



VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008  
Buenos Aires, 5, 6 y 7 de noviembre de 2008

FIA2008-A046

## **Obtención de la reducción de ruido de los protectores auditivos según la técnica MIRE**

José M. Espinosa Robles<sup>(a)</sup>,  
Samir N.Y. Gerges<sup>(b)</sup>,

(a) Sección Ruido y Vibraciones, Departamento de Salud Ocupacional, Instituto de Salud Pública de Chile, Marathón 1000, Ñuñoa, Santiago, Chile, Tel: (52)-2-3507349, Fax: (52)-2-3507581, E-mail: jrobles@ispch.cl

(b) Laboratório de Vibrações e Acústica, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Trindade, Florianópolis, Brasil, Tel: (55)-48-3234.4074, Fax: (55)-48-3269.9882. E-mail: samir@emc.ufsc.br

### **Abstract**

This work presents the development of an objective methodology for the acoustic performance evaluation of hearing protector through the MIRE noise reduction (Microphone In Real Ear), using a microphone pre-amplifier system of low cost with technical characteristics consistent to this type of evaluation (29 dB(A) noise floor, 75 dB dynamic range, 25 mV/Pa sensitivity). The results of the validation applied to the proposed method, and the uncertainty quantification made, indicate that the method is as an effective and efficient alternative for the noise reduction evaluation in earmuff. However, the results of the comparisons made with the sound attenuation for 4 earmuffs, indicate that without considering the corrections of additional parameters, the noise reduction values are not equivalent to values obtained by method of sound attenuation evaluation.

### **Resumen**

Este trabajo presenta el desarrollo de una metodología objetiva para la evaluación del rendimiento acústico de un protector auditivo (orejera) a través de la técnica de reducción de ruido (NR) de tipo MIRE (Micrófono en el oído real), usándose un sistema micrófono-preamplificador de bajo costo y de características técnicas compatibles con este tipo de evaluación (ruido de piso de 29 dB(A), rango dinámico de 75 dB, sensibilidad de 25 mV/Pa). Los resultados de la validación efectuada y de la cuantificación de la incertidumbre del método, indican que éste se presenta como una alternativa eficaz y eficiente para la cuantificación de la reducción de ruido de un protector tipo orejera. Sin embargo, los resultados obtenidos de la comparación del método con la atenuación sonora para 4 protectores, indican que sin la debida corrección de algunos parámetros, los valores no pueden ser intercambiables.

## **1 Introducción**

Como la generación de ruido esta presente en cualquier actividad productiva, la exposición a ruido en los ambientes de trabajo, y consecuentemente la enfermedad asociada (pérdida auditiva o sordera profesional), además de otros efectos en la salud, es uno de los mayores problemas que afectan a los trabajadores en Latinoamérica. Con esta realidad, la implementación de programas de conservación de la audición aparece como una de las medidas de mayor aplicación, incluyéndose medidas de control de ruido en los ambientes de trabajo. Sin embargo, no siempre estas medidas de control son efectivas, debido a que no siempre son viables desde el punto de vista financiero, surgiendo como alternativa natural el uso elementos de protección auditiva por parte de los trabajadores, la que sin embargo, se recomienda como la última opción recomendable para el control de ruido [1].

La implementación de este tipo de control, necesariamente involucra conocer las características de atenuación sonora del protector en laboratorio, técnica que considera la respuesta subjetiva de personas. Sin embargo, antecedentes proporcionados por importantes agencias como OSHA [2], señalan que la eficiencia de un protector auditivo disminuye considerablemente fuera de laboratorio debido a una serie de factores que son difíciles de controlar en terreno. Considerando lo anteriormente planteado, es que este trabajo presenta el desarrollo de una metodología de laboratorio de tipo objetiva, basada en la investigación e implementación de la técnica MIRE (uso de micrófonos en miniatura en el oído) para la predicción de la atenuación obtenida en protectores auditivos de tipo orejeras, cuantificándose la incertidumbre de las mediciones.

## **2 Objetivos**

Desarrollar una metodología objetiva para la obtención de la eficiencia acústica de los protectores auditivos pasivos tipo orejeras, usándose como referencia la técnica MIRE en laboratorio.

Comparar los valores obtenidos de la implementación de la metodología de reducción de ruido basada en la técnica MIRE, con valores de evaluaciones de la atenuación sonora efectuadas bajo la técnica REAT.

