



Serie Proyectos de Investigación e Innovación

Superintendencia de Seguridad Social
Santiago - Chile

INFORME FINAL

**METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN Y VALORACIÓN DE LA
EXPOSICIÓN OCUPACIONAL A RUIDO IMPULSIVO
ACHS 249-2020**

Autores:

Jorge P. Arenas (Universidad Austral de Chile)
Jorge Cárdenas M. (Universidad Austral de Chile)
José Luis Urnia (Asociación Chilena de Seguridad)
2022





SUPERINTENDENCIA DE SEGURIDAD SOCIAL

SUPERINTENDENCE OF SOCIAL SECURITY

La serie Proyectos de Investigación e Innovación corresponde a una línea de publicaciones de la Superintendencia de Seguridad Social, que tiene por objetivo divulgar los trabajos de investigación e innovación en Prevención de Accidentes y Enfermedades del Trabajo financiados por los recursos del Seguro Social de la Ley 16.744.

Los trabajos aquí publicados son los informes finales y están disponibles para su conocimiento y uso. Los contenidos, análisis y conclusiones expresados son de exclusiva responsabilidad de su(s) autor(es), y no reflejan necesariamente la opinión de la Superintendencia de Seguridad Social.

Si requiere de mayor información, sobre el estudio o proyecto escriba a: investigaciones@suseso.cl.

Si desea conocer otras publicaciones, artículos de investigación y proyectos de la Superintendencia de Seguridad Social, visite nuestro sitio web: www.suseso.cl.

The Research and Innovation Projects series corresponds to a line of publications of the Superintendence of Social Security, which aims to disseminate the research and innovation work in the Prevention of Occupational Accidents and Illnesses financed by the resources of Law Insurance 16,744.

The papers published here are the final reports and are available for your knowledge and use. The content, analysis and conclusions are solely the responsibility of the author (s), and do not necessarily reflect the opinion of the Superintendence of Social Security.

For further information, please write to: investigaciones@suseso.cl.

For other publications, research papers and projects of the Superintendence of Social Security, please visit our website: www.suseso.cl.

Superintendencia de Seguridad Social
Huérfanos 1376
Santiago, Chile.



Informe Técnico Final

Proyecto Metodología para la caracterización y valoración de la exposición ocupacional a ruido impulsivo

ACHS 249-2020

Ejecutor: Universidad Austral de Chile

Investigadores:

Jorge P. Arenas (Universidad Austral de Chile)

Jorge Cárdenas M. (Universidad Austral de Chile)

José Luis Urnia (Asociación Chilena de Seguridad)

Fecha: 21 de septiembre de 2022

Este trabajo fue seleccionado en la Convocatoria de Proyectos de Investigación e Innovación en Prevención de Accidentes y Enfermedades Profesionales 2020 de la Superintendencia de Seguridad Social (Chile) y fue financiado por la Asociación Chilena de Seguridad, con recursos del Seguro Social de la Ley N°16.744 de Accidentes del Trabajo y Enfermedades Profesionales.

RESUMEN

Este documento contiene los principales resultados del proyecto de investigación seleccionado en la Convocatoria de Proyectos de Investigación e Innovación en Prevención de Accidentes y Enfermedades Profesionales 2020 de la Superintendencia de Seguridad Social (Chile) y que fue financiado por la Asociación Chilena de Seguridad, con recursos del Seguro Social de la Ley N°16.744 de Accidentes del Trabajo y Enfermedades Profesionales.

El ruido impulsivo es prevalente en muchos ambientes laborales y toda la evidencia científica indica es un tipo de ruido mucho más riesgoso para la audición humana que los ruidos continuos. Esto ocurre básicamente porque un ruido impulsivo posee una enorme cantidad de energía concentrada en un corto intervalo de tiempo.

El proyecto presenta una extensa revisión del estado del arte sobre el tema, que permite establecer que aún quedan muchos aspectos por resolver, sobre todo en la exacta cuantificación del riesgo de pérdida auditiva provocado por un ruido impulsivo.

Por otro lado, una dificultad extra son las limitaciones metrológicas para medir adecuadamente un ruido impulsivo. Los instrumentos comunes utilizados en la medida del ruido ocupacional, esto es los sonómetros y dosímetros, no poseen las características técnicas para medir ruidos de tan alto nivel y tan corta duración. Por este motivo, en este proyecto se seleccionó y adquirió un sistema diseñado específicamente para medir ruido impulsivo, que posee la tasa de muestreo apropiada y el rango dinámico necesario para poder obtener las métricas asociadas al ruido impulsivo.

El estudio contempló mediciones en laboratorio, utilizando fuentes y condiciones ambientales controladas, para poder calibrar y establecer un protocolo de medición en terreno. Luego, se realizaron campañas de medición en cuatro recintos industriales, donde el ruido impulsivo es prevalente. Estos sitios incluyeron dos empresas metalmecánicas, una vulcanización y un astillero. A partir de las medidas se elaboró una base de datos con 198 mediciones de ruido impulsivo, que incluyó todas las métricas necesarias, y los correspondientes archivos de audio de cada ruido. Estos archivos de audio se emplearon para poder utilizar el software que implementa la norma MIL-STD-1474E, elaborada para valorar el riesgo auditivo con ruido impulsivo.

Posteriormente, se determinó los valores de dosis de ruido y número permitido de impulsos en presencia de protección auditiva, con tres distintas metodologías y para cuatro protectores auditivos diferentes. Lo anterior, con el fin de proponer una metodología para valorar la efectividad de un protector auditivo para reducir la exposición al ruido impulsivo. La metodología propuesta se basa en una modificación del anexo B de la norma europea EN458.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.....	5
2.	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y RELEVANCIA.....	5
	2.1 Objetivos	6
3.	REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	6
	3.1 Ruido impulsivo: definición	7
	3.2 El ruido impulsivo y el riesgo auditivo	8
	3.3 Criterios y métricas para ruido impulsivo	11
	3.4 El Algoritmo de Evaluación de Riesgos Auditivos para Humanos (AHAH)	15
	3.5 Metrología del ruido impulsivo	17
	3.6 Protección auditiva y ruido impulsivo	20
	3.7 Valoración de la eficiencia de protectores auditivos a ruido impulsivo	23
	3.8 Métodos de evaluación de la atenuación de HPD con ruido impulsivo	25
4.	METODOLOGÍA.....	28
	4.1 Estado del arte en la medición de ruido impulsivo (equipamientos y métodos de valoración)	28
	4.2 Definición del equipamiento y metodología más acorde para una correcta caracterización del ruido impulsivo	29
	4.3 Adquisición del equipamiento definido	33
	4.4 Implementación del sistema y capacitación en el uso	33
	4.5 Análisis de resultados experimentales	40
	4.6 Valoración de la efectividad de protectores auditivos	40
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
	5.1 Resultados de las medidas de ruido impulsivo con el sistema	48
	5.2 Resultados de la aplicación de las metodologías de valoración de la efectividad de protectores auditivos	61
6.	CONCLUSIONES.....	74
7.	REFERENCIAS	76
8.	ANEXO 1: RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	84
9.	ANEXO 2: MANUAL INTERNO DE USO Y OPERACIÓN DEL EQUIPAMIENTO IMPULSE NOISE EVALUATION BRUEL & KJAER 7963.....	86

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

En el ámbito científico sobre el estudio del ruido impulsivo, existen varios acuerdos, a pesar de los vacíos aún existentes sobre el tema y que requieren más desarrollo. En primer lugar, que el ruido impulsivo es más dañino desde el punto de vista de la salud ocupacional que el ruido continuo. En segundo lugar, que los instrumentos utilizados para medir ruido en ambientes laborales tienen limitaciones técnicas que impiden valorar adecuadamente un ruido impulsivo. Finalmente, y aunque el principal documento de guía usado en la actualidad para valorar la atenuación de un protector auditivo es el anexo B de la Norma Europea (EN458, 2016), existe consenso en que el proceso allí descrito es altamente subjetivo y se considera insuficiente para valorar adecuadamente la eficiencia de un protector auditivo en presencia de ruido impulsivo. Esta propuesta de investigación se enfocó en abordar los vacíos existentes en la medición, análisis y valoración del ruido impulsivo como factor de riesgo de hipoacusia laboral. Además, este proyecto respondió a los TDR publicados para el proyecto No 24, titulado “Metodología para la evaluación de la exposición ocupacional a ruido impulsivo” incluido en los Lineamientos Estratégicos 2020.

El trabajo ejecutado, y que se describe en este documento, fue seleccionado en la Convocatoria de Proyectos de Investigación e Innovación en Prevención de Accidentes y Enfermedades Profesionales 2020 de la Superintendencia de Seguridad Social (Chile) y fue financiado por la Asociación Chilena de Seguridad, con recursos del Seguro Social de la Ley N°16.744 de Accidentes del Trabajo y Enfermedades Profesionales.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y RELEVANCIA

Numerosos organismos internacionales han declarado que, desde el punto de vista de la hipoacusia laboral, el ruido impulsivo es más nocivo que el ruido continuo. La exposición ocupacional a ruido impulsivo, existente en industrias como la metalmecánica y minería, hoy se caracteriza mediante una metodología que no permite su adecuada medición. Esto se debe a que el instrumental utilizado posee un rango dinámico de sólo 143 dB, con una tasa de muestreo de 48 kHz, lo que resulta deficiente según la bibliografía actual para caracterizar de forma correcta, en amplitud y tiempo, la exposición a este tipo de ruido. Además, la normativa nacional no aborda la forma de calcular la efectividad de un protector auditivo cuando existe exposición a este tipo de ruido. El presente estudio aborda ambas problemáticas.

