



FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS APLICADAS

EVALUACIÓN DE PROTECTORES AUDITIVOS MEDIANTE UN SISTEMA
DE ESCUCHA BINAURAL ARTIFICIAL

AUTOR

Cristhian Daniel Espín Ipiales

AÑO

2019



FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS APLICADAS

EVALUACIÓN DE PROTECTORES AUDITIVOS MEDIANTE UN SISTEMA DE
ESCUCHA BINAURAL ARTIFICIAL

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

Profesor Guía
M. Sc. Miguel Ángel Chávez Avilés

Autor
Cristhian Daniel Espín Ipiales

Año
2019

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

"Declaro haber dirigido el trabajo, Evaluación de protectores auditivos mediante un sistema de escucha binaural artificial, a través de reuniones periódicas con el estudiante Cristhian Daniel Espín Ipiales, en el semestre 201910, 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".

Miguel Ángel Chávez Avilés

Master of science in Sustainable building engineering

CI: 1710724848

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

"Declaro haber revisado este trabajo, Evaluación de protectores auditivos mediante un sistema de escucha binaural artificial, de Cristhian Daniel Espín Ipiales, en el semestre 201910, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación".

Daniel Alejandro Núñez Solano
Master of science in engineering acoustics
CI: 1716430911

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

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

Cristhian Daniel Espín Ipiales

CI: 1723209878

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirme llegar al final de este camino, que a pesar de las adversidades, siempre me ha ayudado a seguir adelante. A mis padres y familia por estar acompañándome. A mis docentes y amigos con los que hemos compartidos grandes experiencias.

DEDICATORIA

Este trabajo es la representación de un esfuerzo que no todos conocen, y quiero dedicarlo a Dios por llegar hasta aquí.

RESUMEN

El presente trabajo de titulación muestra la evaluación de protectores auditivos mediante un sistema de escucha binaural, Dummy Head. Donde se encontrarán números simplificados de atenuación de los protectores auditivos evaluados.

Este procedimiento se realiza en un salón difuso, en donde se coloca una fuente omnidireccional y el dummy head para tomar muestras sin el uso del protector auditivo y muestras con el uso del dispositivo de protección de ruido. La adquisición de las muestras se realiza mediante el software SPECTRA PLUS.

Los resultados muestran que 4 de los 6 protectores auditivos analizados entregan valores del número simplificado de atenuación próximos a los que el fabricante entrega, mientras que los 2 restantes tienen un valor menor al valor que entrega el fabricante. Además, las desviaciones estándar encontradas con el procedimiento son menores debido a que en esta experimentación no se tiene sujetos de prueba.

Concluyendo, en vista de los resultados obtenidos, se puede analizar una relación costo versus beneficio, en donde se determina que a mayor costo del protector auditivo, mayor protección auditiva se obtiene. Además, en su mayoría, los protectores auditivos analizados tienen valores reales de atenuación, y como un factor para que este valor disminuya en el uso del dispositivo de reducción de ruido, es la colocación del mismo en la cabeza.

ABSTRACT

The present degree work shows the evaluation of hearing protectors through a binaural listening system, Dummy Head. Where you will find simplified attenuation numbers of hearing protectors evaluated.

This procedure is performed in a diffuse room, where an omnidirectional source and the dummy head are placed to take samples without the use of the hearing protector and samples with the use of the noise protection device. The samples are acquired using the SPECTRA PLUS software.

The results show that 4 of the 6 hearing protectors analyzed provide values of the simplified attenuation number next to those that the manufacturer delivers, while the remaining 2 have a value lower than the value delivered by the manufacturer. In addition, the standard deviations found with the procedure are lower because in this experiment there are no test subjects.

Finally, in view of the results obtained, a cost versus benefit relationship can be analyzed, where it is determined that the higher the hearing protector cost, the greater the hearing protection is obtained. In addition, for the most part, the hearing protectors analyzed have real attenuation values, and as a factor for this value to decrease in the use of the noise reduction device, it is the placement of the same in the head.

ÍNDICE

1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Marco Referencial	4
1.3. Hipótesis.....	4
1.4. Alcance	5
1.5. Justificación	5
1.6. Objetivos.....	5
1.6.1. Objetivo General.....	5
1.6.2. Objetivos Específicos	6
2. Marco teórico.....	6
2.1. Protectores Auditivos.....	6
2.1.1. Funcionamiento	7
2.1.2. Tipos de protectores auditivos	8
2.2. Atenuación de Ruido	11
2.2.1. Números Simplificados para Atenuación del protector auditivo	12
2.2.2. APVF	16
2.3. Sistema de escucha Binaural artificial.....	17
2.3.1. Dummy Head.....	17
3. Metodología	18
3.1. Equipamiento y diagrama de conexión	19
3.2. Protectores Auditivos.....	19
3.3. Lugar de medición.....	21
3.4. Procedimiento	22
3.4.1. Ubicación de la fuente y receptor.	23

3.4.2. Calibración del sistema de grabación.....	25
3.4.3. Medición	29
3.5. Cálculo de atenuación de los protectores auditivos analizados.....	30
4. Resultados.....	30
4.1. Resultados Individuales de cada protector auditivo analizado.....	30
4.1.1. Truper 14257	30
4.1.2. Climax 10.....	31
4.1.3. 3M Peltor Optime III.....	33
4.1.4. 3M Peltor Optime 98.....	34
4.1.5. Howard Leight L3.....	36
4.1.6. Climax 14.....	38
4.2. Comparativa de atenuación media y desviación estándar de cada protector auditivo analizado con los datos del fabricante.....	39
4.2.1. Truper 14257	39
4.2.2. Climax 10.....	40
4.2.3. 3M Peltor Optime III.....	42
4.2.4. 3M Peltor Optime 98.....	44
4.2.5. Howard Leight L3.....	46
4.2.6. Climax 14.....	48
4.3. Resultados Finales.....	49
5. Conclusiones	57
Referencias.....	59
Anexos	62

1. Introducción

1.1. Antecedentes

La evaluación de protectores auditivos ha venido dándose durante varios años y por varios métodos. El obtener resultados reales sobre la atenuación que ofrecen los protectores auditivos es uno de los estudios más realizados sobre estos dispositivos de protección.

Biabani et al. en el 2017, estudiaron la tasa real de reducción de ruido de los dispositivos actuales de protección auditiva en lugares de trabajo, utilizando un micrófono de campo en el oído, conocido como el método FMIRE. Donde como resultado obtuvieron que independientemente del tipo de exposición al ruido, los valores reales de atenuación para orejeras en una frecuencia de banda de octava fueron menores que los valores nominales de los mismos.

Además, otro estudio indica resultados de evaluación de reducción sonora en protectores auditivos, mediante un método denominado MIRE, método de prueba de ajuste objetivo con un micrófono en el oído real. Aquí, se investigaron cinco protectores de orejeras comercialmente disponibles en 30 trabajadores expuestos a la fuente de ruido de referencia de acuerdo con el método estándar, ISO 11904-1, usando un dosímetro de ruido. Los aspectos ergonómicos de las orejeras y los diferentes niveles de experiencia y concientización de los usuarios pueden considerarse los principales factores que afectan la adaptación individual en comparación con la condición de laboratorio para adquirir los datos de atenuación de ruido. Con base en los resultados de las pruebas de ajuste obtenidas, la aplicación de campo de MIRE puede emplearse para estudios complementarios en estaciones de trabajo reales mientras los trabajadores realizan sus tareas de trabajo regulares (Biabani et al., 2017).

Por otra parte, Kozłowski y Młyński en el 2017 realizaron estudios para obtener valores de la atenuación del ruido con 27 modelos de orejeras comúnmente usados en las bandas de 1/3 de octava en alta frecuencia. (10, 12.5 y 16 kHz), mediante el método REAT, método de oreja real al umbral.

Almeida-Agurto, et al. en el 2011, realizaron la medición de atenuación de ruido de protectores auditivos por el método MIRE, en donde se implementa la pérdida de inserción (IL), en el que IL se mide utilizando micrófonos en miniatura, especialmente diseñados para cumplir con los estándares ANSI e ISO para la técnica MIRE.

Además, Valentin y Laville en el 2017, presentan una evaluación de protectores auditivos en donde reproducen estímulos de tono puro (500 y 1000 Hz), modulados en amplitud a 40 Hz. a 10 adultos con audición normal a través de auriculares en tres niveles en pasos de 10 dB. En donde se evaluaron dos condiciones: canal auditivo no ocluido y conducto auditivo ocluido. Los datos de amplitud del procedimiento de respuestas estables auditivas como una función del nivel de estimulación se linealizan usando regresiones de mínimos cuadrados. La "atenuación fisiológica" se calcula como la diferencia promedio entre las dos mediciones. La viabilidad técnica de medir la atenuación del tapón auditivo se demuestra para la atenuación media del grupo en los sujetos. Otro método para la evaluación de protectores auditivos llamado el método del umbral, se puede desarrollar con sujetos de prueba, como lo realizó Alam et al. en el 2013. El estudio tomó como muestra las mediciones a un grupo de 10 hombres con una edad media de 20 años con una sensibilidad auditiva normal, los cuales fueron expuestos a ruidos de banda estrecha y ruidos de voz para la medición de los umbrales del campo de sonido en sus oídos como un método de evaluación de protectores auditivos, conocido como el método del umbral.

Audiólogos con experiencia en el tratamiento de músicos fueron encuestados sobre sus servicios en Australia. También, se administró una encuesta a los fabricantes de protectores auditivos para músicos, en donde se pudo evidenciar

que solo un tercio de los audiólogos realizó una audiometría de tonos puros antes del ajuste de los protectores auditivos, lo cual afecta en la selección de la longitud del canal para los fabricantes de protectores auditivos ajustados al músico (McGinnity et al., 2018).

Los métodos más comúnmente utilizados para medir la atenuación de los protectores auditivos se pueden dividir en dos categorías: métodos psicoacústicos (subjetivos) y físicos (objetivos). Para comprender mejor la relación entre estos métodos, Nélisse et al. en el 2015, presentan varios factores que relacionan los valores de atenuación obtenidos con estos métodos a través de una serie de pruebas. Se llevó a cabo experimentos en sujetos donde fueron preparados en ambas orejas con micrófonos en miniatura, por afuera y por debajo del protector auditivo. A continuación, se realizaron una serie de mediciones del umbral de la audición (método psicoacústico), seguidas de grabaciones de sonido de micrófono utilizando ruidos difusos de banda ancha de campo de alto nivel (método físico). El protocolo de prueba propuesto permitió obtener varios factores relacionados con los métodos de prueba, así como los valores de atenuación y clasificaciones para diferentes condiciones de protección (oreja abierta, orejeras, tapones para oídos y protección doble).

A partir de un estudio reciente de los datos de las pruebas de atenuación de protectores auditivos, se presenta un trabajo con una propuesta para reconsiderar cómo los datos reunidos por los procedimientos de una prueba subjetiva estándar reconocido, se utilizan para calcular la calificación de rendimiento de protectores auditivos. El estudio consiste en incorporar el rendimiento esperado (media) y la variación en el rendimiento (desviación estándar) en una sola cifra de calificación. Es deseable que cualquier calificación de rendimiento de protectores auditivos indique claramente el rendimiento que espera el usuario (Williams, 2012).

Teniendo en cuenta los estudios mencionados anteriormente, se evidencia que hasta el momento no se existen estudios que evalúen protectores auditivos

mediante el uso de un sistema de grabación binaural, aunque el método del oído real, se aproxima al método que se propone como proyecto de titulación. El estudio de la atenuación de protectores auditivos con el uso de un sistema de escucha binaural (dummy head) se realizará con grabaciones sin protector auditivo, y otra grabación cuando esté colocado el protector, en donde se evaluará la diferencia de nivel de estas dos muestras para caracterizar la atenuación de nivel que ofrece el dispositivo. El estudio será basado para bandas de octava y se utilizará ruido rosa para las evaluaciones.

1.2. Marco Referencial

El estudio que se realizará en el trabajo de titulación está basado en el uso de un sistema de escucha binaural artificial como una herramienta para la evaluación de protectores auditivos. Para el desarrollo del experimento se utilizará la sala EG1 de la Universidad de las Américas, sede Granados. Aunque en los estudios mencionados en los antecedentes no se habla sobre condiciones de la sala para las mediciones, se prefiere que la misma sea difusa para aproximarnos así a la realidad de una industria.

Según Gerges en 2004, los protectores auditivos a analizarse se pueden dividir en tres tipos:

- Protectores de Inserción del Tipo Moldeables
- Protectores de Inserción del Tipo Pre-moldeados
- Protectores del Tipo Orejera

1.3. Hipótesis

Los valores de atenuación sonora de los protectores auditivos medidos en el sistema de grabación binaural son fiables, como método de validación se muestra que son próximos a los valores que el fabricante entrega en su ficha técnica.

1.4. Alcance

Se realizará un análisis comparativo de los valores de atenuación de ruido que ofrecen 6 protectores auditivos de tipo orejera, mediante el uso de un sistema de escucha binaural. No se utilizará protectores auditivos de inserción debido a la forma del oído externo del Dummy Head, ya que este tipo de protector no se ajusta de manera correcta en el conducto auditivo.

Los análisis y resultados de esta experimentación se harán en bandas de octava desde 125Hz hasta 8kHz, y así comparar con los datos de atenuación sonora que el fabricante entregue, además se realizarán 5 mediciones para cada protector auditivo, para así poder analizar la variación de los resultados obtenidos.

1.5. Justificación

El desarrollo de un nuevo método para la evaluación de protectores auditivos mediante un sistema de grabación binaural, es útil para estudios de protección del sistema auditivo de los seres humanos, en especial cuando es aplicado en el sector industrial. En Ecuador, no se encuentra evidencia sobre medición de atenuación de protectores auditivos, por lo que la implementación de este nuevo método de evaluación resulta innovador en el país, además de no utilizar recursos humanos para la verificación de los mismos, así como de sistemas complejos. Con éste nuevo método, la Universidad de Las Américas podrá realizar estudios de la protección que tiene un trabajador cuando es expuesto a ruidos altos, y si el dispositivo de protección que utiliza es efectivo o no. Además, podría darse paso al desarrollo de una publicación científica con éste nuevo método.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo General

- Evaluar la atenuación sonora de protectores auditivos comerciales tipo orejera mediante un sistema de escucha binaural artificial.

1.6.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar una guía de medición para la atenuación sonora de protectores auditivos tipo orejera mediante el uso de un sistema de grabación binaural.
- Validar los resultados de atenuación sonora obtenidos a través de la comparación del parámetro que el fabricante entregue.

2. Marco teórico

En el presente capítulo, se presenta el fundamento teórico del presente estudio, en donde se abordan los temas necesarios para comprender todo lo relacionado con el tema.

2.1. Protectores Auditivos

Mantenerse al margen de las zonas de ruido, es una de las maneras más eficaces para evitar la pérdida de audición inducida por este factor. Dentro de un ambiente laboral, rediseñar los procesos de fabricación y adecuar acústicamente estos espacios, así reducir el nivel de presión sonora a un nivel menor para evitar pérdidas de audición por ruido y mejorar la comunicación entre los operarios.

Otra manera de disminuir el riesgo de pérdida auditiva por ruido, es reducir el nivel sonoro de la fuente de ruido, mediante el diseño de encierros acústicos, silenciadores o reubicación de la misma.

Los protectores auditivos son la primera y en muchas ocasiones la única manera de prevenir el riesgo de pérdida auditiva por exposición al ruido, y para aumentar su eficacia, se deberían usar el 100% del tiempo (Franks y Berger, 1998).

El uso del protector auditivo, no es el único recurso para prevenir la pérdida de audición por ruido, pero es el único en asegurar el control individual de ruido y el más usado y de fácil acceso (Mello, 1999).

2.1.1. Funcionamiento

El desempeño de un protector auditivo, principalmente depende de características fisiológicas y anatómicas del usuario (Gerges, 2004).

Para un correcto funcionamiento de un protector auditivo, se debe colocar de una manera correcta en el pabellón auricular del usuario, una colocación incorrecta causa filtraciones, disminuyendo la eficacia del protector.

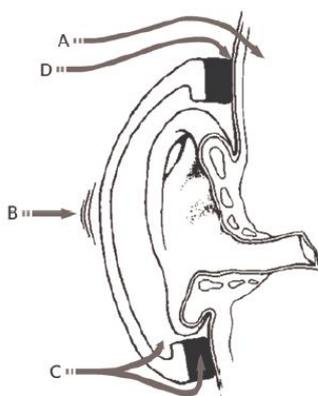


Figura 1. Esquema con los cuatro caminos de transmisión de ruido de un protector auditivo tipo orejera.

Tomado de Gerges, 2014.

Cuando se usa un protector auditivo, la incidencia de ruido, puede llegar por cuatro trayectorias diferentes cuando se usa un protector auditivo que se muestra figura 1.

Donde los cuatro caminos señalados son:

- A. Transmisión vía ósea y tejido.
- B. Vibraciones del protector.
- C. Transmisión a través del material del Protector.
- D. Infiltración a través del contacto.

El protector auditivo actúa como una barrera acústica del ruido para el oído interno. Si nos fijamos en la figura 1, a través de las trayectorias “C” y “D” reduce el ruido. En la trayectoria “C” dependiendo de los materiales utilizados, la reducción es principalmente por el coeficiente de transmisión acústica del material (Gerges, 2004).

A través de la trayectoria “D”, existe una filtración aérea de ruido, dependiendo de la colocación en torno al pabellón auditivo externo, así, la colocación y ajuste correcto del protector auditivo externo viene como un factor de suma importancia para obtener una correcta atenuación sonora de ruido, variando entre 5 a 15 dB el efecto de atenuación (Mello, 1999).

La trayectoria “A” es considerada como un camino de importancia de transmisión de ruido, vía ósea. En promedio, los huesos y tejidos del cuerpo humano producen una atenuación de 40 a 55 dB dependiendo la frecuencia del ruido, por lo que la transmisión ósea es un factor significativo que determina la atenuación total recibida (Gerges, 2004).

Finalmente, en la trayectoria “B”, la transmisión de ruido ocurre debido al aire contenido dentro de la orejera y el material flexible que tiene el protector, el cual está en contacto con la cabeza, formando así un sistema masa resorte, pudiendo ocasionar vibraciones (Gerges, 2004).

2.1.2. Tipos de protectores auditivos

Según Gerges en el 2004 (pp. 480), en la selección de un tipo de protector auditivo, se debe tener en consideración el tipo de ambiente ruidoso, así como otros factores como el confort del usuario, costo, durabilidad, problemas de comunicación, seguridad e higiene.

A continuación se presentan 3 principales tipos de protectores auditivos:

2.1.2.1. Protectores de Inserción del Tipo Moldeables

Los protectores auditivos moldeables son muy utilizados debido a su bajo costo, esto debido a que los materiales usados son algodón parafinado, espuma plástica y tipos especiales de fibra de vidrio. La atenuación que ofrecen depende del tipo de material de fabricación así como la correcta ubicación en el canal auditivo. Los protectores auditivos moldeables con material del tipo especial de fibra de vidrio ofrecen una atenuación comparable a los demás tipos de protectores auditivos, aunque los que son fabricados con espuma polimerizada, cuando se insertan en el canal auditivo se expanden y son bastante eficaces y generalmente más confortables, esto se puede apreciar en la figura 2 (Gerges, 2004).



Figura 2. Protector auditivo tipo Moldeable.

Tomado de 3M. s.f.

2.1.2.2. Protectores de Inserción del Tipo Pre-moldeados

Los protectores auditivos pre moldeados son fabricados con materiales elásticos para que se puedan adaptar a las diversas formas de canales auditivos, como ejemplo se aprecian varios modelos en la figura 3. Estos materiales garantizan que la forma del protector no se altere por un uso prolongado o por la cera del oído, así como por el sudor.

Este tipo de protector auditivo presenta ciertas desventajas a comparación de los otros modelos. Para una correcta atenuación, el protector debe ser

colocado en el canal auditivo de forma firme, lo cual puede quitar confort al usuario. Las irregularidades del canal auditivo en algunas personas, pueden hacer que la inserción firme sea un tanto complejo. Tienen vida limitada, debido a que se suelen lavar continuamente para retirar cera o sudor, por lo que la elasticidad del material se ve afectada (Gerges, 2004).



Figura 3. Protectores auditivos pre moldeados.

Tomado de 3M. s.f.

2.1.2.3. Protectores del Tipo Orejera

Este tipo de protector, es fabricado con material rígido, cubierto con una almohadilla de espuma, para así cubrir por completo el pabellón auricular, esto se puede apreciar en la figura 4.

La atenuación del protector auditivo tipo orejera se relaciona en parte, por la presión que ejerce en la cabeza. Esta presión, dependerá del confort del usuario. Son de gran uso en áreas no limpias y de fácil adaptación a diferentes tipos de oídos (Gerges, 2004).



Figura 4. Protectores auditivos tipo orejera.

Tomado de 3M y Truper. s.f.

2.2. Atenuación de Ruido

La atenuación de ruido, se ve reflejada en la diferencia de niveles recibidos con el uso del protector auditivo y sin el uso del mismo. Además, si se tiene más de una medición de atenuación de ruido para un protector auditivo, se procede a tomar una atenuación media entre todas las mediciones.

Para el cálculo de la atenuación media se toma en cuenta la diferencia de niveles en cada medición y por cada banda de octava.

Para lo cual seguimos la siguiente ecuación (Gerges, 2004):

$$AT_i = LS_i - LC_i \text{ (dB)}$$

Ecuación 1 Atenuación por cada “i-ésima” medición.

Donde:

AT_i es el nivel de atenuación en la medición “i-ésima” (dB).

LS_i es el nivel recibido en el dummy head sin el uso del protector auditivo en la medición “i-ésima” (dB).

LC_i es el nivel recibido en el dummy head con el uso del protector auditivo en la medición “i-ésima” (dB).

La atenuación media por banda de octava “j”, se realiza con un promedio aritmético de las “n-esimas” mediciones de cálculos de atenuación (dB). Debido

a que se espera obtener un promedio de mediciones realizadas para el posterior análisis de desviación estándar, más no una conservación de energía.

$$\overline{AT}_j = \frac{\sum_{i=1}^n AT_i}{n} \text{ (dB)}$$

Ecuación 2 Atenuación media de una banda "J" de frecuencia.

La obtención de la desviación estándar por banda de octava "j", se realiza mediante la desviación típica para obtener la variabilidad de las mediciones, con la siguiente ecuación:

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(AT_i - \overline{AT})^2]}{n - 1}} \text{ (dB)}$$

Ecuación 3 Desviación estándar de una banda "J" de frecuencia.

