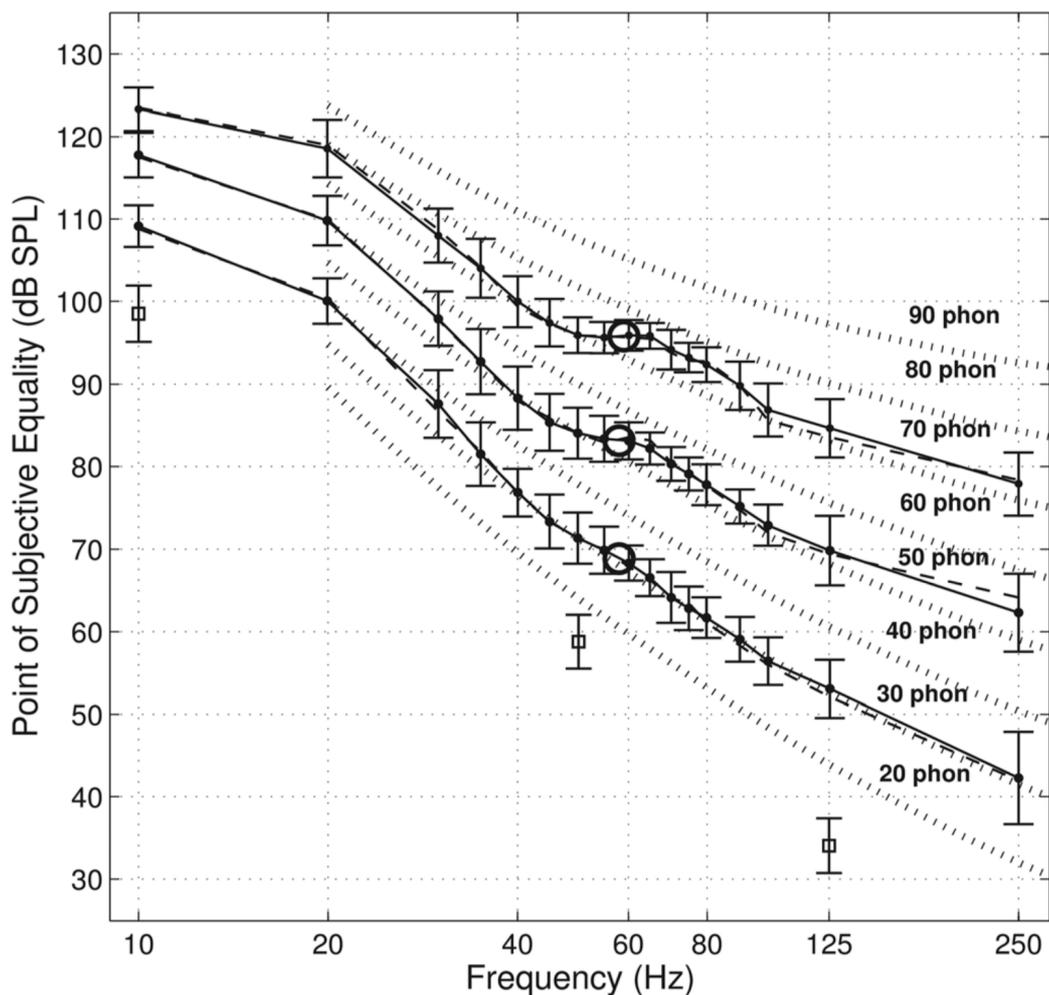


Figura 13. Curvas de igual sonoridad para frecuencias menores a 20 Hz.

Tomado de (Jurado et al., 2017, p. 3828)

### 2.6.3.3. ISO226-2003

Años después de los estudios de Fletcher y Munson, se implementó la primera normativa internacional que definió un acuerdo acerca de los umbrales de audición humana; esta fue la ISO R224:1961. Los datos que aquí se encuentran,

se basaron en los estudios hechos por Robinson y Dadson en 1956, mostrando los umbrales de audición y las curvas de igual sonoridad; pero, aun sin llegar a niveles inferiores a 20 [Hz]. Posteriormente se realizaron revisiones y se fueron modificando las normas, pasando por la a ISO 226:1987 e ISO 389-7:1996 para terminar en la ISO 226:2003.

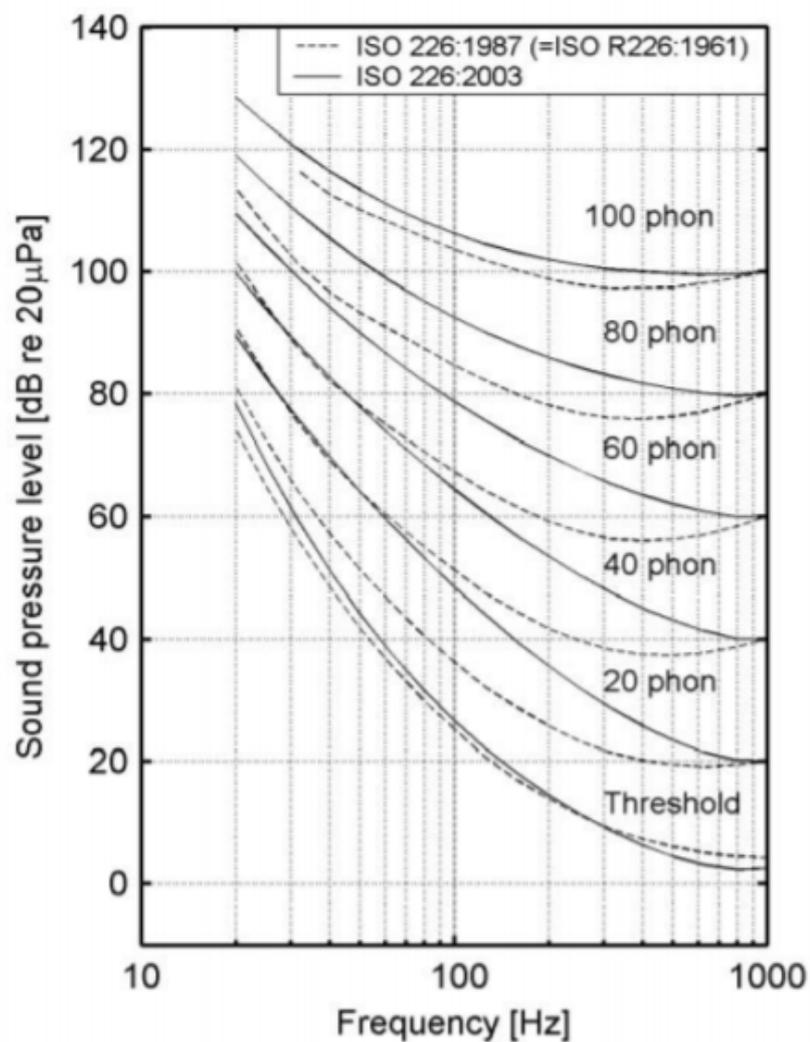


Figura 14. ISO 226:1987 vs. ISO 226:2003.

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

#### 2.6.3.4 Niveles audibles de infrasonidos

Debido a que el sistema auditivo humano, tiene una pobre respuesta a las bajas frecuencias, se ha comprobado que algo similar ocurra en infrasonidos. De hecho, hay estudios que datan del año 1958 sobre las mediciones de umbral en tonos y sonidos por debajo de los 10 [Hz] (Moller y Pedersen, 2004; Watanabe y Moller, 1990); y son estos mismo, los cuales han implantado algunas metodologías de cómo hacerlo.

Primero, se debe entender que la percepción auditiva humana, fuera del rango audible es todavía más susceptible a factores externos. Por ende, para poder tener una acertada medición de umbral, se deben considerar factores como las condiciones de medición, si se las realizó de manera monoaural o binaural, de igual manera el tipo de fuente sonora utilizada e incluso el cómo arriba el estímulo al oyente (Scharine, Cave y Letowski, 2009, p. 393).

De esta manera, dentro de las distintas formas de obtención de umbrales de audición, para el presente trabajo existen dos principales de interés. El primer método, denominado MAF (Umbral del mínimo Campo Audible), utiliza el campo libre como medio de propagación para que las ondas sonoras lleguen desde el punto de un emisor (como un altavoz), hasta el punto de un receptor (el oído humano), separados una distancia  $x$ . Por otro lado, el segundo método, denominado MAP (Umbral de la Mínima Presión Audible), utiliza audífonos o dispositivos intraurales para ocluir el conducto auditivo y enviar por el canal las señales directo al tímpano.

Estos estudios, se han sometido a diversas condiciones, siendo estas la disponibilidad de ocupar audífonos monoaurales o binaurales, usar campo libre o cámara de presión; lo interesante, es que con cada uno de estos cambios los resultados fueron distintos. Por ejemplo, el método con audífono binaural es más sensible que el de monoaural, ya que este último se encuentra 3 [dB] por encima.

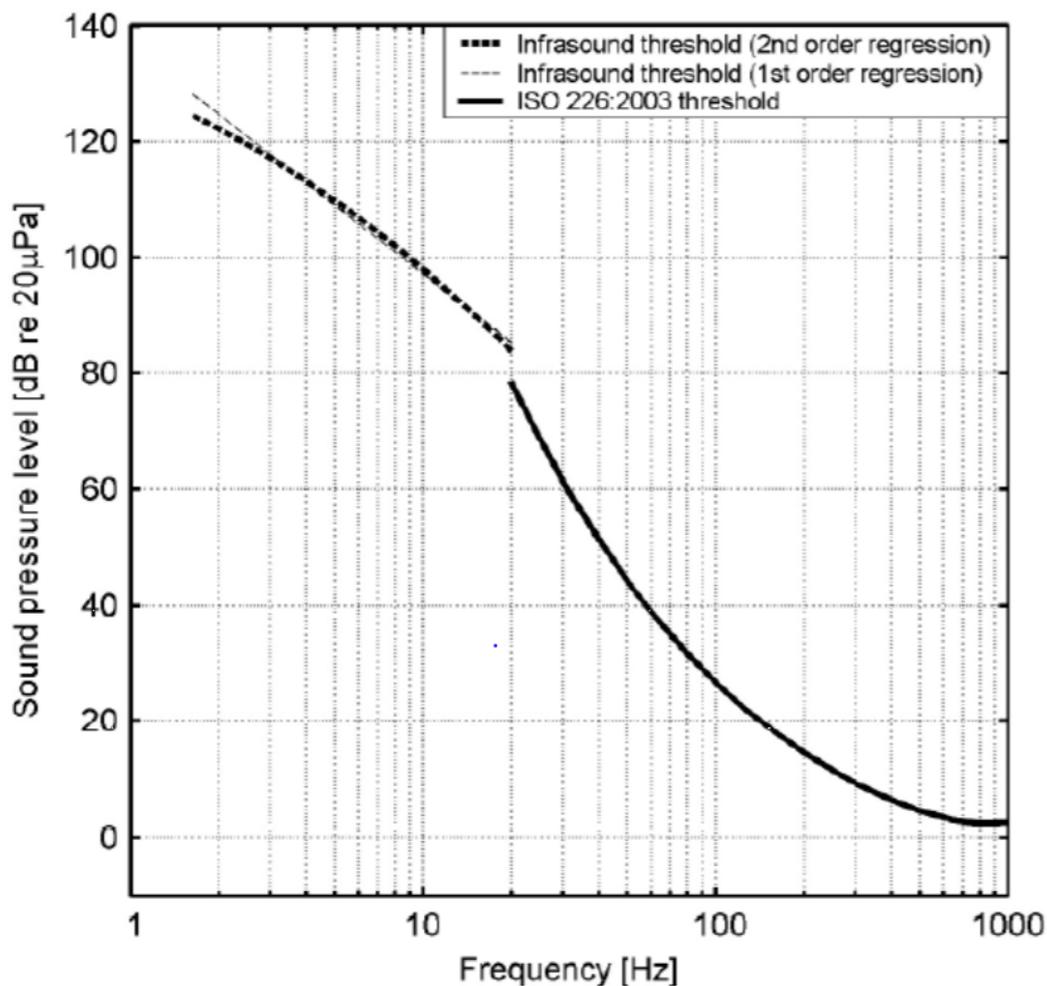


Figura 15. Umbrales de audición propuestos para frecuencias bajo 20 [Hz] y umbral de audición estándar de la ISO 226:2003 sobre 20 [Hz]

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

Como se aprecia en la *Figura 15*, se puede ver claramente cómo el ser humano necesita niveles altos para poder percibir los infrasonidos. Este comportamiento, podría explicarse debido a que todo el sistema integrado que conforma el aparato auditivo, incluyendo oído externo, medio e interno; tiene una pobre transmisión de energía para este rango frecuencial.

### 3. METODOLOGÍA

Para la ejecución de todas las mediciones llevadas a cabo en el presente trabajo se utilizó una cadena electroacústica dispuesta de la siguiente manera: Se

conectó el computador HP ProDesk del Laboratorio de Acústica con la interface FireFace 802 a través de un cable USB, al mismo tiempo se conectó el PowerMate por USB al computador. El driver en cuestión se conectó a las salida de audífonos 9/10 de la interface. Por otro lado, el canal de grabación del Etymotic ER-10C Rec 2 se conectó a la salida de audio 7 de la interface y el canal de micrófono 1 (Etymotic ER-10C) a la entrada de micrófono 1. El micrófono G.R.A.S. usado para la calibración fue asignado a la entrada de micrófono 11 (alimentado con phantom power) y finalmente, el dispositivo de reproducción a utilizar se conectó a la salida estéreo 9/10.

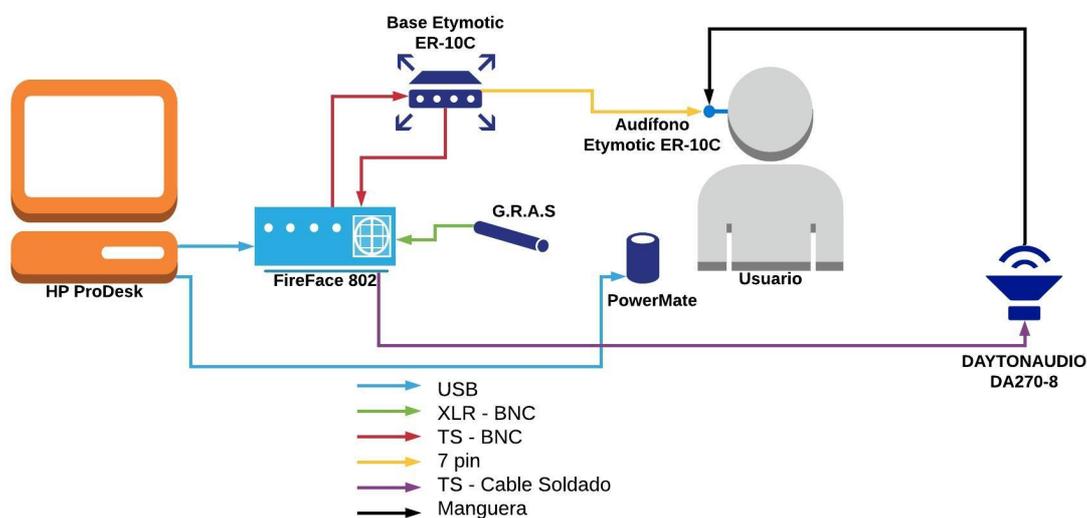


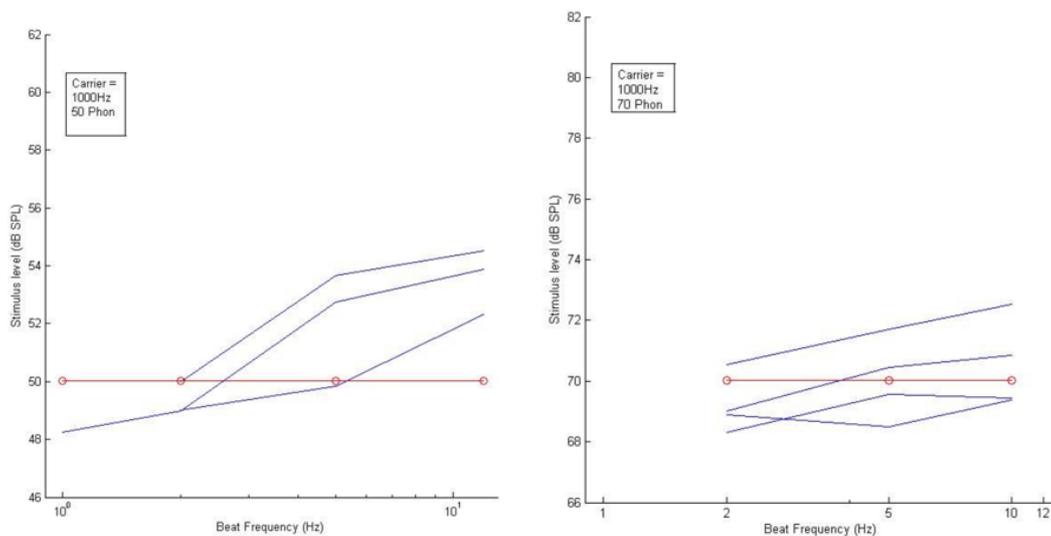
Figura 16. Diagrama de conexión del sistema empleado para las mediciones a los participantes.

### 3.1. Prueba de *beating*

Las pruebas se llevaron a cabo en el laboratorio de acústica de la Universidad De Las Américas, dentro de una cámara semianecoica para tratar de suprimir la máxima cantidad de ruido externo a la que está expuesto el participante. El experimento se realizó de lunes a viernes, en 3 horarios (uno por participante) repartidos de 08:00 am a 17:00 pm, procurando tener las sesiones de entrenamiento en el horario de 14:00 pm a 17:00 pm, de forma que se evite tener

mediciones de datos definitivos en la tarde debido al nivel de fatiga en los participantes. Para más detalle sobre el itinerario de medición puede revisarse el anexo 1.

En cuanto a los parámetros del experimento, las frecuencias carrier para la toma principal de datos fueron: 40, 63, 80 (frecuencias nominales en el rango de baja frecuencia) y 1000 [Hz] (frecuencia referencial para comparar en el rango de frecuencias altas) ; las frecuencias beat para cada carrier fueron: 1, 2, 5 y 12 [Hz]; y el nivel de emisión fue de 50 fonos, que como se puede ver en la *Figura 17* presenta un mayor rango dinámico en comparación con el nivel de 70 fonos medido en pruebas preliminares. Cabe recalcar, que se consideró la frecuencia 1 [Hz] como beat, ya que fuentes de infrasonido como turbinas de viento, generan niveles altos en frecuencias menores a 1 [Hz], mientras que las frecuencias de 2, 5 y 12 [Hz] provienen de pruebas preliminares.