Preguntas de investigación:

1. ¿Cuál es la metodología adecuada para caracterizar la exposición ocupacional a ruido impulsivo?

2. ¿Qué método de cálculo es el más adecuado para estimar la reducción de ruido proporcionada por el uso de un elemento de protección auditiva, cuando existe exposición a ruido impulsivo?

La problemática de exposición a ruido impulsivo se debe abordar de forma adecuada ya que la Superintendencia prescribe mediante su Circular N° 3469¹ que, ante la presencia de fuentes de ruido impulsivo, éstas se deben evaluar como tales. Actualmente la definición del DS 594, para este tipo de ruido, es deficiente ya que no permite discernir claramente la presencia de este tipo de ruido, por lo que no se evalúa en la cuantía potencial que tendría, considerando el criterio prescrito en la circular mencionada. Además, la documentación de referencia en esta materia, al no establecer una metodología aceptada nacionalmente para realizar los cálculos de efectividad de la protección auditiva, no permite estimar la atenuación efectiva que los protectores auditivos proporcionan cuando existe exposición a ruido impulsivo.

2.1 Objetivos

Los objetivos generales y específicos de este trabajo fueron los siguientes:

2.1.1 Objetivo general:

Definir una metodología que permita caracterizar de forma adecuada la exposición ocupacional a ruido impulsivo y valorar la efectividad de un protector auditivo a este tipo de ruido.

2.1.2 Objetivos específicos:

1. Definir la cadena de medición y metodología, para obtener de forma idónea los indicadores o métricas de intensidad y tiempo de exposición a la que se someten los trabajadores, producto de fuentes de ruido impulsivo.
2. Definir el método de cálculo apropiado para cuantificar la efectividad de un protector auditivo para reducir la exposición al ruido impulsivo.

3. REVISIÓN DE LA LITERATURA

La investigación sobre el ruido impulsivo, su medida y su importancia como agente físico causante de una enfermedad profesional ha sido extensa. En esta sección se presenta una revisión del estado del arte sobre el tema de ruido impulsivo, enfocado en los efectos sobre la salud auditiva de las personas expuestas.

¹ Circular No 3469: Programa de vigilancia ambiental y de la salud de trabajadores expuestos a ruido. Superintendencia de Seguridad Social. Gobierno de Chile. 30 de octubre de 2019.

3.1 Ruido impulsivo: definición

En general, un ruido impulsivo se genera por la liberación rápida de gases comprimidos (impulso) o bien por la colisión de objetos sólidos (impacto). Se puede definir como el cambio instantáneo en la presión sonora durante un período corto de tiempo (Crocker, 2007).

El término ruido impulsivo se utiliza en este documento en forma genérica incluyendo todas las formas de sonidos de alta intensidad y corta duración, es decir, desde los impactos presentes en medios industriales hasta las intensas ondas expansivas asociadas con operaciones militares. La gama de parámetros que definen un impulso es amplia. Las duraciones de los impulsos pueden variar desde decenas de microsegundos, en el caso de disparos de armas pequeñas, hasta varios cientos de milisegundos para un estampido sónico o un impacto industrial reverberante. Las intensidades de los impulsos pueden variar desde los 100 dB hasta superar los 185 dB de nivel de presión sonora máxima (SPL). La energía de un impulso suele estar ampliamente distribuida, pero las concentraciones espectrales de energía pueden cubrir varias frecuencias a lo largo del rango audible. El número de ocurrencias de un ruido impulsivo en ambientes industriales o militares puede ir desde un impulso o menos por hora hasta varios impulsos por segundo sin un intervalo de tiempo fijo entre impulsos. Además de los parámetros físicos del impulso, otras condiciones ambientales pueden afectar seriamente al resultado de una exposición, es decir, si los impulsos se producen en un campo libre o reverberante, el ángulo de incidencia, la presencia de otros ruidos o vibraciones, etc. (Henderson y Hamernik, 2007).

Las formas de onda o característica temporales del ruido impulsivo pueden ser muy diferentes. Un extremo es el ruido de impacto industrial. El ruido de impacto es reverberante ("ringing") y su comportamiento físico se explica generalmente por las leyes de la acústica. En el otro extremo están las ondas de choque. Estas pueden tener valores peak de 150 dB o más y son, de hecho, un tipo de ondas que se rigen por principios físicos diferentes de las leyes de la acústica (Henderson y Hamernik, 2007). Coles et al. (1968) han clasificado este tipo de ruidos en dos tipos básicos de impulsos: una onda A no reverberante y una onda B reverberante, como se muestra en la Figura 1. Esta figura indica que el impulso se caracteriza términos de nivel peak, la duración y el número de impulsos, aunque no tiene en cuenta otras variables potencialmente importantes como son el tiempo de subida (T), el espectro, y el patrón temporal (Walker y Behar, 1971; Price, 1983; Hynson et al., 1976; Perkins et al., 1975).

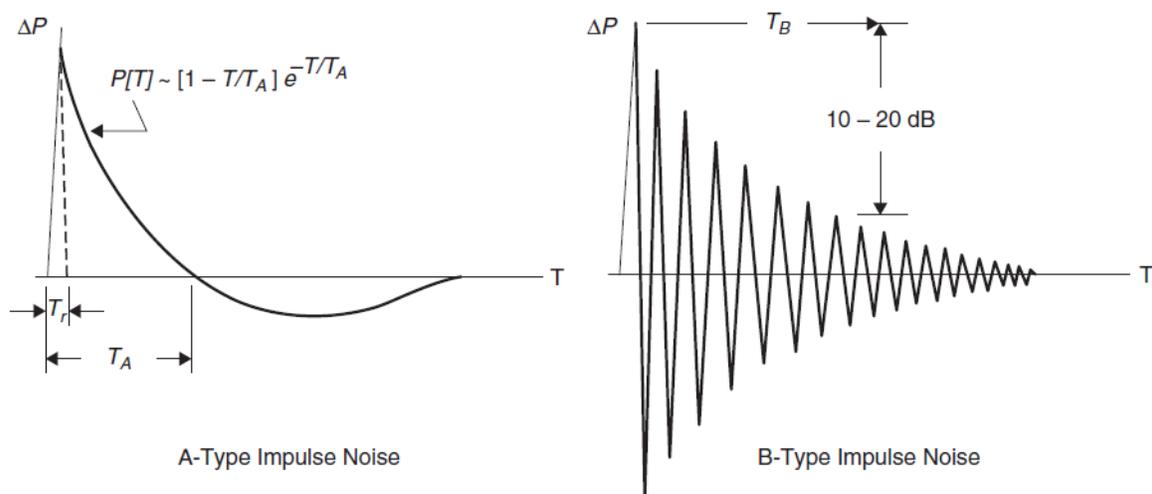


Figura 1: Representación esquemática de la presión sonora en función del tiempo de los dos tipos básicos de ruido impulsivo, de acuerdo al criterio de Coles et al. (1968). La onda de la izquierda también se denomina onda de Friedlander. Fuente: Henderson y Hamernik (2007).

Otras definiciones para el ruido impulsivo se introdujeron en la antigua norma S1.13 (ANSI, 1971) del Instituto Nacional de Estándares Americanos (ANSI, American National Standards Institute), y en los trabajos de Pfander (1975) y Pfander et al. (1980). En la descripción de Pfander, se considera la especificación temporal de un impulso para incluir las fases de rarefacción y condensación, así como la duración del impulso y el número total del número de impulsos.

La especificación física de un ruido impulsivo se complica aún más cuando los impulsos se mezclan con un ruido continuo. La combinación de impulsos y ruido continuo es muy común en los entornos industriales. De hecho, Bruel (1980) demostró que es común encontrar factores de cresta de hasta 50 dB en estos ambientes.

3.2 El ruido impulsivo y el riesgo auditivo

El mecanismo del daño auditivo producido por un ruido impulsivo es aún objeto de estudio. Una dificultad para estudiar los efectos del ruido impulsivo en la audición es que no es ético llevar a cabo una investigación que exponga a los sujetos desprotegidos a ruidos impulsivos de alta energía, con el objetivo de determinar los cambios permanentes en el umbral auditivo. Por esto, la mayoría de los estudios se han basado en capturar los cambios temporales en el umbral auditivo después de la exposición al ruido. Otros estudios han sido efectuados en mamíferos de laboratorio (Luz y Hodge, 1971; Henderson et al., 1974; Dancer et al., 1985). Aunque se han identificado los parámetros más importantes, la respuesta a cuánto contribuyen la presión máxima, la

duración, los espectros de frecuencia, la curtosis y el espaciamiento temporal al mecanismo de daño, aún es objeto de estudio.

