

Determinación de la atenuación en dispositivos auditivos tipo orejera aplicados en la protección, comunicación y entretenimiento con control activo de ruido

Determination of the attenuation of earmuff active noise control devices applied to the protection, communication, and entertainment.

Daniel Catalán Urra¹, Jorge P. Arenas², Samir N.Y. Gerges³

¹ Instituto de Acústica, Univ. Austral de Chile, Casilla 567, Valdivia, Chile. E-mail: dacustico@gmail.com

² Instituto de Acústica, Univ. Austral de Chile, Casilla 567, Valdivia, Chile. E-mail: jparenas@uach.cl

³ Laboratorio de Ruido Industrial, Univ. Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC 88040-900, Brasil, E-mail: samir@emc.ufsc.br

RESUMEN

En este trabajo se expone un análisis para determinar el desempeño en la reducción del ruido de tres tipos de Dispositivos Auditivos (DA) con cancelación activa de ruido aplicados a la protección, comunicación y entretenimiento utilizando como referencia tres normas una Europea (SS-EN 352-4), otra estadounidense (ANSI/ASA S12.42-2010) y otra Internacional (ISO 4869-6), que entregan todas las especificaciones técnicas, teóricas y prácticas para evaluar el desempeño. Serán presentados también dos de los métodos más utilizados para evaluar el desempeño de estos dispositivos: método objetivo micrófono en el oído real “Microphone In Real Ear” MIRE y el método subjetivo de atenuación en el umbral del oído real “Real Ear Atenuación Treshold” REAT. Son presentados también el principio de funcionamiento de tales dispositivos. Finalmente, se presenta un análisis comparativo con otros trabajos previos que abordan el tema.

Palabras clave: Control activo del ruido, protector auditivo pasivo, cancelación de ruido, pérdida por inserción, atenuación sonora.

ABSTRACT

In this work a detailed analysis for determining the performance in noise reduction of three types of active noise cancellation hearing devices, which are applied to the protection, communication

and entertainment is presented. This work was done using three standards available as references: a European (SS-EN 352-4), American (ANSI/ASA S12.42-2010) and the international one (ISO 4869-6). These standards provide all of the technical, theoretical, and practical specifications to evaluate the performance of hearing protectors. It will also be presented two of the methods commonly used to evaluate the performance of these devices: the objective method, microphone in real ear MIRE, and the subjective method, called real ear attenuation at threshold REAT. The operating principle of such devices is also discussed. Finally, a comparative analysis with previous works reported in the literature is presented.

Key Words: Active noise control, Passive Hearing Protector, Noise Cancelling, Insertion Loss, sound attenuation.

1. OBJETIVO

Los objetivos principales de este trabajo son: a) obtener el desempeño objetivo de la atenuación del ruido en tres tipos de Dispositivos Auditivos Activos (DAA), usando la metodología MIRE descrita en tres normas internacionales, b) describir las características de funcionamiento de estos dispositivos y c) determinar la posible dependencia del Nivel de Presión Sonora para atenuar el ruido.

2. MARCO TEÓRICO

En esta sección se exponen los conceptos teóricos del trabajo, incluyendo una descripción del concepto de control activo de ruido y sus principales aplicaciones.

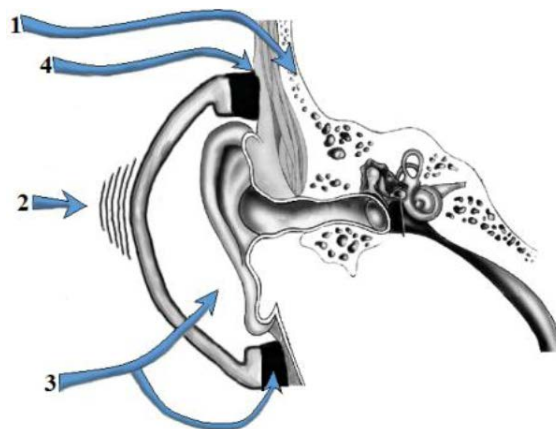


Figura 1: Diagrama de los cuatro caminos recorridos por el sonido: 1) Transmisión vía ósea y tejido humano, 2) Transmisión a través de las vibraciones provocadas por el PA, 3) Transmisión a través de los materiales del PA, 4) Transmisión producida por filtración a través del contacto del PA y la cabeza.

2.1. PROTECTOR AUDITIVO CONVENCIONAL

Como los daños auditivos son provocados normalmente en el oído interno, el Protector Auditivo (PA) actúa como una barrera que dificulta el paso del sonido y protege el oído interno [Botsford, 1972]. Según Gerges y Arenas [Gerges y Arenas, 2010] la energía acústica puede llegar al oído interno por cuatro diferentes caminos como se puede apreciar en la Figura 1.

3. CONTROL ACTIVO DE RUIDO

Actualmente existen dos tipos de Control Activo de Ruido (CAR): Los sistemas de control activo de ruido que utilizan un altavoz como actuador para cancelar el ruido, los cuales generan una onda sonora desfasada 180° con respecto a la onda sonora original, produciendo una interferencia destructiva y los sistemas de cancelación activa estructural, que utilizan como actuador un transductor de vibraciones (acelerómetro), ubicado en una estructura flexible que genera el ruido.

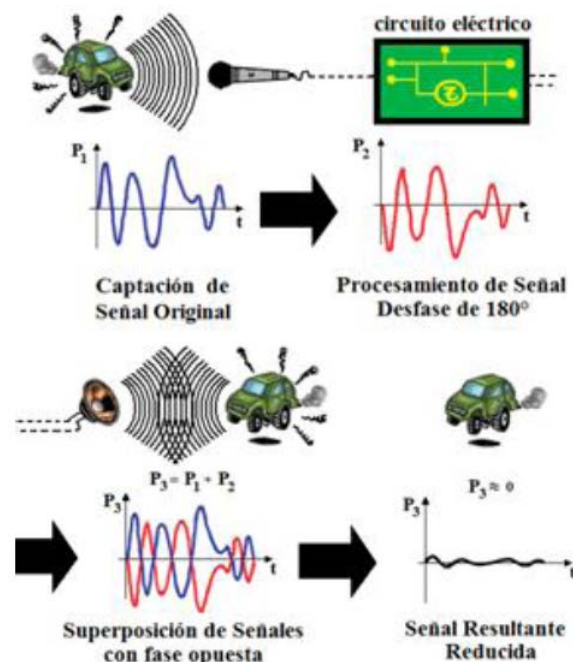


Figura 2: Etapas del proceso de control activo de ruido aplicado en la acústica.