*Figura 17.* Datos preliminares del carrier de 1000 Hz a 50 y 70 fonos.

En esta prueba, el usuario escucha la señal y debe mover el control rotatorio para ajustarla a su punto de máxima modulación. En el punto máximo de la derecha la modulación presenta un nivel alto pero sin claridad (contaminada con ruido) que no excede un nivel seguro de 90 fonos, mientras que en el punto máximo de la izquierda el nivel disminuye hasta que la señal modulada es

imperceptible y se escucha la frecuencia de carrier casi como un tono puro, de esta forma, se espera que el participante registre su respuesta (pulsando el botón rotatorio) en un punto medio del rango disponible (o donde considere que escucha la modulación máxima).

Para generar las modulaciones de 1, 2, 5 y 12 [Hz] se utilizó el método de ajuste de nivel, en donde existe una frecuencia máxima (TU) y una mínima (TL) cuya diferencia es la frecuencia de modulación y el punto medio del rango es la frecuencia de carrier, de esta forma, se espera que al ajustar TL (de acuerdo a la función de transferencia del oído) el participante tienda a subir el nivel del estímulo, mientras que al ajustar TU, tienda a bajar. A partir de esto, y según las etapas de la prueba descritas en el anexo 1 en la primera medición de fluctuación se deja fija a la frecuencia máxima y se ajusta el nivel de la frecuencia mínima y en la segunda se deja fija la frecuencia mínima y se ajusta la máxima, o viceversa (ya que se fija de manera aleatoria si se empieza por la mínima o la máxima). Por último, se recogen las diferencias de TU y de TL en cada frecuencia de beat para su respectivo carrier y se restan (TL-TU) de forma que se puedan obtener los deltas de cada participante para finalmente sacar la media de los mismos y obtener un delta promedio por frecuencia de beat para cada carrier.

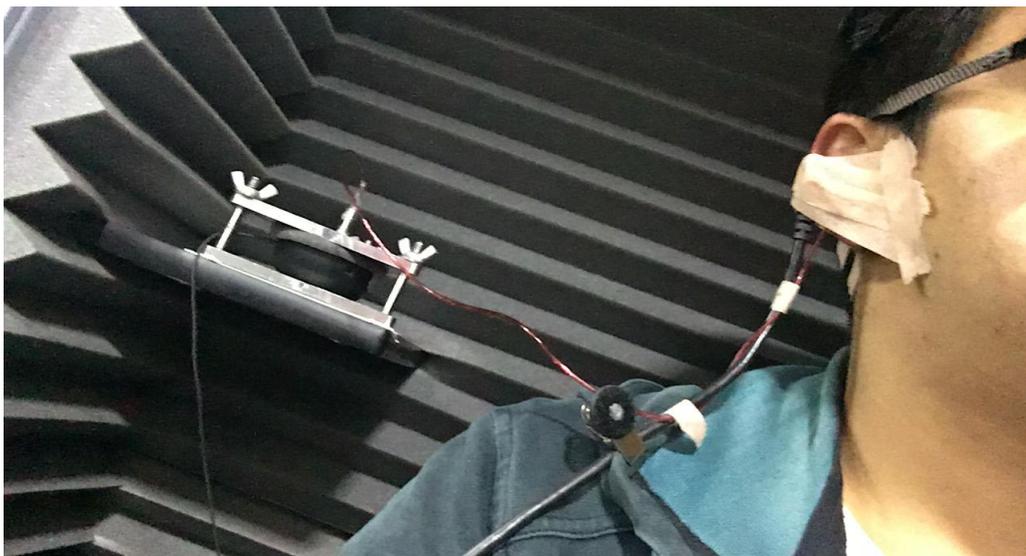


Figura 18. Pruebas de *beating* con audífono adaptado Beyerdynamic.

### 3.2. Prueba de *loudness*

En esta parte de la prueba se envía la frecuencia de carrier (tono constante) a un determinado nivel fijo durante pocos segundos, luego se produce una pausa corta y seguido de esta se emite la señal modulada (respectivamente para 1, 2, 5 y 12 [Hz]) a un nivel diferente, ya sea este bajo o alto con respecto al nivel del tono constante (RMS a 50 [fonos]). Utilizando el control rotatorio el participante debe ajustar el nivel del tono fluctuante hasta que lo perciba al mismo nivel del tono constante y su respuesta tiene que registrarse mientras el tono fluctuante se reproduce para que pueda ser reconocida por el software. Finalmente, a través de Matlab se recoge la media de todas las respuestas por cada frecuencia de beat y para cada carrier y se las resta para el nivel referencial RMS en 50 fonos de la frecuencia de carrier, para finalmente tener una media general de las diferencias de nivel requeridas para igual sonoridad de todos los participantes.

Aquí, en un principio se había definido que el tono constante sea el que varíe en intensidad, para que el participante lo ajuste según su percepción hasta que produzca una misma sensación de sonoridad en el oído. Pero, esta propuesta también estuvo alejada de lo que se quería estudiar; si se lo analiza bien, la referencia (tono constante), tiene un nivel PEAK y RMS ya definidos y comprobados incluso sensorialmente.



*Figura 19.* PowerMate USB, dispositivo por el cual se respondió a los estímulos del método de ajuste de la prueba.

En la investigación se planteó caracterizar la percepción de intensidad del ruido fluctuante de baja frecuencia y es por esta misma razón que se invirtieron los papeles la final. Por ende, se dejó al tono puro con un nivel siempre constante, y al ruido fluctuante de baja frecuencia, se lo dejó para ser ajustado en intensidad por los participantes.

### 3.2.1. Exclusión de sujetos

Una vez realizadas las mediciones, se procedió a analizar y validar los datos, ya que convenía evaluar la influencia de los resultados individuales sobre el resultado global, además de reducir el rango de error sobre los datos a considerarse. De esta manera, se aplicaron dos métodos de exclusión sobre las desviaciones estándar de las diferencias entre TU y TL de los participantes, teniendo en total cinco criterios de exclusión sobre los datos.

El primer método de exclusión se basó en el concepto de rango intercuartil (RI), que consiste en una estimación estadística de la dispersión de un conjunto de datos y es una medida útil para eliminar valores alejados de la distribución normal. Se utilizó MATLAB para generar un diagrama de caja de los datos utilizando el RI, de manera que al obtener la gráfica se pueda conocer los valores del límite superior adyacente (LSA) y el límite inferior adyacente (LIA). Estos valores de LSA y LIA se fijaron como el rango de los datos aceptados, de manera que un valor superior al LSA sería descartado, y un valor inferior al LIA, también sería descartado. Tres criterios de exclusión se implementaron utilizando el método descrito anteriormente, teniendo así:

- Criterio de exclusión 1

Para este criterio se consideraron todas las desviaciones individuales de cada participante en cada medición de *beating*.

- Criterio de exclusión 2

Este criterio se basó en el primer criterio de exclusión con la diferencia de que en vez de tomar cada desviación individual se consideró el promedio de todas las desviaciones de cada participante.

- Criterio de exclusión 3

Por último, ya que los dos criterios anteriores están basados en las desviaciones de la prueba de *beating*, se aplicó un criterio basado en las medias de los valores de *loudness* obtenidos, de manera que la exclusión de participantes no se rija únicamente a una de las dos partes de la prueba, sino que también incluya esta segunda parte y se pueda analizar de manera global los datos excluidos del experimento. Para esto se sacó la media de valores de cada participante para cada carrier y se los restó de los valores de la media general para cada carrier, de manera que se excluyan los valores más alejados con respecto a la media. Una vez obtenidos los valores de la resta en cada carrier para cada participante, se hizo un promedio de ellos.

Por otro lado, el segundo método de exclusión se basó en fijar una tolerancia (en [dB]) y al igual que en el criterio 2 aplicarlo a las medias de las desviaciones de cada sujeto. El método busca excluir a las personas que presenten diferencias de TU vs TL mayores a la tolerancia fijada. Con esto se generaron dos criterios (criterio 4 y criterio 5), en el primero la tolerancia fue de 3 [dB] (muy restrictivo), que fue fijada de acuerdo con la consistencia de los participantes medidos en pruebas preliminares, y en el segundo se escogió una tolerancia de 6 [dB] para evaluar una condición menos restrictiva.

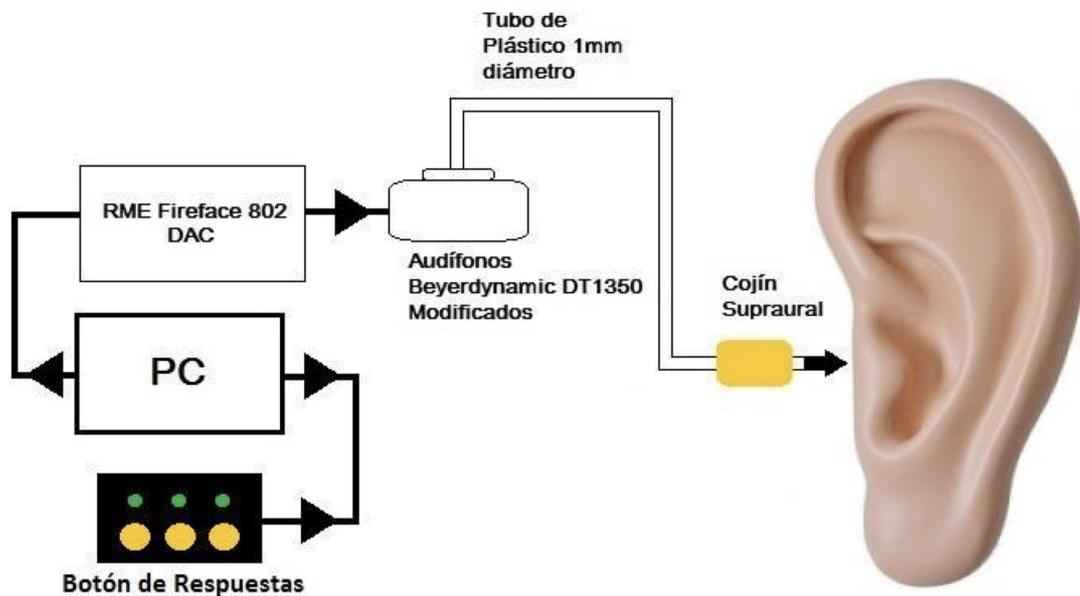
### 3.3. Prueba de umbral



*Figura 20.* Equipamiento necesario para la prueba de umbral.

El participante era sometido a una prueba de umbral para determinar si su audición es óptima para el experimento basado en bajas frecuencias. Para la

prueba se utilizó el software de medición de umbral disponible, y el dispositivo de botón de respuestas.



*Figura 21.* Cadena acústica para la medición de umbrales de baja frecuencia e infrasonidos.

Esta medición se realiza de modo monoaural en torno a un tono de 50 [Hz] a través de tres opciones aplicando el método psicofísico adaptativo 3 down - 1 up. La señal que se emite dura 1.2 segundos y los leds se encienden en pausas de 400 ms.

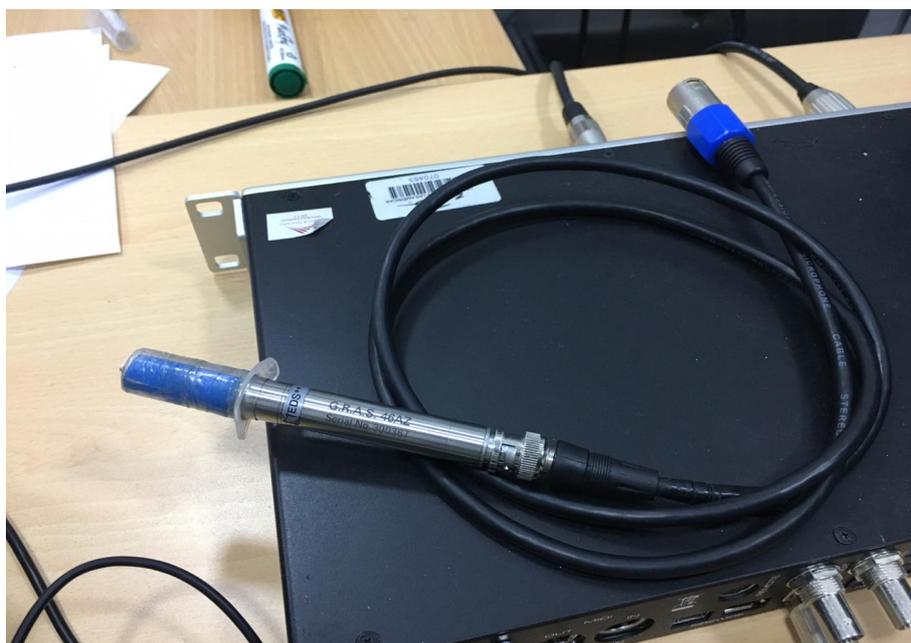
De esta manera, los tres leds se encienden al mismo tiempo y lo primero que tiene que hacer el participante es apretar cualquiera de los tres botones para iniciar con la prueba. Luego de esto, los leds sobre cada botón se encienden uno a uno y únicamente en uno de los leds encendidos se escuchará el tono. Finalmente, los tres leds se encenderán nuevamente al mismo tiempo a la espera de la respuesta del participante, y el participante deberá apretar uno de los tres botones en donde considere que escuchó el tono. Si la respuesta del participante es correcta el led sobre el botón seleccionado se encenderá, caso contrario se encenderá el led sobre el botón que contenía la respuesta. Este

proceso se repite con la variación (aumentos y decrementos) del nivel del tono hasta que se completen 8 cambios de estado (turnpoints).

Normalmente la prueba de umbral se repite dos veces, promediando de esta manera los 8 cambios de estado de cada medición para obtener el valor de umbral absoluto. En el caso de alguna anomalía durante la medición, ya sea por motivos externos o por causas relacionadas al participante, se realiza una tercera medición la cual también se promedia a las dos anteriores.

### 3.4. Calibración del sistema

Este proceso se realizaba una vez por semana y se hacía uso del software de calibración disponible en MATLAB, además del calibrador CESVA CB006 y el micrófono de medición G.R.A.S. 46AZ.



*Figura 22.* Adaptación de jeringa al micrófono de medición G.R.A.S., junto con el cable de conexión XLR - BNC que lo comunica con la interfaz FireFace.

Se empezaba entonces conectando el micrófono G.R.A.S. a la interfaz por medio de la patchera de la cámara semianecoica, y dentro de la cámara se coloca el

micrófono con el calibrador CESVA. Después, se inicia el software de calibración y el programa procede a grabar la respuesta del micrófono en 1 [kHz] a 94 [dB]. Una vez comprobado que al programa esté entrando fielmente esto, se retira el calibrador y se coloca el micrófono Etymotic con su cojín supra aural y conducto de reproducción (señal proveniente de los audífonos Beyerdynamic) a través de una adaptación de jeringa y se mide la respuesta del Etymotic a 1 [kHz], con un tono de 20 [Hz] y con un ruido de calibración. Por último, se mide la respuesta del sistema Beyerdynamic con el ruido de calibración y se obtiene su curva de respuesta.



*Figura 23.* Calibración del sistema utilizando Etymotic y G.R.A.S montados a través de la adaptación de jeringa.

### 3.5. Pruebas de subwoofer para infrasonido

Para la segunda parte del proyecto, se utilizaron los mismos equipos de las pruebas de *beating* y *loudness* con la excepción de que a manera de fuente se

cambiaron los audífonos Beyerdynamic DT 1350 por un subwoofer modificado. En cuanto al ruteo en la interfaz, al ser el audífono utilizado el correspondiente al canal R, cuando se usaba el sistema Beyerdynamic, se ruteaba la salida al canal 10 desde MATLAB y se paneaba la salida a R desde el software de la interfaz, en cambio, cuando se utilizaba el subwoofer, se ruteaba al canal 9 y se paneaba a L.



*Figura 24.* Conexiones de entrada y salida de la Interfaz FireFace. La de la izquierda es la entrada del micrófono G.R.A.S, y la de la derecha es la salida para el altavoz.

### 3.5.1. Adaptación de subwoofer

Para optimizar la fuente de bajas frecuencias e infrasonido, se adaptó el subwoofer de tal forma que pueda emitir estímulos de forma controlada en el oído. Para conectar el sistema acústicamente al oído y probar que esté

herméticamente sellado, sin fugas de aire, que causarían una caída de la presión acústica, se planteó utilizar un conducto de tubos de diámetro pequeño.



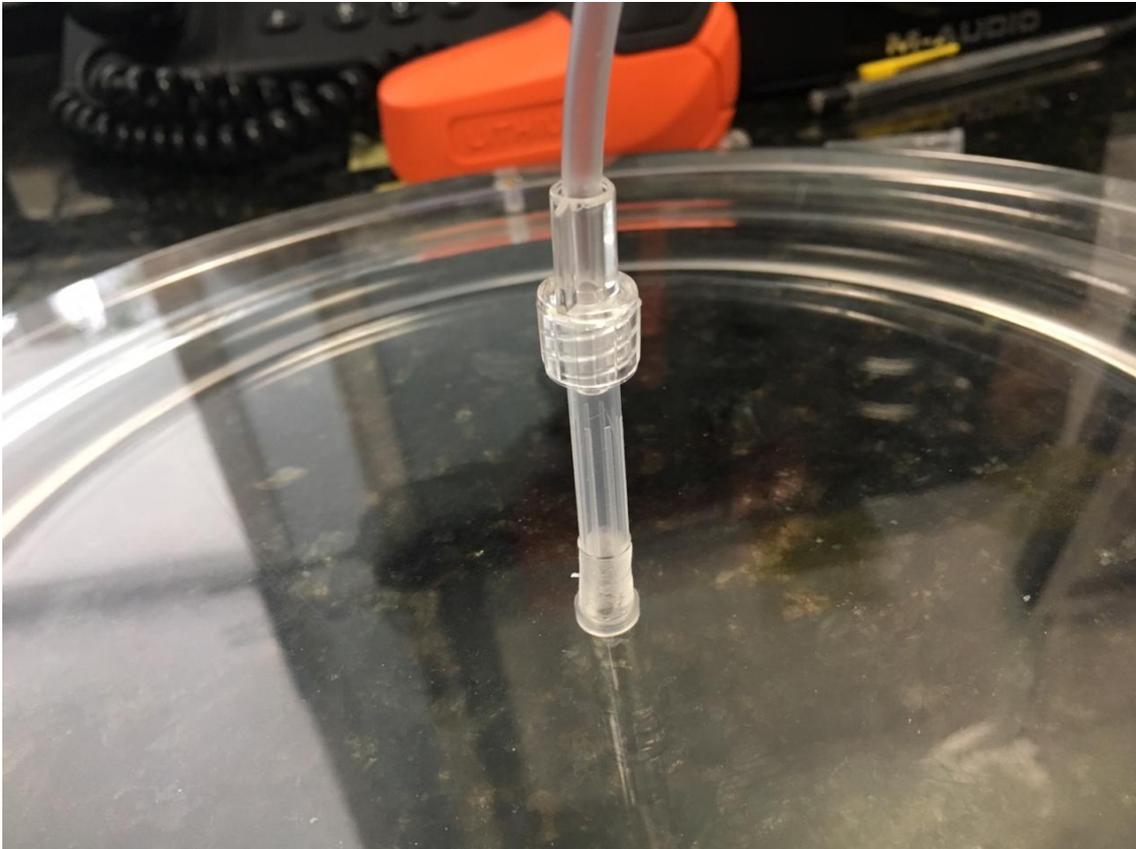
*Figura 25.* Adaptación hermética de subwoofer, se encuentra con un caucho en el anillo superior del cono, sobre el cual se asienta una tapa de acrílico con un espacio circular que permite la vibración del diafragma, y un orificio en el centro que es por donde saldrán los tonos. Se aplicó la ecuación de condensación para aplicar y ejecutar este concepto.