Con lo descrito anteriormente, obtenemos así un valor de atenuación media y desviación estándar para cada banda de frecuencia.

2.2.1. Números Simplificados para Atenuación del protector auditivo

Para caracterizar la atenuación de ruido que ofrece un protector auditivo se han desarrollado indicadores de un número. En la actualidad, los números simplificados de atenuación de ruido de un protector auditivo más usados son el NNR (Noise Reduction Rating) y el SNR (Single Number Ratio).

A continuación se explica el cálculo de cada uno de estos números únicos:

2.2.1.1. SNR

El método SNR calcula el rendimiento a varios niveles de protección sonora, en donde se estima que una población considerada no va a obtener una atenuación menor a la estimada (NCh 1331/6, 2001).

Según la Nota Técnica de Prevención (NTP) 638 del 2003, el cálculo para el SNR es:

$$SNR = LS(dBC) - LCapvf84 \text{ (dB)}$$

Ecuación 4 SNR

Donde:

$LS(dBC)$ es el nivel total recibido en el dummy head sin el uso del protector auditivo en la medición en ponderación dBC (dBC).

$LCapvf84$ es el nivel total de las “m” bandas de frecuencia, recibidas en el dummy head con el uso del protector auditivo en la medición con un valor de protección asumida (APVF) o confiabilidad del 84% (dBA).

En el SNR, la confianza de resultados de experimentación es del 84%, ya que se asume que los resultados de atenuación tienen una variabilidad y toma en cuenta las diferencias anatómicas que pueden existir en la experimentación (Gerges, 2004).

$$LCapvf84 = 10 * \log \left(\sum_{j=1}^m 10^{(0,1 * LCapvf84_j)} \right) \text{ (dB)}$$

Ecuación 5 Nivel global de las “m” bandas de frecuencia con un valor de protección asumida (APVF) del 84%.

Donde:

$LCapvf84_j$ es el nivel por banda de octava “j-ésima” recibido en el dummy head con el uso del protector auditivo en la medición con un valor de protección asumida (APVF) del 84% (dB).

$$LCapvf84_j = LS_j(dBA) - \overline{AT}_j + \sigma_j \text{ (dBA)}$$

Ecuación 6 Nivel por banda de octava “j-ésima” con un valor de protección asumida (APVF) del 84%.

Donde:

$LS_j(dBA)$ es el nivel por banda de octava “j-ésima” recibido en el dummy head sin el uso del protector auditivo en la medición en ponderación dBA (dBA).

$$LS(dBC) = 10 * \log \left(\sum_{j=1}^m 10^{(0,1*(LS_j - C_j))} \right) \text{ (dBC)}$$

Ecuación 7 Nivel global recibido sin el uso del protector auditivo en la medición en ponderación dBC.

Donde:

LS_j es el nivel de la banda “j-ésima” de octava recibido en el dummy head sin el uso del protector auditivo en la medición (dB).

C_j es la ponderación C de la banda “j-ésima” de octava(dB).

2.2.1.2. NNR

El NNR, ofrece un valor de reducción de ruido, que es la resta de los niveles de presión en ponderación C y el nivel que recibe el usuario utilizando el protector auditivo con ponderación A. Este valor nos indica de una manera resumida el valor de atenuación de un protector auditivo analizado. (Gerges, 2004).

Según Gerges en 2004, el Número único de atenuación (NNR), se calcula de la siguiente manera:

$$NNR = LS(dBC) - LCapvf98 - 3 \text{ (dB)}$$

Ecuación 8 NNR

Donde:

$LS(dBC)$ es el nivel global recibido en el dummy head sin el uso del protector auditivo en la medición en ponderación dBC (dBC).

$LCapvf98$ es el nivel total recibido en el dummy head con el uso del protector auditivo en la medición con un valor de protección asumida (APVF) o confiabilidad del 98% (dBA).

$$LCapvf98 = 10 * \log \left(\sum_{j=1}^m 10^{(0,1*LCapvf98_j)} \right) (dB)$$

Ecuación 9 Nivel global de las “m” bandas de frecuencia con un valor de protección asumida (APVF) del 98%.

Donde:

$LCapvf98_j$ es el nivel total de las “m” bandas de frecuencia, recibidas en el Dummy head con el uso del protector auditivo en la medición con un valor de protección asumida (APVF) del 98%.

En el NNR, la confianza de resultados de experimentación es del 98%, ya que se asume que los resultados de atenuación no son variables y las diferencias anatómicas que pueden existir en la experimentación son menores (Gerges, 2004).

$$LCapvf98_j = LS_j(dBA) - \overline{AT_j} + 2\sigma_j (dBA)$$

Ecuación 10 Nivel por banda de octava “j-ésima” con un valor de protección asumida (APVF) del 98%.

Donde:

$LS_j(dBA)$ es el nivel es el nivel por banda de octava “j-ésima” recibido en el dummy head sin el uso del protector auditivo en la medición en ponderación dBA, especificado en la ecuación 7 (dBA).

2.2.2. APVF

El valor APVf, es un valor de protección asumida para cada banda de octava con un porcentaje de eficacia. Estos valores se determinan a partir de pruebas realizadas en un laboratorio y se asume la protección mínima que tiene un protector auditivo Matemáticamente, es el valor de la atenuación media en dB menos α veces la desviación standard a una frecuencia f , además es un porcentaje de confiabilidad para la atenuación asumida que el protector ofrece (Esselacoustics, 2018).

$$APVf_{x\%} = \overline{AT}_j - (\alpha * \sigma_j) \text{ (dB)}$$

Ecuación 11 Cálculo de APVF para un valor X de eficacia

A continuación se presentan los valores de α para un porcentaje de eficacia conocido:

Tabla 1.

Valores de α para un porcentaje de eficacia, para el cálculo de APVF.

Porcentaje de eficacia	Valor de α
75%	0,67
80%	0,84
84%	1,00
85%	1,04
90%	1,28
95%	1,64
98%	2,00
99,5%	2,58

Adaptado de NTP 638. 2003.

2.3. Sistema de escucha Binaural artificial

Un sistema de escucha binaural, es la emulación de la escucha humana de un sonido o un ambiente sonoro. El resultado es obtener un sonido en donde el oyente sea capaz de identificar la fuente de sonido en 360°, tal como si estuviese en el lugar en donde se grabó dicho audio. Una manera de realizar este tipo de grabaciones binaurales es colocando dos micrófonos omnidireccionales en la misma posición y distancia de nuestros oídos, es decir, separados entre 16 a 21 centímetros, colocando en medio material absorbente para simular la absorción de la cabeza. Aunque la manera más completa y más cercana a la escucha humana, es el uso de un Dummy Head (Johnson, 2011).

2.3.1. Dummy Head

El Dummy Head, es un dispositivo profesional para simular la audición humana, diseñado para resaltar las características espaciales del sonido y registrarlo. Una de las principales características de un Dummy head es el uso de una cabeza artificial que tiene las irregularidades de una cabeza humana, por las que pasa una onda sonora antes de ingresar al sistema auditivo, proporcionando así una recepción sonora en el oído del Dummy head más real a la escucha humana. Lo más importante de un dummy head, es que al tener un diseño de una cabeza artificial y un sistema auditivo externo muy parecido al de un ser humano, la simulación del tímpano son dos micrófonos de condensador omnidireccionales, así registrar las ondas sonoras tal y cual lo haría el tímpano en el sistema auditivo del ser humano (Görne, 2014).

Generalmente, el material de la cabeza artificial es de plástico y en los laterales tiene dos copias de un pabellón auditivo externo, las cuales tienen una cavidad donde las ondas sonoras son conducidas hacia los micrófonos ubicados simulando los tímpanos. Uno de los inconvenientes es el efecto de proximidad de los micrófonos, por lo que se recubren con material poroso para así producir una dilatación en el conducto auditivo, actuando con un silenciador (Rodríguez, 2011).



Figura 5. Corte de un Dummy Head.

Tomado de Neumann. s.f.

Comercialmente, el modelo más completo de Dummy head es el KU100 de la empresa Neumann.



Figura 6. Dummy Head Neumann KU100.

Tomado de Neumann. s.f.

3. Metodología

El desarrollo de este experimento se basa en la medición de atenuación de niveles que ofrecen seis protectores auditivos de tipo orejera mediante el uso de un sistema de escucha binaural, Dummy head.

3.1. Equipamiento y diagrama de conexión

El equipamiento utilizado para la experimentación es el siguiente:

- Fuente omnidireccional CESVA FP122
- Amplificador para fuente omnidireccional CESVA AP602
- Sonómetro CESVA SC310
- Interface de audio Avid Mbox mini
- Dummy head Neumann KU100
- Computador con software Spectra Plus
- Cables de conexión

El diagrama de conexión del equipamiento utilizado, se muestra a continuación:

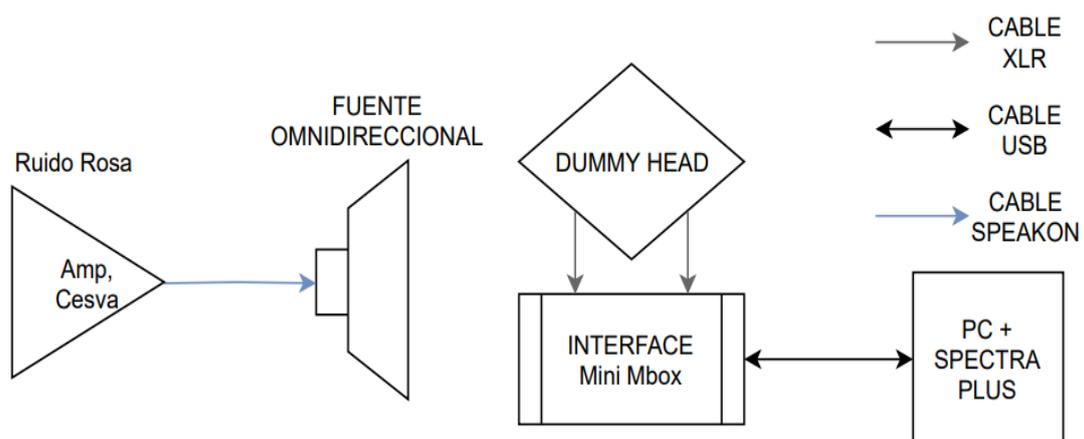


Figura 7. Diagrama de conexión para la obtención de mediciones.

3.2. Protectores Auditivos

A continuación se detallan los protectores auditivos a ser analizados con el número de atenuación que el fabricante entrega, así como su costo estimado.

Tabla 1.

Protectores auditivos utilizados para el estudio.

MARCA	MODELO	ATENUACIÓN ESPECIFICADA	COSTO ESTIMADO	IMAGEN
Truper	142527	NNR = 18dB	\$15,00	
Climax	10	SNR = 23dB	\$15,00	
3M	Peltor Optime III	SNR = 35dB	\$80,00	
3M	Peltor Optime 98	SNR = 31dB	\$70,00	
Howard Leight	L3	NNR = 30dB	\$15,00	
Climax	28	SNR = 23dB	\$12,00	

Adaptado de 3M et al., s.f.

3.3. Lugar de medición

La medición de las atenuaciones de los protectores auditivos evaluados se realizó en la Universidad de las Américas, en la sala EG1. Esto debido a que es la sala que más se aproxima a un campo difuso, que deseamos obtener para asimilar así a una condición de trabajo en donde suelen ser más ocupados los protectores auditivos. La sala tiene paneles móviles en una superficie, los cuales fueron colocados con la superficie de madera para lograr acercarnos más al campo difuso. Para comprobar que tan difusa es la sala, se realizó mediciones de EDT (Early Decay Time) y T60 (Tiempo de reverberación), con dos posiciones de emisión y 3 de recepción para cada punto de emisión, de acuerdo a la normativa ISO 3382-2008 (Método de Ingeniería). En el Anexo 1 se adjunta las posiciones de medición. Como se muestra en la figura 8, se obtuvo que estos valores son próximos, dándonos a entender que la sala si tiene una buena difusividad, en especial en altas frecuencias. Mientras que la tabla 3 nos indica valores globales de EDT y T60, en donde se aprecia una diferencia de 0,01 segundos, indicándonos que la sala puede asumirse como difusa, debido a la diferencia mínima que existe entre los parámetros anteriormente mencionados.

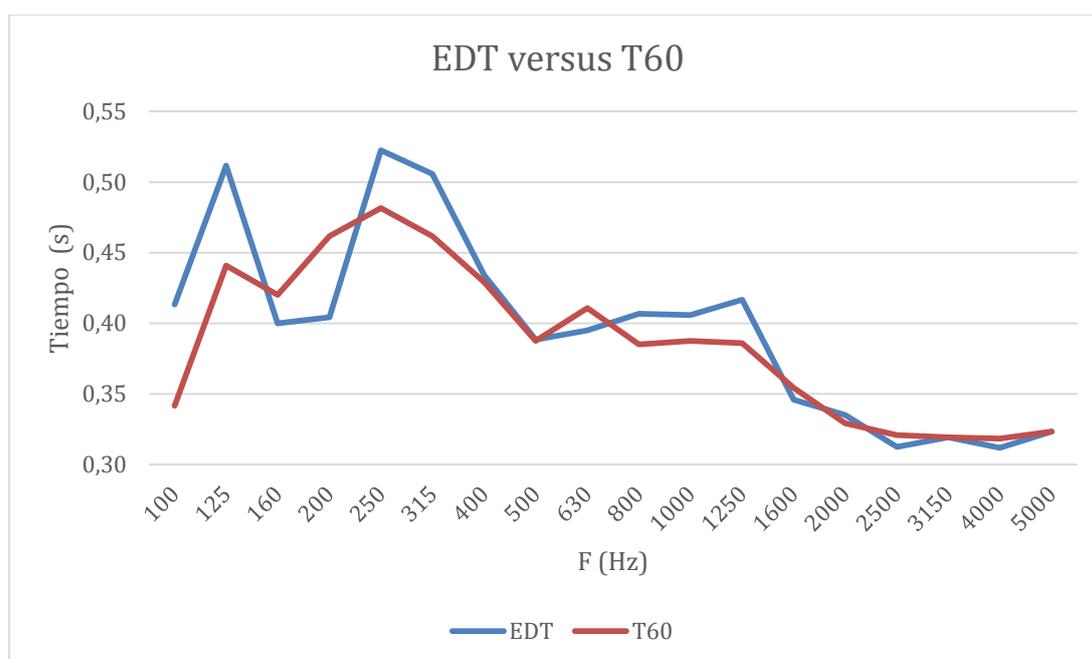


Figura 8. EDT versus T60. Verificación de difusividad de la sala EG1.

Tabla 2.

Valores globales de EDT y T60 de la sala de medición.

EDT VS. T60	t(s)
EDT	0,4
T60	0,39
Diferencia	0,01

La sala EG1, tiene una sala interna (LA1), la cual no se utiliza ya que el estudio se realiza en la parte exterior donde se cumplen las condiciones de difusividad esperada. Además, el volumen de la sala EG1 es de 100m^3 y en la figura 9 se detallan las medidas de la sala, considerando que tiene 2m de altura:

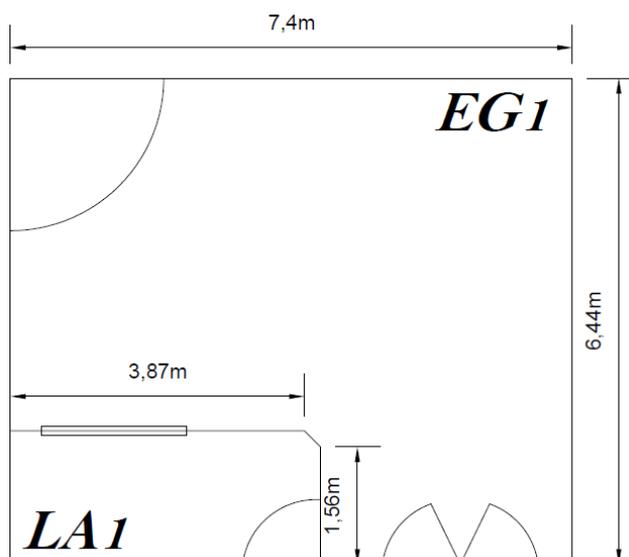


Figura 9. Plano del lugar de medición.

3.4. Procedimiento

Antes de empezar con la experimentación, se procedió a obtener una buena señal a ruido, para que el ruido de fondo no se vea mezclado con las mediciones.

En los siguientes puntos, se detalla el procedimiento para realizar la evaluación de los protectores auditivos mencionados.

3.4.1. Ubicación de la fuente y receptor.

La ubicación del equipamiento se realizó tomando en cuenta dos condiciones, las cuales son basadas en condiciones de ensayos en espacios cerrados de normativas ISO.

- Separación entre la fuente y el receptor de al menos 2 metros.
- Separación de la fuente y el receptor de las superficies de al menos 1 metro.

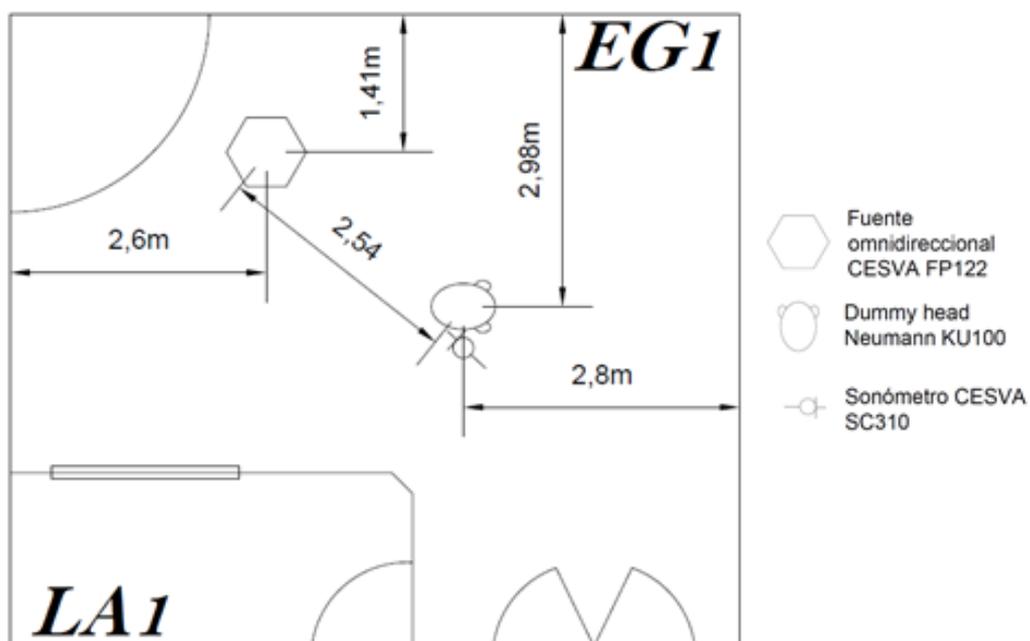


Figura 10. Ubicación de fuente y receptor en el lugar de medición.

Además, la figura 11 y la figura 12 son fotografías de referencia de las mediciones.



Figura 11. Medición sin protector auditivo.

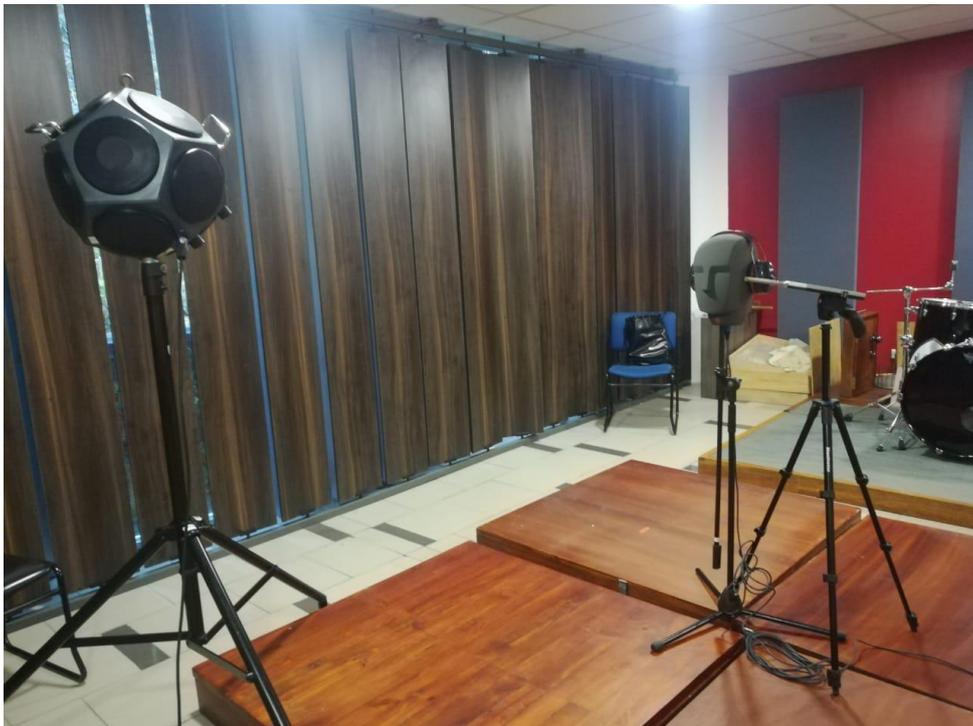


Figura 12. Medición con protector auditivo.

3.4.2. Calibración del sistema de grabación.

El sistema de grabación se lo realizó con el Software SPECTRA PLUS SC, por la facilidad de adquisición de este software, el cual funciona como un analizador de espectro en tiempo real, además de ofrecer mediciones de canal doble con un generador de señales, así como dos opciones de funcionamiento, en tiempo real o como grabación para su posterior análisis. Se puede utilizar cualquier software de medición que tenga las descripciones mencionadas anteriormente y que pueda configurarse los parámetros que se detallan a continuación:

1. Configuración de la medición en el software

En la pestaña de OPTIONS, ventana SETTINGS, configuramos la frecuencia de muestreo a 48000Hz con una definición de 24 bits, debido a que es un estándar de trabajo profesional, obteniendo así audios con más muestras y mejor definición en altas frecuencias. Además, configuramos que la medición sea un promedio de la oreja izquierda y derecha del Dummy Head.