El funcionamiento del CAR se basa en el principio de interferencia destructiva. Primero, a través de un transductor electro-acústico de entrada (un micrófono o acelerómetro), se capta el ruido transformando las fluctuaciones de presión en el aire en variaciones de voltaje. Después, en la señal electrónica equivalente se produce un retardo temporal en la señal de entrada generando una nueva señal que se debe encontrar desfasada 180° con respecto a la señal original. Finalmente, a través de un transductor electro-acústico de salida (un altavoz o acelerómetro), se reproduce la nueva señal de anti-ruido que es superpuesta a la señal original. Así, los máximos de amplitud de presión sonora

del ruido original son superpuestos con los mínimos de amplitud de presión sonora del anti-ruido, cancelando ambas señales y eliminando el ruido, como se puede apreciar en la Figura 2.

3.1. CONTROL ACTIVO DE RUIDO EN DISPOSITIVOS AUDITIVOS

Al referirse a Dispositivos Auditivos DA, se hace mención a todos los tipos de aparatos que se encuentren vinculados al proceso psicológico y fisiológico que produce la sensación de audición aplicados a la protección, en el caso de los protectores auditivos, a la comunicación para los auriculares con micrófonos y para el entretenimiento, con los tipos de auriculares. Todos estos tipos de DA actualmente pueden incorporar el sistema de CAR como complemento para reducir el ruido externo y facilitar su función específica para la cual fueron diseñados.

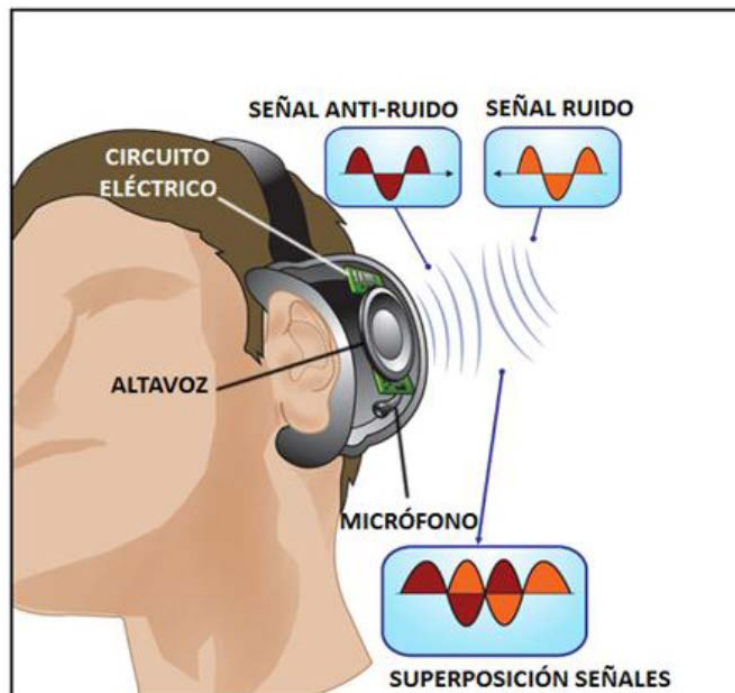


Figura 3: Esquema de los procesos involucrados en la reducción de ruido en DAA. Imagen extraída del sitio web del Blog Indio [The Blogger Indian].

El proceso de captación sonora en un Dispositivo Auditivo Activo (DAA) es realizado por un micrófono en miniatura, el cual debe ser de alta sensibilidad y direccionalidad para captar todas las variaciones de ruido y en algunos casos, señales de audio de entrada mezcladas con ruido. Se presume que un micrófono electroestático de condensador podría ser bastante útil debido a su buena respuesta de frecuencia. Este micrófono se encuentra ubicado generalmente dentro de la copa de los DAA y por lo tanto, se encuentra en la etapa más importante del sistema donde se procesa la señal eléctrica correspondiente y que es realizado por un circuito electrónico. Este circuito utiliza

filtros análogos y digitales para realizar tal proceso de inversión de fase y corrección de los errores. Este circuito se encuentra ubicado, en algunos casos, al interior de la copa del DAA. Finalmente, a través de un pequeño altavoz se reproduce la señal de anti-ruido que producirá la reducción. En la Figura 3 se encuentra ilustrado el esquema del funcionamiento de los DAA.

Existen diferentes tipos de configuraciones para la implementación del sistema de CAR aplicados en los DA, que varían según la ubicación de los micrófonos, la utilización de varios micrófonos, las distintas funciones desempeñadas por el altavoz para el caso de los auriculares (entretenimiento) y auriculares con micrófonos (comunicación) y los diferentes tipos de filtros tanto análogos como digitales utilizados para procesar la señal. En la Figura 4 se puede apreciar el esquema de un auricular activo ilustrando algunos de sus componentes principales.

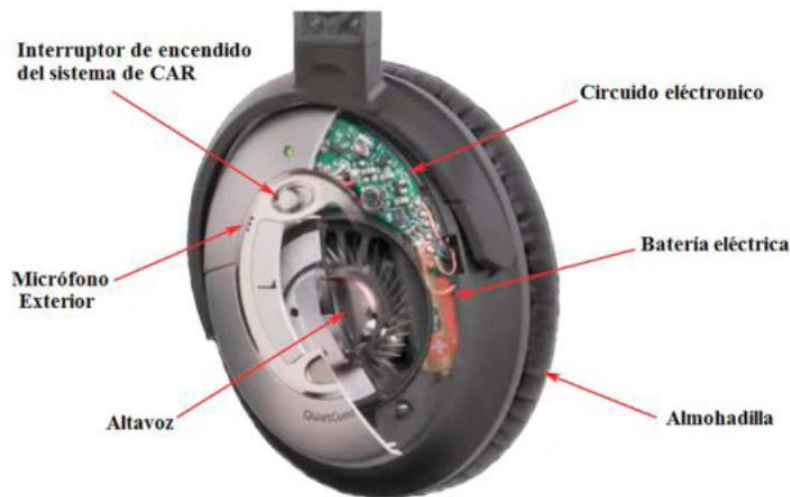


Figura 4: Esquema interior de un auricular con el sistema de CAR incorporado. Imagen extraída de la Empresa de Audio “BOSE”.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. MÉTODOS UTILIZADOS