Los materiales utilizados para la adaptación fueron:

- Tapa plástica de jeringa
- Sonda de alimentos (diámetro fino, un extremo posee una tapa plástica)
- Sonda con llave de tres vías (diámetro grueso, un extremo posee llave de tres vías y otro una boca atornillable)

Primero se realizó un orificio en la tapa plástica de la jeringa y se la introdujo en la abertura de la cubierta del subwoofer. Luego de esto, se juntó la boca atornillable de la sonda gruesa con el orificio de la tapa plástica. Después, se cortó el extremo con la llave de tres vías de la sonda gruesa y se acopló la manguera (sistema de sondas) a la tapa plástica de la sonda de alimentos. Por

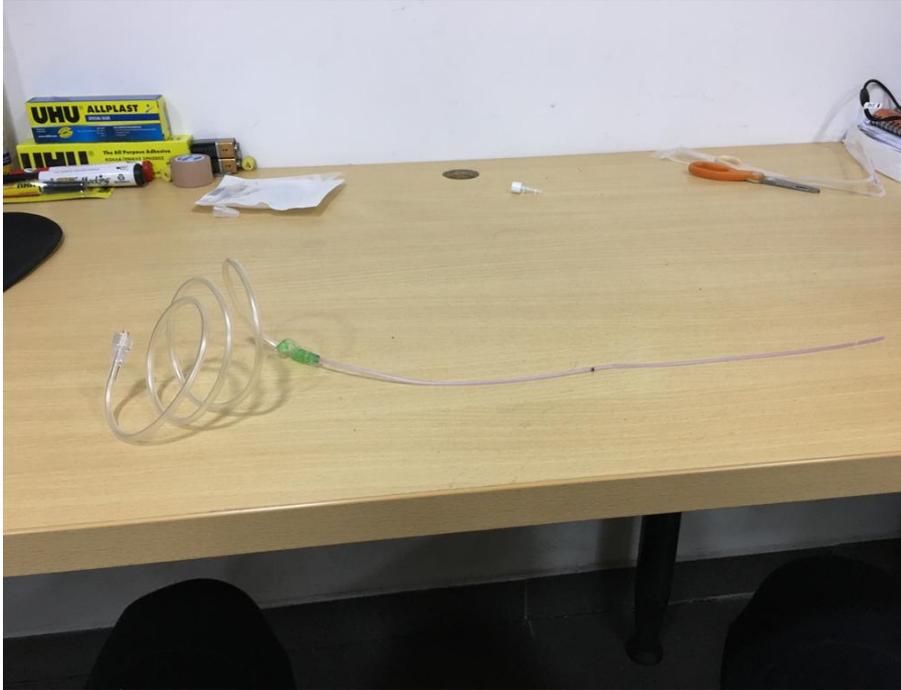
último, se realizó un corte en la punta de la sonda de alimentos y se la acopló a la esponja del sistema Etymotic.



*Figura 26.* Adaptación de tapa de jeringa en el orificio de la tapa de acrílico. A esta implementación más adelante se le sumaron distintas sondas.

En resumen, la adaptación presenta 4 uniones:

- Cubierta del subwoofer con tapa de jeringa
- Tapa de jeringa con sonda gruesa
- Sonda gruesa con sonda fina
- Sonda fina con esponja de sistema Etymotic



*Figura 27.* Sistema de sondas montado, una sonda pequeña unida a una sonda más ancha, aunque igual pequeña, que encaja perfectamente con las tapas de jeringa insertada en el orificio del acrílico.



*Figura 28.* Sistema de sondas montado, una sonda pequeña unida a una sonda más ancha esta vez más larga, que encaja perfectamente con las tapas de jeringa insertada en el orificio del acrílico.

Ya con el sistema del subwoofer comprobado y funcionando a punto, se procedió a realizar las pruebas necesarias para determinar si este, presentaba ventajas significativas con respecto al audífono Beyerdynamic tanto en la respuesta en frecuencia como en la distorsión armónica.

### 3.5.2. Respuesta en frecuencia

Para conocer la respuesta en frecuencia del nuevo sistema, primero se procedió a medir en tercios de octava el nivel de presión sonora desde 10 [Hz] con el sonómetro 01 [dB] DUO. Esto, se lo realizó simulando el volumen de la cavidad del oído humano (1 cc) mediante la jeringa modificada, la cual tenía en el un extremo el micrófono del sonómetro y en el otro, la sonda del driver adaptado insertada en una de las puntas de espuma del micrófono Etymotic. Con estas adaptaciones, ambos extremos del sistema se lograron sellar considerablemente.



*Figura 29.* Medición y comprobación de la respuesta en frecuencia del nuevo sistema de subwoofer, con la utilización del sonómetro 01 dB DUO.

Luego, mediante el uso de un programa de reproducción de tonos diseñado previamente en MATLAB, se fue midiendo con el sonómetro, una por una las frecuencias por tercios de octava desde 10 hasta 200 [Hz]. Adicionalmente, se creó dos vectores en el software donde, en el eje “x” estarían contenidas todas las frecuencias utilizadas y, en el eje “y” los niveles medidos. Finalmente, se realizó una gráfica con la función “plot” la cual estaría suavizada con la herramienta “spline”; el resultado obtenido fue la curva de respuesta en frecuencia del sistema medido con el sonómetro.

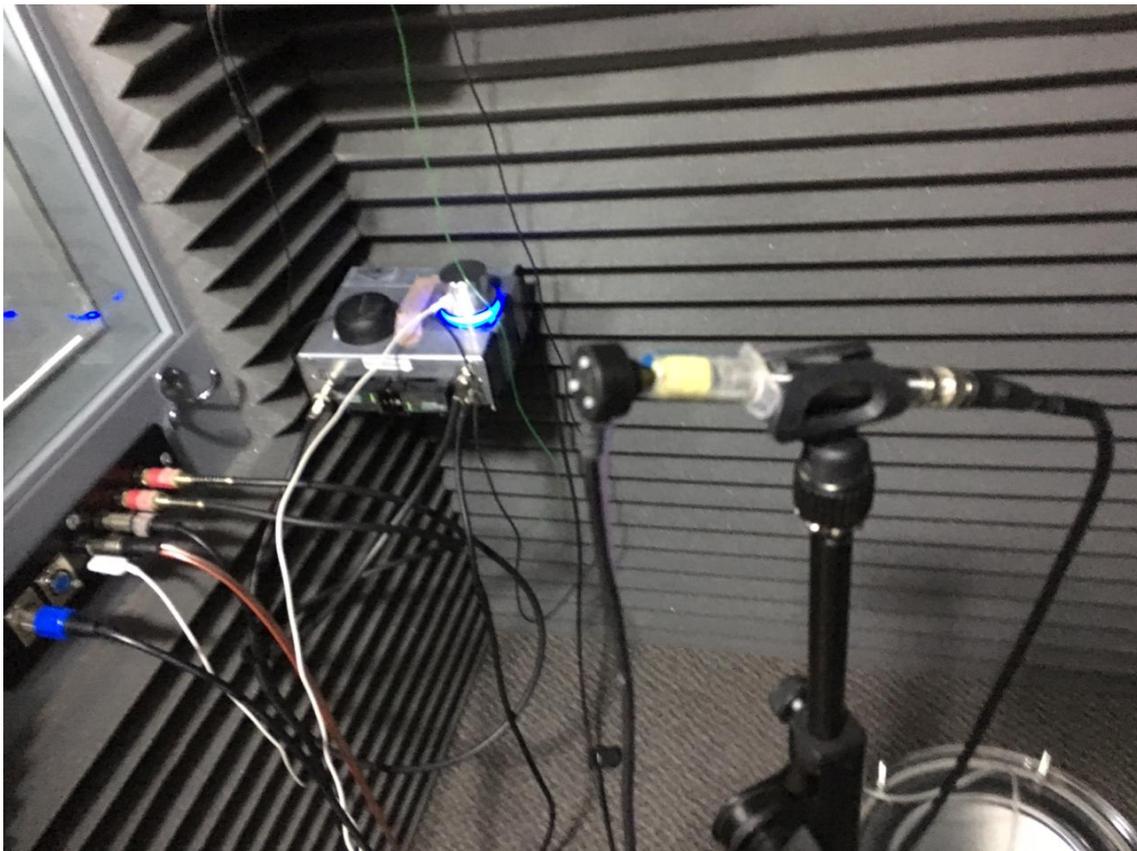
Con la primera curva obtenida, el siguiente paso fue comprobar la veracidad de la misma, usando esta vez el programa de calibración anteriormente diseñado. Entonces, se empezó por medir la respuesta del Micrófono G.R.A.S junto con el calibrador CESVA en 1 [kHz] a 94 [dB]. Seguido, se desacopló el sonómetro de la jeringa y se colocó el micrófono G.R.A.S a la adaptación. Con el programa de calibración, se obtuvo la respuesta en frecuencia del subwoofer, pero esta vez obtenida por el programa en MATLAB.

Para finalizar esta etapa, lo que se hizo fue llamar a todos los datos en un programa distinto, y ordenarlos de tal manera que se correspondan las frecuencias con cada uno de los niveles obtenidos con cada método. Se planteó entonces, que, si el nuevo sistema estuvo correctamente implementado, entonces ambas curvas resultantes tendrían que parecerse.

### 3.5.3. Distorsión armónica

El proceso más importante, tuvo que ver con la medición de la distorsión armónica producida por el nuevo sistema; y su comparación con el anterior. Cabe recalcar, que se tuvo dos opciones de sonda a implementar, por ende, se tuvo que realizar el proceso 3 veces, y evaluar la mejor opción. Mediante MATLAB, se utilizaron códigos de programación para realizar un programa de emisión y grabación de ruido blanco y tonos puros, definiendo un nivel en [dB] de entrada; de igual manera para el análisis de dichos resultados. Para esta medición, se

utilizó la interfaz FireFace 802 con la cual se reprodujo tonos de 5, 10, 15 y 20 [Hz] mediante el subwoofer adaptado, utilizando 3 niveles, uno alto (basado en las mediciones de respuesta en frecuencia con el sonómetro, que corresponde al nivel más alto reproducible en común por los 3 sistemas en full scale), uno bajo (basado en el nivel de umbral para 5 [Hz]) y uno medio. Para la grabación de los mismos, se utilizó el micrófono G.R.A.S.



*Figura 30.* Medición de la distorsión armónica del nuevo sistema, con manguera larga y corta, mediante el uso del micrófono G.R.A.S.

Antes de proceder con la medición de cada sistema, se tuvo que probar cada uno, con la frecuencia más baja (la de 5 [Hz]) a analizar. El objetivo de esto fue determinar qué implementación reproducía el tono más difícil a un nivel más bajo. Esto, ayudó a obtener un nivel máximo de reproducción estándar para los 3 diferentes sistemas (Beyerdynamic, manguera corta y manguera larga). Al igual que en investigaciones anteriores, el nivel de ganancia de salida de la interfaz

fue modificado en un 15% para evitar saturaciones del nivel de la señal de entrada que se grabó con el G.R.A.S.

De esta manera, las mediciones de distorsión armónica se realizaron en una cavidad de 1 cc, porque se descubrió que esta dimensión reducía las diferencias de nivel de reajuste de acoplamiento (descubrimiento que hace alusión a Bryant en 1972), a diferencia que las cavidades de 2 cc. Como primero, se midió la respuesta en frecuencia del Etymotic, grabando simultáneamente un ruido blanco durante 20 segundos, reproducido por el subwoofer en el caso de los sistemas con sonda corta y larga, y con el Beyerdynamic en el caso de la implementación antigua.

Los datos medidos, fueron procesados mediante un software diseñado para esto. Dicho programa, promediaba las señales de tiempo medidas con cada micrófono (Etymotic y G.R.A.S) partiendo de un grupo de 100 bloques, cada uno de 0.2 segundos para mejorar la relación señal ruido. Para poder transformar estos promedios en el dominio de la frecuencia, se utilizó la transformada rápida de Fourier.

Por otro lado, dividiendo el espectro de frecuencia de la salida de la sonda Etymotic por el espectro de salida del micrófono G.R.A.S, se obtuvo la respuesta en frecuencia del sistema de subwoofer insertable. Dicha respuesta, desconvolucionó de la respuesta del subwoofer y la señal de entrada eléctrica (ruido blanco). Ya para finalizar, se obtuvo la respuesta en frecuencia compleja del subwoofer, dividiendo el espectro de ruido blanco de entrada por la respuesta de frecuencia compleja de la sonda del Etymotic.

#### 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para el experimento de beat y *loudness* se contó con 31 personas de las cuales se descartaron 7 personas, una por no pasar la prueba de umbral (presentaba una lesión en el oído), cuatro por no aprobar el entrenamiento al no entender la

prueba o presentar respuestas incoherentes, y dos durante el experimento, una por presentar respuestas inconsistentes en el día 2 y la segunda por no poder detectar la modulación de 12 [Hz].

A partir de esto, se consideraron los datos de 24 participantes, de los cuales el 75% eran hombres y 25% mujeres, comprendidos en un rango de edad entre los 19 y 29 años, y con una mediana de edad de 23 años (dato cercano a la media de edad obtenida de 22,88).

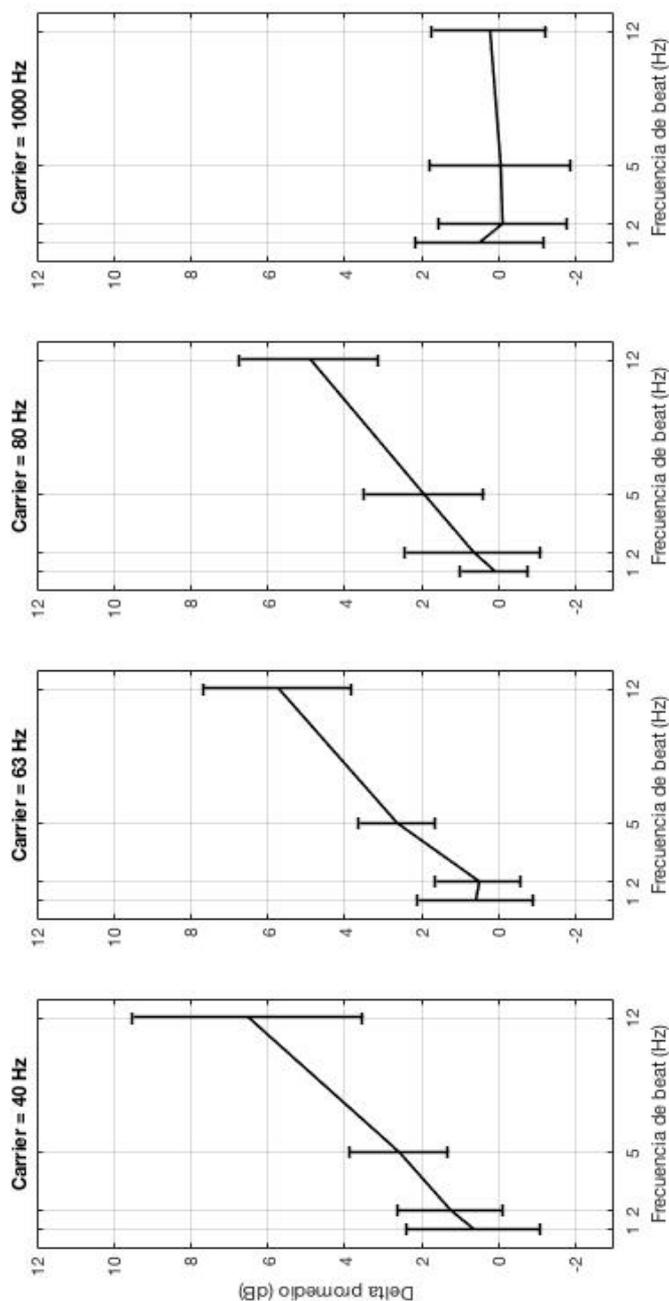
4.1. Resultados de *beating*

Figura 31. Deltas promedio de cada frecuencia de *beating* en cada carrier. Se lee entonces, que cada punto en los gráficos de cada carrier representa cuánto distaron los resultados del 0 (poca variación más certeza del resultado).

- a) Deltas del carrier de 40 Hz.
- b) Deltas del carrier de 63 Hz.
- c) Deltas del carrier de 80 Hz.
- d) Deltas del carrier de 1000 Hz.

Los resultados de *beating* muestran que a medida que la frecuencia de modulación aumenta, los deltas (diferencias entre TU vs TL) también lo hacen. Esto se replica para todas las frecuencias carrier por debajo de 100 Hz, mientras que en 1000 Hz la tendencia de los deltas resulta bastante uniforme (plana). Este comportamiento puede explicarse con la METF al analizar que para frecuencias bajas existe una atenuación producida por el oído medio, la cual va mejorando en respuesta a medida que aumenta la frecuencia, hasta llegar a una zona estable que empieza alrededor de 1000 Hz.