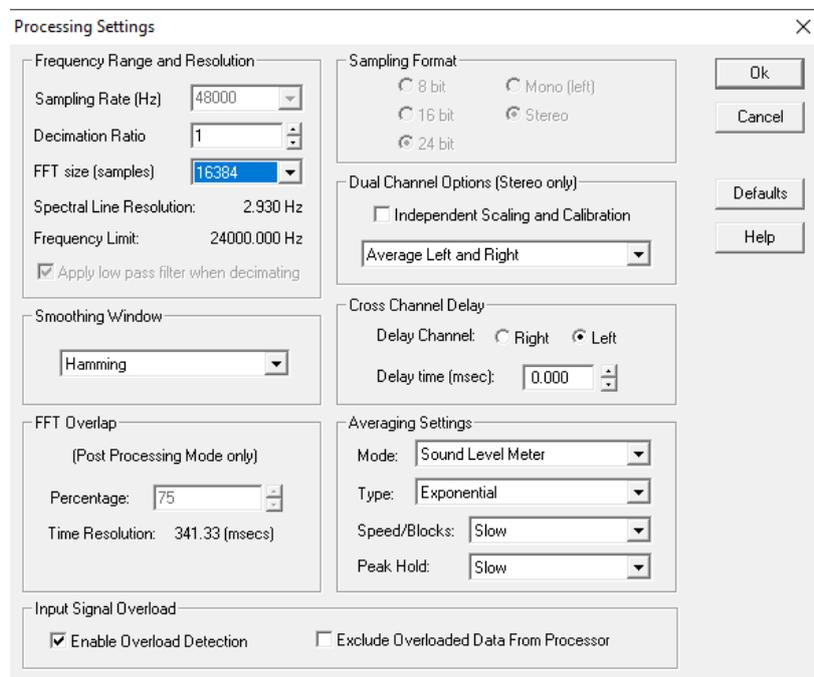


Figura 13. Configuración del software de medición.

2. Calibración del Sistema.

Se conecta el Dummy Head a la interface, en donde se activa la alimentación fantasma de 48v para poder polarizar los micrófonos de la cabeza artificial. Después, se genera ruido rosa en la fuente omnidireccional, para obtener niveles iguales en el espectro de frecuencia deseado. Después, se procede a medir con el sonómetro el nivel de presión sonora en donde se encuentra ubicado el Dummy Head, obteniendo un nivel de señal que se utiliza para calibrar el nivel de entrada al software en la pestaña de OPTIONS, ventana CALIBRATION, en donde se define que la unidad de medición es “SPL dB (in air)” y que el nivel obtenido es RMS, procediendo a ajustar el nivel de ganancia en los pre amplificadores de la interface al mismo nivel, sin que la señal sature en el software. Así, se presiona el botón “Measure Input Signal”, para obtener la medición del Dummy head en ese instante. Finalmente, colocamos el valor que nos muestre el sonómetro en la casilla “Level”, para calibrar los niveles que ingresan al software.

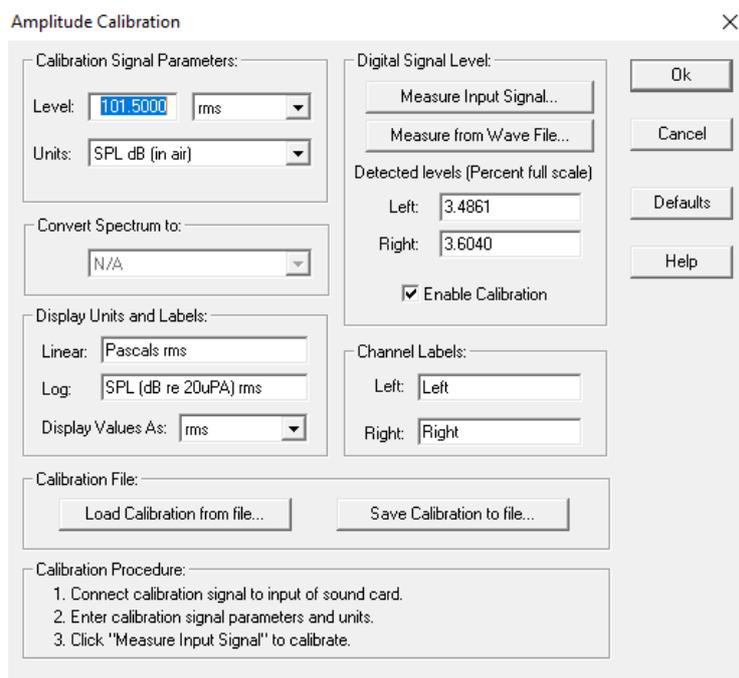


Figura 14. Calibración de la señal de entrada en el software de medición.

3. Definición de la escala de medición.

Para la medición se ocupa un filtro de bandas de octava, por lo que entramos a la pestaña de OPTIONS, ventana SCALING, y seleccionamos el filtro de “1/1 octave”, sin seleccionar ningún tipo de ponderación.

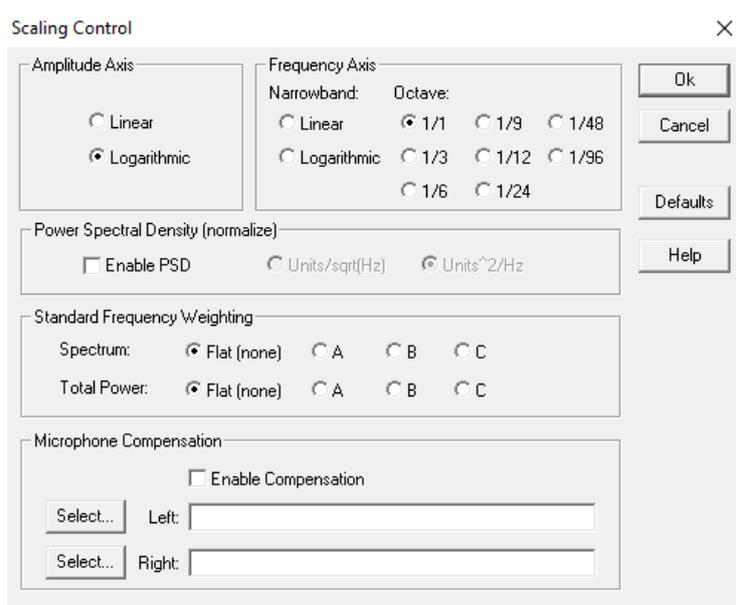


Figura 15. Configuración de la escala de medición en el software de medición.

4. Tiempo de medición

Para obtener un nivel de medición, estable, procedemos a configurar que el tiempo de medición sea de 15 segundos, que de acuerdo a otro tipo de mediciones en espacio cerrado especificados en normativas ISO, es el tiempo suficiente para que la medición se estabilice. Para ello, entramos en la pestaña FILE, opción “File I/O Options”.

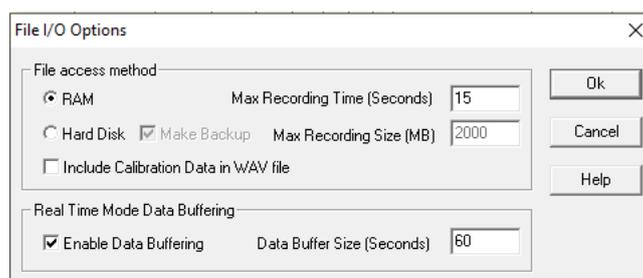


Figura 16. Calibración del tiempo de medición en el software de medición.

5. Modo de funcionamiento del software SPECTRA PLUS SC

Con el objetivo de obtener resultados verificables, usamos el modo “RECORDER”, en donde podremos grabar cada medición en formato “.wav”

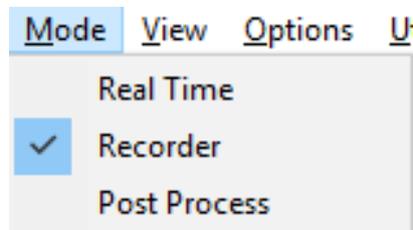


Figura 17. Configuración del modo de funcionamiento del software de medición.

6. Obtención de datos.

Al finalizar la medición, procedemos a dar clic derecho sobre las barras del espectrograma, y le damos clic en “COPY AS TEXT”.

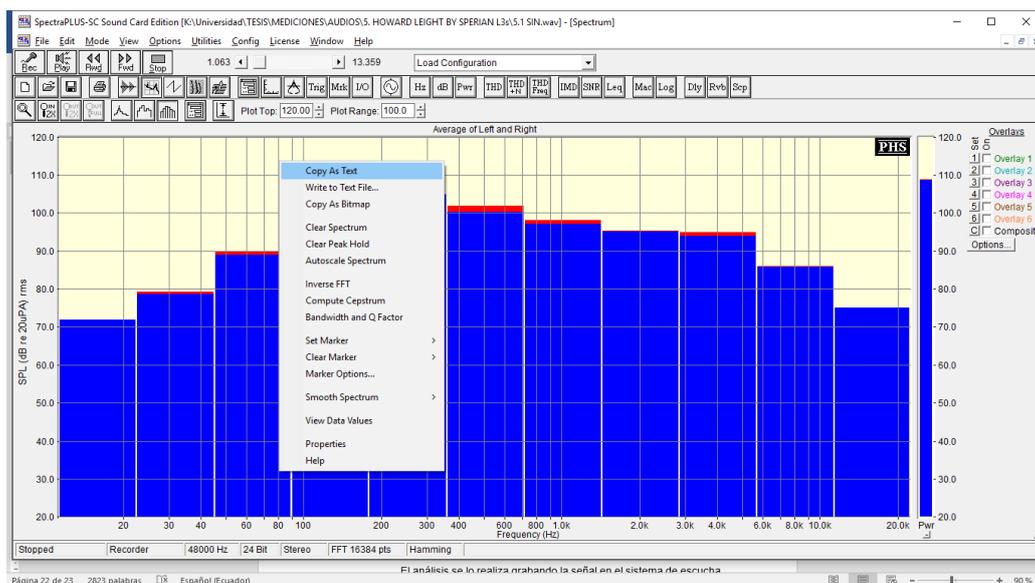


Figura 18. Obtención de datos desde el software de medición.

Después, tomamos los datos con la opción “PEAK HOLD DATA”, los cuales nos entregan un valor promedio de los picos del tiempo de medición.

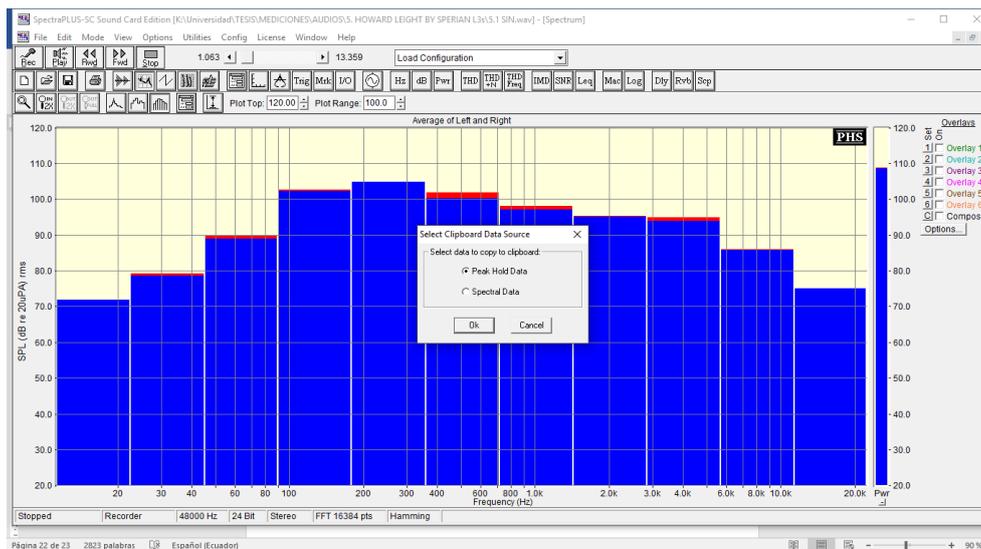


Figura 19. Configuración para la obtención de datos en el software de medición.

3.4.3. Medición

La medición se realizó emitiendo ruido rosa a un nivel conocido emitido por la fuente omnidireccional y grabando dos señales por cada medición del protector auditivo en el sistema de escucha binaural, teniendo así dos clips de audio. El primer clip se grabó en el Dummy head sin el protector. Después, se grabó una segunda muestra con el mismo nivel de ruido rosa, con el protector auditivo a analizar colocado en el Dummy head. Con las dos tomas anteriores, se comparó la atenuación que ofrece el dispositivo de protección auditiva.

Los análisis y resultados de esta experimentación se realizaron en bandas de octava desde 125Hz hasta 8kHz, así, comparar con los datos de atenuación sonora que el fabricante entregue. Además, se realizaron 5 mediciones para cada protector auditivo, para así realizar un análisis de las desviaciones de las mediciones, como se aprecia en el anexo 2.

3.5. Cálculo de atenuación de los protectores auditivos analizados.

A continuación, se indica el procedimiento de cálculo para la obtención de atenuación media, desviación estándar, SNR y NNR, de acuerdo a las fórmulas indicadas en el marco teórico. Teniendo en cuenta que tenemos 5 repeticiones de mediciones, realizadas en 7 bandas de frecuencia desde 125Hz hasta 8000Hz.

4. Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos de mediciones así como su comparativa con los valores entregados por el fabricante.

4.1. Resultados Individuales de cada protector auditivo analizado

4.1.1. Truper 14257

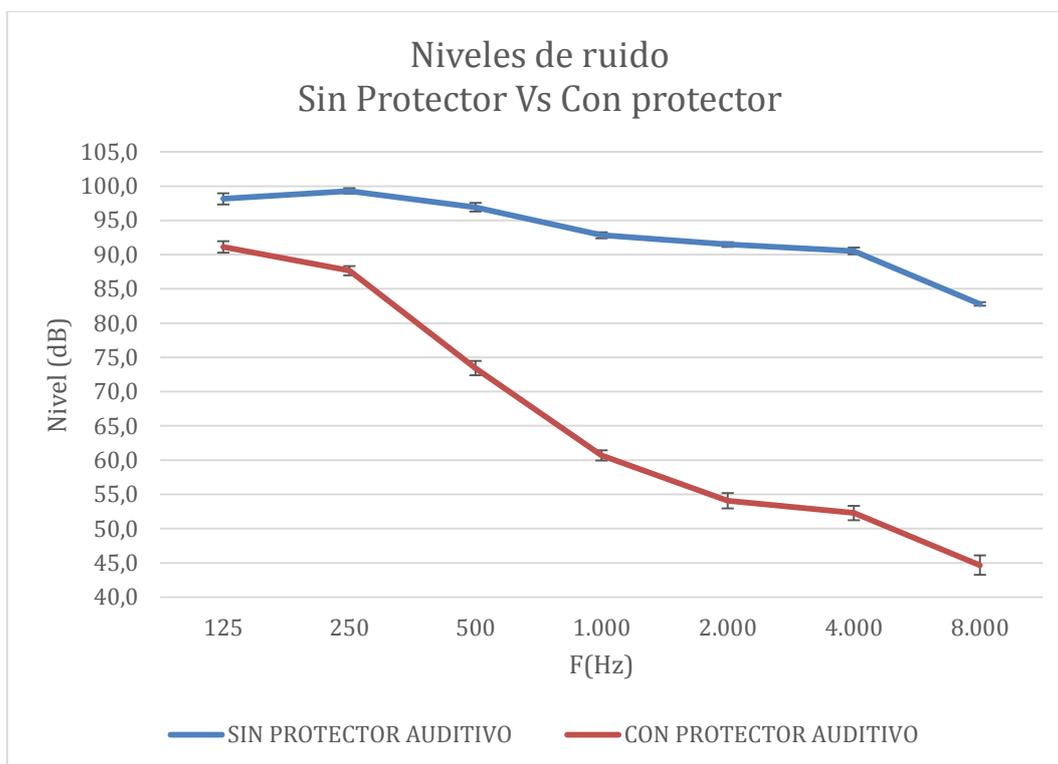


Figura 20. Comparativa de niveles promedio de ruido recibidos en el Dummy Head en la medición con desviaciones estándar por banda de frecuencia. Truper 14257.

La figura 20, nos muestra que la reducción de nivel de ruido ofrecida por el protector auditivo aumenta mientras la frecuencia lo hace, entregándonos una atenuación menor en bajas frecuencias (alrededor de 10dB), como se muestra en la figura 21. Además, se aprecia que las desviaciones (ecuación 3) de cada banda de frecuencia en los resultados promedio de las mediciones son mínimas ($\sigma < 1.5\text{dB}$).

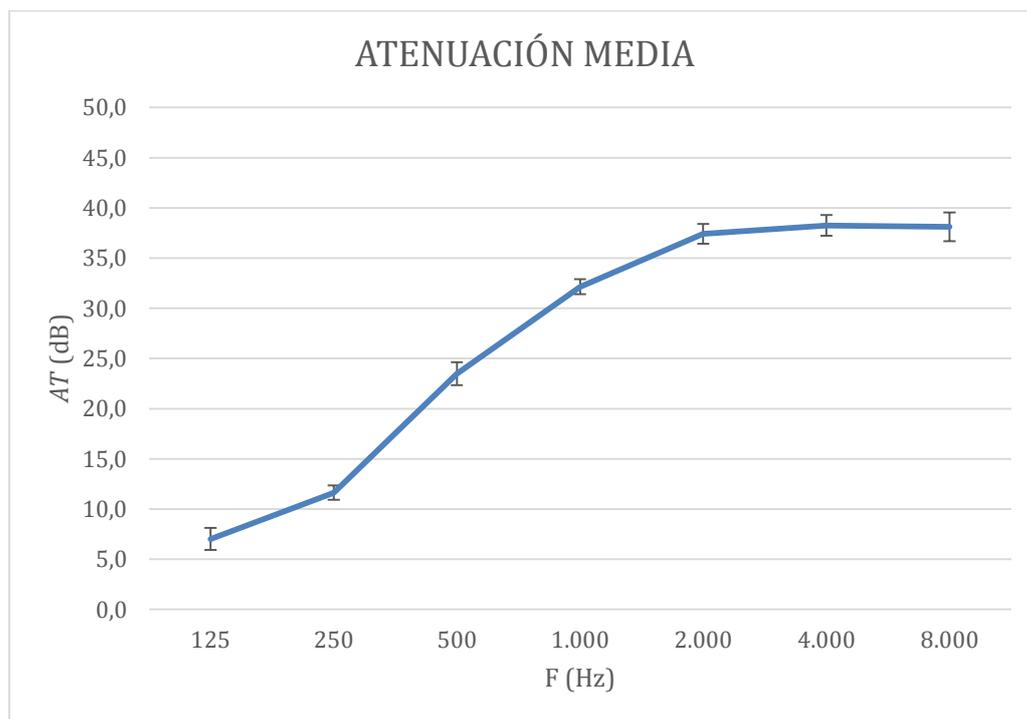


Figura 20. Atenuación media obtenida con desviaciones estándar por banda de frecuencia. Truper 14257.

4.1.2. Climax 10

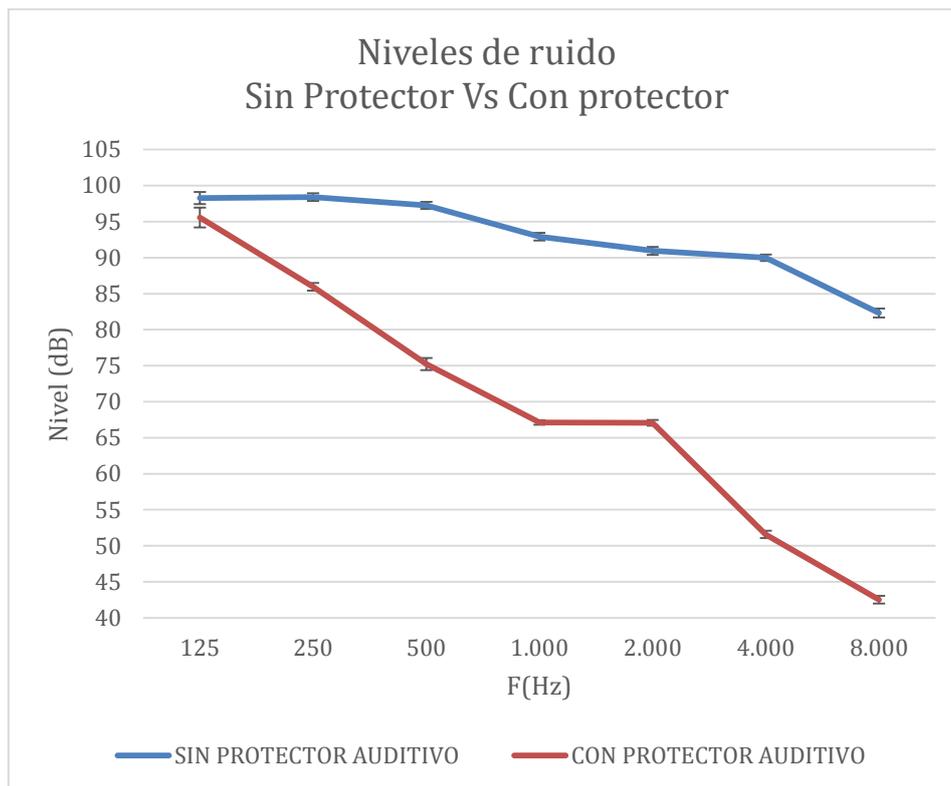


Figura 21 Comparativa de niveles promedio de ruido recibidos en el Dummy Head en la medición con desviaciones estándar por banda de frecuencia. Climax 10.

En la figura 22, se aprecia que el protector auditivo ofrece una protección casi nula en la banda 125Hz (3dB), mientras aumenta la frecuencia, aumenta la atenuación, como se muestra en la figura 23, llegando a tener una atenuación en la banda de 8000Hz de 40dB. Además, se aprecia que las desviaciones (ecuación 3) de cada banda de frecuencia en los resultados promedio de las mediciones son mínimas ($\sigma < 1.5\text{dB}$).