Actualmente existen dos métodos que pueden ser utilizadas para evaluar la atenuación de DAA utilizando sujetos reales: el método REAT, “*Real-Ear-Attenuation-Threshold*” (Atenuación en El Umbral del Oído Real), estandarizada en la norma ANSI/ASA S12.6 y el método MIRE, “*Microphone-in-Real-Ear*”, (Micrófono en el Oído Real), estandarizada en la norma ANSI/ASA S12.42. La metodología MIRE se encuentra además incorporada en la norma internacional ISO 4869-6 y la Europea SS-EN-325-5. Ambas metodologías son utilizadas para evaluar la atenuación de PA tipo orejera, de inserción y los aplicados en un casco de seguridad.

La metodología REAT es considerada como la mejor opción para realizar la evaluación de atenuación a los PA, debido a que depende de la respuesta subjetiva del sujeto, detectando los cambios en el umbral auditivo de éste. La segunda metodología MIRE depende de la instrumentación para realizar la evaluación de los PA, convirtiéndola en una metodología objetiva pero de menor precisión que la anterior.

Sin embargo, el método REAT no puede ser aplicado para la evaluación de los dispositivos auditivos con CAR estudiados en este trabajo, debido a varios factores que limitan su utilización, tales como: 1) no poseer las instalaciones ni equipos de medición adecuados para realizar tal prueba, 2) el inherente ruido propio (“*Siseo*”), producido por los dispositivos con CAR, el cual excede el umbral de audición en el rango de frecuencias sobre 2 kHz, aumentando artificialmente el desempeño de tales dispositivos y sobreestimando la atenuación producida, y 3) el efecto de enmascaramiento producido por el ruido fisiológico bajo la condición de oclusión o protegido que puede sobreestimar los resultados de atenuación obtenidos en un rango determinado de frecuencias.

Una de las ventajas de la metodología MIRE sobre la REAT es que ésta no considera la influencia del Ruido Fisiológico “*Physiological Noise*” (PN) ruido producido bajo la conducción de oclusión donde el oído es más sensible a ruidos como la circulación sanguínea, ritmo cardiaco, etc. y el cual tiene mayor influencia en bajas frecuencias. El método REAT considera el NPS en dB como parámetro de adquisición de datos. En cambio, el método MIRE utiliza como parámetro IL en dB, la que al ser una relación logarítmica elimina la contribución del PN y consecuentemente el Efecto de enmascaramiento “*Masking Effects*” (ME) producido por el PN [Perala y Casali, 2009]. Otro factor a favor del MIRE es que este método es realizado en un ambiente sonoro con elevado NPS que excede el efecto del ruido residual (“*Siseo*”), producido por el sistema de CAR, tornando también despreciable el efecto de enmascaramiento producido por éste y el PN, lo que es una gran ventaja sobre el método REAT.

Sin embargo, existe una gran desventaja del método MIRE puesto que no considera la transmisión del sonido vía Conducción Ósea “*Bone Conduction*” (BC) y tejido humano la cual produce en promedio una atenuación de entre 44 y 55 dB sobre los 2 kHz. Debido a esto, el método MIRE puede sobreestimar los valores de atenuación obtenidos, lo cual ocurre aproximadamente sobre los 2 kHz. Este fenómeno también es agravado por el efecto de oclusión *Occlusion effects* (OE), al igual que el caso del PN en el método REAT. Cabe aclarar que la metodología MIRE es la más adecuada para evaluar los DAA del presente trabajo, debido a las condiciones de infraestructura y equipos que se disponen, al tiempo que se tiene para realizar los ensayos y a todas las ventajas expuestas anteriormente del MIRE sobre el REAT.

4.2. CONSIDERACIÓN NORMATIVA Y MÉTODO DE EVALUACIÓN

La norma ANSI/ASA S12.42/2010 será la norma referente para realizar los ensayos debido a que es la más detallada, entregando todos los pasos a seguir, cómo deben ser realizados los ensayos, las consideraciones técnicas de los equipos de medición, campo acústico de la sala, requisitos de los sujetos de prueba y otras. De la norma Europea SS-EN -352-5-2003 sólo será utilizada la información que sea de utilidad para los ensayos.

4.3. MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

Cumpliendo algunas de las recomendaciones especificadas por la norma, para el ensayo se empleó un Micrófono de presión SV 25S y un Dosímetro Acústico SV 102 (ver Figura 5).

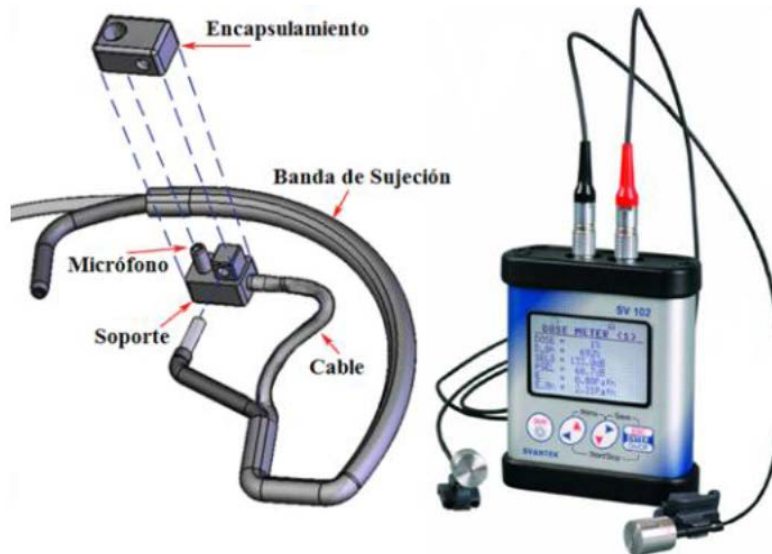


Figura 5: Micrófono de presión SV 25S con sus partes especificadas y dosímetro acústico SV 102.