Debido a esta tendencia, en los carriers de 40, 63 y 80 [Hz], los participantes de la prueba al ajustar TL (TU fijo), tenían que dar más nivel al tono de baja frecuencia para que la fluctuación se perciba con mayor nitidez. En el caso opuesto, cuando se ajustaba TU (TL fijo), los participantes tenían que bajar el nivel de la frecuencia alta para percibir la fluctuación máxima. Se puede decir entonces, que TL por la forma de la METF siempre va a producir menor excitación interna y por ende, será la frecuencia más atenuada. Pero, al referirse a los deltas, se debe mencionar que las compensaciones, sean positivas o negativas, resultaron de un valor absoluto similar para cada frecuencia de *beating*.

Por tanto, para las zonas por debajo de 100 [Hz], mientras mayor sea esta frecuencia, mayor será la compensación que realizar para percibir los dos tonos a un mismo nivel (mayor sensación de fluctuación). Para poder comprobar este comportamiento, se tiene el carrier de 1000 Hz donde, debido a la tendencia plana (horizontal) de esta zona en la METF, TU y TL tienen el mismo nivel de llegada y por ende, la compensación sea cual sea la frecuencia de *beating* no es mucha.

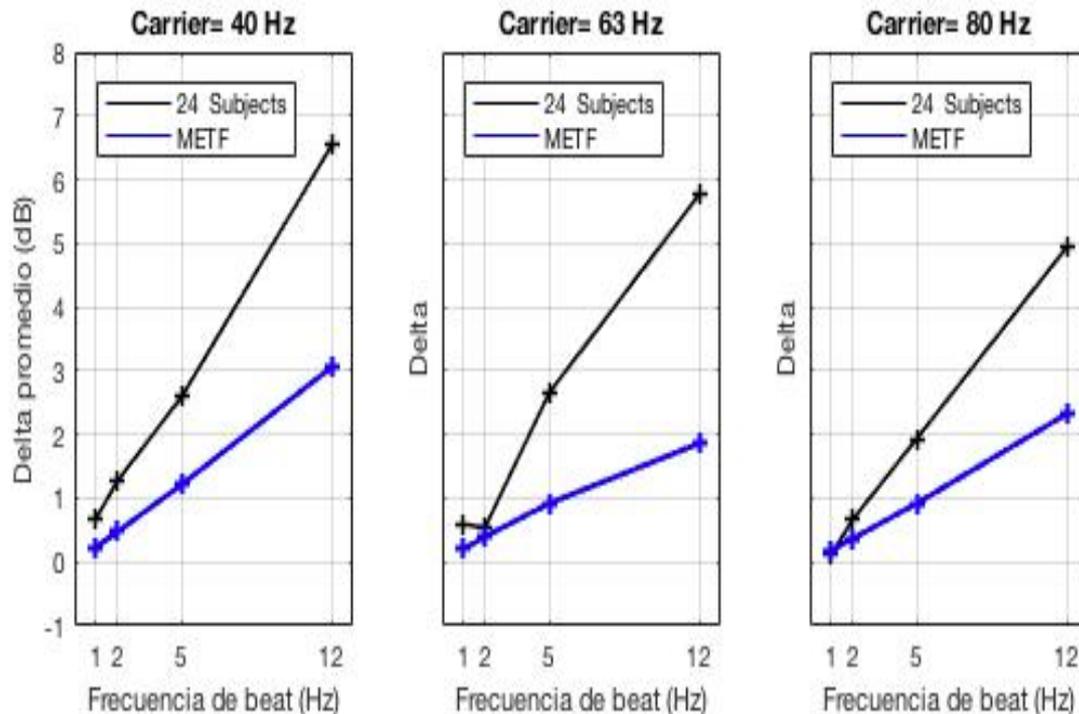


Figura 32. Comparación entre lo obtenido de las mediciones, con la predicción teórica esperada. En frecuencias fluctuantes más altas, mayor los deltas resultantes con respecto al 0.

- a) Comparación del carrier de 40 Hz en 24 sujetos con su predicción teórica.
- b) Comparación del carrier de 63 Hz en 24 sujetos con su predicción teórica.
- c) Comparación del carrier de 80 Hz en 24 sujetos con su predicción teórica.

Si se comparan los deltas promedio de las mediciones realizadas (curva negra) y los deltas basados en la función de transferencia del oído medio (curva azul) como se observa en la Figura 32, se puede realizar un análisis cuantitativo de cuánto variaron los resultados obtenidos en esta prueba con respecto a la curva de la METF. La comparación se efectuó para los carriers de 40, 63 y 80 [Hz] debido a que la información disponible de los valores de la METF en el software utilizado solo constaba hasta 250 [Hz]; el caso de 1000 [Hz] no consta entre los datos, puesto que la curva de la METF para dicha frecuencia es casi plana (las diferencias son cercanas a 0 [dB]). Esto también se corrobora en la figura 31 previamente analizada.

Con el fin de contrastar la información, se recogieron las diferencias entre las dos curvas (en los puntos de cada frecuencia de beat) en la siguiente tabla:

Tabla 1.

*Diferencias deltas prom. 24 sujetos vs deltas METF.*

Frecuencia de beat (Hz)		1	2	5	12
Frecuencia de carrier (Hz)	40 Hz	0,4434	0,7983	1,3763	3,4784
	63 Hz	0,3885	0,1427	1,7323	3,9010
	80 Hz	-0,0657	0,2948	1,0177	2,6156

Por medio de esta tabla se puede ver que la diferencia en la frecuencia de 1 [Hz] para todos los carrier analizados es menor a 0.5 [dB]. En el caso particular de 80 [Hz] la diferencia negativa muestra que el delta medido es menor al delta de la METF. Por otro lado, en la frecuencia de beat de 2 [Hz] para 40 [Hz] la diferencia aumenta a aproximadamente 0.8 [dB], a diferencia de 63 [Hz] en donde la diferencia con respecto a la frecuencia de beat anterior disminuye, acercándose más a la curva de la METF; en el caso de 80 [Hz] la diferencia aumenta, pero no sobrepasa a 0.5 [dB] quedándose en 0.3 [dB]. En el caso de la frecuencia de beat de 5 [Hz], las diferencias aumentan a valores alrededor de 1 [dB] para todos los carriers, empezando a notarse una diferencia mayor tanto gráfica como numéricamente. Por último, en el caso de 12 [Hz] las diferencias son considerables aproximándose a 3 [dB] en 40 y 80 [Hz] y llegando hasta aproximadamente 4 [dB] en 63 [Hz].

En general, los resultados obtenidos se asemejan a la METF hasta la frecuencia de beat de 5 [Hz] donde ya se empieza a notar una desviación. En contraste, para 12 [Hz] las curvas tienen ya una separación considerable, lo que se puede

deber a la dificultad de identificar la fluctuación debido a su velocidad. A esto se le suma la posible influencia de factores externos como movimientos no controlados del participante o filtraciones de sonidos dentro de la cabina. De ambas maneras, estos factores afectarían la percepción y precisión de ciertas respuestas.

#### 4.2. Resultados de *loudness*

En la figura 32 se han representado los resultados de *loudness* de los 24 participantes. En líneas grises, se encuentran los resultados individuales de cada carrier con las cuatro frecuencias de *beating*, mientras que la línea negra, en cambio, es la tendencia promedio. Para poder interpretar correctamente lo sucedido, se debe aclarar que en el “Eje y” se encuentran los valores de la diferencia de nivel (en [dB]) requerida para que la sensación de sonoridad sea igual a la del tono puro, mientras que en el “Eje x”, están las frecuencias de *beating* en [Hz]. En general, se puede observar que los datos sugieren un comportamiento similar en todos los casos.

En todos los carriers, para una frecuencia de *beating* de 1 [Hz], las personas respondieron que necesitan alrededor de 1 [dB] menos de intensidad en el tono fluctuante para percibirlo como igual. Para 2 [Hz], esta diferencia resultó de igual manera negativa, y es la más distante hacia abajo que se obtuvo por parte de los participantes; alrededor de -1.8 [dB]. En el caso de 5 [Hz] de *beating*, en todos los carriers los resultados fueron subiendo y acercándose al 0. Esto quiere decir que la sensación de sonoridad fue aumentando su similitud para tonos puros y para tonos fluctuantes. Por último, en 12 [Hz] se registraron los datos que más diferencia positiva necesitaban para poder igualarse. Se puede ver que todos los carriers el valor promedio de este *beating* está por encima del 0.

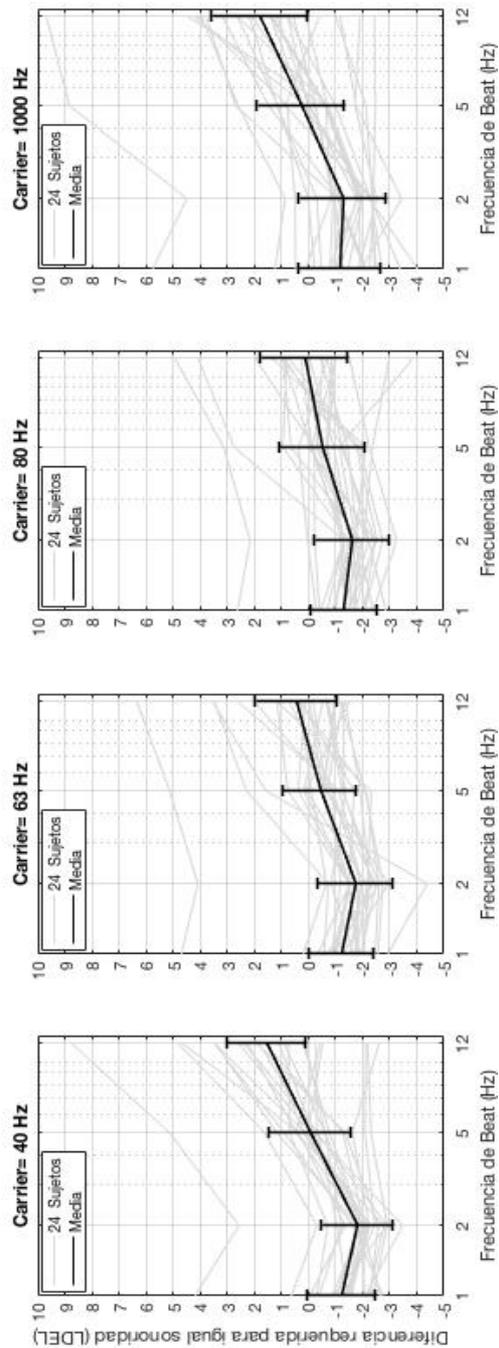


Figura 32. Resultados individuales y promedio de *loudness*. Se aprecia como los niveles de misma escucha de cada persona para los tonos fluctuantes describen, en general, una curva que cambia de pendiente.

- Diferencia media requerida para igual sonoridad en el carrier de 40 Hz.
- Diferencia media requerida para igual sonoridad en el carrier de 63 Hz.
- Diferencia media requerida para igual sonoridad en el carrier de 80 Hz.
- Diferencia media requerida para igual sonoridad en el carrier de 1000 Hz.

Resumiendo, los datos obtenidos en esta parte describen una pendiente negativa en todos los carriers hasta 5 [Hz] de fluctuación. De ahí en adelante, la pendiente se hace positiva hasta llegar a 12 [Hz]. Sin embargo, se está hablando únicamente de la tendencia observada, más no de los valores reales obtenidos. A tal respecto, la Figura 32 muestra como cada carrier tiene una tendencia independiente.

En orden de analizar estadísticamente las diferencias presentadas en los resultados de *loudness* se aplicó a través de MATLAB un análisis ANOVA de una variable, con un alfa (probabilidad de que la hipótesis nula sea cierta) del 5%, para validar si existen diferencias significativas (valor- $p < 5\%$ ) entre los resultados o no. Para esto se definió a la frecuencia de beat como la variable a analizar, teniendo en total un análisis por cada frecuencia de carrier.

ANOVA Carrier = 40 Hz					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	157.611	3	52.5369	17.62	4.04097e-09
Error	274.298	92	2.9815		
Total	431.909	95			

ANOVA Carrier = 63 Hz					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	65.331	3	21.7772	8.14	7.24509e-05
Error	246.032	92	2.6743		
Total	311.363	95			

ANOVA Carrier = 80 Hz					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	46.074	3	15.3579	7.96	8.94362e-05
Error	177.525	92	1.9296		
Total	223.599	95			

ANOVA Carrier = 1000 Hz					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	148.685	3	49.5616	11.09	2.77574e-06
Error	411.023	92	4.4676		
Total	559.708	95			

Figura 33. Resultados ANOVA para cada carrier.

- Valores de ANOVA para carrier de 40 Hz.
- Valores de ANOVA para carrier de 63 Hz.
- Valores de ANOVA para carrier de 80 Hz.
- Valores de ANOVA para carrier de 1000 Hz.

A través de estos resultados de ANOVA se puede ver que, de manera global, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las diferencias requeridas para igual sonoridad en cada frecuencia beat para cada frecuencia de carrier. Ampliando el análisis global, se aplicó una prueba de comparación múltiple (función *multcompare* en MATLAB) a cada análisis de ANOVA, de forma que se pueda comparar individualmente cada condición, es decir, cada frecuencia de beat por cada carrier, mostrando entre qué frecuencias de carrier exactamente se encuentran estas diferencias significativas.

De esta forma, la prueba de comparación múltiple muestra que para el carrier de 40 [Hz] existen diferencias significativas entre las diferencias de las frecuencias de beat de 1 y 12 [Hz], 2 y 5 [Hz], 2 y 12 [Hz], y de 5 y 12 [Hz]. Para las frecuencias de 63 y 80 [Hz] las diferencias significativas se encuentran entre 1 y 12 [Hz], 2 y 5 [Hz], y 2 y 12 [Hz]. Por último, en el caso de 1000 [Hz], las diferencias significativas se presentan entre 1 y 12 [Hz], y 2 y 12 [Hz]. Se puede ver que las diferencias estadísticamente significativas que presentan en común todos los carriers, se encuentran entre 1 y 12 [Hz], y 2 y 12 [Hz], lo cual cobra sentido al ser 1 y 2 [Hz] frecuencias de beat bastante cercanas donde las diferencias son bastante cercanas. A su vez, 1 y 2 [Hz] son frecuencias distantes con respecto a 12, frecuencia en la que el valor de las diferencias para igual sonoridad fue considerablemente mayor.

Por otro lado, los 5 criterios de exclusión utilizados arrojaron los siguientes resultados:

- Criterio de exclusión 1

De acuerdo con el diagrama de caja obtenido, el LSA y el LIA se fijaron valores de diferencias de TU vs TL de 8.7 y -7.9, obteniendo con esto un total de 11 participantes excluidos. Debido al resultado y características de este criterio, se le consideró como un criterio muy restrictivo.

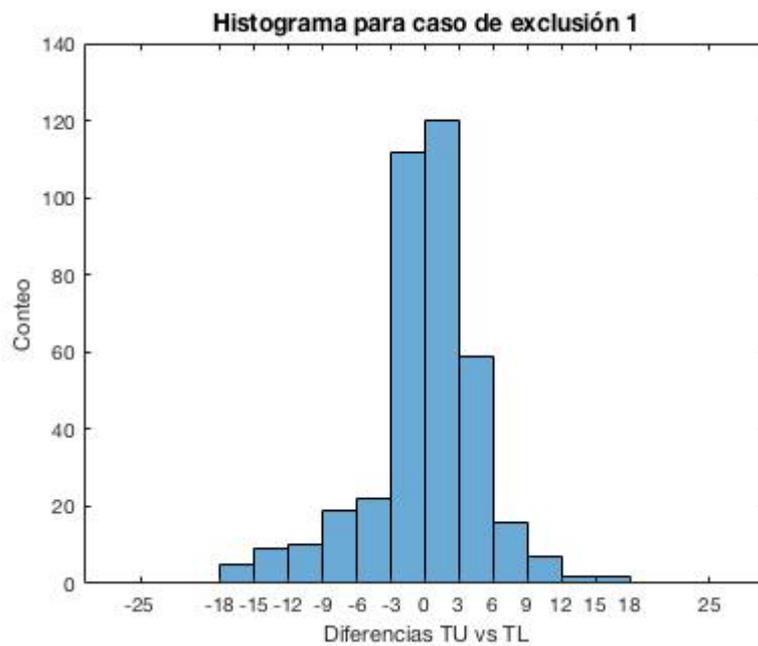


Figura 34. Histograma del primer caso de exclusión.

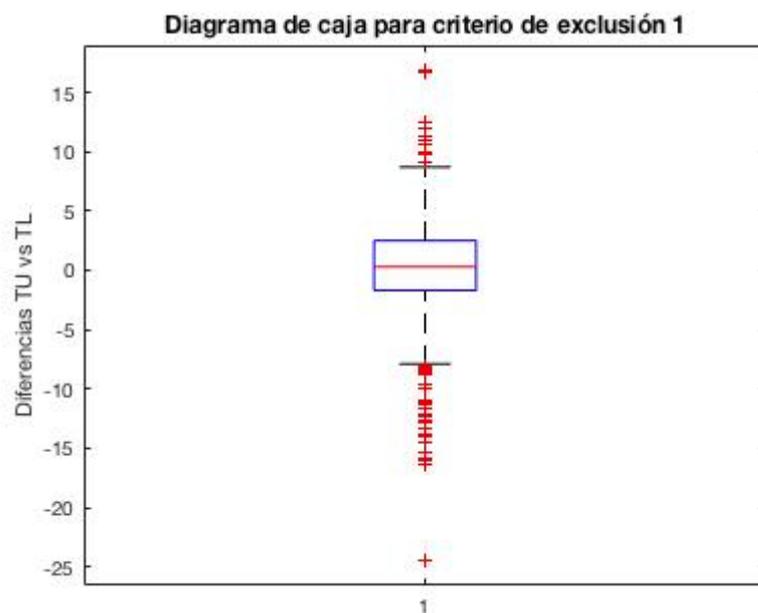


Figura 35. Diagrama de caja del primer criterio de exclusión.

- Criterio de exclusión 2

Se obtuvo un LSA y un LIA con valores de 3.525 y -5.7312 respectivamente. A partir de este criterio se excluyeron un total de 5 participantes de un total de 24 datos.