Con mucha certeza, se ha establecido que los ruidos impulsivos tienen más probabilidad de causar pérdida auditiva inducida por ruido que un ruido continuo de igual energía (Starck et al., 2003). La razón fundamental es que los ruidos impulsivos poseen un amplio ancho de banda y concentran una enorme cantidad de energía sonora en un intervalo de tiempo pequeño. Los mecanismos de protección propia del oído humano resultan además ineficientes para activar el reflejo acústico del músculo estapediano (Berger et al., 2000). A diferencia del daño producido a las células ciliadas sensoriales en el oído interno por la exposición continua al ruido, que equivale a un envenenamiento químico, en el caso de un ruido impulsivo de alto nivel esto corresponde a un evento más físico. Por este motivo, se ha reportado que incluso una exposición por encima de un peak de 140 dB (equivalente a una presión sonora rms de 200 Pa), puede causar pérdida auditiva permanente y tinnitus, a menudo cuando el impulso es inesperado (Mrena et al., 2002). La exposición a impulsos de alta intensidad puede además causar trauma acústico y daño mecánico instantáneo en el oído interno (Luz y Hodge, 1971). La exposición al ruido impulsivo es común en industrias metalmeccánicas, en la construcción, en astilleros, en la minería y entre el personal policial y militar. En particular, los niveles sonoros de un ruido impulsivo, especialmente los generados por armas de fuego o fuegos artificiales, pueden alcanzar valores peak del nivel de presión sonora superiores a los 180 dB.

Por este motivo, muchas de las investigaciones sobre ruido impulsivo y su evaluación de riesgos para la salud han sido desarrolladas en personal militar y policial, en ejercicios de entrenamiento realizados en campos de tiro ubicados tanto en interiores como en campo libre (Ylikoski, 1994; Brueck et al., 2014). Las armas de fuego son una fuente importante de ruido impulsivo y, aunque no existe consenso de la extensión del daño, es plausible pensar que la exposición permanente a este tipo de fuentes genera altos niveles de pérdida auditiva neurosensorial.

Muchos estudios epidemiológicos se han basado en una clasificación del ruido de impacto por tipo de ocupación mediante una *matriz de exposición al ruido*, elaborada por un panel de expertos. Un ejemplo de este tipo de estudio es el presentado por Sjöström et al. (2013) en el cual se usó una clasificación del ruido peak en función de la probabilidad de causar daño auditivo en una escala de 1 a 4 (1: ciertamente, 2: probablemente, 3: quizás, y 4: improbable).

Recientemente, se está empleando la curtosis como métrica descriptiva debido a la complejidad de la evaluación de los riesgos para la audición de un entorno de ruido complejo. Por este motivo, en algunas circunstancias es difícil establecer cuando una exposición contiene componentes impulsivos que deben evaluarse por separado. Algunos estudios (Okada et al., 1972; Yamamura et al., 1974; Arlinger y Mellberg, 1980) han reportado de una pequeña reducción del cambio transitorio del umbral auditivo

(TTS, por su sigla en inglés), producido por cualquiera de los dos agentes por separado. Sin embargo, está claro que, en determinadas condiciones, los impulsos de alto nivel sobre un ruido de fondo producen mayores lesiones en el órgano de Corti que el impulso o el ruido continuo por sí solos (Hamernik y Henderson, 1974).

Otra característica observada en las investigaciones es la extrema variabilidad en los cambios audiométricos que se producen por la exposición al ruido impulsivo. Para las mismas condiciones de exposición, la variabilidad entre individuos puede superar los 70 dB (Kryter y Garinther, 1966). Las diferencias en las membranas timpánicas podrían explicar parte de esta variabilidad. A niveles altos de exposición (es decir, mayores a 160 dB en el caso de un estudio en chinchilla), la membrana timpánica se puede desgarrar, lo que a su vez conduce a una peor transmisión de energía a través del oído medio y, finalmente, a una menor pérdida de audición por pérdida de células ciliadas (sordera neurosensorial). Hay otros datos (Henderson y Hamernik, 1982), que muestran diferencias en el TTS, de 60 dB o más, en sujetos sometidos a la misma exposición.

La amplitud de la variabilidad en los estudios con animales y humanos controlados tiene su paralelo en los datos de las encuestas demográficas. Por ejemplo, Taylor y Pelmear (1976), a partir de una encuesta cuidadosamente controlada en la industria del forjado en Inglaterra, reportaron una variabilidad tan grande que impedía cualquier descripción significativa de las tendencias de los datos. Algunos datos típicos del estudio de Taylor y Pelmear ilustran el problema de la variabilidad y se pueden observar en la Figura 2.

En 2010, McBride (2010) presentó un trabajo encargado por la Corporación de Compensación por Accidentes de Nueva Zelanda consistente en una guía para el diagnóstico de la pérdida auditiva inducida por ruido ocupacional. Estas directrices incluían aspectos relativos al ruido impulsivo, basado en la evidencia recopilada hasta ese momento. Posteriormente, dos estudios realizados en trabajadores chinos expuestos a ruido impulsivo (Xie et al., 2016; Davis et al., 2012) han aportado información adicional sobre el efecto de estos ruidos. En los modelos de predicción del cambio de umbral permanente inducido por ruido (NIPTS, por sus siglas en inglés), se ha demostrado que las funciones de exposición basadas en la curtosis se ajustan mejor a los resultados del modelo. Esta línea de investigación aún está abierta, aunque ya Davis et al. (2012) demostraron que la norma ISO 1999 (1990) subestima el NIPTS en las frecuencias de 2, 4 y 6 kHz en, al menos, 10-15 dB HL (dB de pérdida auditiva).

El Estudio de Roberts et al. (2018), utilizando un modelo mixto en el que se introdujo el estado auditivo de referencia como una covariable adicional, predijo peores umbrales que la norma ISO, más marcados en las frecuencias altas para los percentiles más altos de pérdida auditiva, siendo al menos 5 dB HL y hasta 21 dB HL (percentil 90, en 6 kHz). Aunque estos no son trabajos definitivos, la evidencia muestra que es probable que la norma ISO 1999 subestime el efecto sobre la audición cuando hay ruidos impulsivos.

En este sentido, McBride (2018), en una actualización de su guía de 2010, ha indicado que, probablemente, sea apropiado añadir entre 3 y 6 dB adicionales de exposición al ruido cuando se evalúe el perfil audiométrico en personas expuestas a ruido impulsivo.

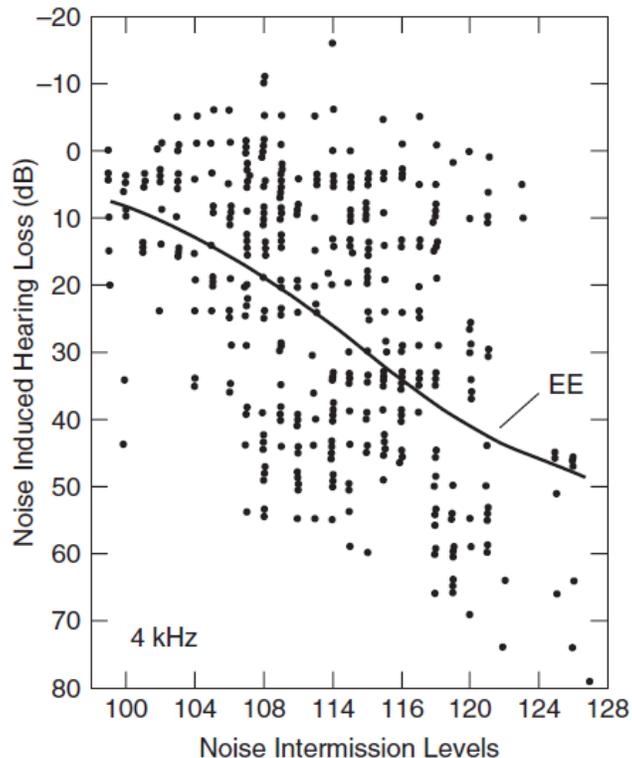


Figura 2: Valores individuales obtenidos por Taylor y Pelmeur (1976), corregidos por edad, de los cambios en el umbral permanente inducidos por ruido en dB a 4 kHz, para trabajadores ingleses expuestos a ruido impulsivo en la industria del forjado. La línea indica las predicciones teóricas (EE). Fuente: Henderson y Hamernik (2007).

3.3 Criterios y métricas para ruido impulsivo

En las décadas de 1950 y 1960, la Academia Nacional de Ciencias de los E.E.U.U., a través del Comité de Audición, Bioacústica y Biomecánica (CHABA, por sus siglas en inglés), desarrolló un trabajo inicial sobre un criterio de riesgo de daño para el ruido continuo y el ruido impulsivo. La primera propuesta de un límite de exposición al ruido impulsivo se enfocó en los disparos de armas de fuego y se basó en el estudio de Coles et al. (1968). Esta propuesta no fue enfocada a los ruidos impulsivos de tipo industrial (impactos) y la dosis de ruido se especificó en términos de la presión sonora peak y dos aspectos sobre la duración de un impulso particular, con factores de corrección para el número de impulsos y para el ángulo de incidencia de la onda sonora con respecto al oído. Es en este criterio donde se definieron por primera vez las duraciones A y B. La duración A es el tiempo requerido para que la onda principal o inicial llegue al nivel de presión peak y retorne momentáneamente a cero. La duración B es el tiempo total que la envolvente

de las fluctuaciones de presión (positivas y negativas) estén dentro de los 20 dB del nivel de presión peak, incluyendo las ondas reflejadas (CHABA, 1992). Sin embargo, este criterio no incluyó el contenido espectral del impulso, a pesar de que el estudio de Coles et al. (1968) consideraba esta información como importante. La razón de esto fue que, con la tecnología disponible en ese momento, resultaba muy difícil y lento realizar un análisis de Fourier a la señal impulsiva.