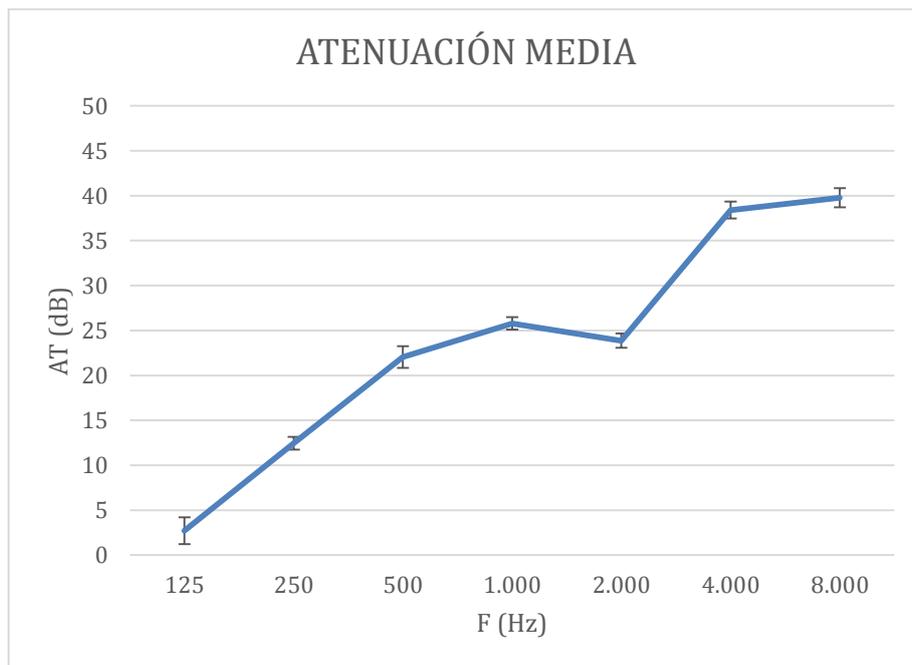


Figura 22 Atenuación media obtenida con desviaciones estándar por banda de frecuencia. Climax 10.´

4.1.3. 3M Peltor Optime III

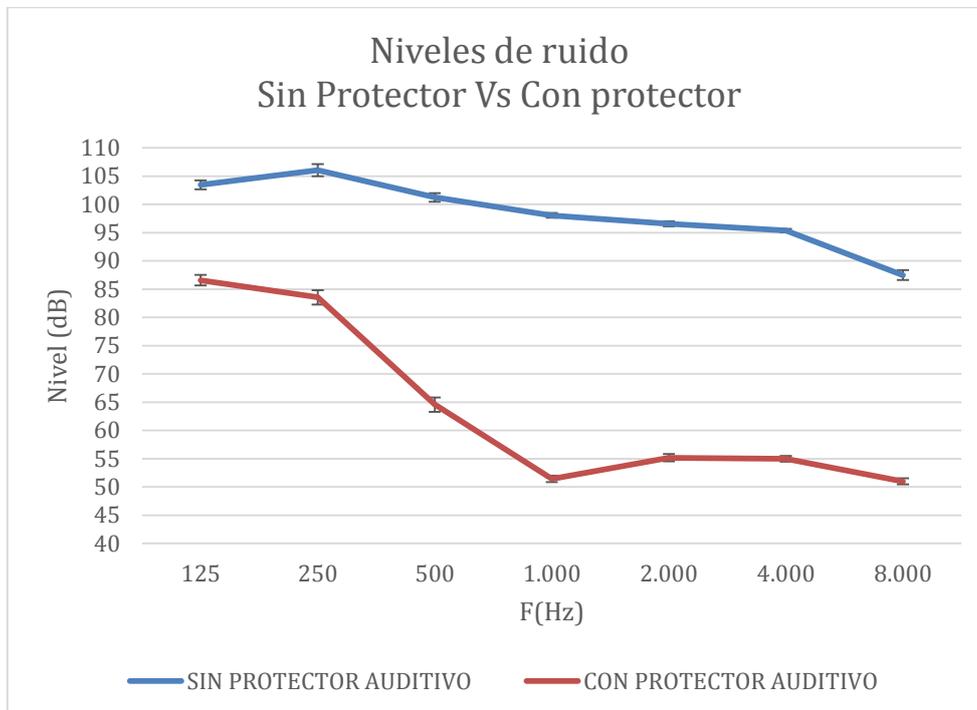


Figura 23 Comparativa de niveles promedio de ruido recibidos en el Dummy Head en la medición con desviaciones estándar por banda de frecuencia. 3M Peltor Opime III.

La figura 24, nos muestra que la reducción de nivel de ruido ofrecida por el protector auditivo tiene un valor mayor en bajas frecuencias (alrededor de 17dB), a comparación de los protectores anteriores. Como se muestra en la figura 25, los valores de atenuación son mayores a 17dB, teniendo una atenuación máxima de 46dB en la banda de 1000Hz. Además, se aprecia que las desviaciones (ecuación 3) de cada banda de frecuencia en los resultados promedio de las mediciones son mínimas ($\sigma < 1.4\text{dB}$).

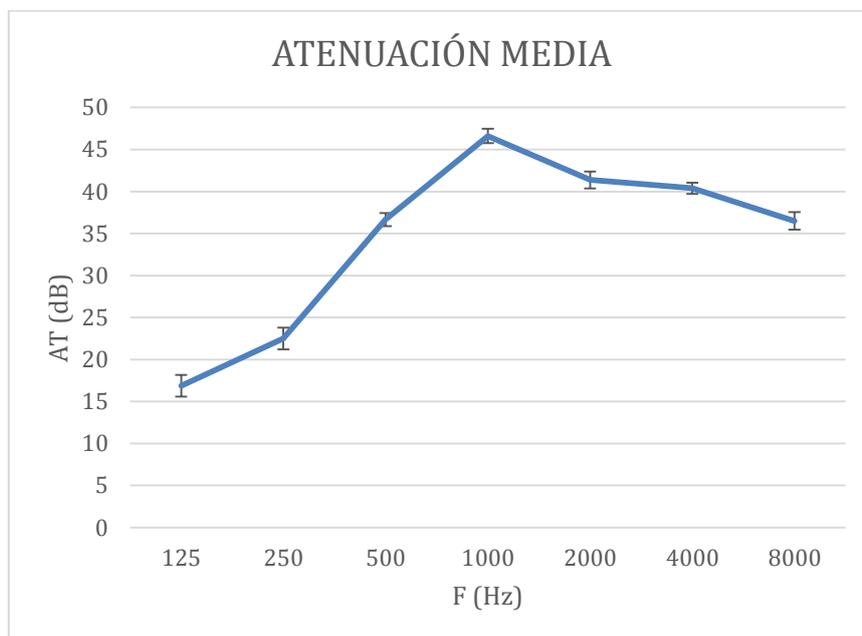


Figura 24 Atenuación media obtenida con desviaciones estándar por banda de frecuencia. 3M Peltor Optime III.

4.1.4. 3M Peltor Optime 98

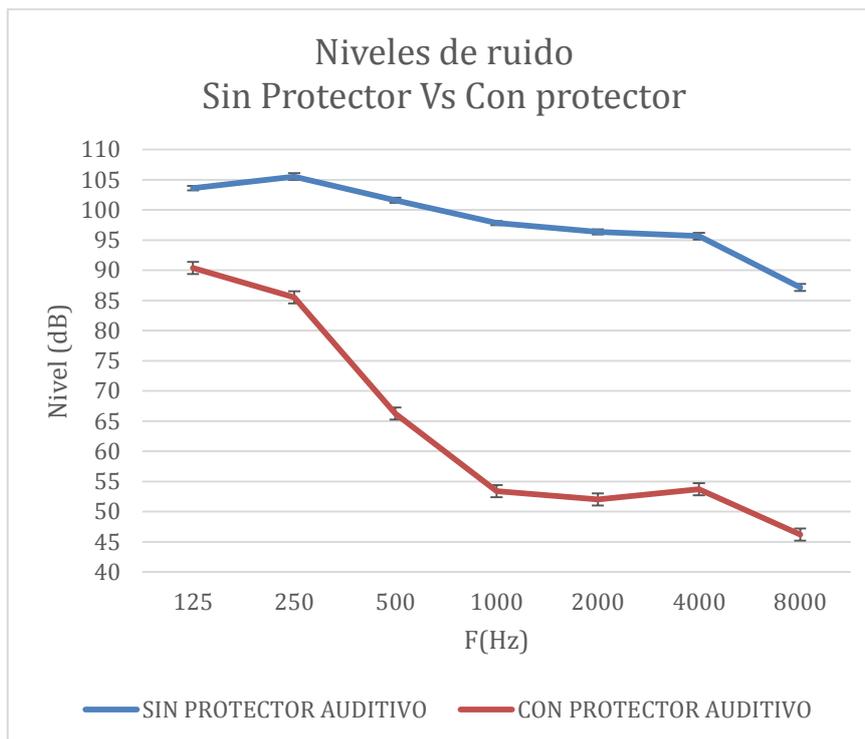


Figura 25 Comparativa de niveles promedio de ruido recibidos en el Dummy Head en la medición con desviaciones estándar por banda de frecuencia. 3M Peltor Optime 98.

La figura 26, nos muestra que la diferencia de niveles de ruido ofrecida por el protector auditivo tiene un valor de 15dB en la banda de 125Hz, menor al caso anterior. Como se muestra en la figura 27, los valores de atenuación aumentan desde 15dB a 44dB desde 125Hz a 1000Hz, teniendo una atenuación prácticamente estable de 44dB en altas frecuencias. Además, se aprecia que las desviaciones (ecuación 3) de cada banda de frecuencia en los resultados promedio de las mediciones son mínimas ($\sigma < 1.1\text{dB}$).

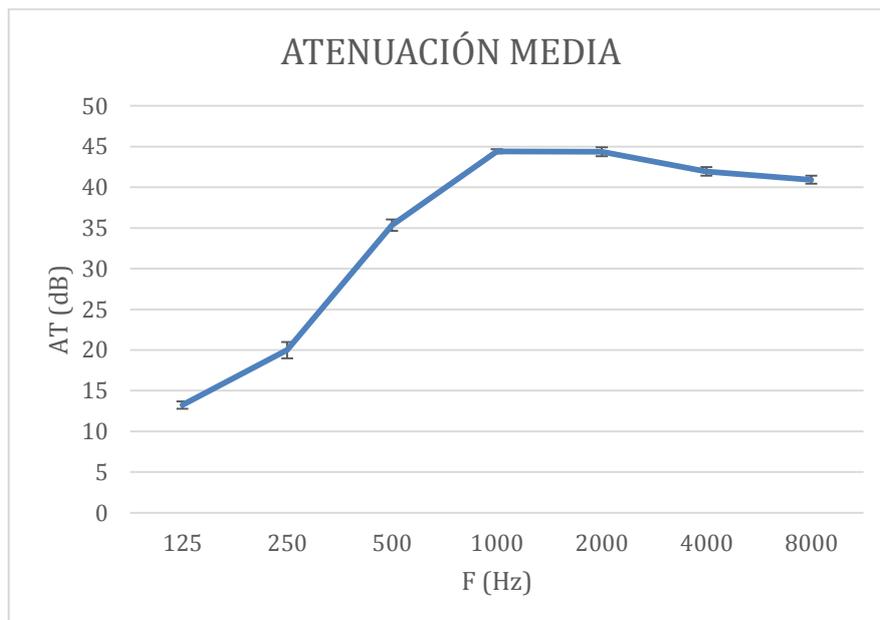


Figura 26 Atenuación media obtenida con desviaciones estándar por banda de frecuencia. 3M Peltor Optime 98.

4.1.5. Howard Leight L3

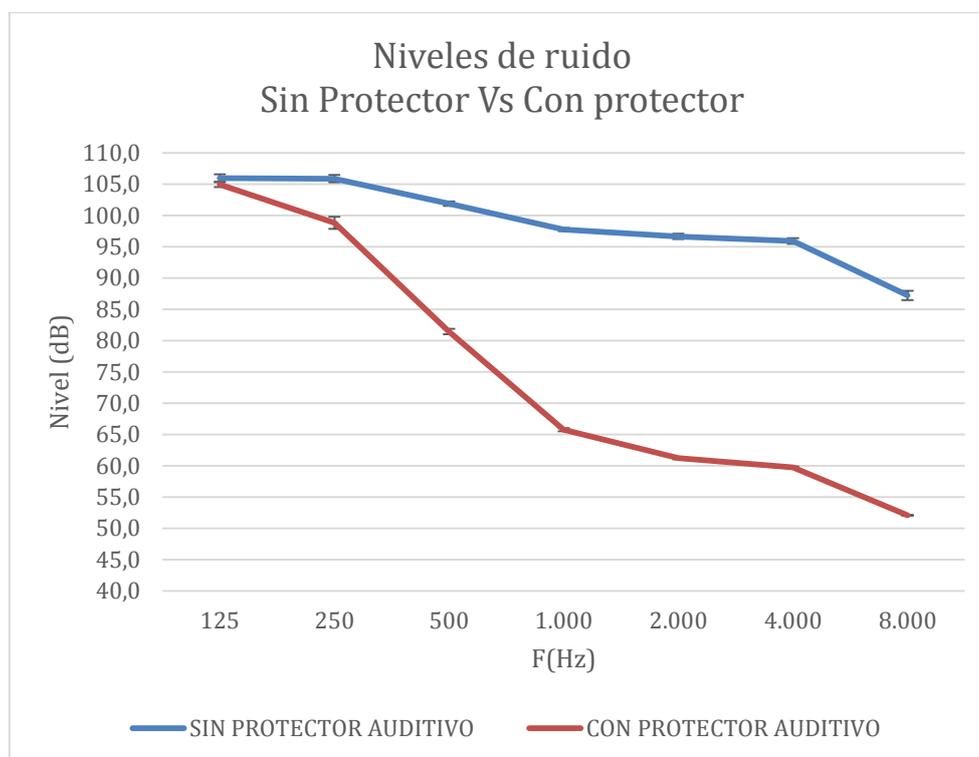


Figura 28. Comparativa de niveles promedio de ruido recibidos en el Dummy Head en la medición con desviaciones estándar por banda de frecuencia. Howard Leight L3.

La figura 28, nos muestra que la diferencia de niveles de ruido ofrecida por el protector auditivo en la banda de 125Hz es casi nula (1dB), mientras que en 250Hz tiene una reducción 7dB, que es baja en comparación a los casos anteriores. Como se muestra en la figura 29, la atenuación en bajas frecuencias es de valores bajos, mientras que el valor de atenuación en altas frecuencias prácticamente estable en los 34dB. Además, se aprecia que las desviaciones (ecuación 3) de cada banda de frecuencia en los resultados promedio de las mediciones son mínimas ($\sigma < 1.1\text{dB}$).

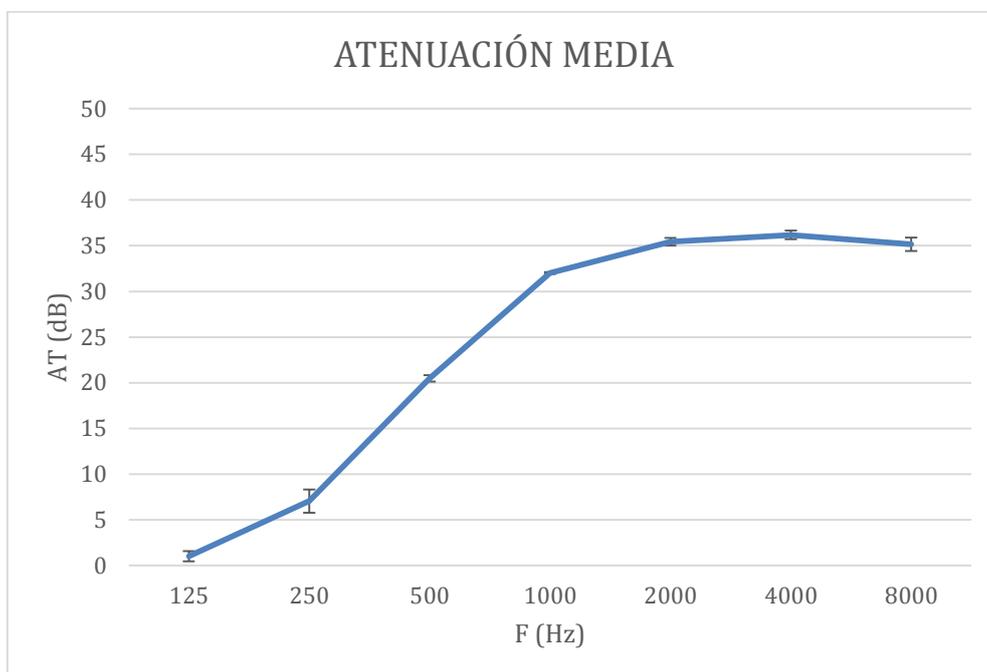


Figura 27. Atenuación media obtenida con desviaciones estándar por banda de frecuencia. Howard Leight L3.

4.1.6. Climax 14

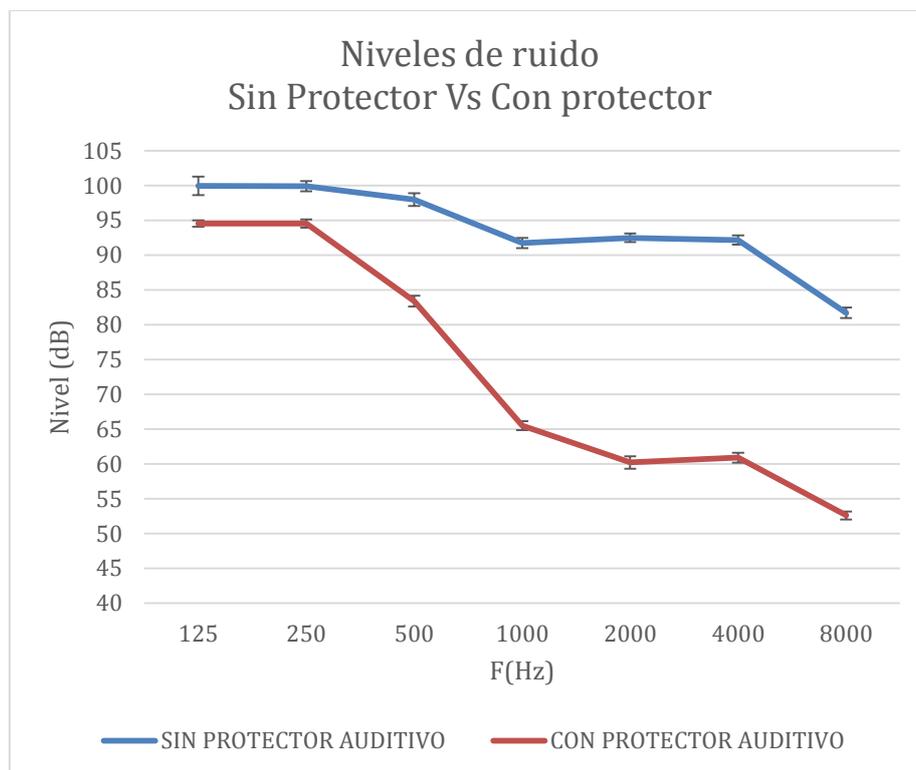


Figura 28. Comparativa de niveles promedio de ruido recibidos en el Dummy Head en la medición con desviaciones estándar por banda de frecuencia. Climax 14.

La figura 30, nos muestra que la diferencia de niveles de ruido ofrecida por el protector auditivo en la banda de 125Hz y 250Hz tiene una reducción 5dB, que es menor en comparación a casos anteriores. Como se muestra en la figura 31, la atenuación en bajas frecuencias es de valores bajos, mientras que el valor de atenuación en altas frecuencias prácticamente estable en los 30dB. Además, se aprecia que las desviaciones (ecuación 3) de cada banda de frecuencia en los resultados promedio de las mediciones son mínimas ($\sigma < 1.4\text{dB}$).

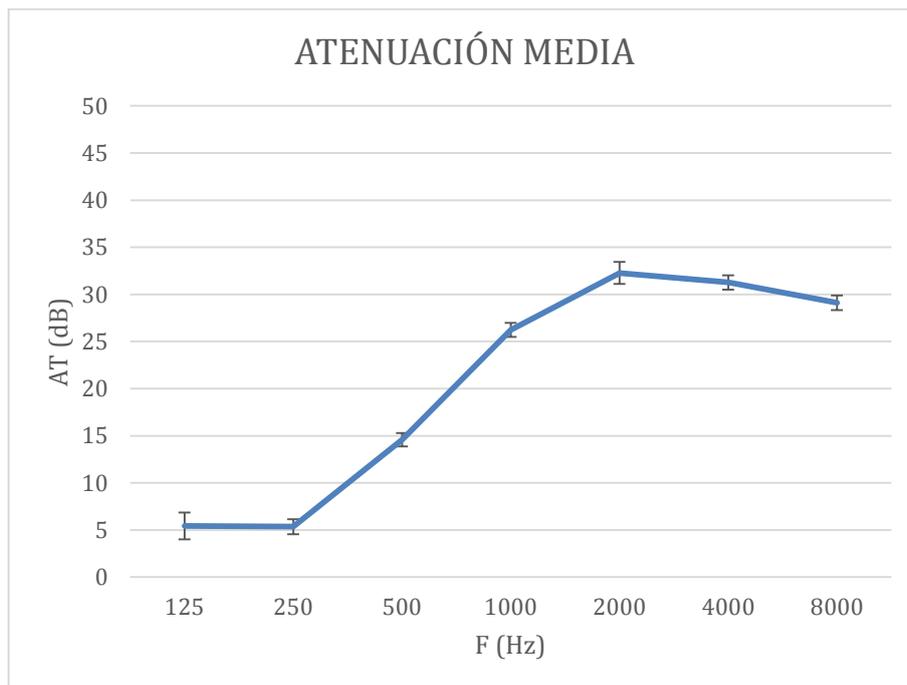


Figura 29. Atenuación media obtenida con desviaciones estándar por banda de frecuencia. Climax 14.

4.2. Comparativa de atenuación media y desviación estándar de cada protector auditivo analizado con los datos del fabricante

4.2.1. Truper 14257

El Fabricante no especifica datos de atenuación media y desviación estándar, sólo de NNR.