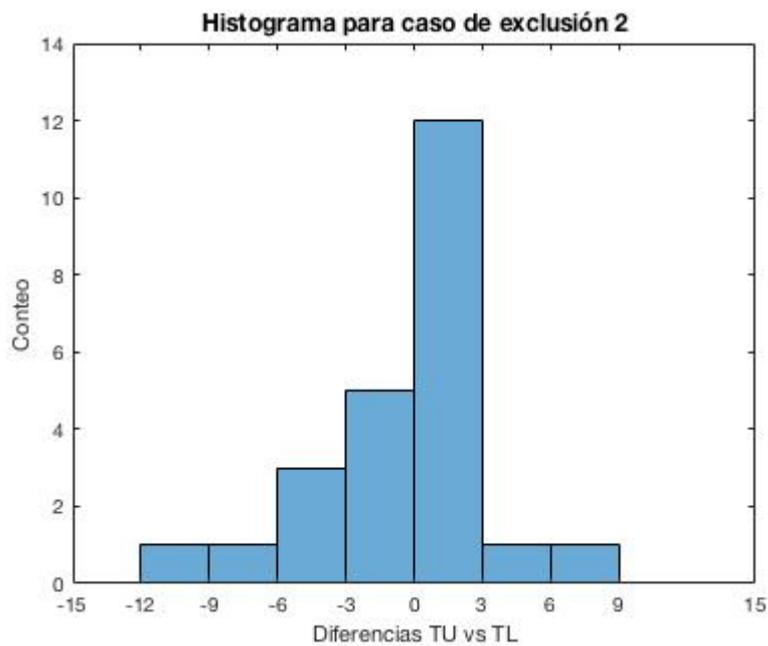


Figura 36. Histograma del segundo criterio de exclusión.

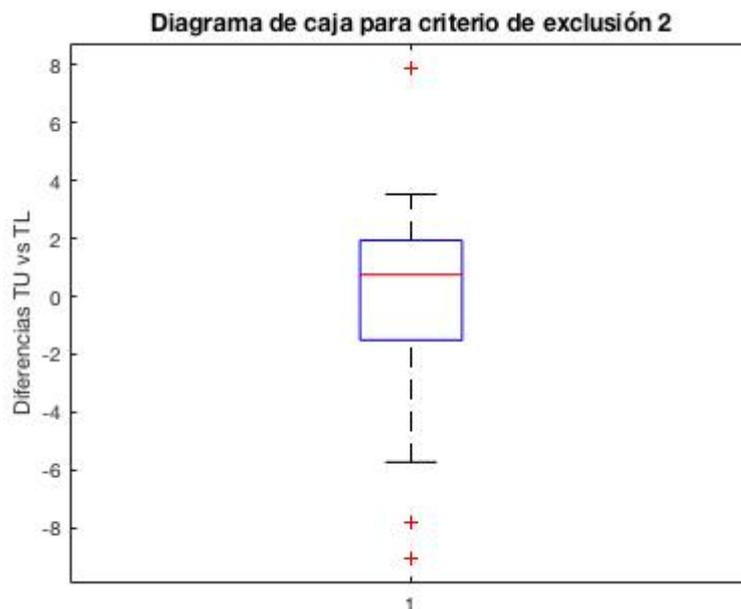


Figura 37. Diagrama de caja del segundo criterio de exclusión.

- Criterio de exclusión 3

En este caso, el LSA fue de 0.7249 y el LIA de -1.323 (diferencia en [dB] con respecto a la media). Con esto 3 participantes se excluyeron, siendo el criterio menos drástico.



Figura 38. Diagrama de caja del tercer criterio de exclusión.

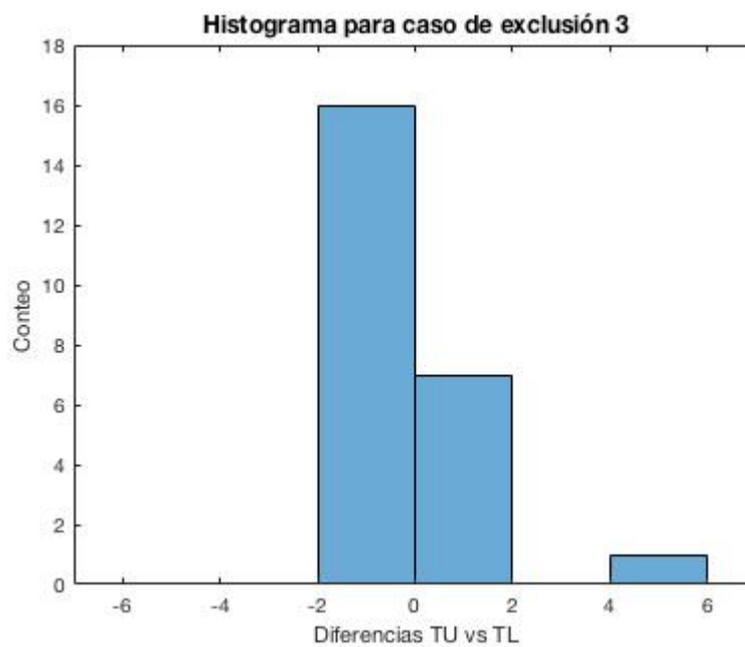


Figura 39. Histograma del tercer criterio de exclusión.

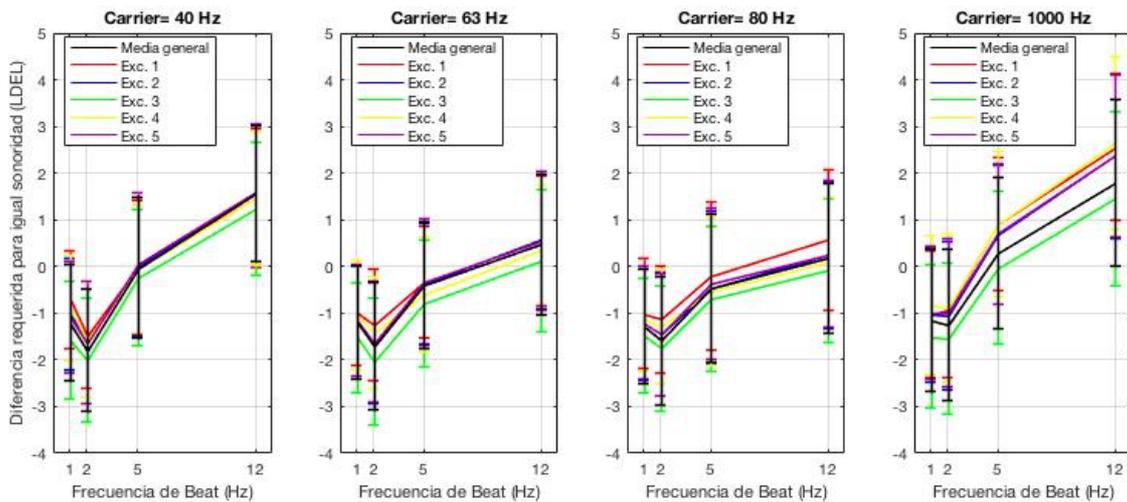
- Criterio de exclusión 4

Aplicando la tolerancia de 3 [dB] se excluyeron 10 participantes.

- Criterio de exclusión 5

Aplicando una tolerancia de 6 [dB] se excluyeron 4 participantes.

De este modo, en la *Figura 39* se muestra la curva promedio de los 24 sujetos en comparación con las diferentes curvas promedio obtenidas al aplicar los criterios de exclusión previamente descritos.



*Figura 40.* Curvas promedio de los resultados obtenidos de *loudness*, con cada uno de los criterios de exclusión. La curva de tendencia de color negro es el promedio sin criterios de exclusión.

- Promedio de loudness general vs. promedios de loudness con cada criterio de exclusión para 40 Hz.
- Promedio de loudness general vs. promedios de loudness con cada criterio de exclusión para 63 Hz.
- Promedio de loudness general vs. promedios de loudness con cada criterio de exclusión para 80 Hz.
- Promedio de loudness general vs. promedios de loudness con cada criterio de exclusión para 1000 Hz.

Haciendo un análisis global de cada gráfica, se puede ver que las diferentes exclusiones varían la media de los 24 sujetos en alrededor de 1 [dB], esta diferencia es menor en el caso del carrier de 40 [Hz] donde las variaciones de la media son cercanas a 0 [dB]. Cabe recalcar que gráficamente se puede ver cómo la variación se hace mayor conforme aumenta la frecuencia carrier, siendo la

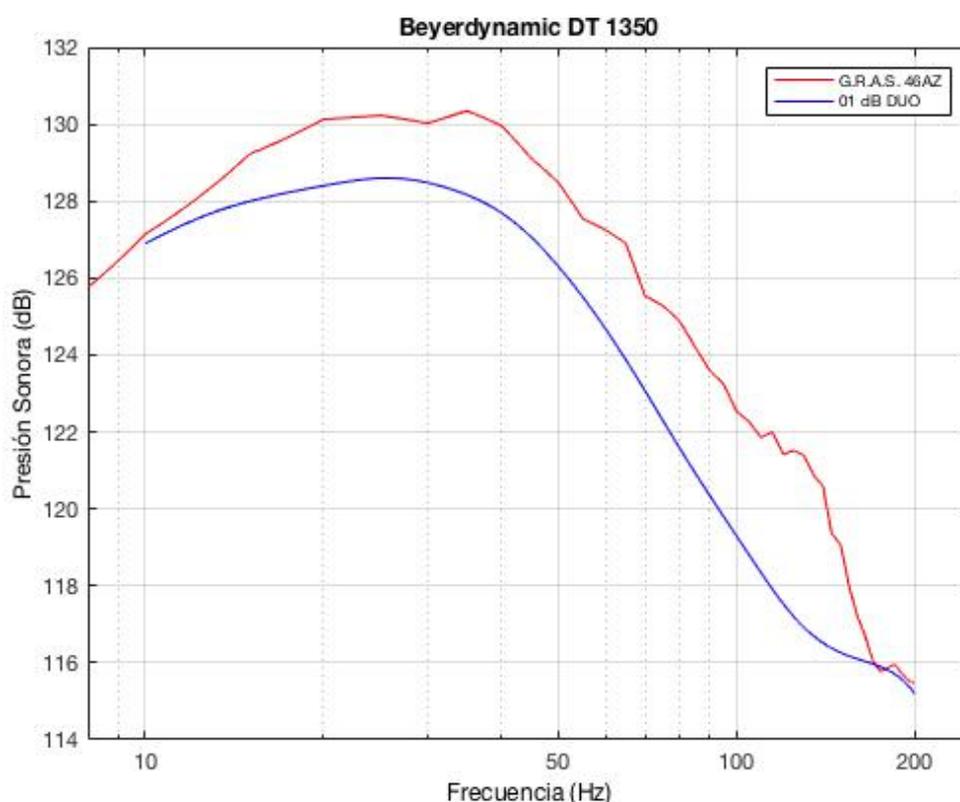
frecuencia de 1000 [Hz] la que alberga las variaciones más grandes al excluir datos. Esto se debe a que en dicha frecuencia la respuesta de los participantes fue más consistente, de forma que al excluir datos las desviaciones individuales existentes se hacen más notables, a diferencia del resto de carriers.

### 4.3. Mejora de subwoofer para infrasonido

#### 4.3.1. Medición de respuesta en frecuencia

Como se había mencionado antes, para la medición de la respuesta en frecuencia de los sistemas se utilizaron dos métodos, uno utilizando el programa de calibración implementado en MATLAB, y otro midiendo los niveles de NPS por tercios de octava con el sonómetro DUO. De este modo, se obtuvieron dos curvas de respuesta en frecuencia, una roja correspondiente a la medición de datos del micrófono G.R.A.S. y transformada de Fourier en MATLAB; y una azul suavizada con la función spline, que hace alusión a los valores medidos directamente con el sonómetro.

En el caso de la adaptación del altavoz Beyerdynamic DT 1350, se puede observar que entre 20 y 40 [Hz] se encuentra la respuesta más plana del sistema. Por encima de este rango, la curva de respuesta describe una pendiente que decrece desde los 130 [dB] hasta los 116 [dB] en el caso de 200 [Hz]. Por otro lado, debajo de 20 [Hz] la respuesta decrece abruptamente, sugiriendo que para los infrasonidos este sistema no es el óptimo. Otro aspecto que considerar es la falta de uniformidad de la curva a lo largo del espectro, que muestra pequeños altos y bajos que se asemejan a más bien una línea dentada o con una rugosidad.



*Figura 41.* Respuesta en frecuencia del audífono adaptado Beyerdynamic 1350, para un rango desde 10 a 200 Hz. Se compara la curva obtenida con el sonómetro vs. la resultante con el programa de calibración.

Si se compara la respuesta de frecuencia medida para los audífonos modificados en este trabajo con la respuesta en frecuencia medida (también con el micrófono G.R.A.S.) para el mismo sistema en la tesis de Gallegos y Gordillo (2016), se puede ver que las curvas difieren en primer lugar en su regularidad, ya que la curva del trabajo anterior es mucho más regular con respecto a la actual que, como se indicó con anterioridad, presenta indicios de algún tipo de saturación. Esto puede deberse a la saturación en el canal de salida de la interface al momento de efectuar la medición. Por otro lado, otra diferencia notable es el nivel que presentan ambas respuestas, en la curva actual el nivel máximo llega alrededor de 130 [dB], mientras que en la curva de Gallegos y Gordillo, el nivel máximo está alrededor de 116 [dB], esta diferencia de nivel también puede dar indicios del origen de la saturación de la curva actual ya que las condiciones de medición actuales están aproximadamente 14 [dB] por encima de las

condiciones del trabajo anterior, lo cual es una diferencia de nivel considerable. A partir de 40 [Hz], tanto en la respuesta del sistema anterior como en la respuesta actual, la curva empieza a decaer hasta los 200 [Hz]. Sin embargo, en la medición actual se observa un comportamiento más plano entre 20 y 40 [Hz] con relación a la medición de Gallegos y Gordillo, muy posiblemente debido al nivel de reproducción alto en la medición actual.

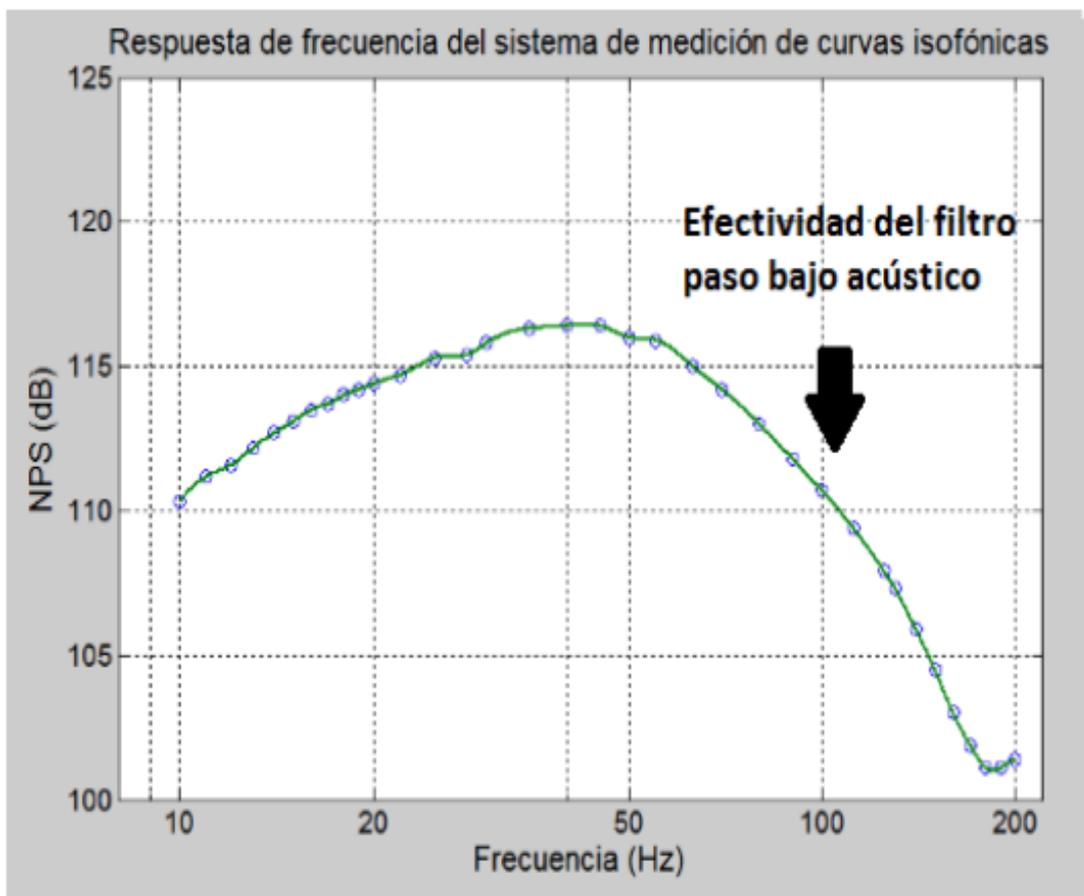
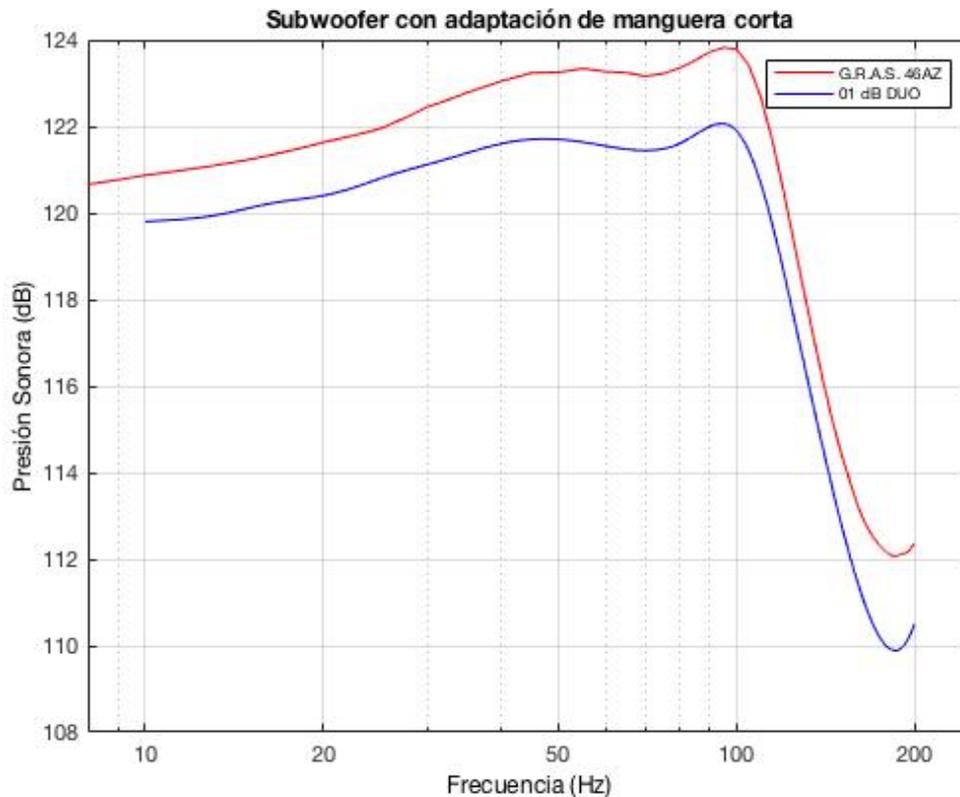


Figura 42. Respuesta en frecuencia del audífono adaptado Beyerdynamic DT 1350 medida en la tesis de Gallegos y Gordillo (2016).