Posteriormente, se definieron otras dos métricas de tiempo impulsivo para un gráfico de presión versus tiempo: la duración C, usada en Alemania, y que corresponde al tiempo transcurrido desde -10 dB antes del peak hasta -10 dB después del peak y la duración D, usada en Holanda, y definida como el tiempo desde el comienzo del ruido impulsivo hasta la caída de una envolvente a un valor de 10 dB por debajo del valor máximo (Smooenburg, 1982). La Figura 3 muestra las distintas duraciones definidas a partir de las funciones presión sonora-tiempo.

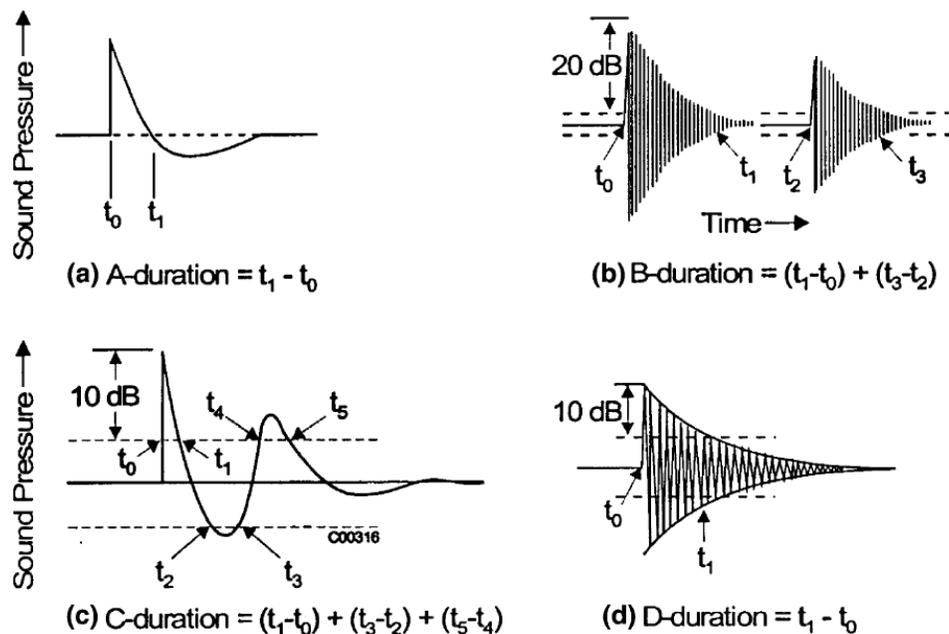


Figura 3: Distintas definiciones de duraciones de tiempo. La duración A es el tiempo que transcurre desde el inicio del impulso hasta el primer cruce por cero después de la caída de la presión máxima. La duración B es el intervalo de tiempo que abarca la "envolvente de las fluctuaciones de presión" (positivas y negativas) dentro de los 20 dB del nivel de presión máxima. La duración C se define como la duración del tiempo desde 10 dB antes del peak hasta 10 dB después del peak. La duración D es el tiempo que transcurre desde el inicio del ruido impulsivo hasta la caída de una envolvente, en el diagrama presión-tiempo, hasta un valor de 10 dB por debajo del máximo. Fuente: Kardous et al. (2005b).

La investigación sobre ruido impulsivo en los siguientes años fue escasa y se limitó a algunos estudios en humanos (Hodge y Garinther, 1970) y en animales (Henderson et al., 1974). En ese escenario, en 1971 se promulgó en E.E.U.U. la regulación OSHA (Federal Register, 1971), que estableció que la exposición a ruido impulsivo o de impacto no debería superar un nivel de presión sonora peak de 140 dB. Así, no se consideró la duración, el contenido espectral, la energía, ni el número de impulsos en esta recomendación. Claramente, los ruidos de disparos no se podían valorar según esta regulación pues siempre excedían el nivel recomendado.

Un estudio realizado en cobayos (Dancer et al., 1985), demostró la importancia de la duración A para cuantificar el peligro de daño auditivo. La comparación de 11 diferentes impulsos a un nivel peak constante, pero con diferentes duraciones A, indicó que mientras más corto el impulso mayor el peligro de daño auditivo, lo cual era contrario a lo esperable basándose sólo en la energía acústica promedio en el impulso. La explicación de este fenómeno es que la distribución espectral de la energía es crucial, pues a mayor duración A, menor es la frecuencia a la cual el espectro exhibirá un máximo, algo que se demostró teóricamente años más tarde (Hamernik and Hsueh, 1991).

Dado que la primera propuesta de CHABA en 1968 poseía varias limitaciones y cuestionamientos, debido a lo limitado de los datos disponibles en ese momento, CHABA estableció en 1988 un nuevo grupo de trabajo para revisar este criterio. Para este trabajo, resultaron fundamentales los datos en modelos animales desarrollados a principios de la década de 1990. Price y Kalb (1991) desarrollaron un modelo matemático para evaluar el riesgo auditivo en presencia de impulsos de alto nivel. El concepto básico era modelar la función de transferencia entre la presión en campo libre y los procesos de daño dentro de la cóclea. Las formas de onda en campo libre servían como entrada al modelo que calculaba la función de transferencia de la cabeza, la del oído medio y el movimiento resultante de la cadena de huesecillos (incluyendo los efectos no lineales), para computar el desplazamiento de la membrana basilar. Esto es la base para lo que se conoce actualmente como el algoritmo de evaluación de riesgos auditivos para humanos (AHAH, por sus siglas en inglés) y que se explica en el trabajo de Price (2007). Dada la importancia de este algoritmo, éste se describe con mayor detalle en la Sección 3.4.

Por otro lado, Patterson y Hamernik (1992), derivaron una función de ponderación espectral que demostró que la energía contenida en impulsos a baja frecuencia debía ser reducida hasta en 10 dB más que la correspondiente a la curva de ponderación A.

En 1990 se publicó el estándar ISO 1999 para considerar ruidos impulsivos de valor moderado para su aplicación en la industria. Se consensuó el uso del nivel equivalente ponderado en A (LeqA) para valorar niveles de ruido impulsivo hasta 145 dB en el oído (ISO, 1990). Allí se establece que no se permitirá una exposición a un nivel sonoro peak mayor a 140 dB. Un criterio similar fue adoptado por el Instituto Americano de

Estándares (ANSI), en su norma ANSI S3.44 (1996), por el Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional de los E.E.U.U. (NIOSH, 1998) y por la Comunidad Europea en su directiva 86/188 (ECD, 1986). Una de las características de la norma ISO 1999 es que integra el peligro de exposición a ruido impulsivo con la exposición a ruido continuo. Sin embargo, se ha establecido que ello no es apropiado para niveles que excedan los 140 dB de nivel de presión sonora peak.

En el primer reporte del grupo de trabajo de CHABA (1992), fundamentado en la evidencia científica disponible, se estableció que la aplicación del criterio debía ser para valores mayores a los 140 dB peak en ponderación C. En el mismo reporte, se estableció que los parámetros de exposición al ruido impulsivo tenían que basarse en los conceptos de energía sonora, contenido espectral, nivel de presión peak, duración, número de impulsos, mezcla de impulsos, y espaciamiento temporal. Esto debía conducir a una modificación de los límites de exposición. Se debe notar que, a pesar del tiempo transcurrido, las consideraciones relativas al ruido impulsivo no han sido incorporadas por la mayoría de los países en sus legislaciones y regulaciones sobre ruido.

En 2003, NIOSH y la asociación nacional para la conservación de la audición de los E.E.U.U. (NHCA), desarrollaron un taller de las mejores prácticas sobre ruido impulsivo, las que fueron publicadas en 2005 (Kardous et al., 2005a). En esta publicación se reporta que la investigación sobre los criterios de riesgo de daños auditivos producidos por los ruidos impulsivos ha generado algunos criterios específicos, algunos en uso actualmente, incluyendo el nivel sonoro equivalente con ponderación A, en 8 horas, denotado como $LeqA8hrs$ (Dancer et al., 1998). Por ejemplo, el Departamento de Defensa de los EE. UU. (DoD), ha adoptado un enfoque basado en el algoritmo AHAAH.

Los tres criterios de riesgo de daño contenidos en varias versiones de la MIL-STD-1474 difieren significativamente en su evaluación del riesgo. Por ejemplo, la recomendación MIL-1474-E (DoD, 2015), emplea las “unidades de riesgo auditivo” (ARU, por su sigla en inglés) y el criterio de igual energía equivalente promediada en intervalos de 100 ms ($LIAeq100ms$), mientras que la recomendación MIL-1474-D (DoD, 1997), se basaba en la medida de la duración A y B, y proveía una categoría límite al ruido impulsivo. Actualmente se considera que el uso de la duración B no es útil para valorar el riesgo auditivo, prevaleciendo lo indicado en la recomendación MIL-1474-E (DoD, 2015).