4.2.2. Climax 10

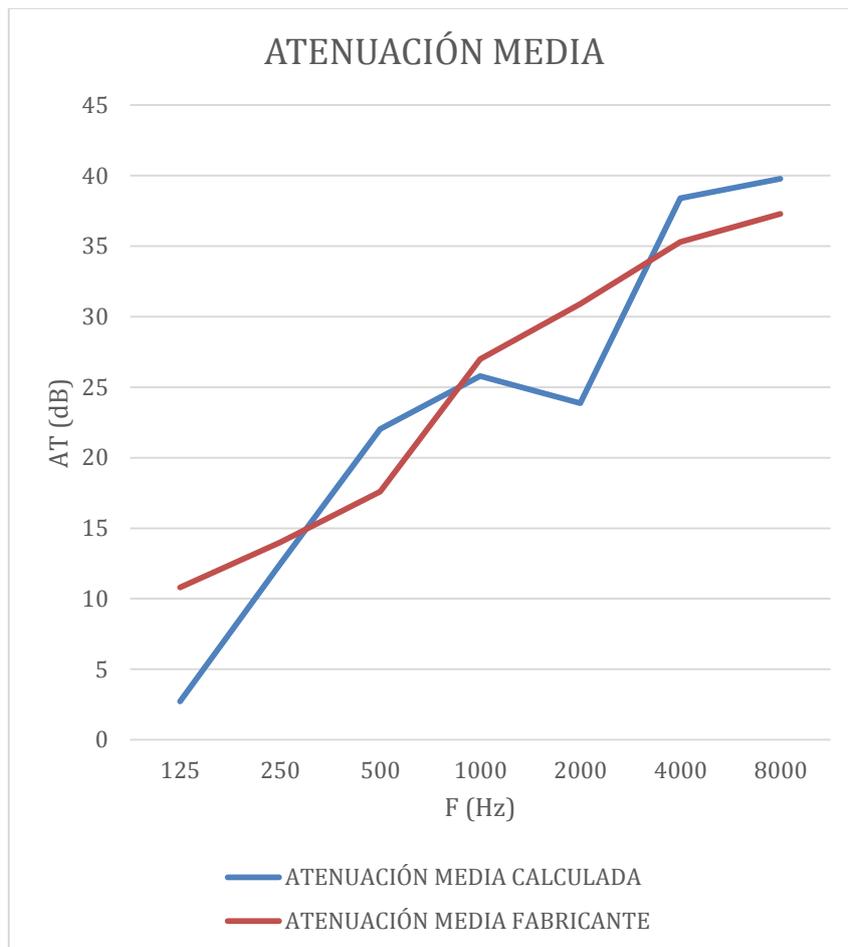


Figura 30. Comparativa de atenuación media, Fabricante vs Calculada. Climax 10.

La figura 32 nos muestra que la atenuación encontrada en bajas frecuencias y en los 2000Hz es menor a la que el fabricante nos indica, mientras que en 500Hz, 4000Hz y 8000Hz es mayor con alrededor 5dB. Aun así la tendencia de la atenuación encontrada sigue a la indicada por el fabricante.

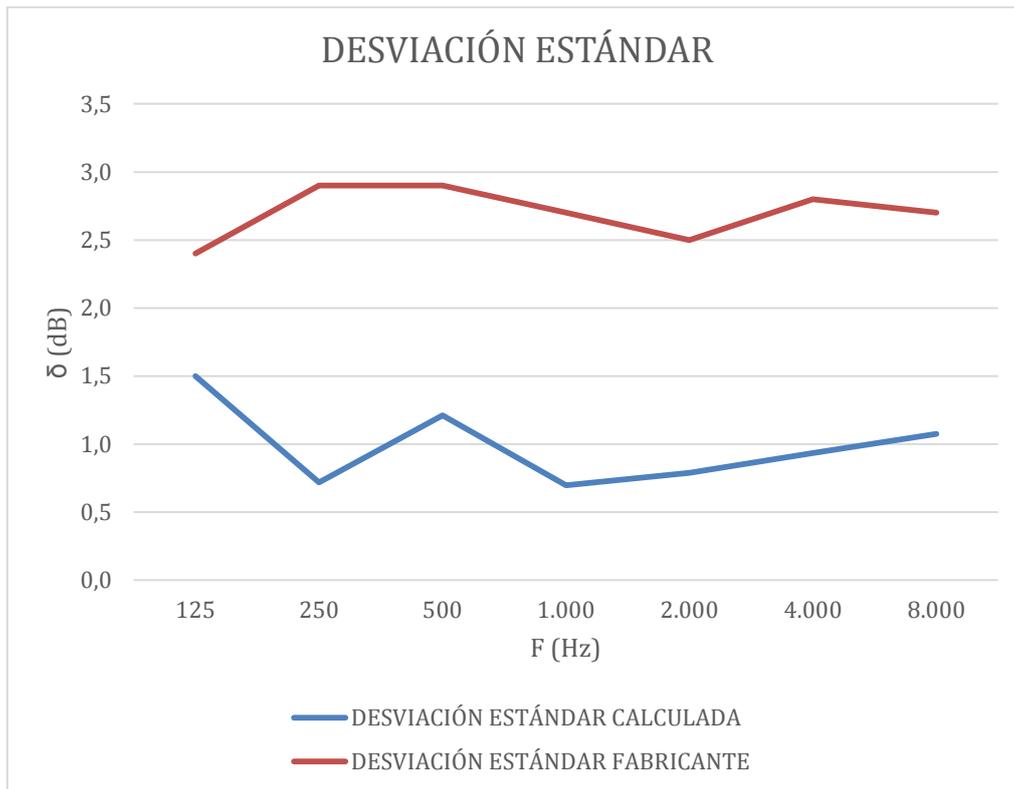


Figura 31. Comparativa de Desviación Estándar, Fabricante vs Calculada. Climax 10.

La figura 33 nos muestra que la desviación estándar obtenida es menor a la que el fabricante nos indica, con una diferencia de alrededor 2dB por banda de frecuencia. A diferencia del fabricante, la desviación estándar encontrada aumenta a bajas frecuencias.

4.2.3. 3M Peltor Optime III

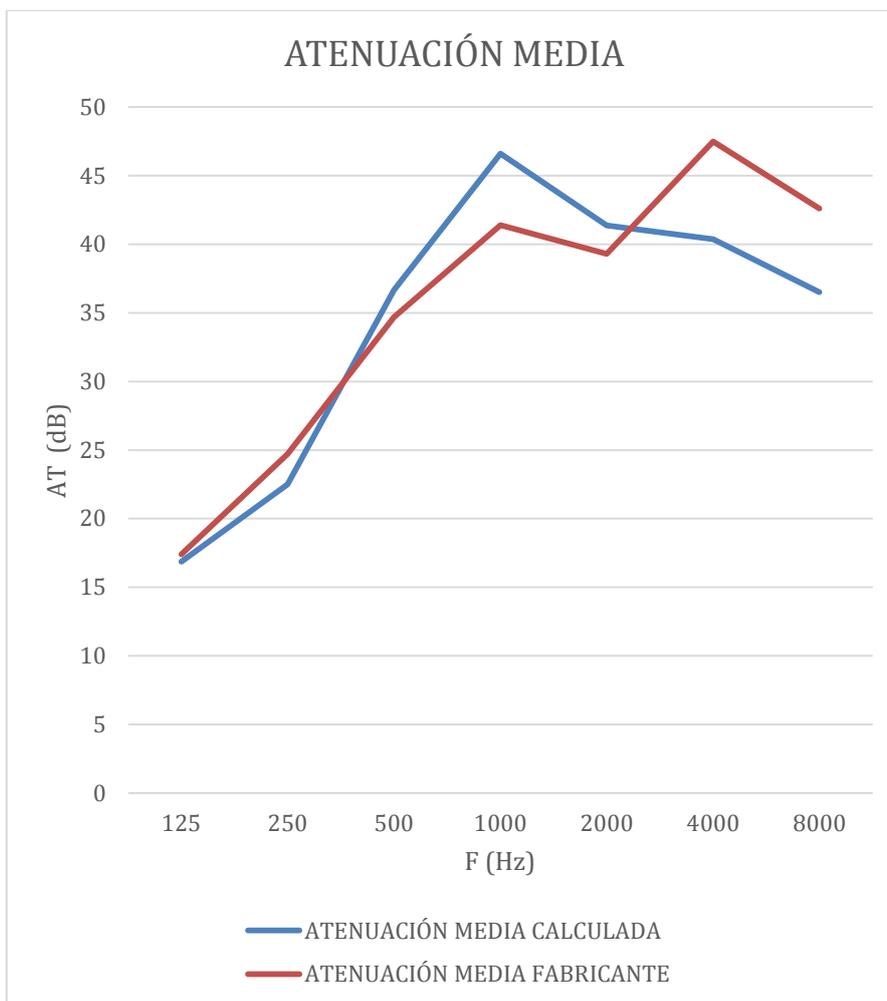


Figura 32. Comparativa de atenuación media, Fabricante vs Calculada. 3M Peltor Optime III.

La figura 34 nos indica una atenuación en baja frecuencia similar, tanto la calculada como la entregada por el fabricante. También, la tendencia de la atenuación encontrada sigue a la indicada por el fabricante. Teniendo un pico en 1000Hz con la atenuación encontrada sobre la indicada por el fabricante (6dB por encima). Además, en las bandas de 4000Hz y 8000Hz, la atenuación encontrada esta 7dB por debajo de la encontrada por el fabricante.

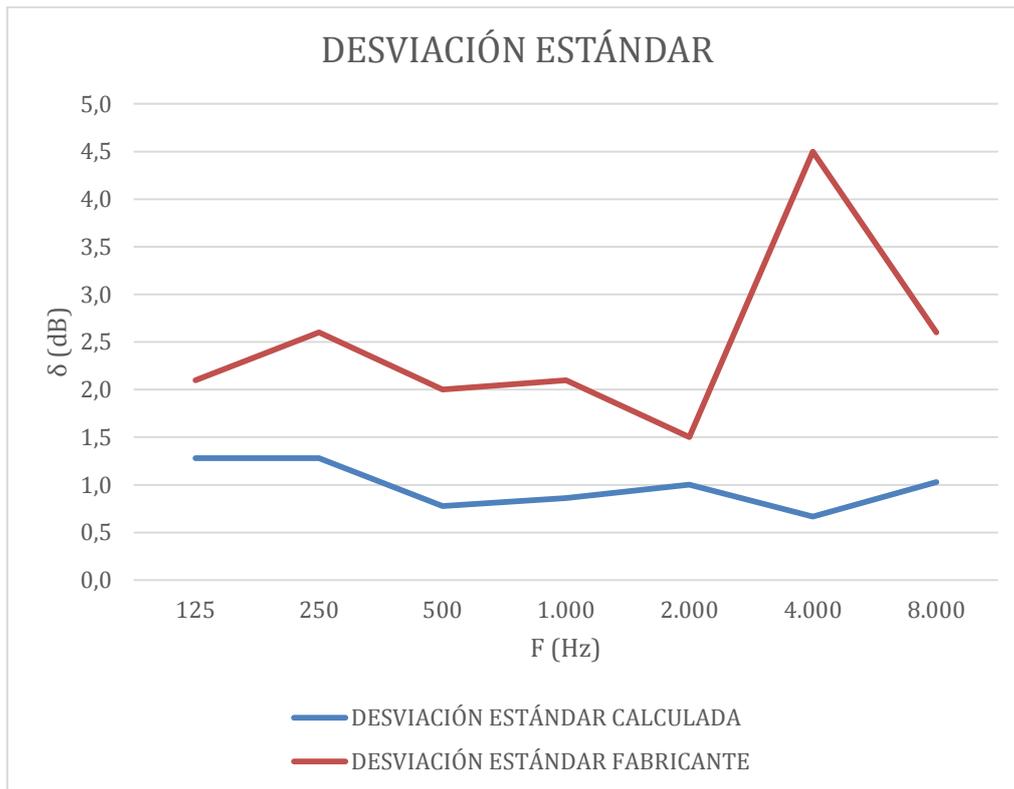


Figura 33. Comparativa de Desviación Estándar, Fabricante vs Calculada. 3M Peltor Optime III.

La figura 35 nos muestra que la desviación estándar obtenida es menor a la que el fabricante nos indica, con una diferencia de alrededor 1.3dB por banda de frecuencia, con excepción de la banda de 4000Hz en donde la diferencia es de alrededor de 4dB. La desviación estándar encontrada sigue la tendencia de la desviación estándar que entrega el fabricante, excepto en la banda de 4000Hz.

4.2.4. 3M Peltor Optime 98

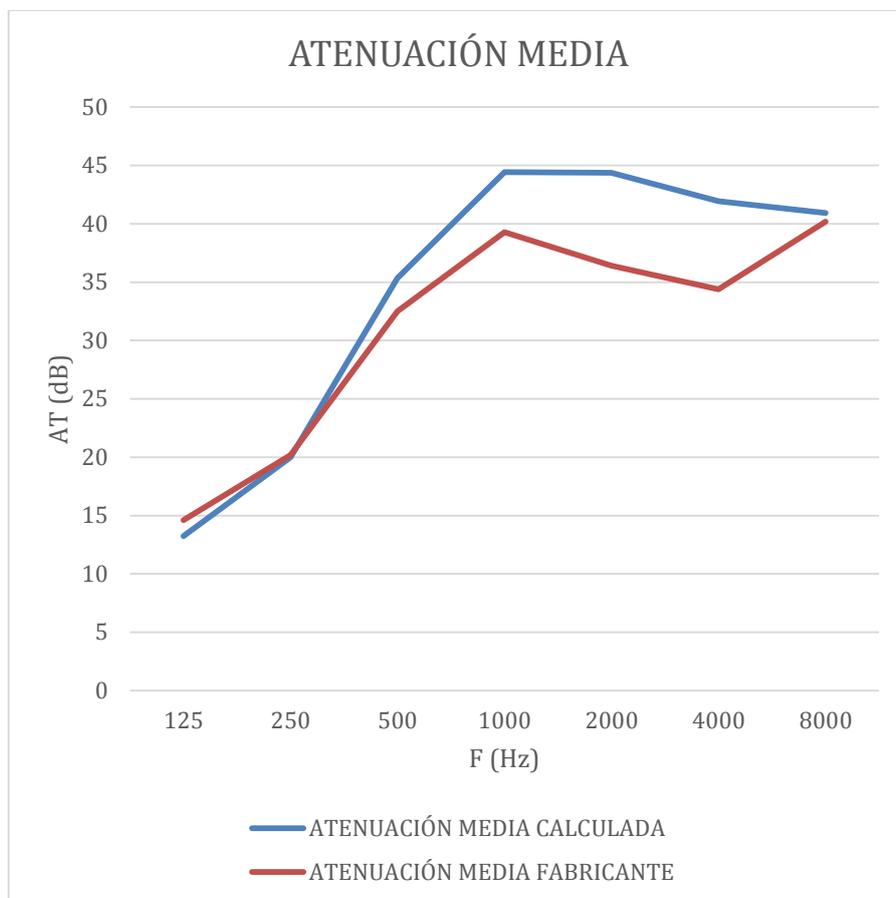


Figura 34. Comparativa de atenuación media, Fabricante vs Calculada. 3M Peltor Optime 98.

La figura 36 nos indica una atenuación en baja frecuencia similar, tanto la calculada como la entregada por el fabricante. También, la tendencia de la atenuación encontrada sigue a la indicada por el fabricante. Teniendo una diferencia de la atenuación encontrada con la indicada por el fabricante de aproximadamente 5 dB entre las bandas de 1000Hz y 4000Hz. Además, en la banda de 8000Hz, la atenuación encontrada y la que nos da el fabricante son prácticamente las mismas.

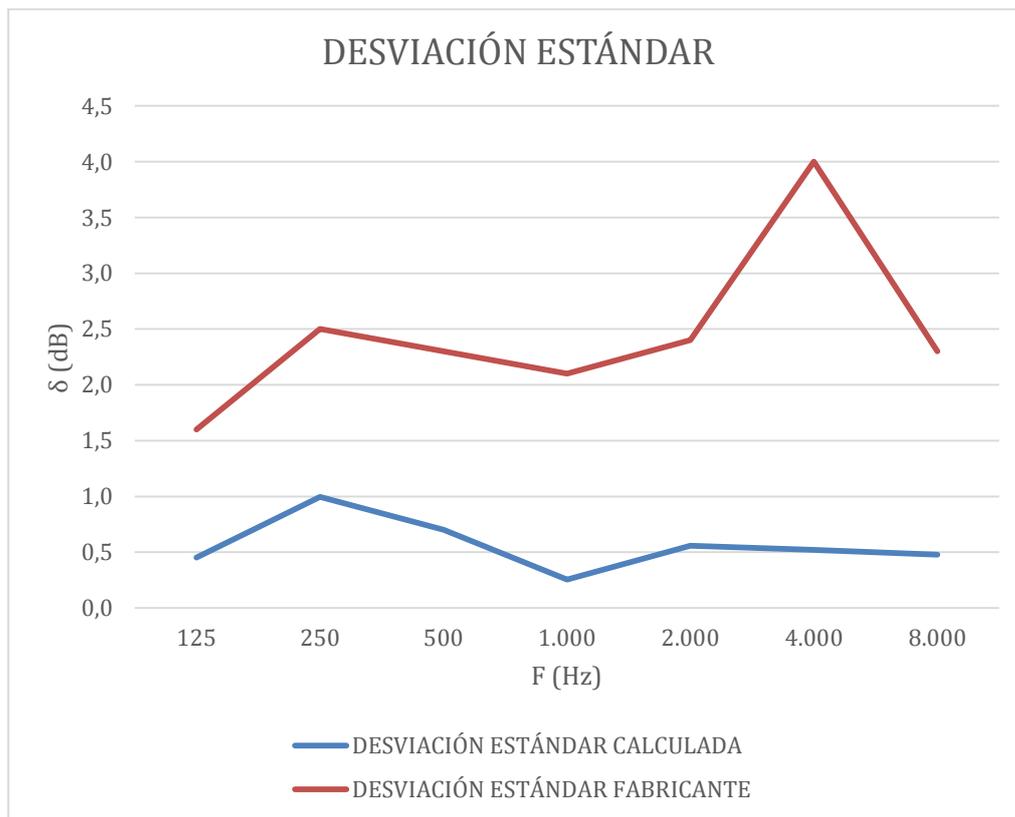


Figura 35. Comparativa de Desviación Estándar, Fabricante vs Calculada. 3M Peltor Optime 98.

La figura 37 nos indica que la desviación estándar obtenida es menor a la que el fabricante nos indica, con una diferencia de alrededor 1.3dB por banda de frecuencia, con excepción de la banda de 4000Hz en donde la desviación estándar entregada por el fabricante es aproximadamente 3.5dB superior que la calculada. La desviación estándar encontrada sigue la tendencia de la desviación estándar que entrega el fabricante, excepto en la banda de 4000Hz.

4.2.5. Howard Leight L3

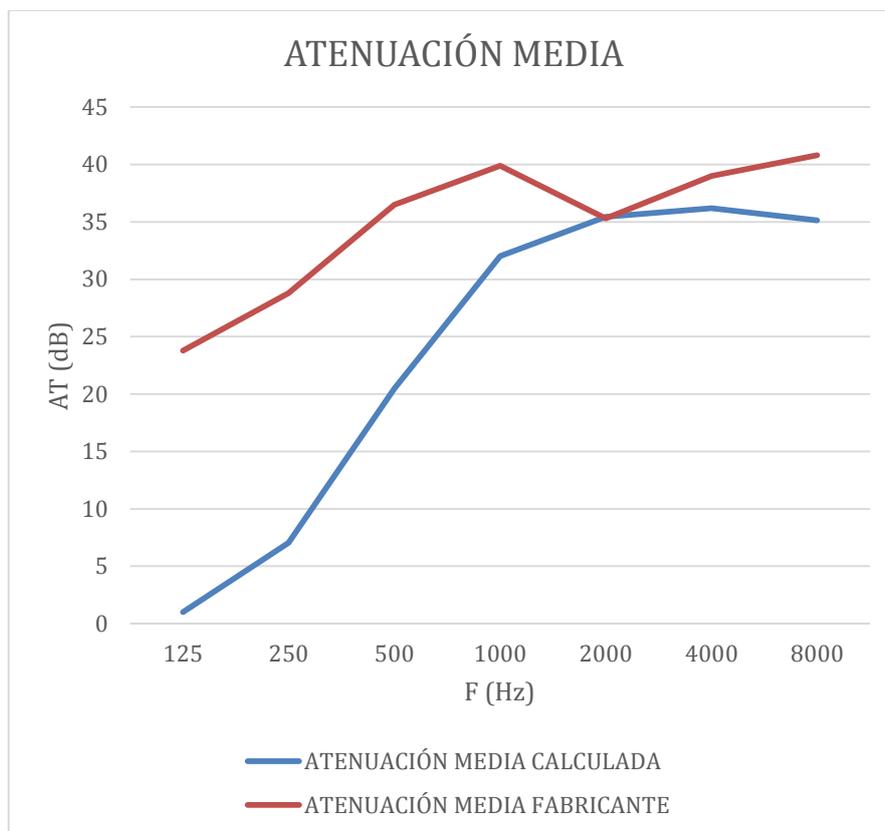


Figura 36. Comparativa de atenuación media, Fabricante vs Calculada. Howard Leight L3.

La figura 38 nos indica una atenuación calculada en baja frecuencia prácticamente nula, que en comparación a la entregada por el fabricante, existe una diferencia de 22dB aproximadamente. Aun así, la tendencia de la atenuación encontrada sigue a la indicada por el fabricante. Además la atenuación en altas frecuencias, son próximas, tanto la calculada como la entregada por el fabricante.

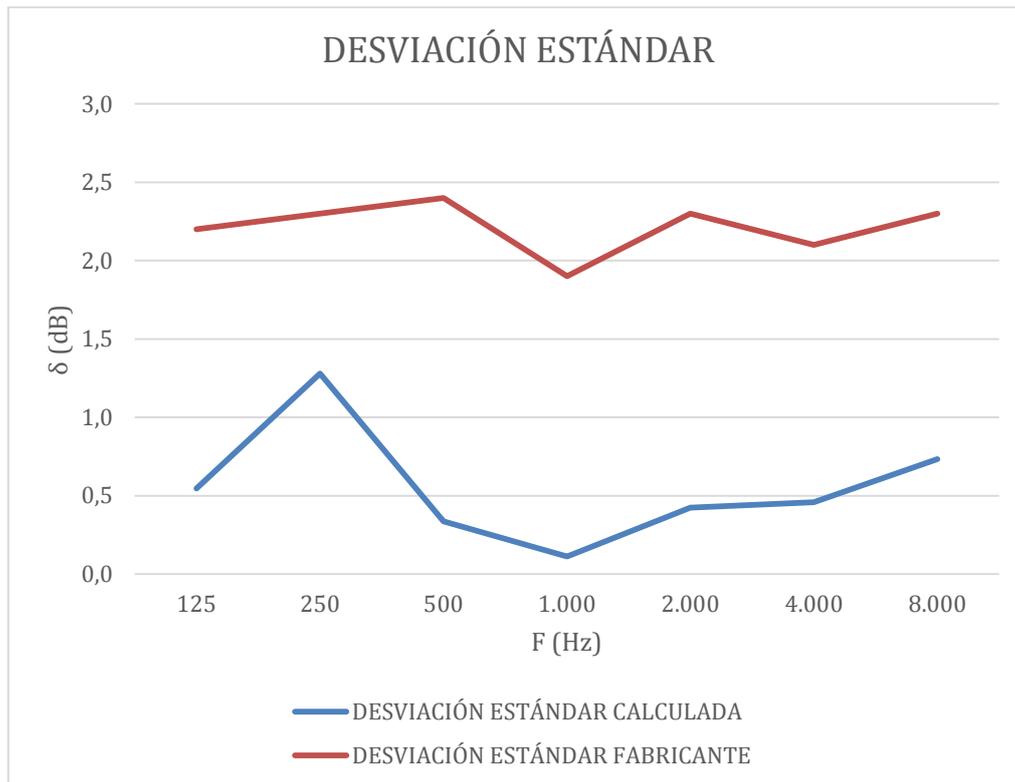


Figura 37. Comparativa de Desviación Estándar, Fabricante vs Calculada. Howard Leight L3.