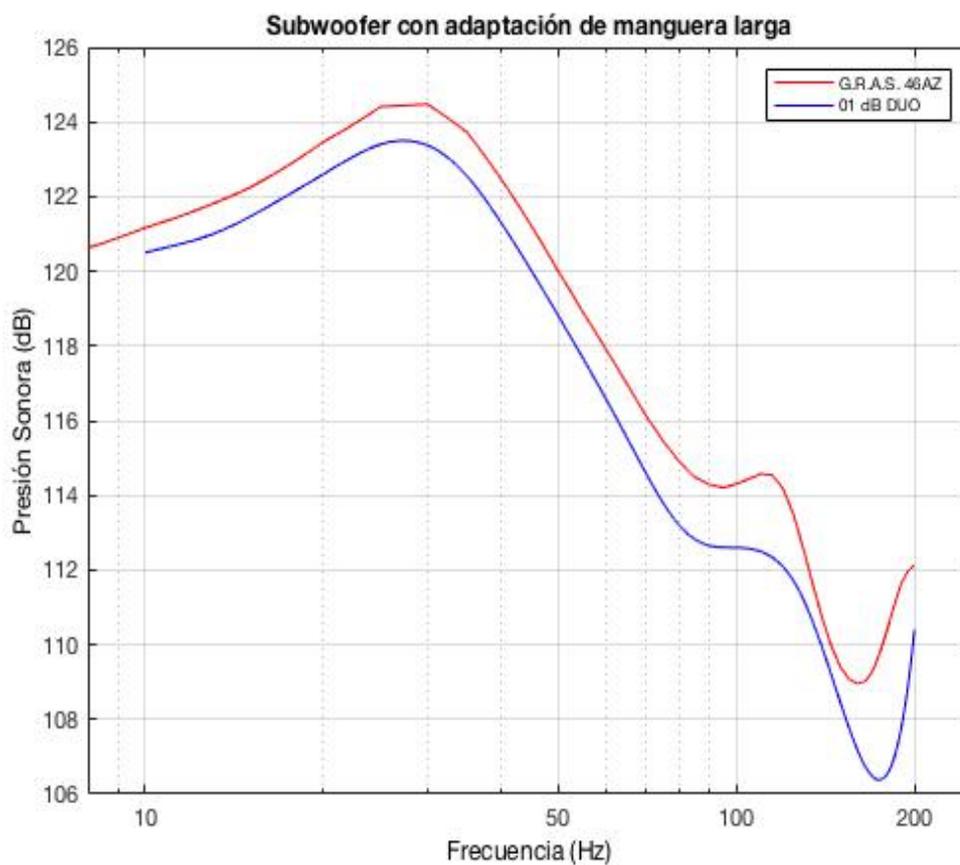
En la medición de la implementación de subwoofer con manguera corta, la curva obtenida presenta una mejora de la respuesta en frecuencia desde 10 hasta 20 [Hz]; visualmente se representa como el sistema puede reproducir niveles de hasta 120 [dB] aproximadamente en 10 [Hz]. El rango de respuesta plana obtenido va desde 10 hasta 100 [Hz]. Por encima de esto, la pendiente decrece hasta 200 [Hz] con un nivel de entre 110 y 112 [dB]. A diferencia del sistema

anterior, la curva en este caso obtenida es mucho más uniforme al no presentar picos abruptos a lo largo del espectro evaluado.



*Figura 43.* Respuesta en frecuencia del subwoofer adaptado con manguera corta, para un rango desde 10 a 200 Hz. Se compara la curva obtenida con el sonómetro vs. la resultante con el programa de calibración.

Para el último sistema puesto a prueba, la curva obtenida es bastante parecida a la del primero, aunque no se puede definir como un intervalo de respuesta plana. En el gráfico se aprecia como de 10 a 30 [Hz] la pendiente es positiva, luego hasta 100 [Hz] decrece un total de 10 [dB], después, presenta un pequeño realce de 1 [dB] aproximadamente hacia 115 [Hz]. A partir de ahí, vuelve a decrecer hasta los 180 [Hz] y finalmente sube de nuevo en 200 [Hz]. Para el caso estudiado, se debe decir que esta irregularidad de respuesta hace que el sistema tampoco sea apto. De todas maneras, se sabe cómo se comportan las distintas implementaciones, y este dato es de gran valor para investigaciones futuras.



*Figura 44.* Respuesta en frecuencia del subwoofer adaptado con manguera larga, para un rango desde 10 a 200 Hz. Se compara la curva obtenida con el sonómetro vs. la resultante con el programa de calibración.

Antes de finalizar este punto, es necesario tomar en cuenta que las diferencias entre las mediciones del SOFTWARE y las del sonómetro, son de un rango pequeño (distan alrededor de 2 [dB] ) y pueden haberse dado debido a la calibración de los equipos o a la manipulación de estos durante el día de medición. Esto en términos generales, valida ambos métodos al coincidir en el comportamiento general de los sistemas.

## 4.3.2. Medición de distorsión armónica

Tabla 2.

 $\Delta L$  armónicos [dB].

		$\Delta L$ armónicos (dB)												
Frecuencia (Hz)		5			10			15			20			
NPS de reproducción (dB)		110	115	119	110	115	119	110	115	119	110	115	119	
Sistema	Beyerdynamic DT 1350	1er armónico	34,6	30,2	26,1	44,2	38,9	35,1	50	44,6	41,1	54,2	49,7	45,4
		2do armónico	38,8	37,3	38	37,3	35,9	34,9	39,3	37,2	36,6	41,7	39,6	38,9
		3er armónico	59	55	49,1	68,5	64,8	61,4	78,9	76,3	72,8	84,7	82,5	84,2
		4to armónico	49,9	47,3	45,9	53,2	48,8	47,1	58	52,9	50,9	60,5	55,2	53,2
	Subwoofer con manguera corta	1er armónico	56,4	61,2	78,7	78,4	78,1	70,8	67,3	70,9	72,4	59	68	68,7
		2do armónico	71	79,4	84,7	66,2	75,1	79,9	85,8	97,1	91,2	65,1	66,9	74,5
		3er armónico	64,7	79,7	77,2	52,7	65,1	71,4	71,8	66,1	71,8	82,1	90,8	100,8
		4to armónico	71,9	85,8	72,7	72,5	73,5	83	80,4	84	93,3	81,9	84,6	95,3
	Subwoofer con manguera larga	1er armónico	57,3	65,9	65,4	65	68,1	75,9	58,7	76	68,8	74,6	83,9	71,8
		2do armónico	78,1	69,2	72,8	63,8	61,2	75,6	72,3	68,9	93,2	79,6	86	90,1
		3er armónico	72,1	64,5	74,7	71,1	70,4	69,7	72,3	87,3	77,4	92,4	100,1	107,6
		4to armónico	60,3	72,6	74,9	74,3	74,2	82,8	94,5	93,3	88,7	89,9	101	109,6

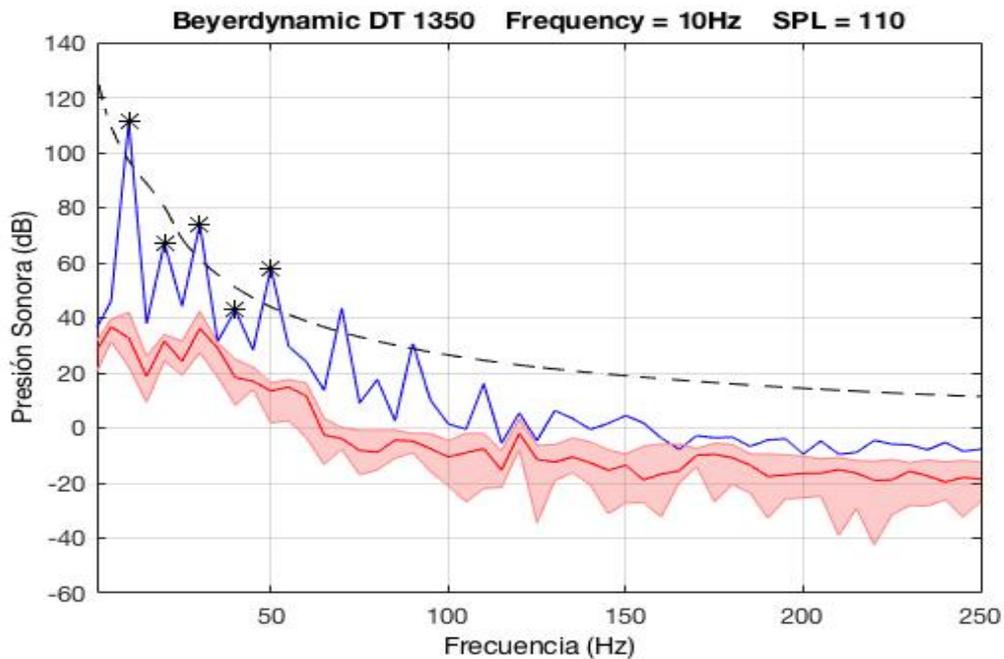
Los resultados de las gráficas obtenidas de las mediciones de distorsión armónica se recolectaron en la tabla 2, donde se registraron los valores de las diferencias de cada armónico ([dB]) con respecto al valor de la fundamental para cada sistema y para cada nivel de las respectivas frecuencias medidas. Las celdas con el fondo más oscuro representan los armónicos, que, en su respectivo caso, superaron el umbral de audición. En la figura 45 la línea azul corresponde a la curva del tono medido, la línea entrecortada negra al umbral de audición, la línea acentuada roja al nivel RMS de ruido de fondo y la región roja clara a los picos del ruido de fondo en la medición.

El objetivo general de evaluar estos resultados es determinar cuál de los tres sistemas presenta la menor cantidad de armónicos sobre el umbral, ya que, en una medición de parámetros frecuenciales puntuales, como las que se realizaron en el presente trabajo, la presencia de contenido armónico no deseado afecta la fidelidad de los resultados. Se evaluaron tres niveles de reproducción para

evaluar cuál sería el óptimo a utilizarse en una medición de baja frecuencia e infrasonido utilizando el nuevo sistema implementado.

Haciendo una evaluación general de los resultados, se puede ver que el sistema Beyerdynamic posee la mayor cantidad de distorsión armónica sobre el umbral en los cuatro primeros armónicos de las frecuencias medidas, y estos van aumentando conforme aumenta la frecuencia, contrariamente a lo que se hubiera esperado con respecto a que el nivel influyera más que la frecuencia. Esto puede deberse a que la curva de umbral es más permisiva en frecuencias más bajas y conforme aumenta la frecuencia el umbral es más bajo haciendo que se requieran diferencias de nivel mucho mayores con respecto a la fundamental para que los armónicos estén bajo el umbral; además, esto refleja que las características de distorsión están más ligadas a las propiedades mecánicas del sistema de reproducción que a los parámetros de reproducción. De esta manera, se puede ver en los datos de los armónicos que no superan el umbral (celdas blancas en la tabla), que conforme la frecuencia aumenta, éstos presentan una tendencia de incremento en las diferencias.

Analizando individualmente, se puede ver que en el sistema Beyerdynamic la distorsión empieza a hacerse presente sobre el umbral a partir de 5 [Hz] en 119 [dB], y presenta todos los armónicos por sobre el umbral en 10, 15 y 20 [Hz] a 115 y 119 [dB].



*Figura 45.* Niveles de NPS de 10 Hz a 110 dB, y sus 4 primeros armónicos, con el audífono Beyerdynamic DT 1350.

En la *Figura 45* se puede ver que a partir de 10 [Hz] empieza a notarse un realce de armónicos superiores al cuarto armónico por sobre el umbral, y es una tendencia que va aumentando hasta verse gráficamente como en la *Figura 46*, con una presencia de armónicos considerables en la medición. En comparación con la distorsión armónica del subwoofer bajo las mismas condiciones, la distorsión armónica del subwoofer está mejor controlada que en el sistema Beyerdynamic, a pesar de que posee mayor presencia de ruido de fondo.

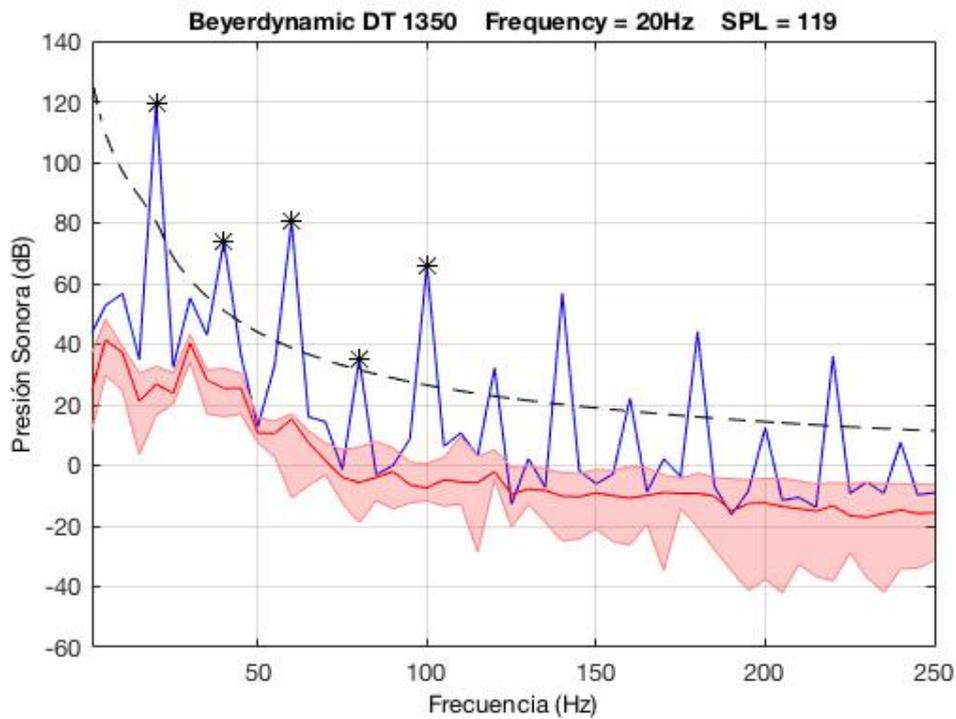


Figura 46. Niveles de NPS de 20 Hz a 119 dB, y sus 4 primeros armónicos, con el audífono Beyerdynamic DT 1350.

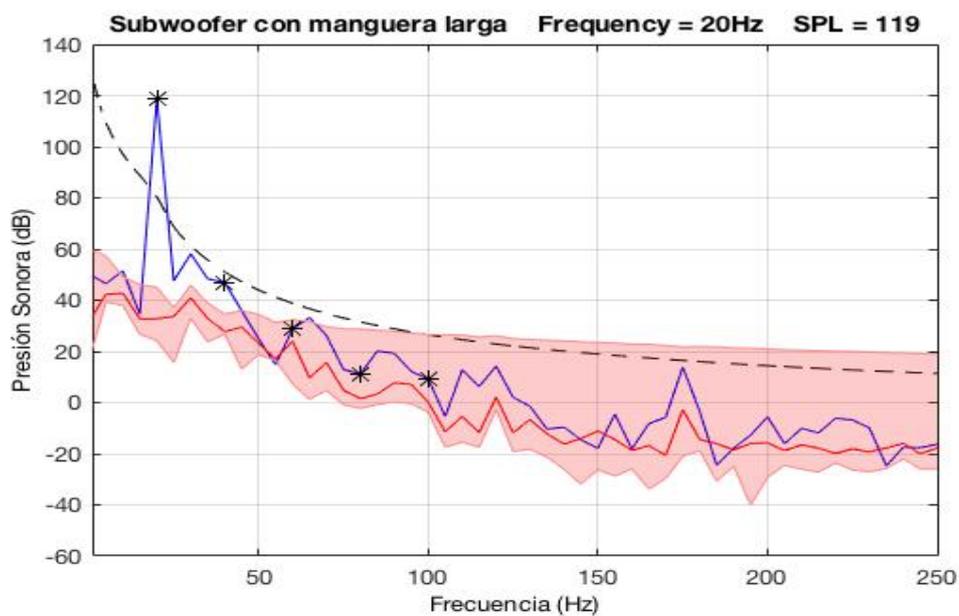
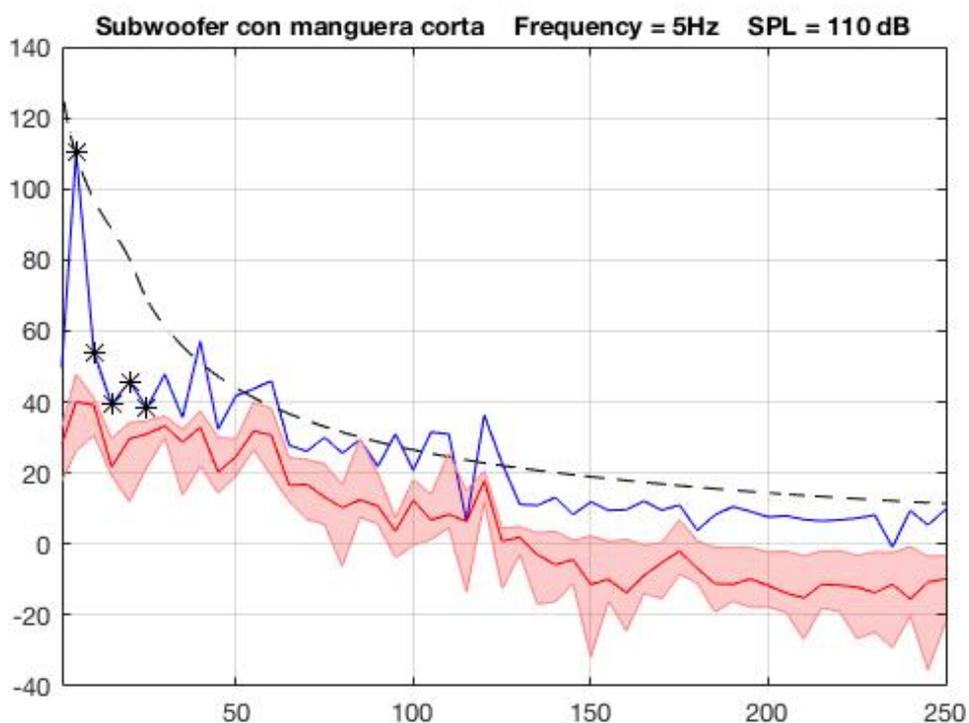


Figura 47. Niveles de NPS de 20 Hz a 119 dB, y sus 4 primeros armónicos, con la adaptación de subwoofer y manguera larga.