## **3 Descripción Metodología MIRE**

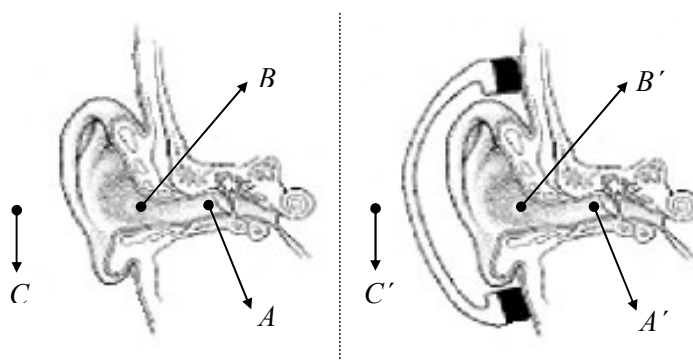
Si bien hasta ahora el método “gold standart” para determinar el rendimiento en laboratorio de un protector auditivo tipo orejera es la atenuación sonora obtenida según el método REAT [3], el cual considera la diferencia entre los umbrales auditivos obtenidos en sujetos de prueba con y sin protector en un ambiente acústico controlado, son varios los antecedentes respecto al intento de obtener una metodología alternativa de tipo objetiva MIRE, basada en el uso de micrófonos en miniatura [4, 5]. Este tipo de metodología objetiva reemplaza la respuesta subjetiva de la persona por la señal de un mini micrófono debidamente ubicado al interior del oído, eliminándose factores subjetivos como el ruido fisiológico [6], además de aumentar la velocidad de procesamiento y disminuir los requisitos para el campo acústico de ensayo. Sin embargo, según la literatura, existen algunos inconvenientes en la aplicación de esta metodología, los cuales tienen relación con la no cuantificación de la trayectoria del ruido por vía ósea y tejidos, además del alto costo de la instrumentación necesaria.

Existe dos procedimientos de aplicación de la metodología MIRE (A y B respectivamente), los cuales se diferencian principalmente por el uso de uno o dos micrófonos en miniatura para la obtención del rendimiento acústico de un protector tipo orejera. El

procedimiento “A”, descrito en la norma ANSI S12.42-1995 [4], considera el uso de un solo micrófono localizado en la oreja externa del sujeto. Este procedimiento es equivalente al método subjetivo REAT, ya que necesita de dos mediciones en serie, con y sin el protector ajustado en la cabeza del sujeto de prueba, para después hacer la diferencia entre ellas (procedimiento conocido como pérdida de inserción (IL)). Sin embargo, este procedimiento no es recomendable en caso de ensayar con altos niveles de presión sonora. El procedimiento “B”, considera el uso de dos micrófonos, los cuales son localizados fuera y al interior de la copa de la orejera ajustada en la cabeza del sujeto. Este procedimiento, conocido como reducción de ruido (NR), obtiene la diferencia simultánea entre las señales captadas por los micrófonos, presentando la ventaja de efectuar un solo ensayo, además de permitir la posibilidad de ensayos a altos niveles.

#### 4 Relación entre la Reducción de Ruido (NR), Pérdida de Inserción (IL) y Atenuación Sonora ( $A_{tt}$ )

Según Berger [3], para la expresión del término “atenuación”, es común encontrarse con términos como pérdida de inserción (IL) o reducción de ruido (NR), los cuales puede inducir a error. De esta forma, con la ayuda de la Figura 1, es posible establecer lo siguiente:



**Figura 1.** Transmisión de ruido sin (izquierda) y con (derecha) la orejera ajustada en la cabeza del sujeto

Para el caso sin orejera (izquierda), es posible obtener la función de transferencia del oído abierto,  $TFOE^1$  [3], a través de la sustracción logarítmica de los niveles en los puntos A y C, mientras que para el caso con la orejera ajustada (derecha), se obtiene la reducción de ruido a través de la diferencia logarítmica entre  $C'$  y  $A'$  como sigue:

$$A - C = 20 \log \left( \frac{p_2}{p_0} \right) = TFOE \text{ (dB)}. \quad (1)$$

$$C' - A' = 20 \log \left( \frac{p'_0}{p'_2} \right) = NR \text{ (dB)}. \quad (2)$$