La figura 39 nos indica que la desviación estándar obtenida es menor a la que el fabricante nos indica, con una diferencia de variable en cada banda de frecuencia. Cabe destacar que la desviación estándar encontrada en la banda de 250Hz tiene un pico de 1.3dB, mientras que en la desviación estándar en 1000Hz es de 0.1dB.

4.2.6. Climax 14

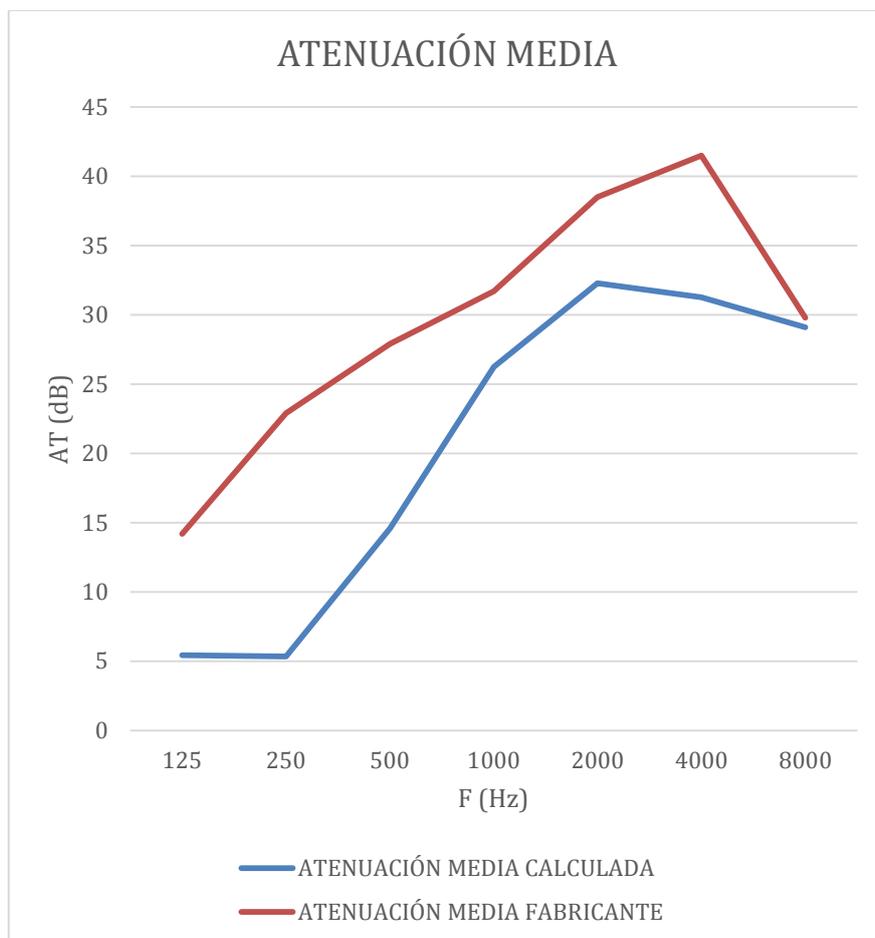


Figura 38. Comparativa de atenuación media, Fabricante vs Calculada. Climax 14.

La figura 40 nos indica una atenuación calculada en baja frecuencia de 5dB, que en comparación a la entregada por el fabricante, existe una diferencia de 10dB en 125Hz y 20dB en 250Hz. Aun así, la tendencia de la atenuación encontrada sigue a la indicada por el fabricante. Además la atenuación calculada de la banda 8000Hz, coincide con la entregada por el fabricante.

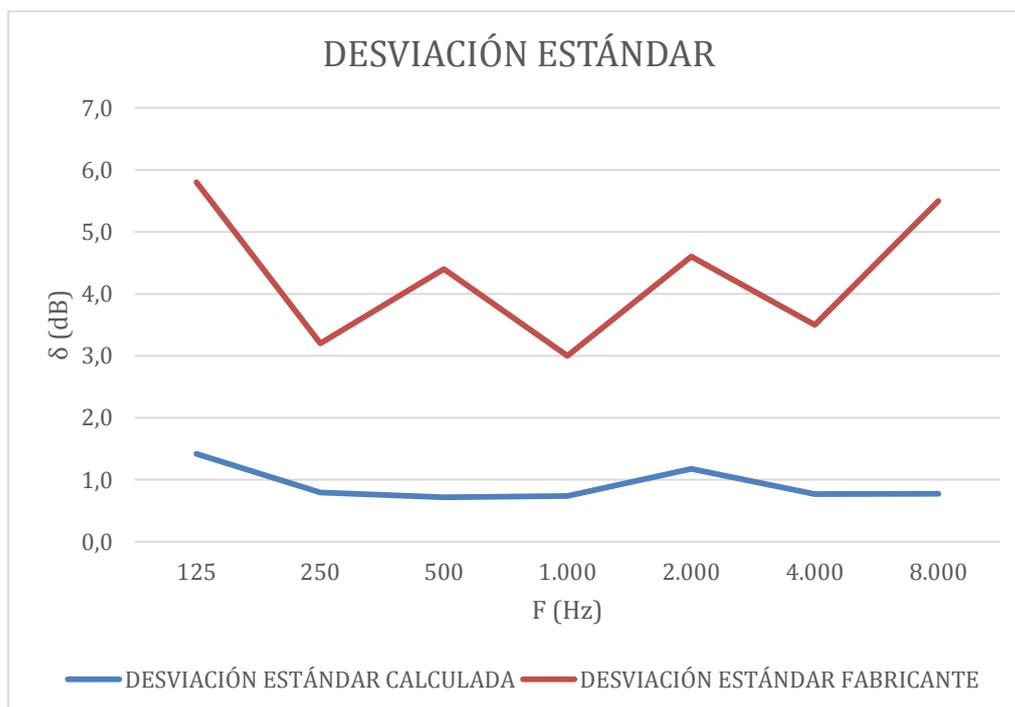


Figura 39. Comparativa de Desviación Estándar, Fabricante vs Calculada. Climax 14.

La figura 41 nos indica que la desviación estándar obtenida es menor a la que el fabricante nos indica, con una diferencia de variable en cada banda de frecuencia. Cabe destacar que la desviación estándar encontrada es prácticamente estable en todo el espectro analizado, aproximadamente 1dB.

4.3. Resultados Finales

Observando las gráficas de atenuación en el apartado 4.2, se aprecia que los valores obtenidos son próximos a los entregados por el fabricante y siguen la tendencia de datos por banda de octava. Además, se puede observar que los datos encontrados de 4 protectores auditivos (Truper 14257, Climax 10, 3M Peltor Optime III, 3M Peltor Optime 98) entregan valores que se son próximos a los que el fabricante entrega. Por otro lado, dos de los protectores auditivos analizados (Climax 14, Howard Leight L3), tienen valores de atenuación menores a los entregados por el fabricante.

Además, en la guía de medición desarrollada, las desviaciones obtenidas en las mediciones realizadas y atenuaciones, en su mayoría, son valores menores a 2dB, siendo valores inferiores a los entregados por los fabricantes, como se aprecia en las figuras 42 y 43.

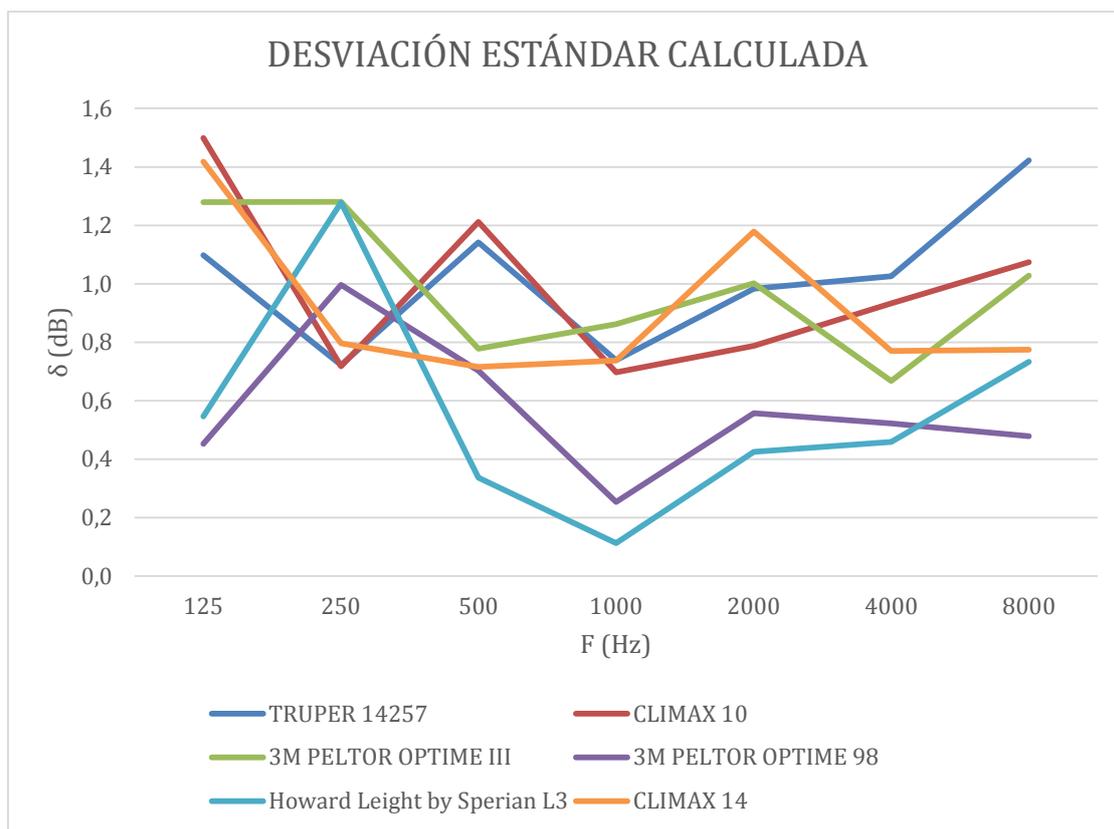


Figura 40. Desviación estándar calculada por banda de frecuencia de los protectores auditivos estudiados.

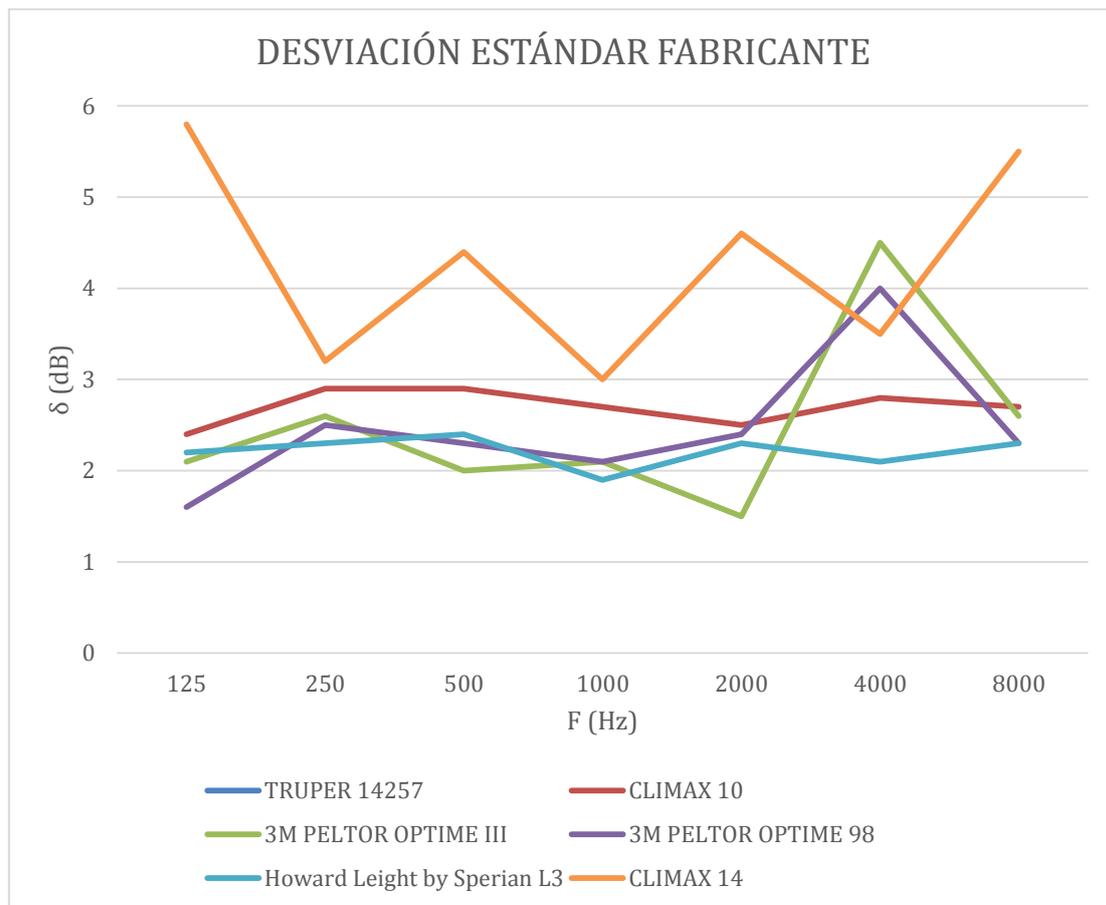


Figura 41. Desviación estándar dada por el fabricante por banda de frecuencia de los protectores auditivos estudiados.

Se muestra los resultados de SNR y NNR en comparación con los entregados con el fabricante.

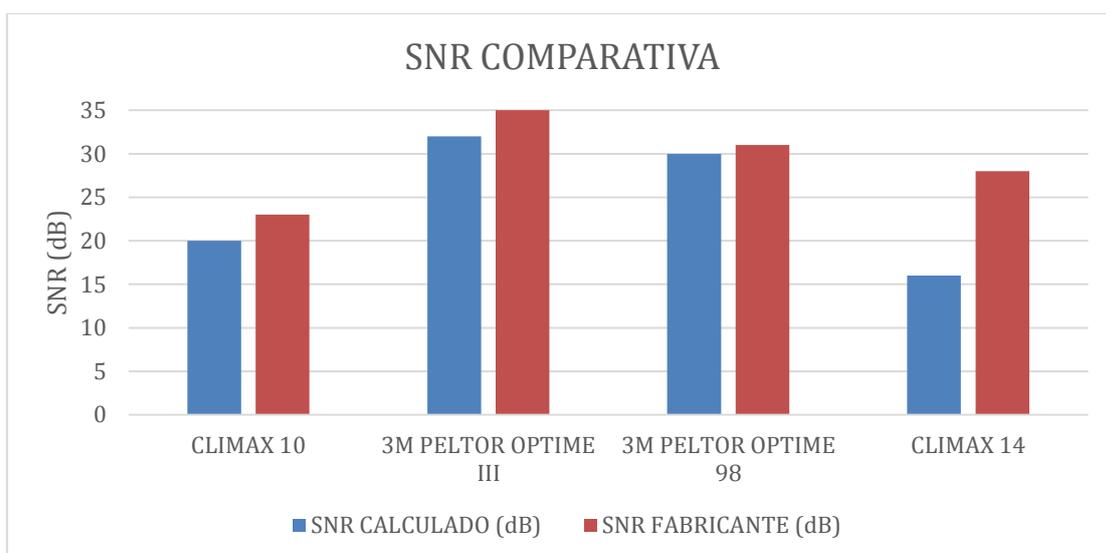


Figura 42. Comparativa de SNR. Fabricante vs. Calculado.

En la figura 44, los valores de SNR entregados por los fabricantes de 4 protectores auditivos son comparados con los valores SNR obtenidos durante la experimentación, entregando en el protector auditivo Climax 10 y 3M Peltor Optime III una diferencia de 3dB, lo cual se puede considerar aceptable dentro de la comparación, mientras el protector auditivo 3M Peltor Optime 98, entrega un resultado con diferencia de 1dB con el dato del fabricante. Al contrario, en el protector auditivo Climax 14, encontramos una diferencia de 12dB menor en el SNR calculado en comparación al entregado por el fabricante, todo esto se puede apreciar en la tabla 4.

Tabla 3.

Resultados de SNR encontrados y entregados por el fabricante.

PROTECTOR	SNR CALCULADO (dB)	SNR FABRICANTE (dB)	DIFERENCIA CALCULADO VS FABRICANTE (dB)
CLIMAX 10	20	23	3
3M PELTOR OPTIME III	32	35	3
3M PELTOR OPTIME 98	30	31	1
CLIMAX 14	16	28	12

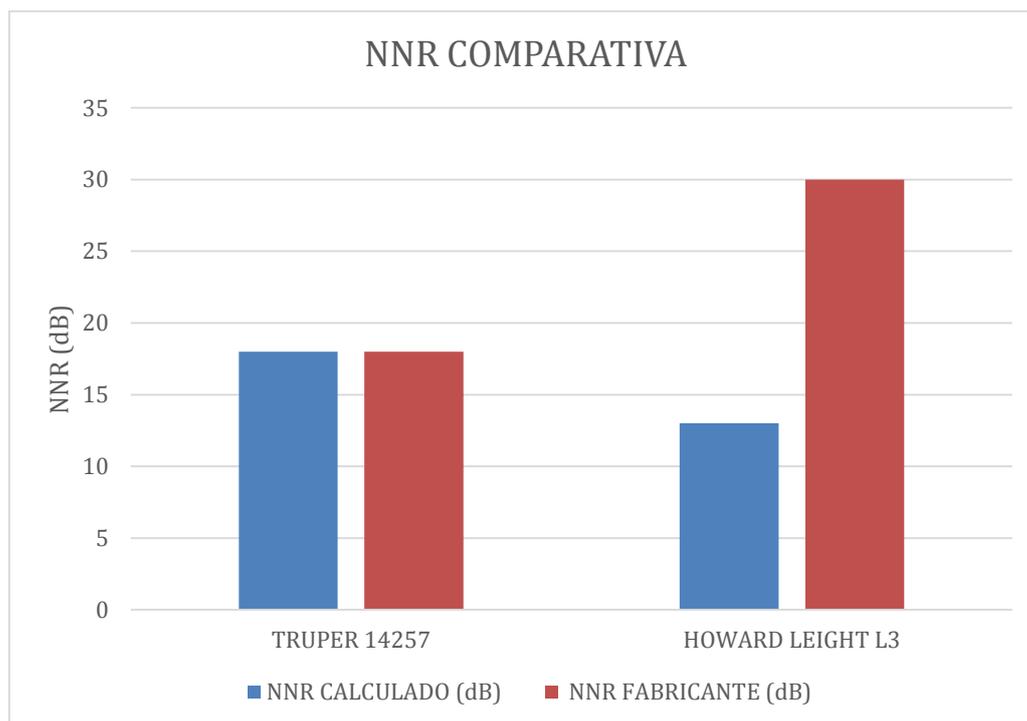


Figura 43. Comparativa de NNR. Fabricante vs. Calculado.

En la figura 45, los valores de NNR entregados por los fabricantes de 2 protectores auditivos son comparados con los valores NNR obtenidos durante la experimentación, entregando en el protector auditivo Truper 14257 el mismo valor que tanto el NNR calculado y el entregado por el fabricante, mientras que el protector auditivo Howard Leight L3 encontramos una diferencia de 17dB menor en el NNR calculado en comparación al entregado por el fabricante, como se aprecia en la tabla 5.

Tabla 4.

Resultados de NNR encontrados y entregados por el fabricante.

PROTECTOR	NNR CALCULADO (dB)	NNR FABRICANTE (dB)	DIFERENCIA CALCULADO VS FABRICANTE (dB)
TRUPER 14257	18	18	0
HOWARD LEIGHT L3	13	30	17

También, en la figura 46, se puede observar las mediciones por banda de frecuencia de todos los protectores auditivos, en donde los protectores 3M Peltor Optime III y 3M Peltor Optime 98 son los que ofrecen mejor atenuación en todas las bandas de frecuencia analizadas, mientras que el protector Climax 14, es el de menor atenuación. También, el protector Climax 10 tiene una atenuación menor a todos en la banda de 2000Hz, mientras que los protectores Howard Leight by Sperian L3 y Truper 14257 tienen una atenuación parecida.

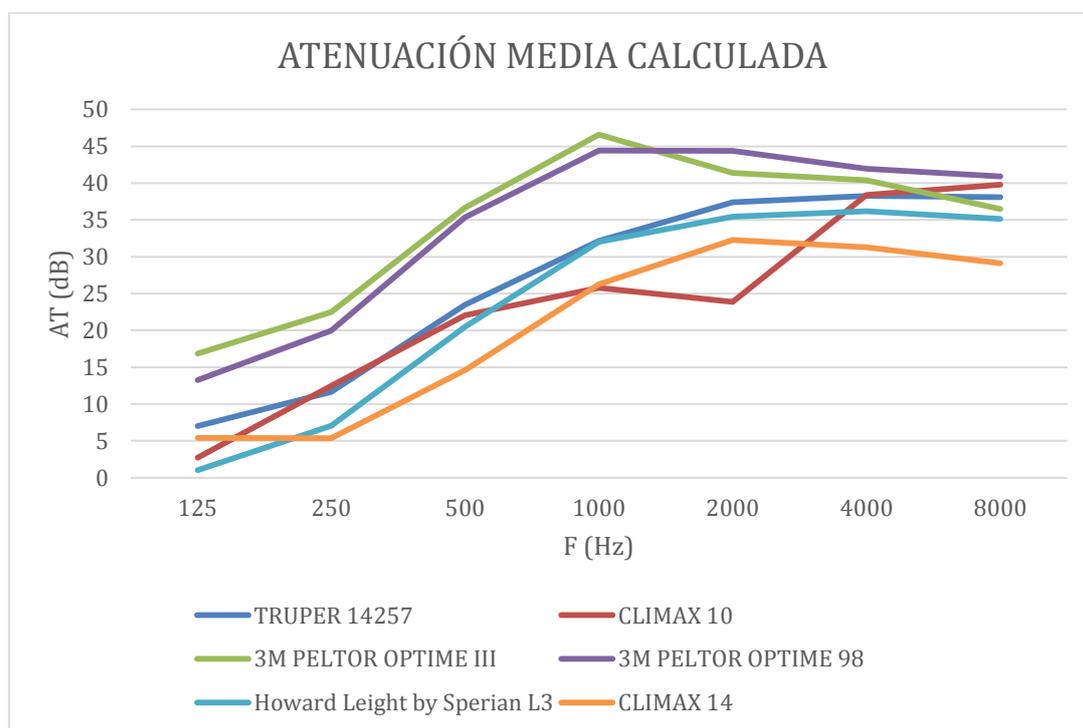


Figura 44. Atenuación media calculada por banda de frecuencia de los protectores auditivos estudiados.