Por otro lado, en el sistema del subwoofer con adaptación de manguera corta, la distorsión mejora considerablemente con respecto al sistema Beyerdynamic presentando apenas uno o dos armónicos por sobre el umbral a partir de 15 [Hz] en 115 [dB]. Sin embargo, si bien los cuatro primeros armónicos no sobrepasan el umbral en la mayoría de los casos, existen armónicos superiores que sobresalen como muestra la *Figura 48*. A esto se suma el hecho de que el nivel de ruido es mayor con respecto al sistema de los audífonos modificados, presentando picos de ruido bastante cercanos al umbral.



*Figura 48.* Niveles de NPS de 5 Hz a 110 dB, y sus 4 primeros armónicos, con la adaptación de subwoofer y manguera corta.

Por último, el sistema del subwoofer con adaptación de manguera larga es el que mejor controla la distorsión armónica, ya que únicamente presenta un pico por sobre el umbral en 15 [Hz] a 119 [dB]. Este sistema presenta diferencias de los armónicos con respecto a la fundamental de entre 60 [dB] y 110 [dB], lo que

brinda un margen aceptable para reproducir bajas frecuencias a niveles altos. Sin embargo, el principal problema que presenta este sistema son los niveles de ruido altos, como en el caso que describe la *Figura 47* a 20 [Hz] y 119 [dB] (caso más crítico), donde el nivel de ruido sobrepasa el umbral. En ciertos casos, los picos de ruido llegan a estar al mismo nivel de algunos armónicos, lo cual impide tener un conocimiento seguro sobre la influencia del armónico en ese punto del umbral. Tanto en el caso de la manguera corta (menor impacto) como en el presente sistema, el ruido de fondo por sobre el umbral puede deberse a ruido eléctrico que puede ser tanto de cuantización como de tierra, o directamente estar ligado a ruidos no controlados externos al lugar de medición, por lo que sería recomendable volver a medir el sistema en mejores condiciones.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

Lo primero que se debe mencionar, finalizada la etapa de experimentación y análisis de datos, es acerca de las pruebas de *beating*. Estas, demostraron que a medida que se va aumentando la frecuencia de fluctuación para los carriers de 40, 63 y 80 Hz, los deltas promedio se alejan más del 0, mientras que, en 1000 Hz, la curva obtenida es bastante parecida a una recta. Se concluyó entonces, que este comportamiento está estrechamente ligado con la METF, argumentado además con el método psicofísico de ajuste utilizado. La explicación, tiene que ver con la forma en que llegan a ser percibidos los distintos tonos en nuestro cerebro; si se toma al oído medio como un filtro paso alto, las frecuencias van llegando cada vez a niveles más altos a medida que aumentan, hasta llegar a una zona en donde el nivel se estabiliza. Con esto, si la separación entre TU y TL es mucha (frecuencia de beat mayor), en zonas antes de 1 kHz, los niveles percibidos de cada uno distan proporcionalmente, y la diferencia de nivel necesaria para igualar ambos tonos es mayor. En esta situación, la velocidad de la fluctuación va aumentando a medida que la frecuencia de *beating* también lo hace, y todo esto en conjunto aumenta el rango de aleatoriedad de respuestas, dando como resultado que los deltas también varíen. Esta aseveración, queda respaldada al tener la curva de 1000 Hz, donde pese a aumentarse la frecuencia de *beating*, los deltas promedios están siempre cerca del 0.

En relación con los resultados de *loudness* se pudo concluir que las frecuencias de beat de 1 y 2 [Hz] fueron percibidas en promedio con mayor nivel en comparación al tono constante, lo que explica que los participantes hayan tendido bajar el nivel del estímulo modulado. Por otro lado, la frecuencia de 5 [Hz] en promedio fue percibida a un nivel bastante cercano al nivel del tono constante. Por último, en la frecuencia de beat más rápida, 12 [Hz] se pudo ver que la percepción del nivel fue menor a la del tono constante, lo cual explicaron los valores de diferencia de nivel requerido para igual sonoridad en dicha condición. De esta manera, se puede decir que, en estímulos de baja frecuencia

modulados, el punto de mayor sonoridad está en las frecuencias de modulación de 1 y 2 Hz, ante lo cual se puede inferir que conforme disminuye la frecuencia de modulación, el nivel de percepción de sonoridad aumenta.

El análisis ANOVA aplicado a los resultados de *loudness*, que reflejó de manera global la existencia de diferencias estadísticamente significativas (tomando a la frecuencia de beat como variable) en cada frecuencia de carrier, permitió concluir que efectivamente la frecuencia de beat tiene una influencia directa sobre las diferencias requeridas para un nivel de igual sonoridad en cada carrier, Además, la prueba de comparación múltiple corroboró que las diferencias significativas se dan entre las frecuencias de beat más distantes (1 y 12 Hz; 2 y 12 Hz), con lo cual se puede decir que mientras mayor sea la frecuencia de beat, mayor será el nivel de sonoridad requerido para escuchar un estímulo modulado con igual nivel que un tono fijo.

Por otro lado, si bien los promedios de los datos con exclusión variaron no más de alrededor de 1 dB con respecto a los resultados generales, se debe tomar en cuenta que dicha variación se da sobre las medias de un conjunto grande de datos. Por esta razón, se llegó a definir que la exclusión de participantes afecta a los resultados finales; por lo que se debería considerar criterios de exclusión cada vez que se cuente con un número extenso de sujetos. Con esto, se lograría reducir el rango de error en los datos definitivos.

Evaluando los resultados obtenidos en las pruebas aplicadas al subwoofer para infrasonido, se pudo determinar que, en cuanto a respuesta en frecuencia, el subwoofer con manguera corta presentaba un mejor comportamiento en bajas frecuencias, con respecto a la implementación de manguera larga y al sistema anterior de audífonos modificados. No obstante, el sistema de subwoofer con manguera larga fue el que mejor manejó la distorsión armónica. De esta manera, se concluyó que el subwoofer con manguera larga es el sistema que logra con mayor efectividad un compromiso entre respuesta en frecuencia y control de distorsión armónica, ya que, si bien su respuesta no es amplia para una gran

parte del espectro de tonos graves, como se vio en el sistema de manguera corta, tiene buena efectividad en la zona de interés (infrasonidos). Por este motivo, para futuros experimentos, con las mismas condiciones de medición, se aconseja utilizar el subwoofer con manguera larga para frecuencias menores a 20 Hz,

Se debe mencionar, que el método psicofísico utilizado, junto con la explicación e itinerario del experimento, tuvieron la efectividad buscada, ya que, el hecho de tener un total de 24 participantes de entre 31, que entendieron lo que se tenía que hacer y lo que se debía encontrar, validó los procesos aplicados. Además, sin tomar en cuenta los criterios de exclusión, los datos promedio de los sujetos evaluados mostraron consistencia, haciendo que los valores obtenidos fueran congruentes con las bases teóricas y los resultados esperados.

Para finalizar, cabe agregar que uno de los factores que generó contratiempos durante la medición fue el ruido de fondo que se transmitía dentro del laboratorio. Este, fue ruido estructural de baja frecuencia que se transmitió desde los recintos colindantes del lugar de mediciones. Al estar en un subsuelo, los focos de molestia se localizaron en los niveles superiores y en la zona del parqueadero contigua. Además, la presencia de un generador eléctrico cercano provocó que, en determinadas ocasiones, la toma de datos se detuviera hasta que éste dejase de funcionar. Estos dos factores hicieron que se debiera volver a medir en determinadas condiciones y en sujetos puntuales.

## 5.2 Recomendaciones

Para futuros experimentos, se aconseja redactar de forma más clara las instrucciones del experimento, o encontrar una manera más óptima de introducir a los participantes a la actividad. Dar ejemplos demostrativos o visuales de cómo se espera que sea la participación de la persona, puede ayudar a optimizar el tiempo de medición, o al menos el tiempo de entrenamiento. Cabe mencionar que las demostraciones no deben dar ningún indicio de lo que el participante

debe encontrar, es decir, no se debe señalar ni mencionar dónde están las zonas de máxima fluctuación ni de igual nivel.

En relación a los criterios de exclusión, se recomienda evaluar cuál de los cinco utilizados es el mejor o más óptimo a través de una nueva toma de datos, de forma que se pueda comparar y determinar cuál de los criterios aplicados permite disminuir de manera eficiente el rango de error en comparación a los demás, o si en efecto, es viable implementar un nuevo criterio en base al uso de métodos estadísticos para el análisis de distribuciones de datos grandes.

A raíz del nivel de ruido de fondo por sobre el umbral de audición que se pudo ver en la medición de distorsión armónica del sistema de subwoofer con manguera larga, sería apropiado determinar el origen del nivel de ruido de fondo en la medición, o bien realizar la medición en mejores condiciones. Si bien se especula que el ruido de fondo puede deberse a ruido eléctrico, parte del mismo puede también deberse a ruidos no controlados provenientes de fuera del lugar de medición, de manera que se debe aplicar métodos de control no solo sobre los equipos y parámetros de medición (caso de ruido eléctrico), sino sobre el entorno, ya sea mejorando el aislamiento o encontrando el horario y lugar apropiados para el procedimiento.

También se debe tomar en cuenta que en la etapa de la implementación se alimentó al subwoofer con la potencia generada desde la interfaz. Esta, no posee la capacidad necesaria para poder excitar al nuevo altavoz hasta sus niveles máximos. Es por este motivo por el que se prevé la adquisición de un amplificador de potencia óptimo para los usos requeridos. Se plantea entonces que las mediciones tanto de respuesta en frecuencia, como de distorsión armónica sean replicadas el momento de incorporar este nuevo dispositivo a la cadena.

La última de las recomendaciones, tiene que ver con el lugar y posición del nuevo driver para infrasonidos. Debido a que su potencia es mucho mayor y el volumen

de aire que mueve se incrementa exponencialmente con respecto a los audífonos adaptados, se prevé que se produzcan situaciones no deseadas. Las principales son: vibración en la superficie de la cabina, sonidos dentro de la misma y, armónicos superiores que pueden quedarse estacionarios y afectar a los datos. Todo esto, puede mejorar si se encuentra un mejor lugar para el dispositivo. Se recomienda que esté ubicado afuera de la cabina de medición, sin embargo, en el peor de los casos puede mantenerse dentro, siempre y cuando esté sujeta a algún tipo de soporte desacoplado del piso y amortiguado.

## REFERENCIAS

- Aichinger, P., y Eckel, G. (2009). *Investigation of psychoacoustic principles for automatic mixdown algorithms*. DOI: 10.13140/RG.2.1.3454.6960
- Aznar, A. (2009). *Introducción a la psicofísica*. Recuperado de [http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/9922/1/PSICFISCA\\_Apuntes\\_2009.pdf](http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/9922/1/PSICFISCA_Apuntes_2009.pdf)
- Du, Y., Kong, L., Wang, Q., Wu, X., y Li, L. (2011). *Auditory frequency-following response: a neurophysiological measure for studying the “cocktail-party problem”*. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 35(10), 2046-2057. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2011.05.008
- Glasberg, B. R., y Moore, B. C. (2006). *Prediction of absolute thresholds and equal-loudness contours using a modified loudness model*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(2), 585-588. DOI: 10.1121/1.2214151
- Jurado, C., Gallegos, P., Gordillo, D., y Moore, B. C. (2017). *The detailed shapes of equal-loudness-level contours at low frequencies*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 142(6), 3821-3832. DOI: 10.1121/1.5018428
- Jurado, C., y Robledano, D. (2007). *Auditory filters at low frequencies: Erb and filter shape*. Technical report, Aalborg University. Recuperado de [https://projekter.aau.dk/projekter/files/9897666/Auditory\\_filters\\_at\\_low\\_frequencies\\_07gr1062.pdf](https://projekter.aau.dk/projekter/files/9897666/Auditory_filters_at_low_frequencies_07gr1062.pdf)
- Kingdom, F., y Nicolaas Prins. (2016). *Psychophysics*. Elsevier Science. DOI: 10.1016/C2012-0-01278-1
- Kinsler, L. E., Coppens, A. B., Frey, A. R., y Sanders, J. V. (1992). *Fundamentos de acústica* (No. 531.77 KIN).
- Korczak, P., Smart, J., Delgado, R., Strobel, T., y Bradford, C. (2012). *Auditory Steady-State Responses*. *Journal of the American Academy of Audiology*. 23. 146-70. DOI: 10.3766/jaaa.23.3.3.
- Leventhall, G., Pelmear, P., y Benton, S. (2003). *A review of published research on low frequency noise and its effects*. DOI: EPG1/2/50

- Makarewicz, R., y Golebiewski, R. (2013). *Amplitude modulation of wind turbine noise*. arXiv preprint arXiv:1306.2752. Recuperado de <https://scienceforecastoa.com/Articles/SJAAS-V1-E1-1008.pdf>
- Marquardt, T., Hensel, J., Mrowinski, D., y Scholz, G. (2007). *Low-frequency characteristics of human and guinea pig cochleae*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121(6), 3628-3638. DOI: 10.1121/1.2722506
- Mayo, A. (2019). *Loudness: introducción, métodos de medición y recomendaciones*. Recuperado de <http://www.andresmayo.com/images/LoudnessNDB.pdf>
- Miyara, F. (2007). *Introducción a la psicoacústica*. Recuperado de <https://www.analfatecnicos.net/archivos/04.IntroduccionPsicoacusticaFedericoMiyara.pdf>
- Molina, R. H., Zacarías, F. F., Ancela, J. L. C., López, S. L., y Ojembarrena, A. A. (2012). *Aplicación de las curvas de igual sonoridad en la molestia a ruido aleatorio. Caso de estudio en sistema CPAP con Helmet neonatal*. Recuperado de: <http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/112.pdf>
- Moller, H., y Pedersen, C. S. (2004). *Hearing at low and infrasonic frequencies*. *Noise and health*, 6(23), 37. Recuperado de <http://www.noiseandhealth.org/text.asp?2004/6/23/37/31664>
- Møller, A. R. (1963). *Transfer function of the middle ear*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 35(10), 1526-1534. DOI: 10.1121/1.1918742
- Moore, B. C. (2012). *An introduction to the psychology of hearing*. Bingley: Emerald. Recuperado de [https://people.finearts.uvic.ca/~aschloss/course\\_mat/MUS%20511%20articles/An%20Introduction%20to%20the%20Psychology%20of%20Hearing%20by%20Brian%20Moore%206th%20Edition.pdf](https://people.finearts.uvic.ca/~aschloss/course_mat/MUS%20511%20articles/An%20Introduction%20to%20the%20Psychology%20of%20Hearing%20by%20Brian%20Moore%206th%20Edition.pdf)
- Moore, B. C. (2014). *Development and current status of the "Cambridge" loudness models*. *Trends in hearing*, 18, 2331216514550620. DOI: 10.1177/2331216514550620

- Moore, B. C. (2015). *Differences between ANSI S3. 4-2007 and the proposed ISO532-2*. The Journal of the Acoustical Society of America, 138(3), 1889-1889. DOI: 10.1121/1.4933931
- Moore, B. C., Glasberg, B. R., y Baer, T. (1997). *A model for the prediction of thresholds, loudness, and partial loudness*. Journal of the Audio Engineering Society, 45(4), 224-240. Recuperado de <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=10272>
- Perkins, R., Berry, B., Grimwood, C., y Stansfeld, S. (2016, August). *A Review of research into the human response to amplitude modulated wind turbine noise and development of a planning control method*. In INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings (Vol. 253, No. 3, pp. 5222-5233). Institute of Noise Control Engineering. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/308023530\\_A\\_review\\_of\\_research\\_into\\_the\\_human\\_response\\_to\\_amplitude-modulated\\_wind\\_turbine\\_noise\\_and\\_development\\_of\\_a\\_planning\\_control\\_method](https://www.researchgate.net/publication/308023530_A_review_of_research_into_the_human_response_to_amplitude-modulated_wind_turbine_noise_and_development_of_a_planning_control_method)
- Pickles, J. (2015). *Auditory pathways: Anatomy and physiology*. Handbook of clinical neurology. 129C. 3-25. DOI: 10.1016/B978-0-444-62630-1.00001-9
- Pizlo, Z. (2001). *Perception viewed as an inverse problem*. Vision research, 41(24), 3145-3161. DOI: 10.1016/S0042-6989(01)00173-0
- Rumsey, F., y McCormick, T. (2007). *Sonido y grabación: introducción a las técnicas sonoras* (No. Sirsi a443695).
- Scharine, A., Cave, K., y Letowski, T. (2009). *Auditory perception and cognitive performance*. Helmet-Mounted Displays: Sensation, Perception, and Cognition Issues, 391-489. DOI: 10.13140/2.1.3160.1925
- Tichko, P., y Skoe, E. (2017). *Frequency-dependent fine structure in the frequency-following response: The byproduct of multiple generators*. Hearing research, 348, 1-15. DOI: 10.1016/j.heares.2017.01.014

- Van Eeckhoutte, M., Wouters, J., y Francart, T. (2016). *Auditory steady-state responses as neural correlates of loudness growth*. *Hearing research*, 342, 58-68. DOI: 10.1016/j.heares.2016.09.009
- Watanabe, T., y Møller, H. (1990). *Low frequency hearing thresholds in pressure field and in free field*. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 9(3), 106-115. DOI: 10.1177/026309239000900303
- Zenker, F., Barajas, J., y Larumbe, E. (2008). *Loudness and auditory steady-state responses in normal-hearing subjects*. *International journal of audiology*, 47(5), 269-275. DOI: 10.1080/14992020801945501

## ANEXOS

Anexo 1. Itinerario de las mediciones de *beat* y *loudness*.