<sup>1</sup> La TFOE, la cual depende de la frecuencia, representa una amplificación relativa debida al campo sonoro no perturbado causado por las resonancias en el conducto auditivo y en la oreja, siendo válida para un ruido continuo y de nivel medio (hasta 100 dB aproximadamente)

Como la pérdida de inserción se define como la diferencia entre los niveles de presión sonora con y sin la orejera ajustada en la cabeza del sujeto, según la Figura 1, es posible establecer la relación siguiente:

$$IL = A - A' = 20 \log \left( \frac{p_2}{p_2'} \right) \quad (dB). \quad (3)$$

De esta forma, sumándose algebraicamente las ecuaciones (1), (2) y (3), queda la siguiente expresión:

$$IL = NR + TFOE \quad (dB); \text{ com } p_0 = p_0'. \quad (4)$$

Según Voix y Laville [7], es conocido que la atenuación sonora obtenida por el método REAT ( $A_{tt}$ ) puede ser subestimada debido al efecto de enmascaramiento en la oreja ocluida (con orejera) – ruido fisiológico generado debajo de 500 Hz – además de representar una evaluación subjetiva de la pérdida de inserción, por lo tanto, es posible presentar una atenuación sonora por el método REAT como:

$$A_{tt} = IL + PN \quad (dB). \quad (5)$$

De esta forma, y considerándose que no es posible obtener el nivel de presión sonora en el tímpano de la persona con la orejera ajustada en la cabeza de éste, será necesario redefinir la reducción de ruido ( $NR$ ) de la siguiente forma:

$$NR = NR_0 - E_{CA}, \quad (6)$$

donde  $NR_0$  es la reducción de ruido obtenida a la entrada del conducto auditivo del sujeto ( $C'-B'$ ), y  $E_{CA}$  es el efecto del conducto auditivo cerrado por la orejera en el tímpano ( $B'-A'$ ). Por lo tanto, reemplazando las ecuaciones (4) y (6) en la ecuación (5), se obtiene:

$$A_{tt} = NR_0 + TFOE - E_{CA} + PN \quad (dB). \quad (7)$$

Finalmente, es posible expresar la atenuación sonora de una orejera ( $A_{tt}$ ) en términos de la reducción de ruido obtenida en la entrada del conducto auditivo del sujeto de prueba ( $NR_0$ ), de la siguiente forma:

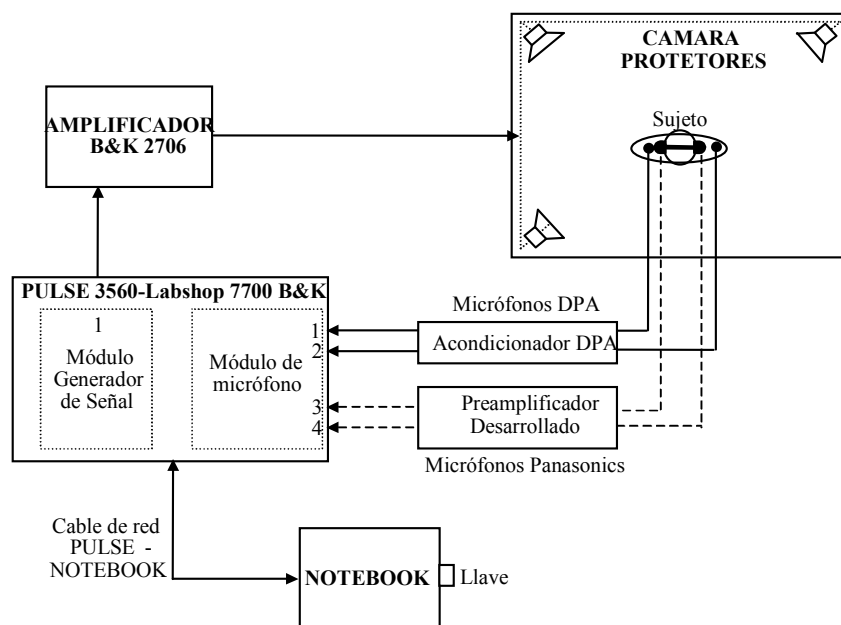
$$A_{tt} = NR_0 + TFOE_0 + PN \quad (dB). \quad (8)$$

En donde  $TFOE_0$  es la función de transferencia del oído abierto a nivel de la entrada del conducto auditivo cerrado del sujeto ( $TFOE - E_{CA}$ ), y  $PN$  es el ruido fisiológico.