En la figura 47, también apreciamos que las especificaciones de los fabricantes coinciden en tendencia con las curvas de atenuación media encontradas, ya que en bajas frecuencias ofrece una menor atenuación que en altas frecuencias. Los protectores tienen variaciones en sus curvas de atenuación con respecto a los valores encontrados (figura 46), como el protector Climax 14, que los valores encontrados son menores a los del fabricante y el protector 3M Peltor Optime III se mantiene como el protector con mejor atenuación en los dos casos.

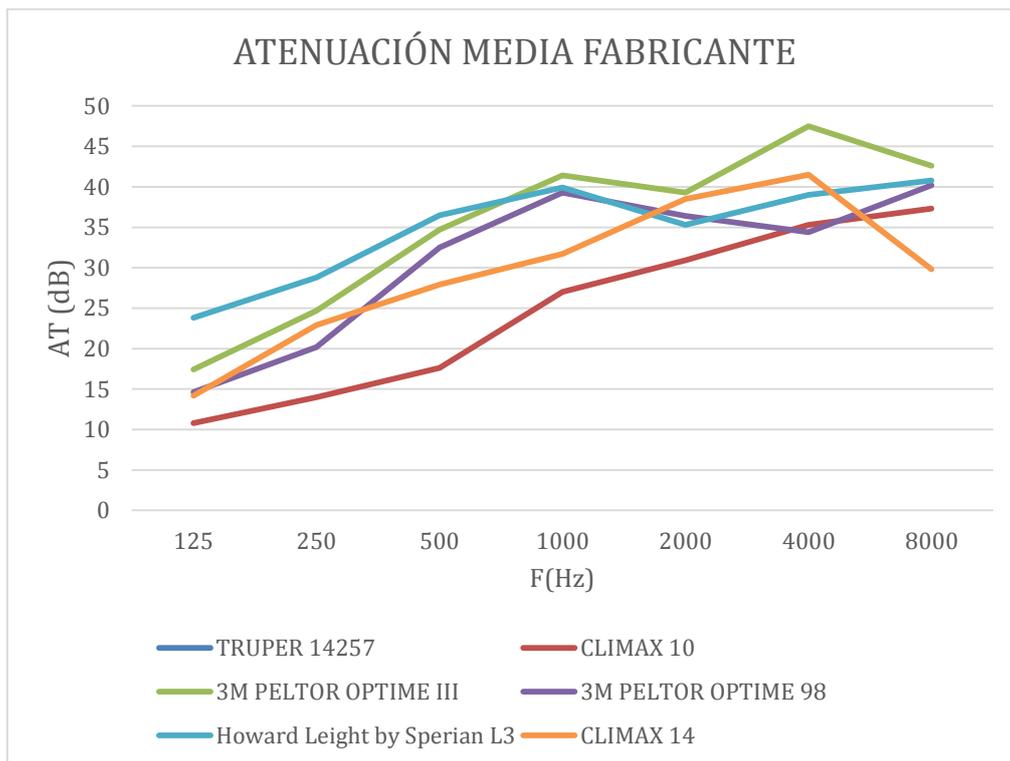


Figura 45. Atenuación media dada por el fabricante por banda de frecuencia de los protectores auditivos estudiados.

Con los resultados de número simplificado de atenuación, se procede a realizar una comparativa “Costo versus Beneficio”, en donde se encuentra una relación directa entre el costo y la atenuación que un protector auditivo entrega. Los valores de atenuación (NNR y SNR), según el valor encontrado y comparado con los datos del fabricante, se colocan dentro del mismo gráfico, ya que al hablar de un número resumido de atenuación podemos compararlos entre sí, para así, cotejar las atenuaciones que cada protector auditivo entrega.

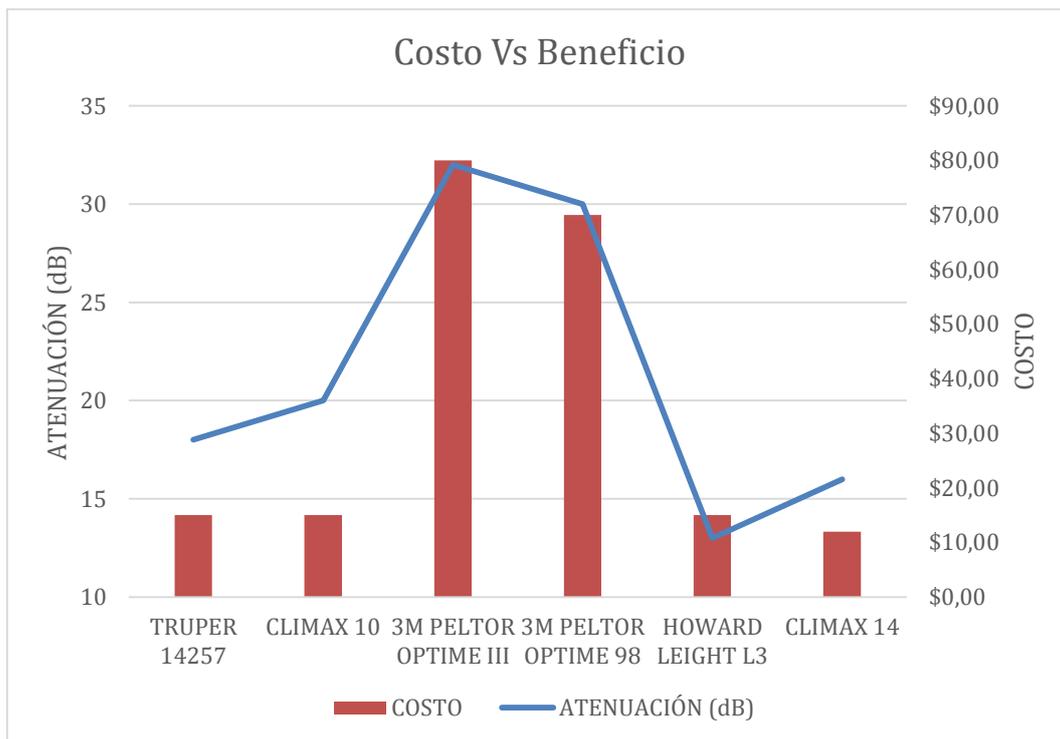


Figura 46. Comparativa Costo vs Beneficio de los protectores auditivos analizados.

5. Conclusiones

La evaluación de protectores auditivos mediante un sistema de escucha binaural artificial, entregó datos similares a los mostrados por el fabricante de los protectores auditivos analizados. Dando a entender, que el experimento puede ser una herramienta para obtener valores de atenuación de protectores auditivos de tipo orejera, obteniendo así una validación de la especificación del dispositivo de protección auditiva analizado.

Con respecto a la desviación estándar obtenida, los valores encontrados, son inferiores a los entregados por los fabricantes. Debido a que en nuestra experimentación no se utilizó sujetos de prueba, mientras que los fabricantes, como parte de su evaluación y caracterización de atenuación del protector auditivo si lo realizan, lo cual aumenta las desviaciones de los resultados.

Cuatro de seis protectores auditivos tienen valores próximos en atenuación media, SNR o NNR (acorde el protector auditivo), sugiriendo que la experimentación entrega resultados confiables, ya que al repetir el procedimiento, se volvieron a obtener resultados semejantes. Mientras que en los dos protectores auditivos restantes, no se puede afirmar que el fabricante entregó valores erróneos, más se puede suponer que existieron errores de sujeción de las orejeras por la forma del Dummy Head, teniendo así en cuenta que la sujeción de la orejera debe la correcta para obtener una atenuación esperada acorde a la ficha técnica del protector auditivo.

La especificación de atenuación viene dada por el número resumido de atenuación, en donde se aprecia que esta especificación es variable con dos números resumidos, SNR y NNR. Así, para evaluarlos se debe acudir a su ficha técnica, para así escoger una metodología correcta. En el caso de esta experimentación, debido a los datos de los fabricantes, se procedió a encontrar la atenuación media, desviación estándar, SNR y NNR para proceder con la comparación.

Los protectores auditivos 3M Peltor Optime III y 3M Peltor Optime 98 tienen un coste mayor a los demás, y tienen una atenuación mayor. En donde se aprecia una relación directa entre el coste de un protector auditivo y su número simplificado de atenuación, dándonos a entender que a mayor costo, mayor protección auditiva obtendremos.

Una manera de obtener mejor atenuación de ruido, puede ser la combinación de dos tipos de protectores auditivos, es decir, Tipo orejera y protectores de inserción (Moldeables o pre moldeados).

La atenuación en bajas frecuencias en los protectores auditivos analizados es baja, lo cual podría sugerir un nuevo estudio para elevar la atenuación en esta parte del espectro, como el diseño del material o espesor de los materiales de los protectores auditivos de tipo orejera.

Para finalizar, se sugiere que el campo acústico de la medición sea cerrado y lo más difuso posible (de preferencia una cámara difusa), debido a que se espera simular un ambiente de trabajo donde los protectores auditivos tipo orejera son más utilizados, es decir, una galpón industrial. Esto, con el objetivo de obtener una excitación del campo sonoro igual en todas las direcciones de incidencia del protector auditivo. Además, el uso de una fuente omnidireccional y ruido rosa, ayuda a que la energía acústica se distribuya de manera uniforme en el lugar de medición y en las bandas de frecuencia analizadas. Se espera generar niveles de ruido altos para las mediciones (100dB aproximadamente) y un ruido de fondo bajo, para obtener así una relación señal a ruido de 40dB.

Referencias

- 3M (s.f.). PELTOR Optime III. Recuperado el 03 de octubre del 2018 de https://www.3m.com.ec/3M/es_EC/inicio/todos-los-productos-3m/~/3M-PELTOR-Optime-III-H540A-Orejeras/?N=5002385+3294471240&rt=rud
- 3M (s.f.). PELTOR Optime 98. Recuperado el 03 de octubre del 2018 de https://www.3m.com.ve/3M/es_VE/inicio/todos-los-productos-3m/~/3M-Peltor-Optime-98-Orejeras-Sobre-la-Cabeza-Conservaci%C3%B3n-de-la-Audici%C3%B3n-H9A-10-pieza-aja/?N=5002385+3294758531&rt=rud
- Alam, N., Sinha, V., Jalvi, R., Gurnani, D., Barot, D., & Suryanarayan, A. (2013). Comparative study of attenuation measurement of hearing protection devices by real ear attenuation at threshold method. *Indian Journal of Otolaryngology*, 19(3), 127. doi:10.4103/0971-7749.117477
- Almeida-Agurto, D. D., Gerges, S. N., & Arenas, J. P. (2011, 06). MIRE-IL methodology applied to measuring the noise attenuation of earmuff hearing protectors. *Applied Acoustics*, 72(7), 451-457. doi:10.1016/j.apacoust.2011.01.009
- Biabani, A., Aliabadi, M., Golmohammadi, R., & Farhadian, M. (2017, 12). Individual Fit Testing of Hearing Protection Devices Based on Microphone in Real Ear. *Safety and Health at Work*, 8(4), 364-370. doi:10.1016/j.shaw.2017.03.005
- Climax. (s.f.). Protector oídos climax 10. Recuperado el 03 de octubre del 2018 de <https://www.productosclimax.com/producto/protector-oidos-climax-10/>
- Climax. (s.f.). Protector oídos climax 14. Recuperado el 03 de octubre del 2018 de <https://www.productosclimax.com/producto/protector-oidos-climax-14/>
- Franks, J., Berger, E. (1998). Hearing Protection. In *Encyclopedia of Occupational Health and Safety, volume (1), chapter Personal Protection. International Labour Office, 4th edition.*

- Gerges, S. N., & Arenas, J. P. (2004). *Fundamentos y control del ruido y vibraciones*. NR.
- Görne, T. (2014). *Tontechnik*. Hanser.
- Howard Leight. (s.f.). Leightning L3 Earmuff. Recuperado el 09 de octubre del 2018 de <http://www.howardleight.com/ear-muffs/leightning-l3>
- ISO 3382. (2008). Métodos utilizados para la medición del tiempo de reverberación.
- Johnson, B. W. (2011). *Processing of Binaural Information in Human Auditory Cortex*. INTECH Open Access Publisher.
- Kozłowski, E., & Młyński, R. (2017, 06). Measurement of Earmuffs Attenuation at High Audible Frequencies. *Archives of Acoustics*, 42(2), 249-254. doi:10.1515/aoa-2017-0027
- Manager, I. C. (s.f.). Hearing Protection. Recuperado el 01 de noviembre del 2018 de <http://www.iloencyclopaedia.org/component/k2/49-31-personal-protection/690?Itemid=321>
- McGinnity, S., Beach, E., Mulder, J., & Cowan, R. (2017). Caring for musicians' ears: Insights from audiologists and manufacturers reveal need for evidence-based guidelines. *International Journal of Audiology*, 57(Sup1). doi:10.1080/14992027.2017.1405288
- Mello, A. (1999). Alerta al Ruido Ocupacional. (*Tesis de maestría*). Centro de Especialización en Fonoaudiología Clínica.
- NCh 1331/6, (2001). Protectores Auditivos – Parte 6: Estimación de los niveles de presión sonora efectivos ponderados A cuando se utilizan protectores auditivos. *Ministerio de salud Chile*.
- Neumann. (s.f.). KU 100. Recuperado el 04 de diciembre del 2018 de <https://en-de.neumann.com/ku-100>
- Nélisse, H., Cocq, C. L., Boutin, J., Laville, F., & Voix, J. (2015). Systematic Evaluation of the Relationship between Physical and Psychoacoustical Measurements of Hearing Protectors' Attenuation. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 12(12), 829-844. doi:10.1080/15459624.2015.1053893
- NTP 638. (2003). Estimación de la atenuación efectiva de los protectores

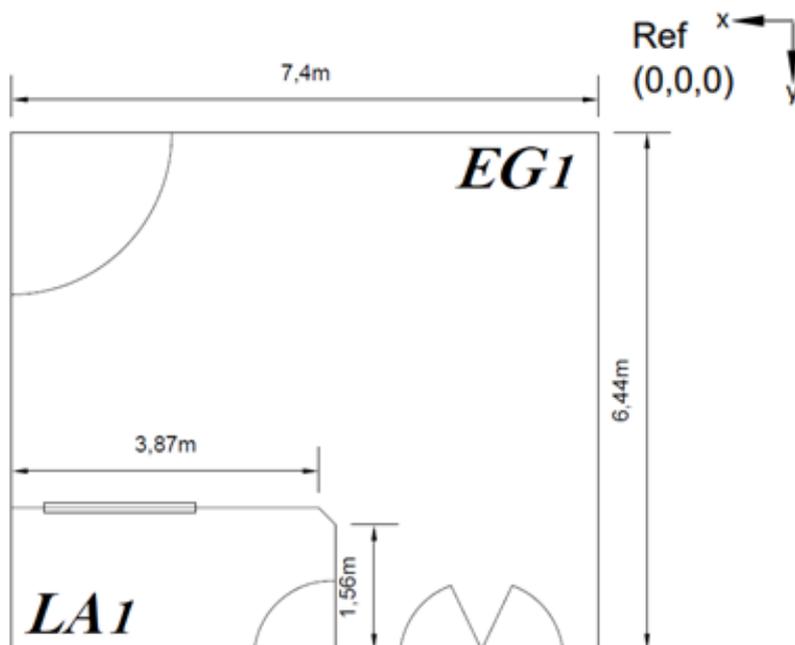
auditivos. *Ministerio de trabajo y asuntos sociales España.*

- Olson, H. F. (2014). *Music, physics and engineering*. Dover Publications.
- Rodríguez, R. (2011). Técnicas de sonido binaural en la postproducción Audiovisual. (*Tesis de maestría*). *Universidad politécnica de Valencia.*
- SpectraPLUS-SC Product Options. (s.f.). Recuperado el 15 de octubre del 2018 de <http://www.spectraplus.com/ProductOptionsSC.htm>
- Esselacoustics. (2018). *The Assumed Protection Value (APV)*. Recuperado el 02 de enero del 2019 de <https://esselacoustics.com/news/assumed-protection-value-apv/>
- Truper. (s.f.). *Truper 142527*. Recuperado el 03 de octubre del 2018 de https://www.truper.com/CatVigente/img/modulos_gr/26204.gif
- Wahbeh, H., Calabrese, C., & Zwickey, H. (2007). Binaural Beat Technology in Humans: A Pilot Study To Assess Psychologic and Physiologic Effects. *The Journal of Alternative and Complementary Medicine*, 13(1), 25-32. doi:10.1089/acm.2006.6196
- Williams, W. (2012). A proposal for a more refined single number rating system for hearing protector attenuation specification. *Noise and Health*, 14(59), 210. doi:10.4103/1463-1741.99897

Anexos

ANEXO 1

Posiciones de medición para comprobación de difusividad de la sala.



Referencia de puntos de medición para comprobación de difusividad.

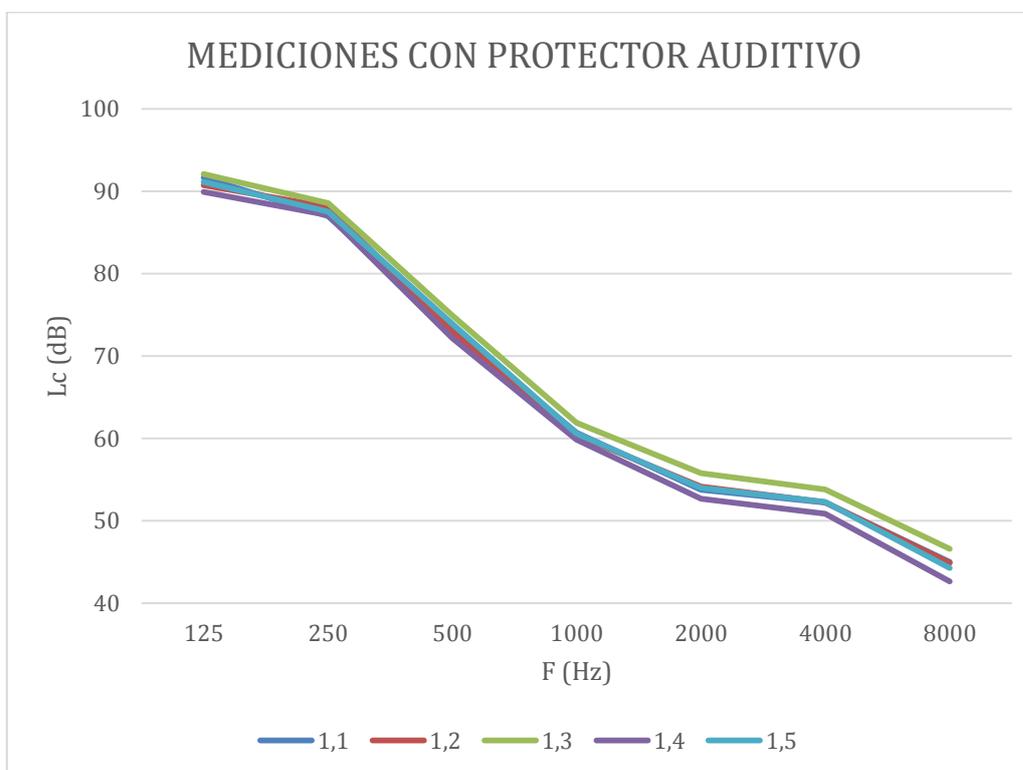
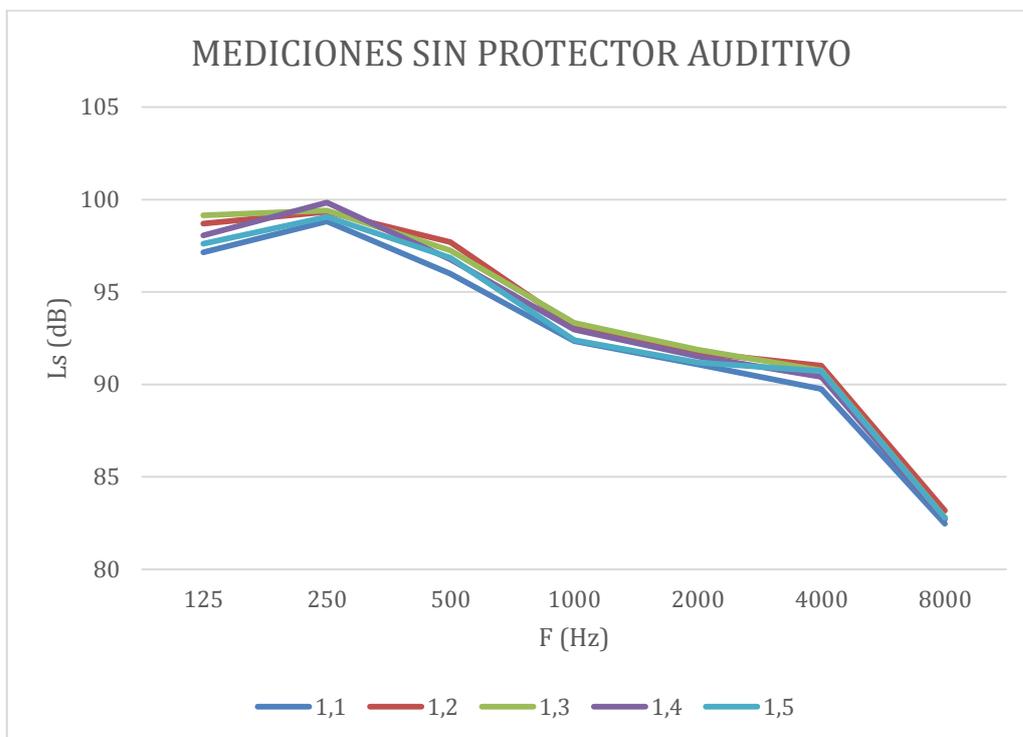
Puntos de medición para comprobación de difusividad.