Entre los criterios para ruido impulsivo también se puede mencionar la ANSI S12.7 (1986), que utiliza el nivel de exposición sonora (SEL), expresado como LxE , donde x es la ponderación en frecuencia. Aunque menos objetivo que los anteriores, el uso del gráfico de nivel peak promedio (medido como $Lzpeak$), expresado en pascales en función del tiempo en segundos, también se ha recomendado como un método de valoración de daño auditivo. Los métodos para estimar los criterios de riesgo de daño por exposición al ruido impulsivo siguen siendo un área muy activa de investigación.

En un estudio comparativo sobre las legislaciones de ruido ocupacional en el continente americano, Arenas y Suter (2014), mostraron que las regulaciones de ruido en varias naciones tratan el ruido impulsivo por separado del ruido continuo. Un enfoque común en algunos países (generalmente aquellos que usan un $q = 5$ dB), ha sido limitar el número de impulsos a una presión acústica máxima dada durante un día de trabajo, aunque las cifras exactas varían ligeramente. Alternativamente, otras naciones han considerado el ruido impulsivo conjuntamente con cualquier ruido continuo. La mayoría de los países limitan la exposición al ruido impulsivo a un nivel máximo de presión sonora no ponderada de 140 dB (o dBC), mientras que algunos usan límites ligeramente más bajos (Brasil a 130 dB o 120 dBC, y Cuba a 135 dB). Algunos países limitan el ruido continuo a 115 dBA, mientras que algunos usan límites más bajos (por ejemplo, México y Bolivia a 105 dBA) y algunos límites más altos (por ejemplo, Canadá a 120 dBA, Argentina a 124 dBA). Sólo unos pocos países limitan el número de impulsos en una jornada laboral (ver Tabla 2 en Arenas y Suter, 2014). En el caso de Chile, se limita el ruido impulsivo a un nivel de presión sonora peak de 140 dBC sin considerar un número de impulsos (DS594, 1999).

3.4 El Algoritmo de Evaluación de Riesgos Auditivos para Humanos (AHAAH)

El Algoritmo de Evaluación de Riesgos Auditivos para Humanos (AHAAH, Auditory Hazard Assessment Algorithm for Humans), es un análogo electroacústico del oído, estructurado para adaptarse a la fisiología del oído, elemento por elemento. Se desarrolló, en principio, para el oído del gato (muy similar al humano), en el cual se podía examinar el cambio temporal del umbral (TTS, Temporary Threshold Shift), el cambio permanente del umbral (PTS, Permanent Threshold Shift) y los cambios a nivel de las células ciliadas del oído interno. Las consideraciones éticas, así como las de precisión científica, exigían el uso de un oído animal en el que la estimulación experimental produjera daños físicos.

Los fundamentos físicos del modelo AHAAH se elaboraron inicialmente basándose en las propiedades mecánicas y fluidodinámicas del oído. Incluyó un análisis del movimiento ondulatorio de la membrana basilar en la cóclea, basado en el método de dinámica ondulatoria de Wentzel-Kramers-Brillouin (WKB), que, durante muchas décadas, se ha utilizado ampliamente y con éxito para resolver problemas de función de onda en mecánica cuántica y física del estado sólido. Desde que se creó la primera versión del modelo AHAAH, éste se ha ampliado varias veces para incluir capacidades adicionales de entrada/salida, para calcular características físicas adicionales de las formas de onda de presión sonora-tiempo y para analizar de forma más estable las formas de onda con comportamientos más severos e inusuales. Sin embargo, el modelo fundamental de riesgo auditivo, incluyendo las representaciones electroacústicas del canal auditivo, el oído medio y la cóclea, no han cambiado desde que se creó el modelo (Fedele et al., 2013).

El modelo reproduce las funciones de transferencia medidas desde el campo libre al estribo y traduce el movimiento del estribo en desplazamientos de la membrana basilar. El algoritmo realiza un seguimiento de los desplazamientos en 23 ubicaciones (intervalos de aproximadamente un tercio de octava) y obtiene una dosis en cada ubicación. Luego eleva al cuadrado la amplitud máxima de cada desplazamiento ascendente de la membrana basilar, los que se suman para el intervalo de análisis. El resultado (en cada ubicación), se expresa en unidades de riesgo auditivo (ARU, Auditory Risk Units), mediante la fórmula:

$$ARU = \sum D^2, \quad (1)$$

donde D es el desplazamiento ascendente de la membrana basilar (en micras).

Se ha determinado que existe una relación directa entre el número de ARUs de una exposición y el cambio del umbral compuesto (CTS, Compound Threshold Shift), resultante en un oído muy similar al humano. Ambos conceptos están relacionados por la ecuación:

$$CTS = 26,6 \ln(ARU) - 140,1 \text{ dB}. \quad (2)$$

Existe una relación genérica correspondiente entre ARU y CTS para la cóclea humana. Con exposiciones intensas, en las que el mecanismo de pérdida es principalmente el estrés mecánico, la recuperación comienza muy lentamente, y es probable que no llegue a completarse cuando se supera una dosis de 500 ARU (CTS = 25 dB).

Los estudios han indicado que una dosis de 500 ARUs es segura, lo que significa que puede haber cambios temporales en la sensibilidad auditiva de hasta 25 dB, pero la recuperación debería producirse en 24 horas, no previéndose que la exposición provoque una pérdida auditiva permanente significativa. Las dosis a niveles muy elevados, que producen un cambio de umbral, deben considerarse como un esfuerzo muscular, equivalentes a un "moretón", que se pueden tolerar ocasionalmente, pero que no deben experimentarse a diario. Cuando se supera el límite de 500 ARUs, la cantidad de PTS suele ser aproximadamente el 60% de la pérdida a los 30 minutos. Se ha demostrado que el PTS previsto corresponde a la pérdida irreversible de células ciliadas. Por otro lado, una dosis de 200 ARUs, dado que no predice ningún cambio de umbral (CTS \approx 0), es el valor de protección estimado como límite de dosis ocupacional, en un ambiente donde podrían ocurrir exposiciones diarias o casi diarias.

Las opciones del AHAH incluyen, además, el efecto de las contracciones musculares del oído medio que se producen antes del inicio del estímulo que se está analizando, denominada exposición advertida (*warned*), o una contracción muscular que es provocada por el ruido de impulso, y que incluye una latencia y un crecimiento hasta el efecto completo, denominada exposición inadvertida (*unwarned*). En el caso de las exposiciones de campo libre, el algoritmo también incluye una función de transferencia del campo libre al tímpano, con o sin protección auditiva.

Se debe notar que el reflejo acústico muscular del oído medio puede activarse en el modelo AHAAH, pero no puede desactivarse. El modelo supone que, una vez superado un umbral, el reflejo se activará y alcanzará su máxima intensidad en unos 200 ms. En la realidad, el reflejo puede activarse y liberarse, puede no alcanzar la activación completa para algunos impulsos y puede estar completamente ausente en algunas personas (Murphy y Kardous, 2012).

El modelo también permite visualizar la acción del sonido en la cóclea, como medio de proporcionar una visión analítica de los procesos de daño en el dominio del tiempo. Esta característica tiene un valor significativo para los diseñadores de materiales de protectores, pues permite dividir el evento impulsivo para determinar qué parte del evento contribuye significativamente al riesgo de pérdida auditiva (Berger y Hamery, 2008).

El AHAAH evalúa el riesgo auditivo para el percentil 95 (el más susceptible), del oído humano, para los sonidos que se dirigen perpendicularmente hacia el lado de la cabeza, que se considera la peor condición. Además, el AHAAH puede evaluar el riesgo auditivo para la incidencia frontal a la cara, como el que experimenta una persona al disparar un rifle. El AHAAH calcula el riesgo auditivo de los sonidos intensos modelando sus efectos desde el campo libre, a través de un protector auditivo, a través del oído medio y hasta el oído interno, que es el lugar donde se producen los daños auditivos permanentes. El módulo de protección auditiva, que se describirá en la Sección 4.6.3 de este documento, permite seleccionar la protección auditiva adecuada en función de parámetros seleccionables por el usuario.

Los ARUs de cada impulso individual deben analizarse por separado y sumarse para obtener la dosis total. Por ejemplo, un gran impulso con 400 ARUs es equivalente a cuatro impulsos, cada uno de 100 ARUs, o bien a 100 impulsos de cuatro ARUs cada uno.

3.5 Metrología del ruido impulsivo

A pesar de la evidencia científica sobre el peligro de daño auditivo de los ruidos impulsivos y la importancia de las métricas necesarias para valorar el riesgo, los resultados validados y aceptados para el ruido impulsivo han quedado muy por detrás de sus contrapartes del ruido continuo. Una razón para esta dicotomía es la limitación metrológica.

Existe un acuerdo general que el mejor método para medir un impulso aislado es grabar la historia de la presión sonora en el tiempo. Sin embargo, debido a los límites extremos que pueden adoptar los parámetros de ruido impulsivo, se debe tener cuidado al momento de la medición. Por ejemplo, los tiempos de subida en un ruido impulsivo pueden ser menores a unos pocos microsegundos y las intensidades pueden ser tan altas como 185 dB en nivel de presión sonora). Los peaks de ruido impulsivo por encima

de los 140 dB son muy difíciles de medir pues muchos instrumentos de medición, que han sido diseñados para medir el nivel del ruido continuo y de sonidos intermitentes en el ámbito industrial, no son capaces de capturar con precisión niveles de sonido tan intensos. Por ejemplo, las constantes de tiempo de integración de algunos sonómetros (medidores de nivel de presión sonora) es de aproximadamente 30 a 40 ms. Sin embargo, algunos impulsos cortos (por ejemplo, un disparo), pueden durar sólo unos pocos microsegundos. Por lo tanto, esta limitación instrumental puede seriamente subestimar los niveles peak u otros parámetros del impulso (Henderson y Hamernik, 2007).