## 5 Metodología

### 5.1 Descripción del Sistema de Reducción de Ruido Utilizado

El sistema utilizado para la obtención de la reducción de ruido en orejeras, es presentado en la Figura 2:



**Figura 2.** Sistema utilizado para la obtención de la reducción de ruido en orejeras

El sistema consiste en la emisión de un ruido rosa de  $95 \pm 1$  dB ( $93$  dB(A)) en la zona de localización del sujeto de prueba al interior de la cámara de evaluación de protectores del Laboratorio de Ruido Industrial de la UFSC<sup>2</sup>, campo acústico que cumple con todos los requisitos establecidos para una metodología tipo REAT [8], el cual es captado simultáneamente por un sistema de 4 micrófonos, 2 ubicados fuera y 2 dentro de las copas del protector ajustado en la cabeza del sujeto de prueba. La diferencia simultánea entre el  $L_{eq}$  de 1 minuto obtenido por la señal captada en los micrófonos ubicados fuera y dentro de cada copa para cada banda de frecuencia en 1/3 de octavas entre 125 Hz y 8 kHz, proporciona la reducción de ruido.

El ensayo es realizado para 10 sujetos de prueba diferentes, y para cada uno de éstos se efectúan 2 ensayos con unidades nuevas de la orejera evaluada. De esta forma, el promedio de todos los valores obtenidos, representa la reducción de ruido final de la orejera, junto con la desviación estándar obtenida.

#### 5.1.1 Captación de la Señal

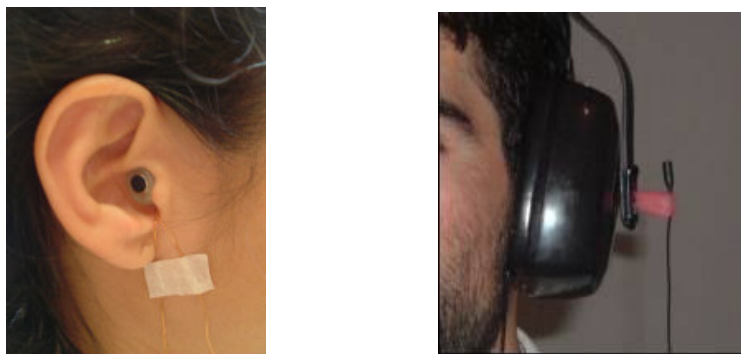
La captación de la señal fuera de las copas de las orejeras se efectúa a través de la señal captada por 2 micrófonos DPA 4060 (5,4mm x 12,7 mm; 20 mV/Pa de sensibilidad, ruido de piso de 23 dB(A)) y su acondicionador de 2 canales respectivo, ubicados verticalmente a la línea central de cada copa, y a una distancia de 2 cm de ésta. Si bien el micrófono presenta

<sup>2</sup> Universidad Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

una respuesta de frecuencia genérica para campo difuso, fue necesario cuantificarla individualmente para la corrección de los desvíos respectivos.

La captación dentro de las copas se efectúa a través de la señal captada por 2 micrófonos Panasonic WN-61A (6mm x 3,4 mm) ubicados a la entrada de los conductos auditivos del sujeto de prueba, los cuales fueron modificados estructuralmente de forma de obtener una mayor sensibilidad, rango dinámico de la señal y menor ruido de piso de éste. Debido a las características de los micrófonos, fue necesario implementar un preamplificador de 2 canales con un ruido de piso inferior al proporcionado por los micrófonos, y que proporcionara una mayor estabilidad de las señales [9]. Al igual que el caso del sistema DPA, fue necesario cuantificar la respuesta de frecuencia del sistema para corrección de los desvíos, al igual que la sensibilidad, rango dinámico y ruido de piso del sistema (25 mV/Pa, 75 dB y 29 dB(A) respectivamente).

Un esquema del montaje de los micrófonos al exterior e interior de las copas de la orejera, se presenta en la Figura 3.