4.3.1. DISPOSITIVOS AUDITIVOS ACTIVOS

A continuación se darán a conocer los tres tipos de DAA evaluados con los respectivos ensayos bajo la técnica MIRE, presentado algunas de sus características.

4.4. CONSIDERACIONES TÉCNICAS

Según las normas ANSI/ASA S12.42-2010 fueron considerados 10 sujetos entre hombres y mujeres para realizar las pruebas. Considerando las recomendaciones antes mencionadas y el análisis de las variaciones del NPS ilustrado, la señal de prueba utilizada es de 105 ± 3 dB.



Figura 6: Protector Auditivo Activo Marca TELSATE. En la figura se aprecia un micrófono, pero se encuentra inhabilitado.



Figura 7: Auricular con micrófono PELTOR ANR 9500, con su unidad de control externa indicando las opciones del menú.



Figura 8: Auricular Quietcomfort 15 “BOSE” con cancelación activa de ruido.

4.5. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN

El procedimiento se encuentra explicado con detalle en la norma ANSI/ASA S12.42-2010 para los Protectores Auditivos Activos PAA tipo orejera, el que de igual manera puede ser utilizado para los DAA estudiados en este trabajo.

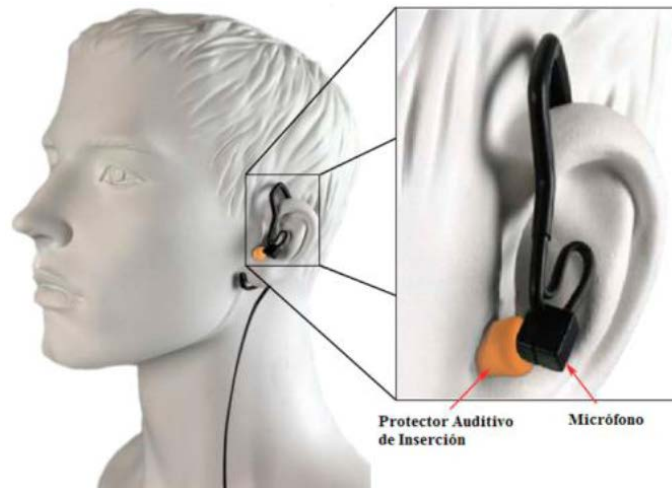


Figura 9: Esquema de localización de micrófono de medición y protector auditivo de inserción moldeable para la técnica MIRE.

4.5.1. ATENUACIÓN DE RUIDO

El parámetro de atenuación puede ser definido de dos maneras, a través de la diferencia aritmética de los NPS en la condición abierta y cerrada y como la relación logarítmica entre las

presiones acústicas en el tímpano en la condición abierta y cerrada, tal como se puede apreciar en la ecuación (1), que se determina para cada banda de octava.

$$IL = L_o - L_c = 10 \log \left(\frac{P_3}{P'_3} \right) \quad (1)$$

- L_o : Nivel de presión sonora en la condición abierto (no ocluido).
- L_c : Nivel de presión sonora en la condición cerrada (ocluido).
- P_3 : Presión sonora en el tímpano en la condición abierto.
- P'_3 : Presión sonora en el tímpano en la condición cerrado.

Secuencia (Abierto Cerrado, Abierto Cerrado) “ACAC”
a) Activar señal de Prueba.
b) Medición de oído abierto, L_o .
c) Colocación y ajuste del DAA a evaluar.
d) Tiempo de espera de 120 ± 5 s para ajuste final del DAA.
e) Medición en condición cerrada (oclusión) con sistema CAR off, L_{c-off} .
f) Encendido del sistema CAR con el interruptor. En caso de DAA “PELTOR” encendido de la unidad de control.
g) Espera de 10 s con señal de prueba activada.
h) Medición en Condición Cerrada con sistema CAR on, L_{c-on} .
i) Apagado del Sistema CAR y remover DAA.
j) Verificación de micrófonos y recomendaciones.
Repetir los pasos de (a) - (j), midiendo los NPS para la condición cerrado, cerrado/off y cerrado/on por segunda vez.

Tabla 1: Secuencia de medición adoptada de la norma ANSI/ASA S12.42/2010 para realizar las mediciones de los parámetros PIL, AIL y TIL

Debido a la evaluación de PA con el sistema de CAR, la norma ANSI/ASA S12.42-2001 incorpora la consideración de cuatro variantes del parámetro de IL, cuya nomenclatura abreviada será definida en inglés, debido al carácter universal del idioma.

1. **Pérdida de Inserción Pasiva, PIL (“Passive insertion loss”)**: Es definida como la diferencia $L_o - L_{c-off}$ entre los NPS en las condiciones abierto (L_o) y cerrado con el sistema CAR apagado (L_{c-off}).

2. **Pérdida de Inserción Activa, AIL (“Active Insertion loss”)**: Es definida como la diferencia, $L_{c-off} - L_{c-on}$ entre los NPS medidos en la condición cerrado con el sistema CAR apagado (L_{c-off}) y encendido (L_{c-on}).
3. **Pérdida de Inserción Total, TIL (“Total Insertion Loss”)**: Está definida como la diferencia $L_o - L_{c-on}$, entre los NPS medidos en la condición abierta y cerrada, con el sistema de CAR encendido.

4.5.2. SECUENCIA DE MEDICIÓN

La secuencia de medición adoptada de la norma ANSI/SASS12.42/2010 para realizar las mediciones de los parámetros PIL, AIL y TIL se observa en la Tabla 1

5. RESULTADOS

5.1. RESULTADOS DE ENSAYOS DE ATENUACIÓN DE RUIDO

Para el reporte de los resultados, serán presentados los parámetros PIL, AIL y TIL para cada DAA evaluado.