Un estudio publicado por NIOSH en 2003 (Kardous y Willson, 2004) demostró que los dosímetros de ruido no son adecuados para caracterizar el ruido impulsivo. La mayoría de los dosímetros y sonómetros del tipo 2 tienen una respuesta en frecuencia que se deteriora significativamente por sobre los 3 kHz y alcanzan su límite máximo cerca de los 140 dB. Esto produce que los niveles de presión sonora peak por encima de ese valor quedan recortados (efecto usualmente denominado “clipping”). Al recortarse los niveles máximos, es probable que toda la medición y las métricas no sean válidas.

Algunos fabricantes han desarrollado medidores de nivel de presión sonora tipo 1 de alta gama, equipados con micrófonos de gran rango dinámico que pueden medir impulsos de hasta 160 dB. Para poder medir niveles altos de presión sonora, las membranas de los micrófonos deben ser de diámetro más reducido (de 1/4 o 1/8 de pulgada), para incrementar su rigidez. Aunque esto aumenta el rango dinámico, por otro lado, reduce la sensibilidad de los micrófonos (Wong y Embleton, 1995).

Otro estudio (Meinke, 2016), reportó que incluso los sonómetros adaptados para medir el ruido de armas de fuego perdían confiabilidad cuando los valores peak superaban los 155 a 160 dB. Además, el nivel máximo no es la métrica principal para caracterizar el riesgo de daño auditivo de un ruido impulsivo. Se ha establecido que la forma de onda del ruido impulsivo en el dominio del tiempo es vital para establecer las métricas asociadas a los criterios de daño auditivo. Así, conocer las características de la forma de onda del ruido impulsivo es fundamental para valorar el riesgo de cualquier exposición a ruido de impulso de alto nivel. Esto establece otra dificultad metrológica ya que, debido a la corta duración de un ruido impulsivo, se requiere una velocidad de adquisición de datos muy elevada, superior a las 100.000 muestras por segundo. Sin embargo, los sonómetros estándar no superan las 50.000 muestras por segundo (en general, 48 kHz).

Como se indicó anteriormente, varias investigaciones han identificado otras métricas que estarían asociadas a la caracterización de un ruido impulsivo y que serían factores importantes para determinar el riesgo de exposición al ruido impulsivo (CHABA 1992), las que incluyen: 1) la energía total en una forma de onda impulsiva, 2) la duración inicial de un impulso, a menudo denominada duración A, 3) la reverberación que sigue al impulso inicial, como las duraciones B, C o D, 4) el contenido relativo de frecuencias

altas o bajas en un impulso, 5) el número y espaciado temporal de los impulsos en una exposición completa, y 6) la curtosis de un evento impulsivo, que corresponde a un valor estadístico sensible al valor peak y a las características temporales de un ruido. La obtención instrumental de estas métricas en terreno permite establecer los exigentes requisitos que debe cumplir un sistema de medición de ruido impulsivo para poder evaluar estas métricas apropiadamente.

Una extensa revisión de las técnicas de medición de ruido impulsivo hasta 1980 fue presentada por Ivarsson y Nilsson (1980). En ese trabajo, ya establecía la necesidad de incorporar los, hasta ese entonces, incipientes desarrollos en la electrónica digital y el procesamiento de señales para producir una medida apropiada de los ruidos impulsivos.

En la literatura también se puede observar que varios investigadores se interesaron en desarrollar instrumentación para producir un índice numérico único relacionado con los peligros de una exposición a ruido que contenga componentes impulsivos (Atherly y Martin, 1971; Hakanson et al., 1980). Este tipo de dosímetros se basan normalmente en alguna medida ponderada de la energía total y, generalmente, se ajustan al modelo analítico discutido por Martin (1976). Aunque no se puede negar el valor potencial de un instrumento de este tipo, Henderson y Hamernik (2007), advierten que puede ser prematuro adoptar un esquema de medición que ignore por completo una variedad de parámetros potencialmente relevantes como son el tiempo de subida, la tasa de repetición, el contenido de frecuencia y el ruido de fondo.

Apuntando a la necesidad de realizar mediciones precisas del ruido impulsivo en los lugares de trabajo, algunas alternativas han sido investigadas en los últimos 15 años. Kardous et al. (2005b) presentaron un prototipo de dosímetro para medir ruido impulsivo consistente en un micrófono de 1/4 de pulgada y fuente de alimentación Bruel & Kjaer, y un grabador digital de cinta National Panasonic. El sistema permitía muestrear a 200 kHz para capturar impulsos con un tiempo de subida menores a 5 microsegundos. Con el instrumento grabaron señales impulsivas, las que fueron analizadas y procesadas en ambiente MatLab. Con esto, pudieron calcular distintas métricas de ruido impulsivo para cuantificar cambios de umbral permanente.

Por otro lado, NIOSH desarrolló y patentó un sistema de medición autónomo y portátil (Kardous, 2013). Este sistema se basaba en un computador portátil, una tarjeta de adquisición de datos del fabricante National Instruments, tres micrófonos polarizados de muy baja sensibilidad marca PCB y un acondicionador de micrófonos de la fábrica GRAS, y cuyo fin era comercializarlo como un kit autónomo. Aunque su comercialización no prosperó, sus pruebas de validación y aplicación práctica sirvieron para definir algunas características básicas que debería poseer un sistema de este tipo (Brueck et al., 2014). El sistema de NIOSH podía medir impulsos de hasta 192 dB de nivel de presión sonora en tiempo real (equivalente a 79,6 kPa de presión sonora rms) y permitía una adquisición con una frecuencia de muestreo de 102 kHz. El software, desarrollado en ambiente LabView, permitía almacenar formas de onda y proporcionar

análisis y cálculos inmediatos de métricas de ruido de impulso relevantes, que se establecieron como el nivel peak, duración B, espectro de frecuencia (FFT y banda de octava), espaciado temporal, número de impulsos, curtosis y Leq.

Un sistema más reciente, desarrollado por Bruel & Kjaer, se basa en la plataforma Pulse y considera un módulo de adquisición de datos LAN-XI. El sistema funciona con tres micrófonos de 1/4 de pulgada y con una sensibilidad de 0.9 mV/Pa. La adquisición de datos se puede realizar a una tasa de 262 kHz y el software permite obtener todas las métricas en el dominio del tiempo y frecuencia, necesarios para valorar un ruido impulsivo de acuerdo con las recomendaciones militares del DoD (DoD, 1997; 2015).

3.6 Protección auditiva y ruido impulsivo

Respecto a la valoración de la efectividad de los protectores auditivos (PA) al ruido impulsivo, la literatura es escasa. La eficiencia de los PAs es, en general, valorada por el procedimiento de la norma ISO 4869-2 (2018). Esta norma define tres métodos para medidas de ruido continuo (bandas de octava, HML y SNR). En esta misma norma se establece que es posible que estos métodos no sean adecuados para usar con medidas de nivel peak. Actualmente, el principal documento de guía para valorar la atenuación de un PA es el anexo B de la Norma Europea (EN458, 2016). En ésta se definen tres tipos de ruido impulsivo correspondientes a fuentes impulsivas típicas. El método descrito no utiliza ninguna métrica adicional al nivel peak (dBC) y se basa en los valores de HML obtenidos por medio de la ISO 4869-2. Obviamente, el proceso es altamente subjetivo y se considera insuficiente para valorar adecuadamente la eficiencia de un protector auditivo en presencia de ruido impulsivo.

Hamery et al. (2015) han discutido el uso de una cabeza artificial (ATF) para evaluar protectores auditivos usando niveles elevados de ruido impulsivo. Ellos establecen que las ATF tradicionales no son apropiadas para este propósito, dado que han sido diseñadas para otro tipo de pruebas. Un ATF especial para evaluar el comportamiento no lineal de pequeños orificios y protectores auditivos fue desarrollado por Parmentier et al. (2000) para ISL Groupe APC, en Francia. La ATF (denominada ISL ATF), posee un aislamiento acústico superior a 60 dB para todas las frecuencias y se consideró como referencia en el standard ANSI S12.42 (2010) para utilizarla con ruido impulsivo. De esa forma, se puede obtener la pérdida por inserción de HPD utilizando el mismo procedimiento tradicional, llamado MIRE. Esta metodología fue aplicada por Hamery et al. (2015) en varios HPD sometidos a ruido impulsivo, reportando que la atenuación no es constante al utilizar distintos niveles de presión sonora impulsiva.

En un estudio más reciente desarrollado en Polonia, Mlynski y Kozlowski (2019), evaluaron la reducción de ruido impulsivo de 10 HPDs utilizados en un campo de tiro. La protección fue valorada usando la norma europea (EN458, 2016). Ellos concluyen que la elección del HPD debe basarse no solo en los métodos estandarizados de

selección relacionados con ruido continuo si no también deben considerar el parámetro asociado con el valor instantáneo del nivel de la señal, siendo este el nivel de presión sonora peak, ponderado con filtro C (dBCpeak).