**Figura 3.** Montaje de los micrófonos al exterior e interior de las copas de la orejera ensayada

### 5.1.2 Validación del Método

La validación del método descrito en el punto 5.1 se efectuó a través de la comparación entre las reducciones de ruido finales para un modelo de orejera MSA, modelo Mark V, según este método y según el método propuesto en la ecuación (9) para 3 ensayos, usándose en ambos casos una cabeza artificial Head Acoustics, modelo HMS III, equipada con 2 simuladores de oído.

$$NR = IL - TFOE \quad (dB) \quad (9)$$

De esta forma, el valor de la reducción de ruido ( $NR$ ) de la cabeza artificial, se obtiene a través de la diferencia entre la pérdida de inserción ( $IL$ ) obtenida, y una aproximación de la función de transferencia de la misma cabeza ( $TFOE$ ) para cada simulador de oído de ésta, originadas de la diferencia entre los NPS obtenidos en cada simulador, y un micrófono de referencia (GRASS, modelo 40AQ) localizado en el punto medio del eje entre éstos, en las mismas condiciones de ensayo descritas en 5.1.

Los resultados de la aplicación del análisis de varianza ANOVA entre las reducciones de ruido obtenidas a través del método propuesto y a través de la aplicación de la ecuación (8), indicaron que no existen diferencias significativas en ninguna de las bandas de prueba, con un intervalo de confianza de  $p = 0,4551$ .

### 5.1.3 Cuantificación de la Incertidumbre del Método

La cuantificación de la metodología fue realizada considerándose como referencia los criterios establecidos en la “Guía para la expresión de la incertidumbre de medición” [10]. Para tal fin, a través de la aplicación e la técnica “brainstorming”, fueron obtenidos los factores que puede influenciar la incertidumbre de la evaluación de la reducción de ruido, descartándose aquellos componentes sistemáticos presentes en la medición externa e interna de las copas, además del cuidado en no cuantificar dos veces una misma fuente de incertidumbre.

Los valores finales de la incertidumbre expandida de la reducción de ruido individual (un solo ensayo),  $U(NR)$ , la reducción de ruido por sujeto,  $U(NR_0)$ , y la reducción de ruido final,  $U(NR_T)$ , son presentados en la Tabla 1 por las bandas de frecuencia de ensayo y para un intervalo de confianza de un 95%.

**Tabla 1.** Incertidumbre expandida de la reducción de ruido

Frecuencia Central, Hz	Incertidumbre Expandida Reducción de Ruido (95%), dB*		
	$U(NR)$	$U(NR_0)$	$U(NR_T)$
125	1,7	1,2	0,4
250	<b>1,7</b>	<b>1,2</b>	<b>0,4</b>
500	1,3	0,9	0,3
1000	0,8	0,6	0,2
2000	1,3	1,0	0,3
4000	1,2	0,8	0,3
8000	1,4	1,0	0,3

Finalmente, es posible generalizar una incertidumbre expandida máxima para cada una de las reducciones de ruido obtenidas, las cuales se encuentran destacadas en negrilla en la Tabla 1, quedando una incertidumbre expandida general de  $\pm 0,4$  dB para la metodología propuesta para la evaluación de la reducción de ruido de una orejera.