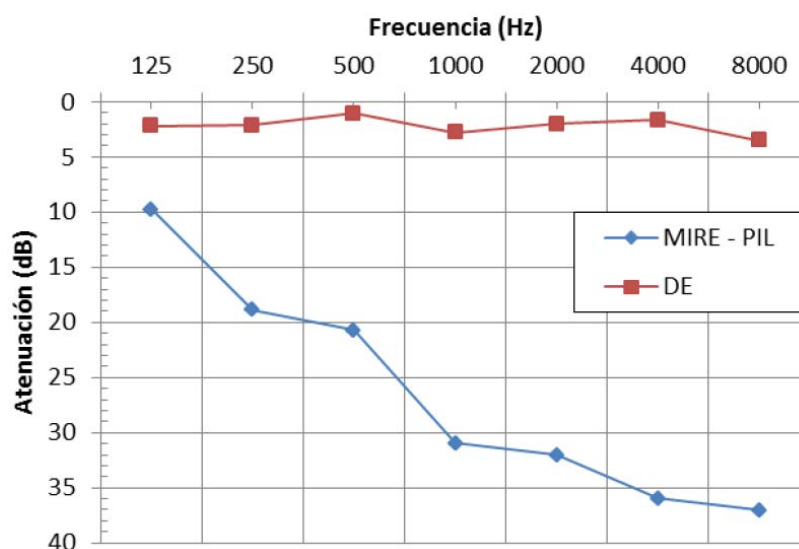


Figura 10: Promedio de la Pérdida de Inserción Pasiva (PIL) y Desviación Estándar (DE).

Los parámetros considerados serán entregados en bandas de octava desde 125 Hz hasta 8 kHz. Las bandas de frecuencia de 35,5 Hz y 63 Hz no fueron consideradas para la presentación de los resultados, debido a que sus valores en tales frecuencias no entregan un valor coherente de la atenuación de ruido.

En todos los resultados entregados se incorpora también la desviación estándar en dB.

5.1.1. PROTECTOR AUDITIVO ACTIVO PAAR 10 TELSATE

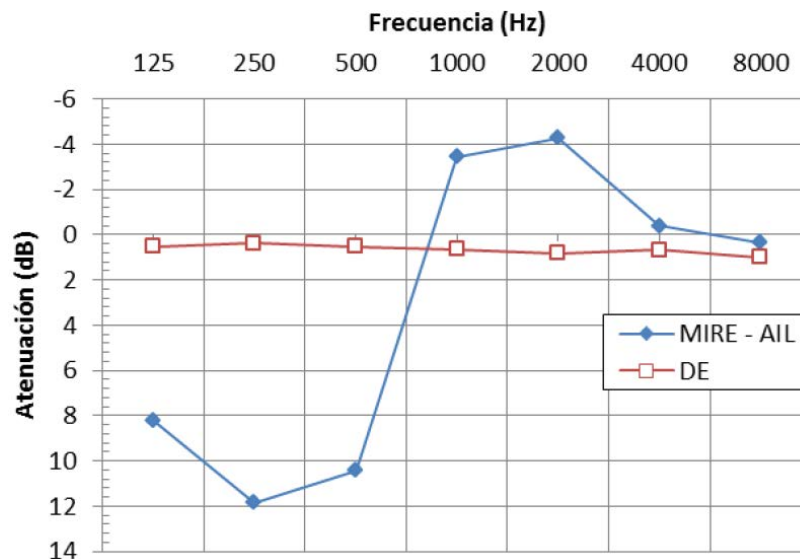


Figura 11: Promedio de la Pérdida de Inserción Activa (AIL) y Desviación Estándar (DE).

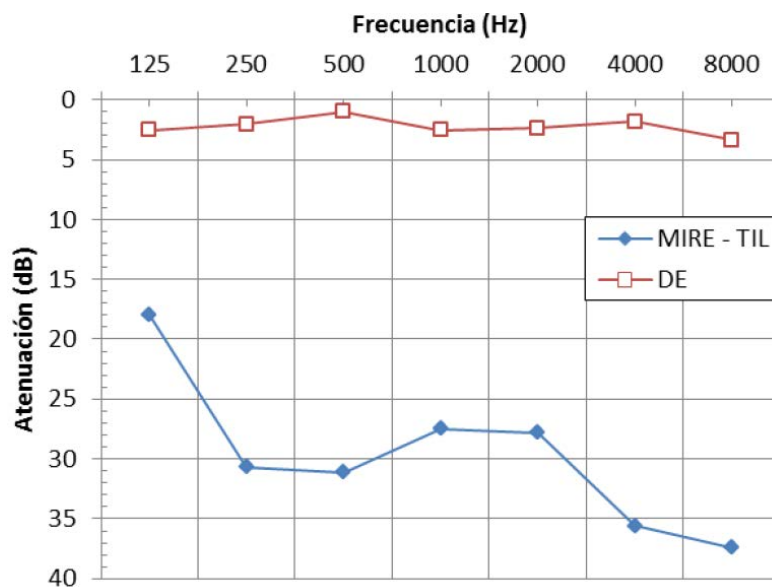


Figura 12: Promedio de la Pérdida de Inserción Total (TIL) y Desviación Estándar (DE).

5.1.2. AURICULAR CON MICRÓFONO ACTIVO ANR DIGITAL 9500 ‘PELTOR’

Este dispositivo poseía tres modalidades de funcionamiento que simulan tres ambientes diferentes, cabina de un helicóptero “*Heli*”, cabina de un aeroplano de un motor “*Single*”, y cabina

de un aeroplano con dos motores “*Twin*”. En los tres resultados de atenuación estas tres modalidades no mostraron diferencias significativas. Por esta razón sólo se va a utilizar los resultados de la modalidad “*Heli*” intentando ser representativo.