En la versión 1474E del modelo AHAAH se incorpora la capacidad adicional de evaluar los riesgos auditivos cuando se utilizan protectores auditivos mediante un módulo de protección auditiva. AHAAH aplica modelos electroacústicos apropiados para una amplia variedad de protectores auditivos y combinaciones de protectores auditivos. Ya que el módulo de protección auditiva depende de los mecanismos del protector y está acoplado el modelo AHAAH, éste permite la evaluación de cualquier diseño futuro de protector auditivo. La Figura 4 muestra el concepto básico del módulo de protección auditiva y la analogía electroacústica de los parámetros físicos que definen el desempeño de un protector auditivo. En la figura se aprecia de qué forma los parámetros físicos son reemplazados por elementos equivalentes del tipo resistivo (resistencias) y reactivo (masas y compliancias), en un circuito eléctrico análogo.

Un detalle importante es que el AHAAH permite realizar cálculos para condiciones en las que (1) no hay protección auditiva, (2) se usa un buen dispositivo de protección auditiva (HPD) (un tapón u orejera), o (3) se emplea una protección auditiva doble (tapón y orejera combinados) que estén correctamente ajustados y usados por el usuario. Muchos protectores auditivos específicos pueden aplicarse en el modelo utilizando valores medios de rendimiento de los protectores auditivos (valores REAT) o utilizando valores reducidos en una desviación estándar (Fedele et al., 2013).

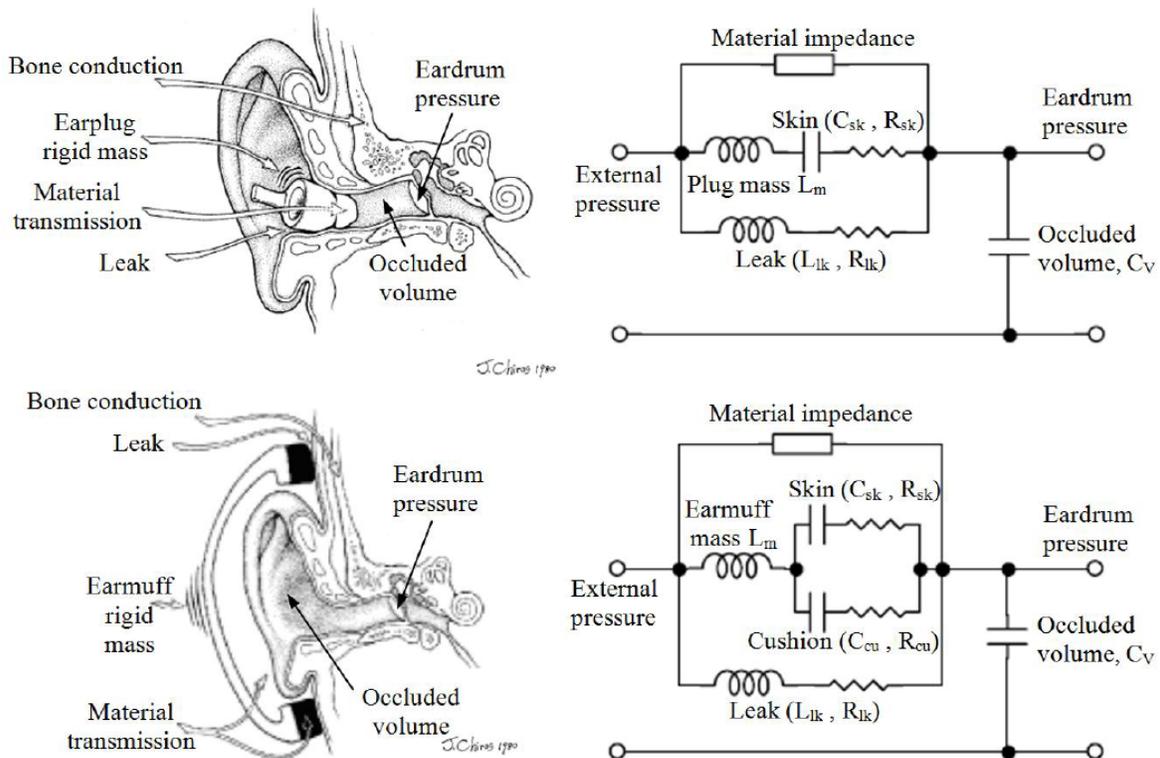


Figura 4: Analogía electroacústica de la protección auditiva. Fuente: DoD (2015).

Una alternativa a los protectores auditivos tradicionales para su uso con altos niveles de ruido, son los protectores pasivos dependientes del nivel o, también denominados no lineales. Estos son HPD que incorporan filtros acústicos especializados que, a diferencia de los HPD tradicionales, crean una barrera relativamente transparente a niveles sonoros bajos, utilizando un pequeño orificio o un fino diafragma. La intención es que la cantidad de reducción de ruido aumente en proporción al nivel sonoro al que se expone el usuario.

A niveles sonoros bajos (menores a 110 dB, por ejemplo), estos dispositivos proporcionan poca o ninguna atenuación, lo que permite al usuario mantener una mejor capacidad auditiva (en el sentido de mantener las habilidades de detección sonora, reconocimiento, identificación, localización y comunicación). Sin embargo, cuando el usuario está expuesto a ruidos impulsivos de muy alto nivel y corta duración, los filtros acústicos restringen instantáneamente la transmisión del sonido al oído en una cantidad mayor, la cual aumenta a medida que aumenta el nivel sonoro, con el objetivo de mejorar la atenuación de la onda de presión sonora máxima, L_{peak} , y reducir así la exposición del usuario (3M, 2015).

Algunos HPD dependientes del nivel, permiten al usuario cambiar del modo de protección contra el ruido de impulsos a un modo de protección contra el ruido continuo sellando el filtro acústico, lo que hace que el dispositivo funcione como un

protector auditivo tradicional. Esto puede ser útil cuando el usuario está expuesto a ruido de impulsos en determinados momentos y a ruido continuo en otros.

3.7 Valoración de la eficiencia de protectores auditivos a ruido impulsivo

Las exposiciones a los intensos ruidos de impacto en las industrias y a los ruidos de impulso de alto nivel en el sector militar, plantean la necesidad de medir el rendimiento de los equipos de protección auditiva (HPD, Hearing Protection Devices), respecto a este tipo de ruidos. Estas exposiciones suponen un grave peligro de pérdida de la audición inducida por el ruido impulsivo para las personas que no utilizan protectores en estos tipos de ambientes. Proporcionar un método que informe a los usuarios sobre el rendimiento de los protectores auditivos en presencia de ruido impulsivo de alto nivel y de una metodología para valorar la efectividad de los protectores auditivos ante dichos ruidos, permitirá a un usuario o a un especialista estimar si un trabajador está adecuadamente protegido.

Aunque se han publicado numerosos estudios sobre el tema de ruido impulsivo, estos se han enfocado primariamente al campo militar y policial, en los impulsos provenientes de armas de fuego. Estos temas se han cubierto adecuadamente en la última norma STD-MIL-1474-E publicada en 2015. Sin embargo, la información sobre la conexión entre los efectos del ruido impulsivo de tipo industrial y los protectores auditivos es escasa, y la investigación sobre estos temas continúa. Por este motivo, solamente una norma, la ANSI/ASA S12.42 (que se desarrolló inicialmente para los ruidos de impulso en el ámbito militar), un anexo de la norma europea EN 458 (2016) y una futura parte 7 de la norma ISO 4869, actualmente en elaboración, son los únicos instrumentos que relacionan estos importantes temas.

En la valoración de la efectividad real de los protectores auditivos en presencia de ruido impulsivo, se han identificado seis dificultades técnicas:

1. La atenuación suministrada por un protector auditivo no es lineal con respecto a los niveles de presión sonora a los que están expuestos.
2. Evidencia reciente indica que el sello de un protector auditivo falla al ser expuesto a un nivel extremadamente alto (L_{peak} sobre 180 dB).
3. Debido a la dificultad práctica y a restricciones éticas, no existen estudios epidemiológicos amplios sobre los reales efectos de un ruido impulsivo en el ser humano.
4. No existe consenso respecto a las métricas, definidas en estándares y recomendaciones internacionales, y su correlación con el nivel de riesgo auditivo de las personas expuestas a ruido impulsivo.

5. Las formas de onda en el dominio del tiempo de los ruidos impulsivos encontrados frecuentemente en ambientes laborales industriales, no corresponden a las formas idealizadas de ruido de impulso y de impacto, con las cuales se han desarrollado los estudios teóricos sobre el riesgo auditivo.

6. La energía de un ruido impulsivo es de gran ancho de banda y esta energía puede abarcar frecuencias que están fuera de los rangos de frecuencias centrales de las bandas de octava, en las cuales se mide la atenuación al ruido de un protector auditivo.

Resulta evidente que, en el proceso de selección del HPD adecuado para un determinado ruido impulsivo, se considere primero evaluar detalladamente las características físicas del ruido, para luego determinar el riesgo auditivo que este ruido representa. Posteriormente, se debe estimar el cambio en el riesgo auditivo que se produce al utilizar el equipo de protección auditiva. Por este motivo, la determinación del riesgo auditivo a partir de una métrica es indispensable.