### 5.2 Comparación con el Método de la Atenuación Sonora (REAT)

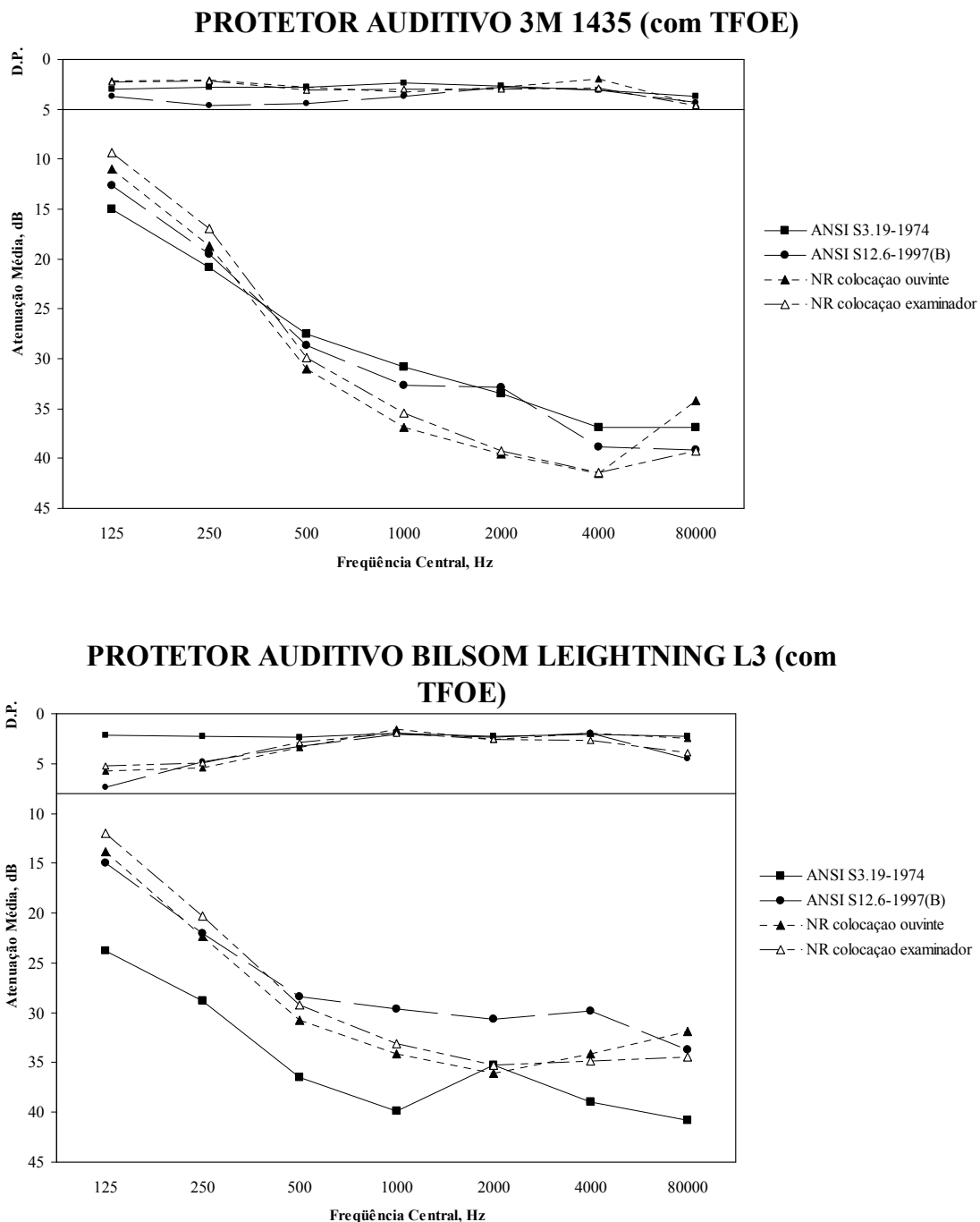
Para fines de la comparación con la atenuación sonora, fue evaluada la reducción de ruido en 4 modelos de orejeras usadas en el mercado brasileño (2 unidades por cada modelo), de diferentes tamaños de copas, en dos condiciones: ajuste de la orejera efectuado por el sujeto y por el examinador respectivamente.

La reducción de ruido final de cada orejera para cada banda de frecuencia de prueba, además de su desviación estándar correspondiente, fue comparada con la atenuación sonora efectuada en el Laboratorio de Ruido Industrial de la UFSC según norma ANSI S12.6-1997 (método B), y con la información proporcionada por el fabricante en relación a la norma ANSI S3.19-1974.

El número de sujetos de prueba utilizados fue de 10 personas, en cuya selección fue considerada la experiencia en el uso de protectores auditivos, con actividad universitaria al interior de la UFSC, y principalmente, que no presentaran alteraciones físicas que puedan afectar el montaje de los micrófonos a la entrada de los conductos auditivos.