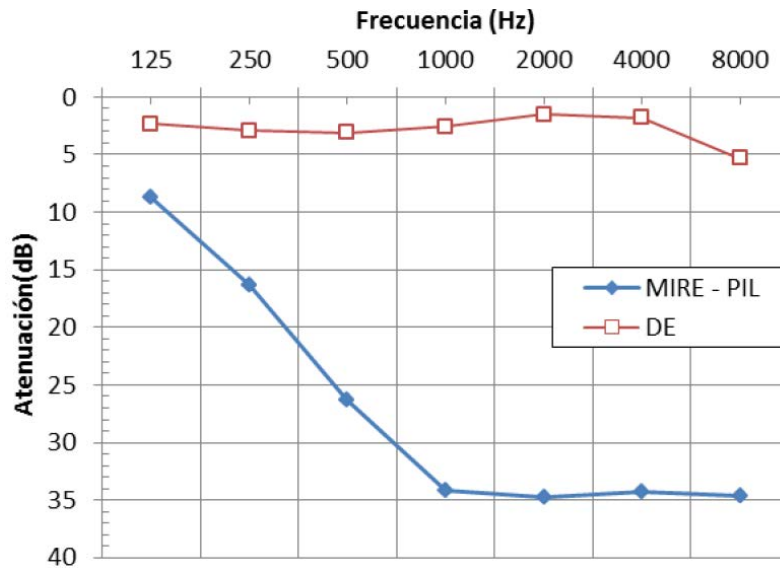


Figura 13: Promedio de la Pérdida de Inserción Pasiva (PIL) y Desviación Estándar (DE).

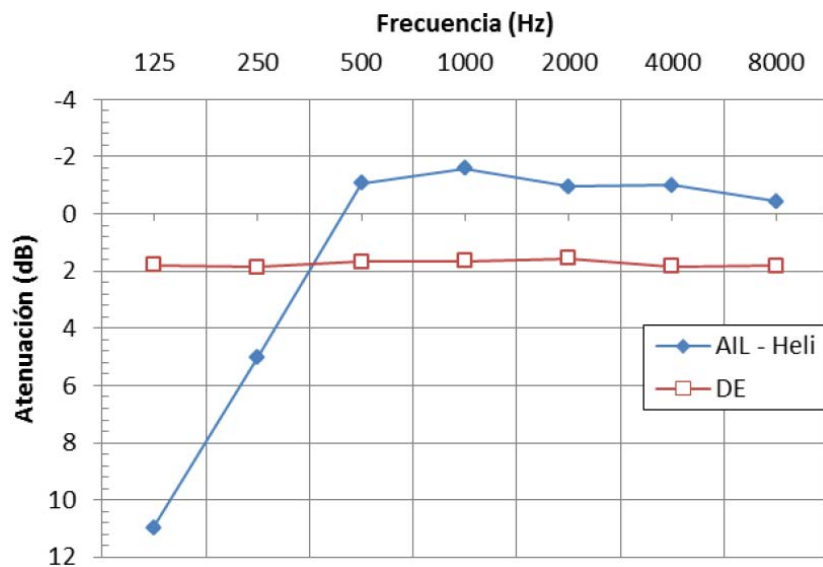


Figura 14: Promedio de la Pérdida de Inserción Activa (AIL) y Desviación Estándar (DE en la modalidad de funcionamiento helicóptero).

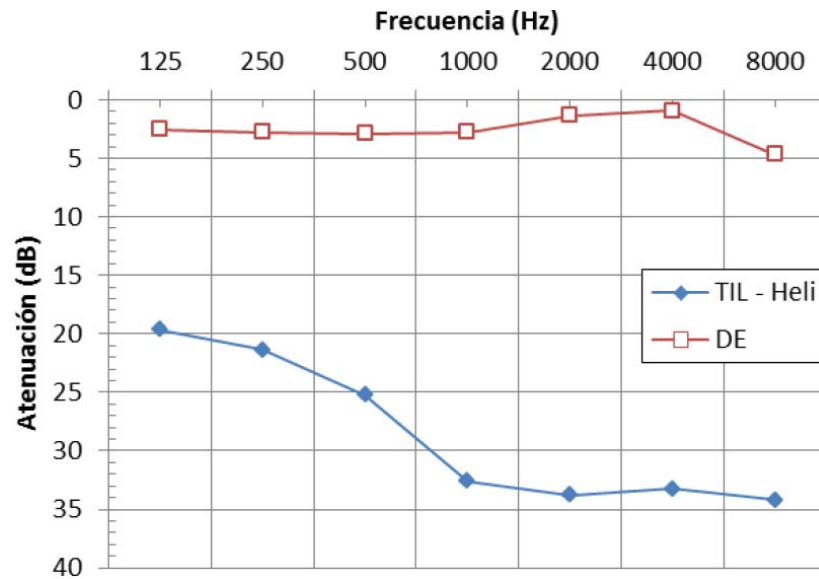


Figura 15: Promedio de la Pérdida de Inserción Total (TIL) y Desviación Estándar (DE), en la modalidad de funcionamiento helicóptero.

5.1.3. AURICULAR CON CANCELACIÓN DE RUIDO QUIETCOMFORT 15 BOSE

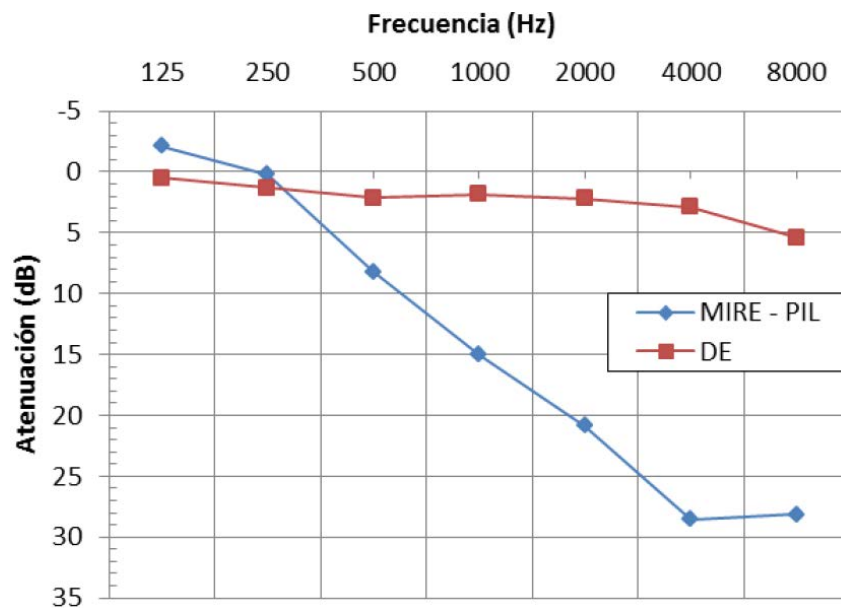


Figura 16: Promedio de Pérdida de Inserción Pasiva (PIL) y Desviación Estándar (DE).