<b>Día 1</b>	<b>Día 2</b>	<b>Día 3</b>
Entrenamiento Primer Carrier con primera frecuencia de Beating. Tono Superior Fijo.	Medición del Primer Carrier con primera frecuencia de Beating. Tono Superior Fijo.	Medición del Tercer Carrier con primera frecuencia de Beating. Tono Superior Fijo.
Entrenamiento Primer Carrier con segunda frecuencia de Beating. Tono Superior Fijo.	Medición del Primer Carrier con segunda frecuencia de Beating. Tono Superior Fijo.	Medición del Tercer Carrier con segunda frecuencia de Beating. Tono Superior Fijo.
Entrenamiento Primer Carrier con tercera frecuencia de Beating. Tono Superior Fijo.	Medición del Primer Carrier con tercera frecuencia de Beating. Tono Superior Fijo.	Medición del Tercer Carrier con tercera frecuencia de Beating. Tono Superior Fijo.
	Medición del Primer Carrier con cuarta frecuencia de Beating. Tono Superior Fijo.	Medición del Tercer Carrier con cuarta frecuencia de Beating. Tono Superior Fijo.
<b><i>Descanso de 3 minutos.</i></b>		
Entrenamiento Primer Carrier con primera frecuencia de Beating. Tono Inferior Fijo.	Medición del Primer Carrier con primera frecuencia de Beating. Tono Inferior Fijo.	Medición del Tercer Carrier con primera frecuencia de Beating. Tono Inferior Fijo.
Entrenamiento Primer Carrier con segunda frecuencia de Beating. Tono Inferior Fijo.	Medición del Primer Carrier con segunda frecuencia de Beating. Tono Inferior Fijo.	Medición del Tercer Carrier con segunda frecuencia de Beating. Tono Inferior Fijo.

Entrenamiento Primer Carrier con tercera frecuencia de Beating. Tono Inferior Fijo.	Medición del Primer Carrier con tercera frecuencia de Beating. Tono Inferior Fijo.	Medición del Tercer Carrier con tercera frecuencia de Beating. Tono Inferior Fijo.
	Medición del Primer Carrier con cuarta frecuencia de Beating. Tono Inferior Fijo.	Medición del Tercer Carrier con cuarta frecuencia de Beating. Tono Inferior Fijo.
<b><i>Descanso de 10 Minutos.</i></b>		
Medición de Entrenamiento Loudness del Primer Carrier con primera frecuencia.	Medición de Loudness del Primer Carrier con primera frecuencia.	Medición de Loudness del Tercer Carrier con primera frecuencia.
Medición de Entrenamiento Loudness del Primer Carrier con segunda frecuencia.	Medición de Loudness del Primer Carrier con segunda frecuencia.	Medición de Loudness del Tercer Carrier con segunda frecuencia.
Medición de Entrenamiento Loudness del Primer Carrier con tercera frecuencia.	Medición de Loudness del Primer Carrier con tercera frecuencia.	Medición de Loudness del Tercer Carrier con tercera frecuencia.
	Medición de Loudness del Primer Carrier con cuarta frecuencia.	Medición de Loudness del Tercer Carrier con cuarta frecuencia.
<b><i>Descanso de 3 minutos.</i></b>		

Medición de Entrenamiento Loudness del Primer Carrier con primera frecuencia.	Medición de Loudness del Primer Carrier con primera frecuencia.	Medición de Loudness del Tercer Carrier con primera frecuencia.
Medición de Entrenamiento Loudness del Primer Carrier con segunda frecuencia.	Medición de Loudness del Primer Carrier con segunda frecuencia.	Medición de Loudness del Tercer Carrier con segunda frecuencia.
Medición de Entrenamiento Loudness del Primer Carrier con tercera frecuencia.	Medición de Loudness del Primer Carrier con tercera frecuencia.	Medición de Loudness del Tercer Carrier con tercera frecuencia.
	Medición de Loudness del Primer Carrier con cuarta frecuencia.	Medición de Loudness del Tercer Carrier con cuarta frecuencia.
<b><i>Descanso de 3 minutos.</i></b>		
	Medición de Loudness del Primer Carrier con primera frecuencia.	Medición de Loudness del Tercer Carrier con primera frecuencia.
	Medición de Loudness del Primer Carrier con segunda frecuencia.	Medición de Loudness del Tercer Carrier con segunda frecuencia.
	Medición de Loudness del Primer Carrier con tercera frecuencia.	Medición de Loudness del Tercer Carrier con tercera frecuencia.

	Medición de Loudness del Primer Carrier con cuarta frecuencia.	Medición de Loudness del Tercer Carrier con cuarta frecuencia.
--	--	--

**DESCANSO de 10 a 15 MINUTOS (ENTRE CARRIER Y CARRIER)**

	Medición del Segundo Carrier con primera frecuencia de Beating. Tono Superior Fijo.	Medición del Cuarto Carrier con primera frecuencia de Beating. Tono Superior Fijo.
	Medición del Segundo Carrier con segunda frecuencia de Beating. Tono Superior Fijo.	Medición del Cuarto Carrier con segunda frecuencia de Beating. Tono Superior Fijo.
	Medición del Segundo Carrier con tercera frecuencia de Beating. Tono Superior Fijo.	Medición del Cuarto Carrier con tercera frecuencia de Beating. Tono Superior Fijo.
	Medición del Segundo Carrier con cuarta frecuencia de Beating. Tono Superior Fijo.	Medición del Cuarto Carrier con cuarta frecuencia de Beating. Tono Superior Fijo.

**Descanso de 3 minutos.**

	Medición del Segundo Carrier con primera frecuencia de Beating. Tono Inferior Fijo.	Medición del Cuarto Carrier con primera frecuencia de Beating. Tono Inferior Fijo.
	Medición del Segundo Carrier con segunda	Medición del Cuarto Carrier con segunda

	frecuencia de Beating. Tono Inferior Fijo.	frecuencia de Beating. Tono Inferior Fijo.
	Medición del Segundo Carrier con tercera frecuencia de Beating. Tono Inferior Fijo.	Medición del Cuarto Carrier con tercera frecuencia de Beating. Tono Inferior Fijo.
	Medición del Segundo Carrier con cuarta frecuencia de Beating. Tono Inferior Fijo.	Medición del Cuarto Carrier con cuarta frecuencia de Beating. Tono Inferior Fijo.
<b><i>Descanso de 10 minutos.</i></b>		
	Medición de Loudness del Segundo Carrier con primera frecuencia.	Medición de Loudness del Segundo Carrier con primera frecuencia.
	Medición de Loudness del Segundo Carrier con segunda frecuencia.	Medición de Loudness del Segundo Carrier con segunda frecuencia.
	Medición de Loudness del Segundo Carrier con tercera frecuencia.	Medición de Loudness del Segundo Carrier con tercera frecuencia.
	Medición de Loudness del Segundo Carrier con cuarta frecuencia.	Medición de Loudness del Segundo Carrier con cuarta frecuencia.
<b><i>Descanso de 3 minutos.</i></b>		
	Medición de Loudness del Segundo Carrier con primera frecuencia.	Medición de Loudness del Segundo Carrier con primera frecuencia.

	Medición de Loudness del Segundo Carrier con segunda frecuencia.	Medición de Loudness del Segundo Carrier con segunda frecuencia.
	Medición de Loudness del Segundo Carrier con tercera frecuencia.	Medición de Loudness del Segundo Carrier con tercera frecuencia.
	Medición de Loudness del Segundo Carrier con cuarta frecuencia.	Medición de Loudness del Segundo Carrier con cuarta frecuencia.
<b><i>Descanso de 3 minutos.</i></b>		
	Medición de Loudness del Segundo Carrier con primera frecuencia.	Medición de Loudness del Cuarto Carrier con primera frecuencia.
	Medición de Loudness del Segundo Carrier con segunda frecuencia.	Medición de Loudness del Cuarto Carrier con segunda frecuencia.
	Medición de Loudness del Segundo Carrier con tercera frecuencia.	Medición de Loudness del Cuarto Carrier con tercera frecuencia.
	Medición de Loudness del Segundo Carrier con cuarta frecuencia.	Medición de Loudness del Cuarto Carrier con cuarta frecuencia.

## Anexo 2. Extracto del código en MATLAB para graficar los resultados de *beat*.

```
nsubs=Subjects;
BeatFr= [1 2 5 12];
DatosBeat40= zeros(1,4);
DatosBeat63= zeros(1,4);
DatosBeat80= zeros(1,4);
DatosBeat1000= zeros(1,4);

difere=(Delta1S+Delta2S)/2;
ResultadosDelta=zeros(4,4);
DesviacionesStandardDelta=zeros(4,4);

for i=1:4
    Resultados(i,:)=reshape(mean(difere(:,i,:)),1,[]);
    DesviacionesStandardDelta(i,:)=reshape(std(difere(:,i,:)),1,[]);
end

%%

figure
subplot(1,4,1);
errorbar(BeatFr,Resultados(1,:),DesviacionesStandardDelta(1,:), 'k', 'linewidth',1.5)
ylim([-3 12])
xlim([0,13])
xticks([1 2 5 12])
xlabel('Frecuencia de beat (Hz)')
ylabel('Delta promedio (dB)')
title(['Carrier = 40 Hz'])
grid
hold on

subplot(1,4,2);
errorbar(BeatFr,Resultados(2,:),DesviacionesStandardDelta(2,:), 'k', 'linewidth',1.5)
```

Anexo 3. Extracto del código en MATLAB para graficar los resultados de *beat* vs los deltas de la METF.

```
nsubs=Subjects;
BeatFr= [1 2 5 12];
DatosBeat40= zeros(1,4);
DatosBeat63= zeros(1,4);
DatosBeat80= zeros(1,4);
DatosBeat1000= zeros(1,4);

difere=(Delta1S+Delta2S)/2;
ResultadosDelta=zeros(4,4);
DesviacionesStandardDelta=zeros(4,4);

for i=1:4
    Resultados(i,:)=reshape(mean(difere(:,i,:)),1,[]);
    DesviacionesStandardDelta(i,:)=reshape(std(difere(:,i,:)),1,[]);
end

Case=40;
MET1=zeros(1,length(BeatFr));
for i=1:length(BeatFr)
    beat=BeatFr(i);
    MET1(i)=GetDeltaL(Case-beat/2,Case+beat/2);
end

Case=63;
MET2=zeros(1,length(BeatFr));
for i=1:length(BeatFr)
    beat=BeatFr(i);
    MET2(i)=GetDeltaL(Case-beat/2,Case+beat/2);
end

Case=80;
```

Anexo 4. Extracto del código en MATLAB para graficar los resultados de *loudness*.

```
% Means Analysis
gdata40=reshape(MeanSubjects(:,1,:),nsubs,nbeatfr)';
gdata63=reshape(MeanSubjects(:,2,:),nsubs,nbeatfr)';
gdata80=reshape(MeanSubjects(:,3,:),nsubs,nbeatfr)';
gdata1000=reshape(MeanSubjects(:,4,:),nsubs,nbeatfr)';

figure
diffs=10;
diffsd=5;
mgdata=[];
subplot(141)
gdata=reshape(MeanSubjects(:,1,:),nsubs,nbeatfr)';
semilogx(BeatFr,gdata-RMSsp(1),'Color', [0.85 0.85 0.85],'linewidth',0.1)
hold on
errorbar(BeatFr,(mean(gdata))-RMSsp(1),mean(reshape(StdSubjects(:,1,:),nsubs,nbeatfr)), 'k', 'linewidth',1.5)
hold on
%semilogx(linspace(10^-0.2,20,20),zeros(20),)
ylim([-diffsd,diffs])
xlim([0,13])
xticks([1 2 5 12])
yticks([-5 -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10])
title('Carrier= 40 Hz')
xlabel('Frecuencia de Beat (Hz)')
ylabel('Diferencia requerida para igual sonoridad (LDEL)')
hold on
grid
% Legends
h = zeros(2, 1);
h(1) = plot(NaN,NaN,'-','Color',[0.85 0.85 0.85]);
h(2) = plot(NaN,NaN,'-k');
```

Anexo 5. Extracto del código en MATLAB para aplicación de criterios de exclusión.

```
%%  
% CRITERIOS DE EXCLUSION  
  
% CASO 1  
  
Df=Delta1S-Delta2S;  
excludedcaso1=[];  
oksubjaso1=[];  
  
boxplot(reshape(Df(:,:,:),1,[]))  
  
for s=1:nsubs  
    desvindv=reshape(Df(s,::),1,[]);  
    l1=length(find(desvindv <= -7.9));  
    l2=length(find(desvindv >= 8.7));  
  
    if (l1>0) || (l2>0)  
        excludedcaso1=[excludedcaso1 s];  
    else  
        oksubjaso1=[oksubjaso1 s];  
    end  
end  
excaso1=Subjects(excludedcaso1);  
Subjectscaso1=Subjects(oksubjaso1);  
%% CASO 2  
Df=Delta1S-Delta2S;  
BeatDf=zeros(1,nsubs);  
excludedcaso2N=[];  
oksubjaso2N=[];  
tol=3;  
for s=1:nsubs
```

Anexo 6. Extracto del código en MATLAB para reproducción de tonos individuales a *full scale* y graficación de las curvas de respuesta en frecuencia.

```
f=200;
T=20;
Fs=48000;
t=0:(1/Fs):T;
x=0.999*sin(2*pi*f*t)';
playbuffer(:,9)=x; %Playback vector
i=pawavplaya(playbuffer,0,48000,9,9,960000,0);

%% Cargar Calibracion REF

Fs=48000;
T=0.2; %In seconds
nprom=100;
NSamples=9600; %Min_Freq=5

load('/Users/macuser/Documents/MATLAB/Loudness_AM sounds/DatosProbeCheck');
% load('DatosProbeCheck');
%load('DatosUmbral_LF');
% FS_calibracion=(20*log10(abs(H_TT))-20*log10(abs(H_TT(round(20/MIN_FREQ)+1))))+max_level_DT);
N = length(FS_calibracion);
f = (0:N/2)*Fs/N ;
C = str2double(AT_calib);
f = f(1:200/5+1);
FS_calibracion = FS_calibracion(1:200/5+1);
ffr = (f(1):0.1:f(end));
Fs_dense = interp1(f,FS_calibracion,ffr);

f=[10 12.5 16 20 25 31.5 40 50 63 80 100 125 160 200];
s=[120.9 121.4 122.3 123.4 124.6 125.1 123.3 121 118.8 117 116.5 115.7 111.2 113.3];

xintp=(10:0.5:200);
si=interp1(f,s,xintp,'spline');
```

Anexo 7. Extracto del código en MATLAB para medición de distorsión armónica con un NPS como dato de entrada.

```
function [HD_results] = Harmonic_Dist_LVL(LVL,Freq,nharmonics,Plot_and_SaveFIG)

    Fs=48000;
    T=0.2; %In seconds
    nprom=100;
    NSamples=9600; %Min_Freq=5

    load('C:\Experimentos\MATLAB\Loudness_AM sounds\DatosProbeCheck');
    % load('DatosProbeCheck');
    load('DatosUmbra_LF');
    % FS_calibracion=(20*log10(abs(H_TT))-20*log10(abs(H_TT(round(20/MIN_FREQ)+1)))+max_level_DT);
    N = length(FS_calibracion);
    f = (0:N/2)*Fs/N ;
    C = str2double(AT_calib);
    f = f(1:200/5+1);
    FS_calibracion = FS_calibracion(1:200/5+1);
    ffr =(f(1):0.1:f(end));
    Fs_dense = interp1(f,FS_calibracion,ffr);

    HD_results=zeros(1,nharmonics+1);
    f0=Freq;
    FullScaleSPL=Fs_dense(ffr==f0);
    HarmonicsLevel=zeros(1,nharmonics+1);

    % Background Noise Recording INITIAL
    NoiseT=21;
    repetitions=3;
    NoiseRecordings=zeros(repetitions*2,Fs*(NoiseT-1));
    mags_Noise=zeros(repetitions*2,Fs*(NoiseT-1));
    for ns=1:repetitions
        inputbuffer=pawavplaya(0,0,Fs,11,11,Fs*NoiseT,0);
```

Anexo 8. Tablas de los resultados de prueba de comparación múltiple para los resultados de *loudness* de cada frecuencia carrier.

Prueba de comparación múltiple Carrier = 40 Hz					
Condición 1	Condición 2	Intervalo de confianza inferior	Estimación	Intervalo de confianza superior	Valor-p
1 Hz	2 Hz	-0,7209	0,5833	1,8876	0,6470
1 Hz	5 Hz	-2,4882	-1,1839	0,1204	0,0891
1 Hz	12 Hz	-4,0723	-2,7681	-1,4638	1,61E-06
2 Hz	5 Hz	-3,0715	-1,7672	-0,4630	0,0034
2 Hz	12 Hz	-4,6557	-3,3514	-2,0471	1,25E-08
5 Hz	12 Hz	-2,8884	-1,5842	-0,2799	0,0107

Prueba de comparación múltiple Carrier = 63 Hz					
Condición 1	Condición 2	Intervalo de confianza inferior	Estimación	Intervalo de confianza superior	Valor-p
1 Hz	2 Hz	-0,7361	0,4992	1,7344	0,7161
1 Hz	5 Hz	-2,0375	-0,8022	0,4330	0,3299
1 Hz	12 Hz	-2,9111	-1,6758	-0,4406	0,0034
2 Hz	5 Hz	-2,5366	-1,3014	-0,0661	0,0349
2 Hz	12 Hz	-3,4102	-2,1750	-0,9398	7,64E-05
5 Hz	12 Hz	-2,1089	-0,8736	0,3616	0,2567

Prueba de comparación múltiple Carrier = 80 Hz					
Condición 1	Condición 2	Intervalo de confianza inferior	Estimación	Intervalo de confianza superior	Valor-p
1 Hz	2 Hz	-0,7412	0,3081	1,3573	0,8686
1 Hz	5 Hz	-1,8634	-0,8142	0,2351	0,1845
1 Hz	12 Hz	-2,5076	-1,4583	-0,4091	0,0025
2 Hz	5 Hz	-2,1715	-1,1222	-0,0730	0,0312
2 Hz	12 Hz	-2,8157	-1,7664	-0,7171	1,66E-04
5 Hz	12 Hz	-1,6934	-0,6442	0,4051	0,3801

Prueba de comparación múltiple Carrier = 1000 Hz					
Condición 1	Condición 2	Intervalo de confianza inferior	Estimación	Intervalo de confianza superior	Valor-p
1 Hz	2 Hz	-1,5021	0,0944	1,6910	0,9987
1 Hz	5 Hz	-3,0382	-1,4417	0,1549	0,0917
1 Hz	12 Hz	-4,5524	-2,9558	-1,3593	3,01E-05
2 Hz	5 Hz	-3,1327	-1,5361	0,0605	0,0638
2 Hz	12 Hz	-4,6468	-3,0503	-1,4537	1,61E-05
5 Hz	12 Hz	-3,1107	-1,5142	0,0824	0,0696