### 6 Resultados

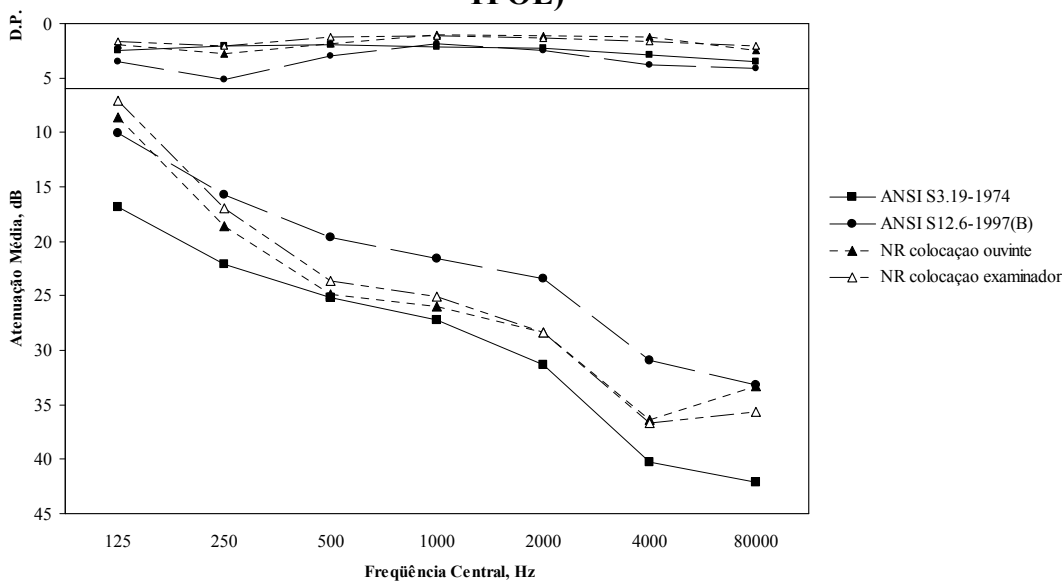
Los resultados finales de la evaluación de la reducción de ruido ( $NR$ )<sup>3</sup> y desviación estándar correspondiente, para cada uno de los protectores evaluados, además de las curvas de atenuación sonora, y desviaciones estándar, según las normas ANSI S12.6-1997 (método B) y ANSI S3.19-1974 respectivamente, se presentan en las gráficas de la Figura 4.



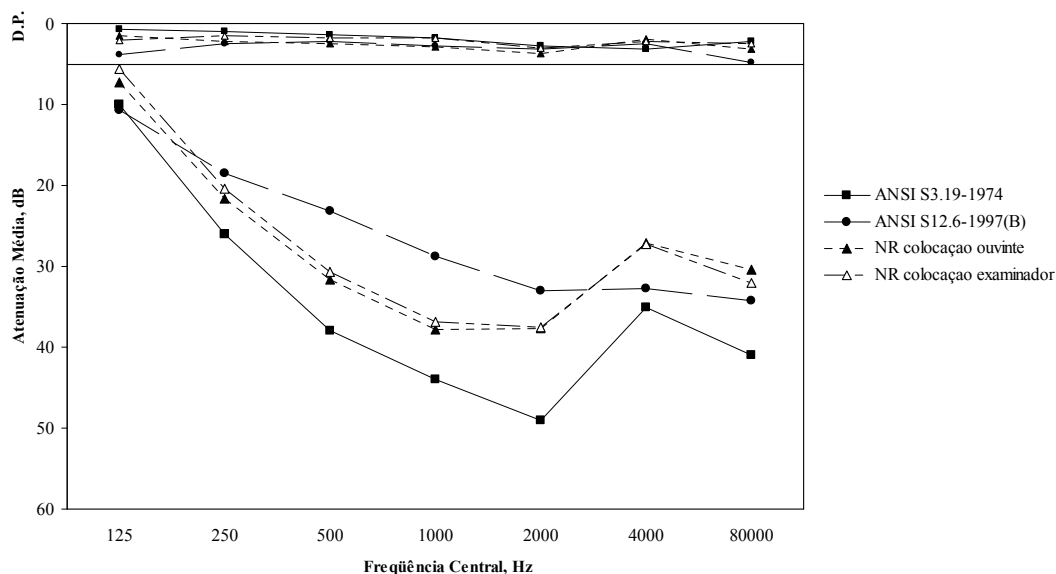
<sup>3</sup> Los valores finales de reducción de ruido ( $NR$ ) presentados en cada una de las gráficas, se encuentran corregidos, en términos genéricos, por la función de transferencia definida en la ecuación (8),  $TFOE_{\theta}$  [5].



**PROTETOR AUDITIVO BILSOM LEIGHTNING LOF (com TFOE)**



**PROTETOR AUDITIVO MSA MARK V (com TFOE)**



**Figura 4.** NR final corrigidas por  $TFOE_0$  y Atenuaciones sonoras ANSI S12.6-1997 (método B) y ANSI S3.19-1974 para las 4 orejeras ensayadas.