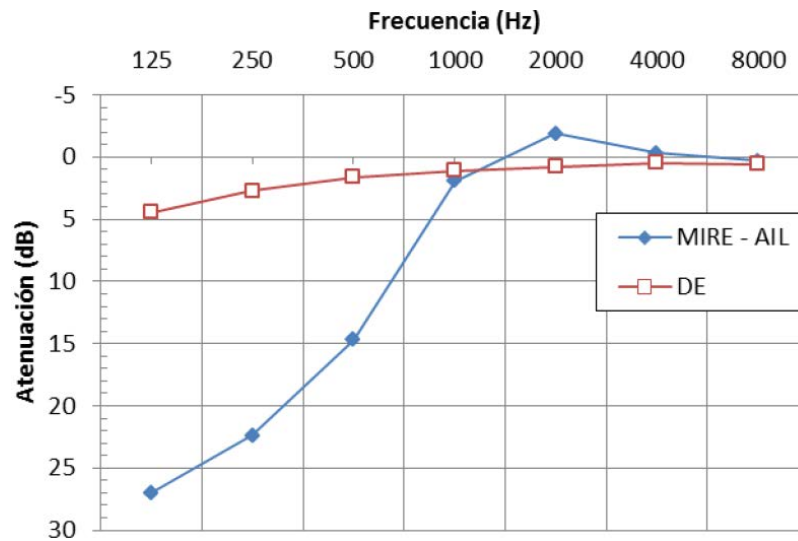


Figura 17: Promedio de Pérdida de Inserción Activa (AIL) y Desviación Estándar (DE).

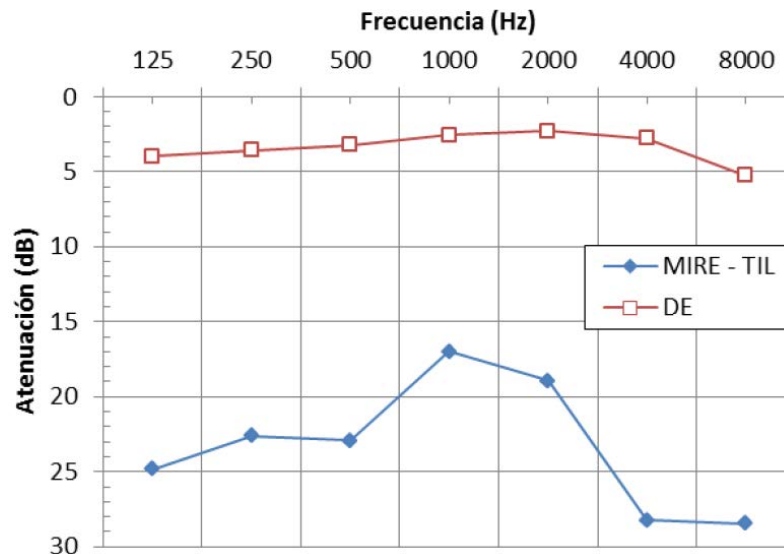


Figura 18: Promedio de Pérdida de Inserción Total (TIL) y Desviación Estándar (DE).

6. ANÁLISIS DE LA DEPENDENCIA DEL NIVEL DE LOS DAA

Para poder analizar si estos dispositivos dependían del NPS para atenuar el ruido se utilizó un método especificado en la norma ANSI/ASA S12.42-2010, utilizando siete NPS de 75 dB, 85 dB, 95 dB, 100 dB, 105 dB, 110 dB y 115 dB. Se utilizó el parámetro AIL como el indicador adecuado del funcionamiento del sistema de CAR en el dispositivo.

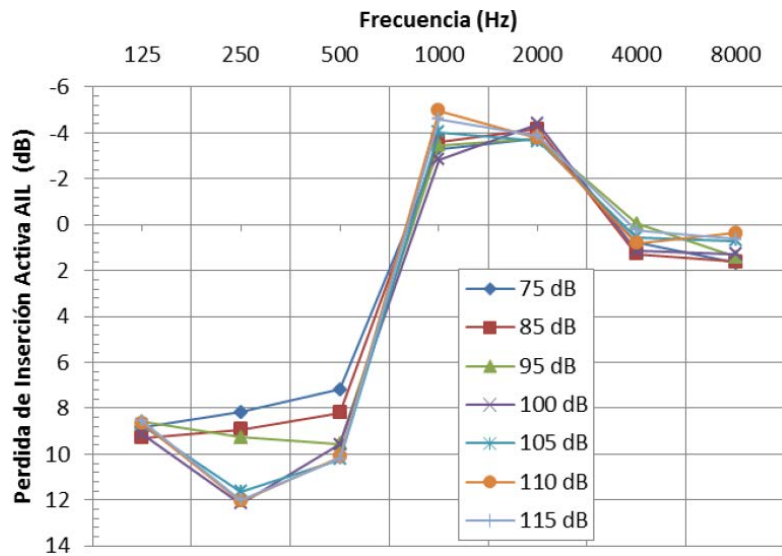


Figura 19: Pérdida de Inserción Activa (AIL) en los diferentes NPS, para el Protector Auditivo Activo PAAR 10 “TELSATE”.