Fuente	Posición	X (m)	Y (m)	Z (m)
FUENTE 1		6,02	2,04	1,4
1	1	4	3,04	1,4
1	2	4,09	1,02	1,4
1	3	4	1,08	1,4
FUENTE 2		1,15	3,01	1,4
2	1	2,1	1,07	1,4
2	2	1,07	5,04	1,4
2	3	1,05	4,05	1,4

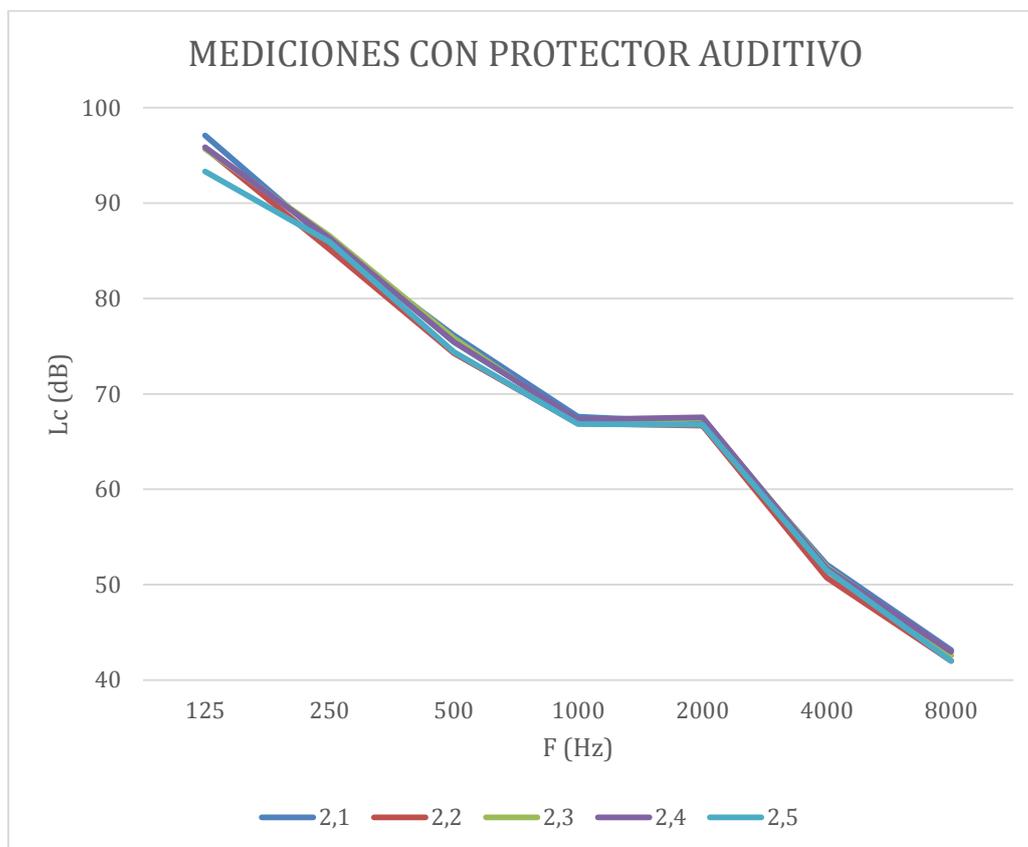
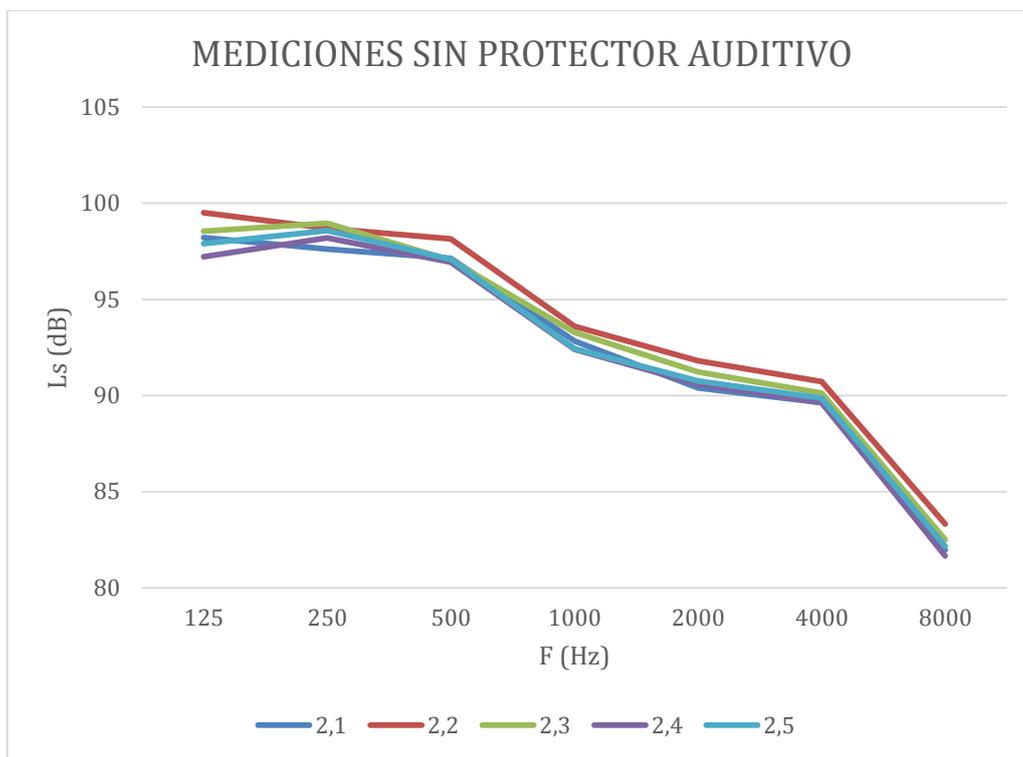
ANEXO 2

Mediciones obtenidas de los protectores auditivos analizados.

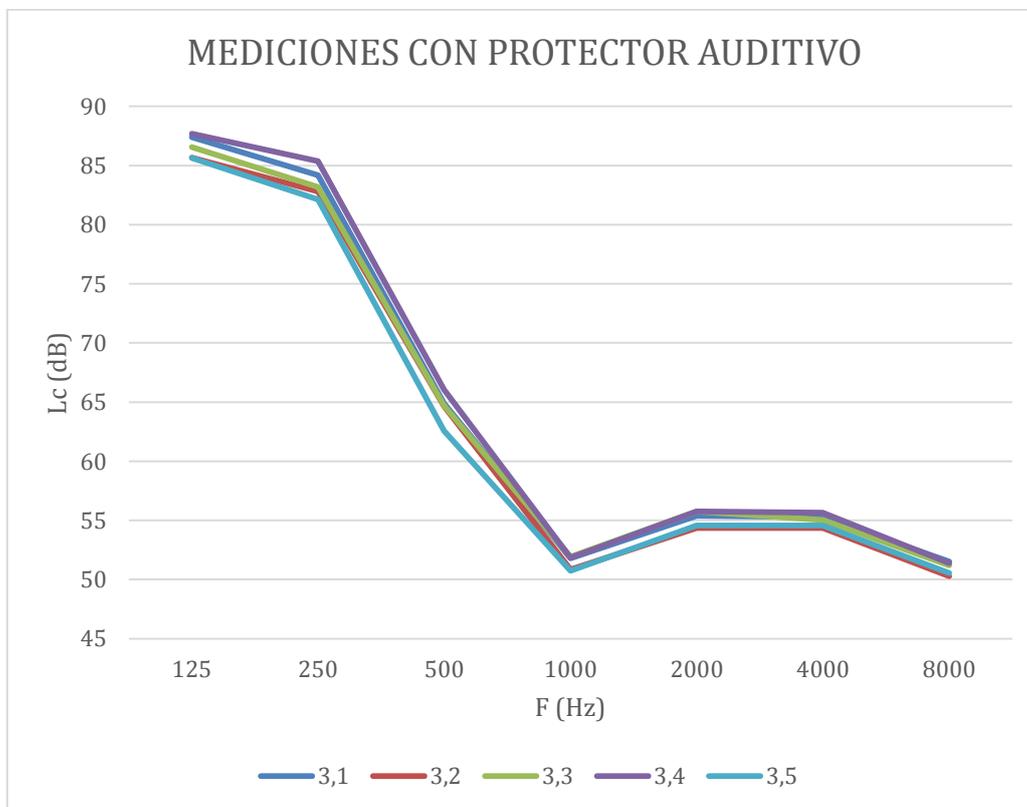
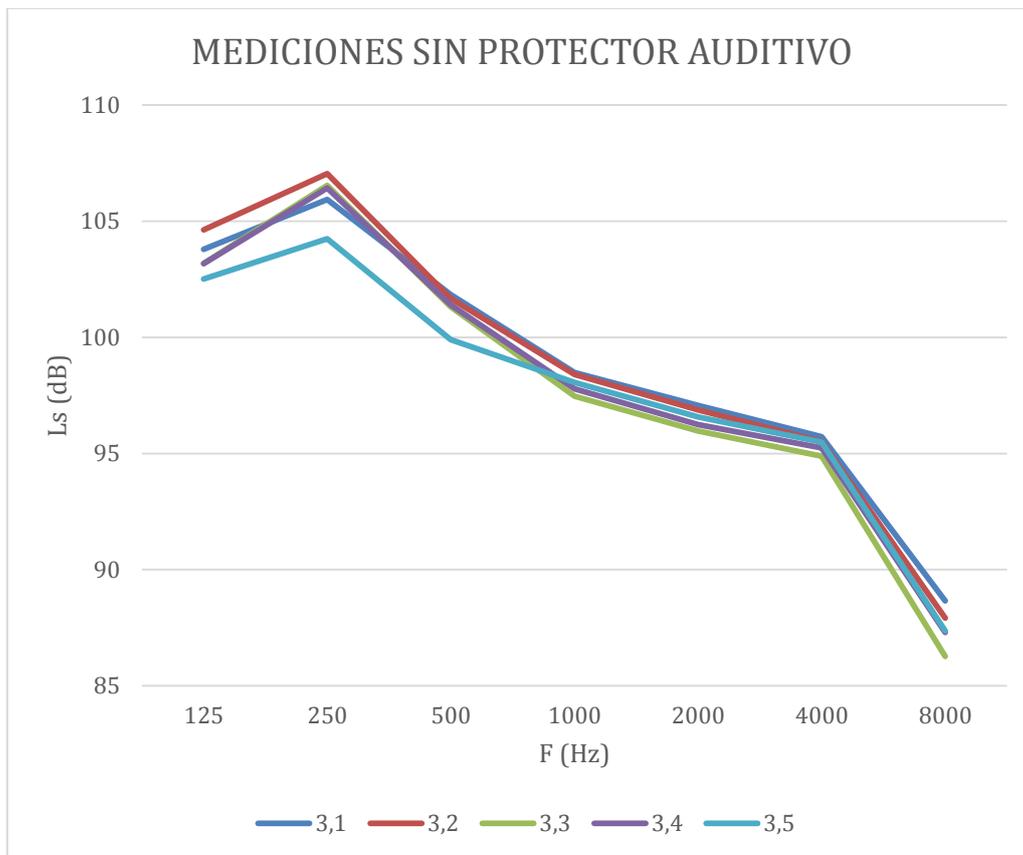
Truper 14257



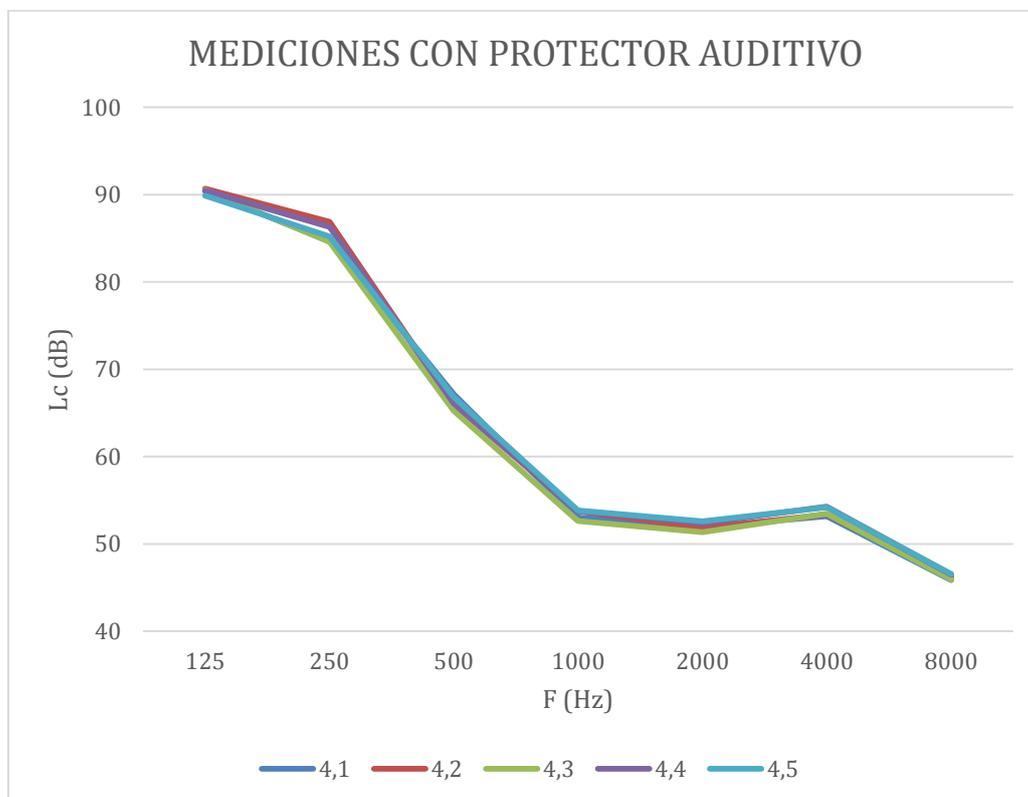
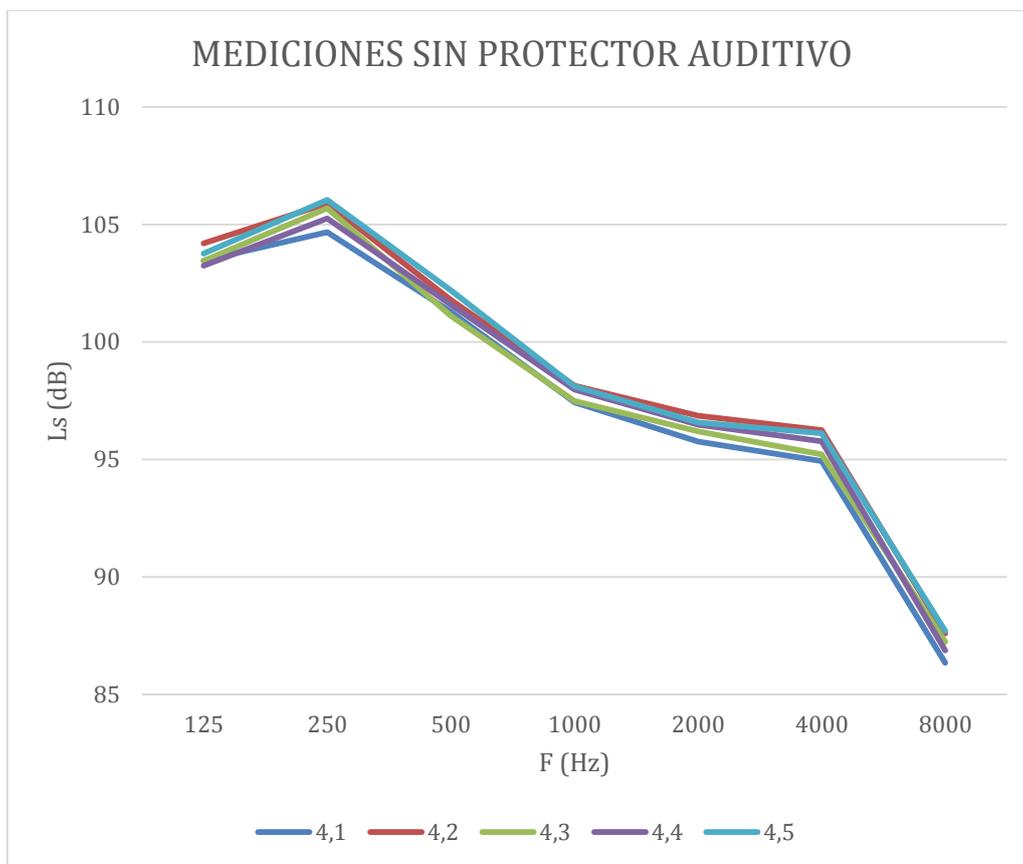
Climax 10



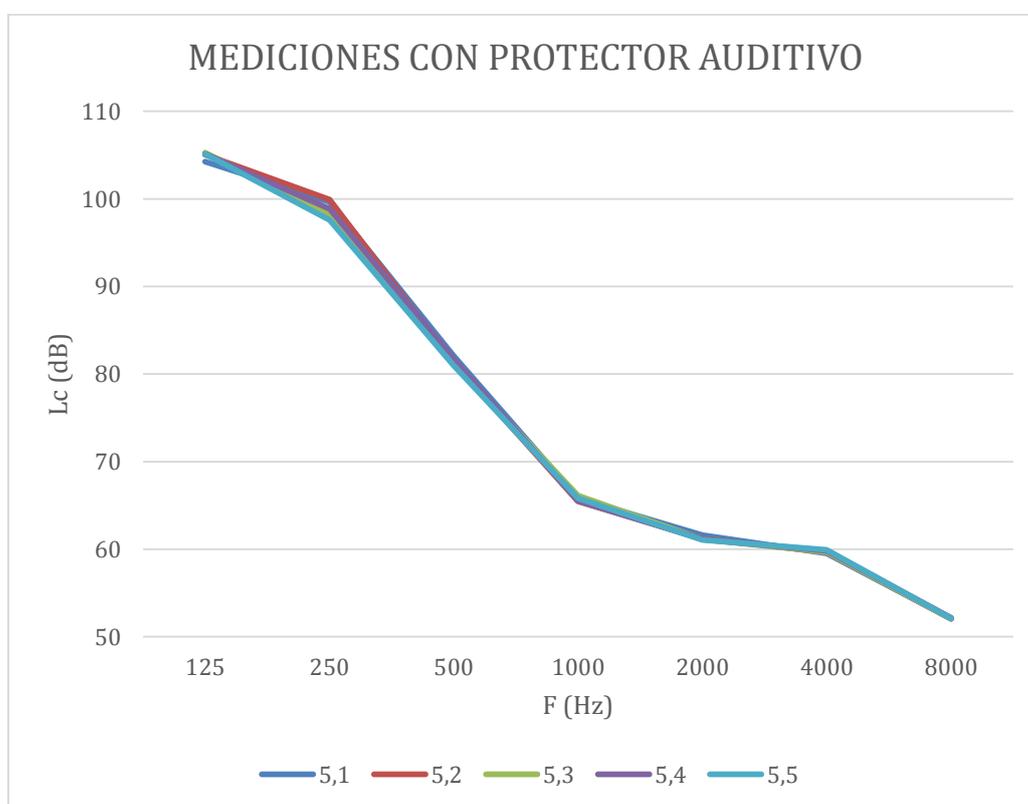
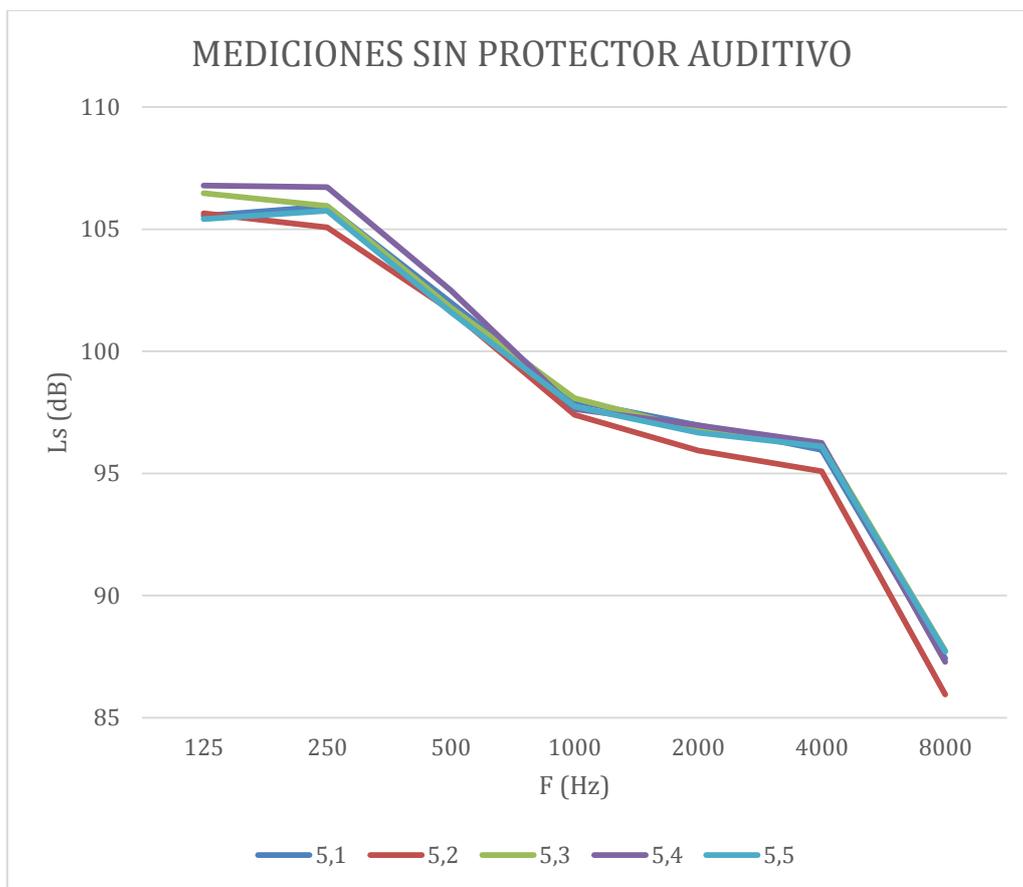
3m Optime Peltor III



3m Optime Peltor 98



Howard leight L3



Climax 14