**7 Análisis**

Si bien se produjeron diferencias importantes entre los valores de atenuación ANSI S3.19-1974 proporcionadas por el fabricante (valores muy elevados) y las NR obtenidas con el ajuste de la orejera hecha por el examinador en 3 de los 4 casos evaluados, las diferencias entre éstas y los valores ANSI S12.6-1997 (método B) obtenidos en el LARI, permitieron comprobar la importancia de las relaciones presentadas en la ecuación (8), específicamente de la influencia de la  $TFOE_0$  en el rango de las medias y altas frecuencias, y por ende, de la no cuantificación por parte del método NR tipo MIRE de la transmisión por vía ósea y tejidos, lo que incide en la obtención de mayores valores a los obtenidos según ANSI S12.6-1997

(método B) en este rango de frecuencia. Además, se pudo comprobar la influencia del ruido fisiológico (*PN*) en los valores de Atenuación Sonora en bajas frecuencias (mayores a los obtenidos según *NR*), tal cual lo descrito por Berger y Kerivan [6], cuyo orden de magnitud y rango de frecuencia varía según variables físicas como el volumen de aire al interior de las copas de las orejeras. Por último, cabe resaltar la similitud entre las curvas de reducción de ruido obtenidas con ajuste del sujeto de prueba y examinador respectivamente para los 4 casos, lo que se deduce de la experiencia en el uso y ensayo de este tipo de protectores por parte de los sujetos de prueba seleccionados para el presente estudio.

## 8 Conclusión

El sistema de evaluación propuesto para la evaluación de la reducción de ruido en orejeras según método MIRE, demostró ser una herramienta válida para la cuantificación de este parámetro según características técnicas, validación y cálculo de la incertidumbre presentados en el presente trabajo. Sin embargo, de las comparaciones efectuadas con los valores de Atenuación Sonora para una misma orejera, se concluye que el método de la reducción de ruido aquí propuesto, por sí solo, aún no es recomendable como método alternativo al de la Atenuación Sonora según método REAT, sin la debida cuantificación estadística de factores que influyen significativamente en los resultados para el rango de frecuencia de ensayo, como lo es el ruido fisiológico (*PN*), la función de transferencia de oído abierto, *TFOE<sub>0</sub>* y la trayectoria vía ósea y tejidos.

## Referencias

- [1] Gerges, Samir N. Y. (2003) "Protetores Auditivos". Ed. UFSC, Florianópolis, Brasil.
- [2] OSHA (2006), "Technical Manual, Section III, Cap.5: Noise and Hearing Conservation", EUA, ([www.osha.gov](http://www.osha.gov)).
- [3] Berger, E.H., (2005) "Preferred Methods for Measuring Hearing Protector Attenuation", INTERNOISE, Rio de Janeiro, Brasil.
- [4] ANSI S12.42-1995, "Microphone-in-Real-Ear and Acoustic Test Fixture Methods for the Measurement of Insertion Loss of Circumaural Hearing Protection Devices," American National Standards Institute, New York, EUA.
- [5] ISO/DIS 11904-1:2000, "Acoustics - Determination of Sound Inmissions from Sound Sources Placed Closed to the Ears, Part 1: Technique using Microphones In Real Ears (MIRE-Technique)", International Organization for Standardization, Switzerland.
- [6] Berger, E. H.; Kerivan, J. E. (1983) "Influence of Physiological Noise and the Occlusion Effect on the Measurement of Real-Ear Attenuation at Threshold". J. Acoust. Soc. Am. 74(1), 81-94.
- [7] Voix, J.; Laville, F. (2002) "Expandable Earplug with Smart Custom Fitting Capabilities", INTERNOISE, Dearborn, MI, USA.
- [8] ANSI S12.6-1997, "Methods for Measuring the Real-Ear Attenuation of Hearing Protectors" American National Standards Institute, New York, EUA.
- [9] Espinosa, J. M. (2008) "Atenuação do Ruído dos Protetores Auditivos pelo Uso da Técnica MIRE". Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, Brasil.
- [10] INMETRO, ABNT (2003). "Guia para a Expressão da Incerteza da Medição", Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial e Associação Brasileira de Normas Técnicas., terceira edição, Brasil, 2003.