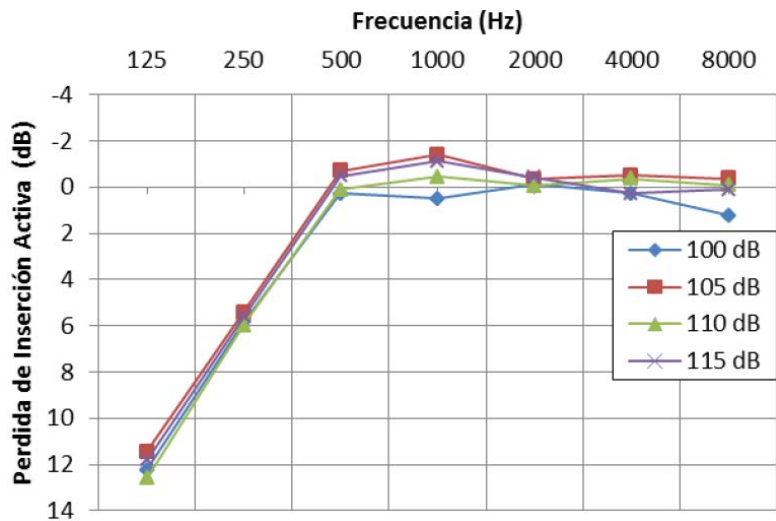


Figura 20: Pérdida de Inserción Activa (AIL) en los diferentes NPS, para el Auricular con Micrófono Activo ANR Digital 9500 “PELTOR” en la modalidad de funcionamiento aeroplano de un motor (Single).

7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La metodología MIRE propuesta por la reciente actualización de la norma ANSI/ASA S12.42-2010, demostró ser bastante eficaz para evaluar los dispositivos auditivos con CAR y cuantificar su desempeño. El método REAT sólo puede ser utilizado para determinar la atenuación pasiva de estos dispositivos puesto que el ruido inherente producido por el sistema de CAR es un factor que limita la utilización de este método.

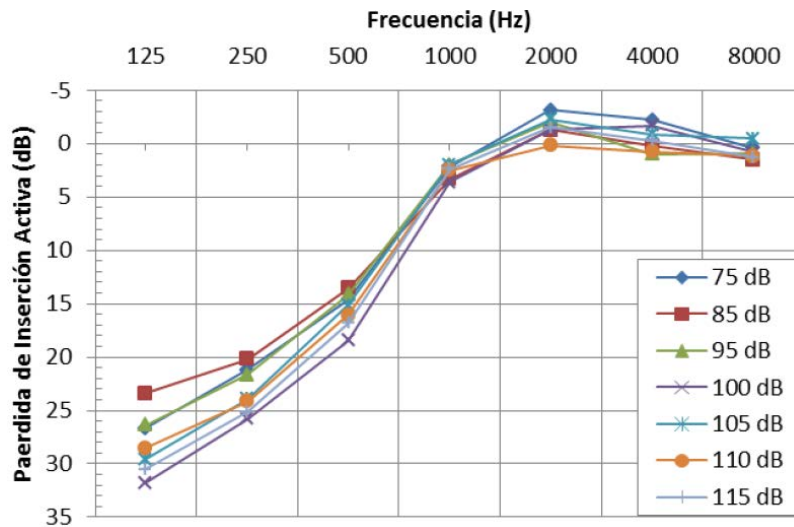


Figura 21: Pérdida de Inserción Activa (AIL) en los diferentes NPS, para el Protector Auditivo Activo PAAR 10 “TELSATE”.

Los resultados obtenidos en los diferentes dispositivos demuestran que la incorporación del sistema de CAR produce un aporte considerable en la reducción total del ruido, teniendo su mayor influencia en las bajas frecuencias, que es donde la atenuación pasiva tiene su mayor falencia. Existe una influencia negativa presentada en la mayoría de los dispositivos evaluados en este trabajo, y también en otros que poseen el sistema CAR, que ocurre por encima de los 500 Hz, aproximadamente. Esta influencia negativa, si bien no produce una disminución considerable en la atenuación total, es un factor latente que puede ser producido por el efecto tardío de adaptación del sistema. Esto se debe a que el sistema electrónico no es capaz de producir una señal de anti-ruido con una velocidad de salida adecuada, interfiriendo en la fase de éste y produciendo una superposición de las ondas sonoras en las frecuencias donde se produce este fenómeno. Este fenómeno de degradación es atribuido también a la incorporación de los implementos electrónicos en la copas de los dispositivos.

También fue comprobado que tales dispositivos son independientes del NPS para atenuar el ruido debido a que la exposición de diferentes NPS no mostró una atenuación correlacionada al NPS.

En los resultados individuales, el ACR Quietcomfort 15 BOSE presentó la mejor ganancia en la atenuación activa del ruido de los dispositivos estudiados. En el caso del AMA ANR Digital 9500 “PELTOR” este presentó una atenuación activa del ruido aceptable con un estrecho rango de frecuencias en su funcionamiento (125 Hz a 250 Hz y 4 kHz a 8 kHz). La incorporación de una unidad de control externa con la cual se escogía una modalidad de funcionamiento (Heli, single, twin), no mostró diferencias significativas de atenuación de ruido. Para el caso del PAA PAAR 10 TELSATE este presentó la mejor atenuación pasiva del ruido, debido a su robusto diseño de copas

grandes, aunque, en algunos casos, puede ocasionar incomodidad en su uso. Además, se observó una satisfactoria atenuación activa de ruido, destacando el hecho que fue mayor a la entregada por el AMA ANR Digital 9500 “PELTOR”.

Con respecto a la consideración de la Conducción Ósea BC, se concluye que es prácticamente despreciable en el desempeño de la reducción activa del ruido, debido a que la mayor influencia de este fenómeno se presenta sobre los 2 kHz, donde el sistema de CAR no produce un efecto considerable. Es recomendable la evaluación de al menos cinco DAA para tener un resultado más representativo para categorizar todos los dispositivos. También se recomienda realizar evaluaciones de comunicación, tales como el test de inteligibilidad y otros.

8. REFERENCIAS

- [1] [Botsford, 1972] Botsford, J.H., “*Ear Protectors - Their Characteristic and Uses*”, Sound and Vibration 6(11), pp. 24-29 (1972).
- [2] [Gerges y Arenas, 2010] Gerges, S.N.Y, Arenas, J.P., “*Fundamentos y Control del Ruido y Vibraciones*”, 2da Edición, NR Editora, Florianópolis, Brasil (2010).
- [3] [Perala y Casali, 2009] Perala, C.H., Casali, J.G., “*Human Subject Investigation of MIRE Microphone Location During Insertion Loss Testing of Active Noise Reduction Hearing Protector in Active and Pasive Modes*”, Noise Control Eng. J. 57(5), 442-458 (2009).