A partir de la información recopilada en la bibliografía sobre el tema, existen dos indicadores de riesgo auditivo que han predominado en las actuales recomendaciones internacionales sobre ruido impulsivo: Las unidades de riesgo auditivo (ARU) y el nivel $LIAeq_{100ms}$.

Las unidades de riesgo auditivo (ARUs) se calculan utilizando el modelo AHAH, que permite calcular los riesgos para exposiciones con y sin advertencia (warned y unwarned) y para tres niveles de protección auditiva: exposiciones sin HPD, con un solo HPD (tapones u orejeras) y con doble HPD (tapones y orejeras usados en conjunto). El AHAH incluye once configuraciones de protección auditiva por defecto, que cubren la mayoría de las condiciones operativas (para mayor detalle, véase la Tabla B-A-I en el estándar STD-MIL-1474E). Las opciones "sin protector" se incluyen para permitir evaluaciones de riesgo sin mitigación y para la exploración teórica de lo que ocurriría si no se llevara protección, por ejemplo, en el caso que el trabajador no utilice los equipos de protección personal de forma correcta. Sin embargo, siempre considera que nunca se permitan exposiciones iguales o superiores a $L_{peak} = 140$ dB, sin protección auditiva.

Por otro lado, el nivel $LIAeq_{100ms}$ es una métrica que emplea el modelo de "igual energía" (Roberto et al., 1985), que caracteriza la energía total equivalente del impulso, calculado para 100 milisegundos (ms). La métrica $LIAeq_{100ms}$ puede utilizarse para calcular una dosis de ruido relativa a un ruido impulsivo de una sola ocurrencia y la dosis impulsiva de uno o varios impulsos puede sumarse con la dosis del ruido continuo. De este modo, la métrica $LIAeq_{100ms}$ podría utilizarse para evaluar la dosis total de la exposición combinada de ruido continuo e impulsivo. Para algunos tipos de ruido impulsivo de mayor duración, el indicador se puede extender a un tiempo de integración mayor que 100 ms.

3.8 Métodos de evaluación de la atenuación de HPD con ruido impulsivo

Para poder valorar la eficiencia de los HPD ante ruidos impulsivos, es necesario medir apropiadamente la atenuación de dichos HPD cuando son expuestos a ruido impulsivo.

La principal norma para la evaluación de protectores auditivos en presencia de ruido impulsivo es la ANSI S12.42-2010, revisada por última vez el 6 de enero de 2020. En esta norma se establecen los métodos de medición, incluyendo los tipos de fuente para generar altos niveles de ruido impulsivo (tubo de ondas de choque y cargas explosivas). El mecanismo utilizado para generar los impulsos debe ser capaz de proporcionar niveles de presión sonora máxima que oscilen entre tres rangos: 130 y 134 dB, 148 y 152 dB, y 166 y 170 dB. Los ensayos pueden realizarse a niveles que superen los 170 dB requeridos, pero esto constituye un cuarto rango al ser reportado. La duración A mínima permitida debe ser mayor o igual a 0,5 ms y la máxima debe ser menor o igual a 2 ms.

Además de los requerimientos de la instrumentación y procesado de las señales, la norma también define las características del dispositivo en el cual se mide el protector auditivo, el cual debe simular una cabeza humana en su forma y representar el oído humano en su instrumentación (Schroeter y Poesselt, 1986). Este dispositivo se conoce como Dispositivo de Ensayo Acústico, maniquí, o cabeza artificial, usualmente denominados ATF (Acoustical Test Fixture). Aunque se ha establecido que aún no existen ATFs que cumplan todos los requisitos establecidos en la norma ANSI, existen en el mercado varios modelos para la medición de protectores auditivos que poseen algunas de las características descritas en dicha norma.

Tres de los maniqués comerciales más conocidos son el KEMAR (Knowles Electronics Manikin for Acoustic Research), el simulador de cabeza y torso (HATS) de Brüel and Kjær Type 4128, y el dispositivo HMS de Head Acoustics. Parmentier et al. (2000), reportaron que el aislamiento del KEMAR y el primer modelo de los dispositivos de Head Acoustics no lograban suficiente aislamiento para que la pérdida de inserción llegara por debajo de la conducción ósea. Del mismo modo, Berger (2005) informó de una serie de deficiencias al utilizar el KEMAR para las mediciones de un HPD. El dispositivo HATS tiene características de diseño similares a las de KEMAR en este sentido; el volumen de la cabeza carece de cualquier masa que absorba el sonido o las vibraciones. Sin embargo, la empresa G.R.A.S. produce actualmente un aparato KEMAR actualizado y es probable que pronto comercialice una versión que incluya todas las características contempladas en esta norma.

Un ejemplo de una cabeza artificial con dimensiones antropométricas representativas es la del Institut Franco-Allemand de Recherches de Saint-Louis (ISL), que cumple el criterio de pérdida de inserción de 60 dB (Parmentier et al., 2000). El ATF del ISL aísla el simulador de oído dentro de una cápsula suspendida dentro de un cuerpo acrílico relativamente sólido. También incorpora un conjunto reemplazable de canal auditivo y

pabellón auricular, incluye las simulaciones de piel necesarias y permite probar tanto dispositivos tipo orejeras como tapones insertos.

El ATF del ISL tiene la ventaja añadida de ser antropométricamente correcto para permitir la colocación adecuada de cascos y también simula con mayor precisión los efectos de difracción del sonido alrededor de la cabeza, lo que es importante para las mediciones del ruido impulsivo. Las únicas características que no poseía el modelo, al momento de revisar la norma, es un calentador para simular la temperatura corporal y un canal auditivo lo suficientemente largo para cumplir los requisitos de la ANSI (su canal sólo mide 10,6 mm).

Para valorar la propiedad de un protector auditivo de atenuar un ruido impulsivo, se definió una métrica llamada Pérdida de Inserción de Peak Impulsivo (IPIL, Impulsive Peak Insertion Loss). Este valor corresponde a la reducción del nivel peak de presión sonora de un ruido impulsivo proporcionada por un HPD, y que se determina a partir de las mediciones de reducción de ruido corregidas, utilizando la función de transferencia de campo libre a oído abierto. Los valores de IPIL se calculan para cada uno de los tres rangos de nivel de presión sonora peak máximos (132, 150, ó 168 dB), definidos en la norma. La última revisión de la norma ANSI ha incorporado un anexo (H) que posee el código en Matlab para el cómputo del IPIL, a partir de las mediciones hechas en el ATF.

Es importante notar que el IPIL es un número único (para cada rango), basado en la reducción instantánea del máximo nivel de presión sonora peak entre las formas de onda temporales, sin ocluir y ocluidas. Este número único no cuantifica explícitamente ninguna dependencia de la frecuencia de las propiedades de atenuación del HPD. Para caracterizar la dependencia de la frecuencia, Fackler et al. (2017) analizaron las formas de onda impulsivas para la pérdida de inserción espectral, definiendo una pérdida de inserción espectral impulsiva (ISIL, Impulsive Spectral Insertion Loss), que producía un espectro en tercio de octavas de la pérdida de inserción entre los 125 y 8000 Hz. Este método fue solamente experimental y no ha sido considerado en ningún estándar hasta ahora.

El método REAT (Real-Ear Attenuation at Threshold), de la ANSI/ASA S12.6 (2016), es también un método de medida que podría ser aceptable para protectores del tipo orejera o tapones insertos para niveles peak hasta 170 dB, aunque hasta el momento no existe un método estandarizado para estimar el IPIL a partir de las medidas REAT. El método REAT utiliza seres humanos voluntarios para caracterizar la atenuación de un HPD. El método MIRE no es aplicable en ruido impulsivo y se recomienda sólo para medidas en presencia de ruido continuo (de Almeida-Agurto et al., 2011).

En 2009, la Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos (EPA), propuso cambiar la forma en que se mide la protección auditiva y cómo se informa al consumidor (Federal Register, 2009). En el caso de los protectores auditivos diseñados para proporcionar poca atenuación a niveles bajos y mayor atenuación a niveles altos,

la EPA desarrolló una clasificación llamada IMPULSE, para describir el cambio en el nivel de impulso máximo en un rango de 130 a 170 dB. Evidentemente, esta clasificación estaba orientada a la comercialización de protectores auditivos usados por militares, cazadores y el personal policial, quienes están expuestos a ruidos impulsivos en el extremo más alto de éstos, que va de los 150 a 170 dB. La normativa propuesta aún no ha entrado en vigor, por lo que todavía no es obligatorio etiquetar los protectores auditivos con una clasificación de IMPULSE. Sin embargo, la metodología para determinar la métrica IMPULSE es muy similar a la del IPIL (Lake, 2013).

La importancia de medir la pérdida de inserción a altos niveles ha sido demostrada por diferentes estudios (Buck, 2009), los cuales indican que el IPIL se incrementa cuando se incrementa el L_{peak} del ruido impulsivo (Murphy et al., 2011). La razón por la que ocurre este fenómeno aún no es conocida. Lo que sí está claro, es que la atenuación a ruido impulsivo de un protector auditivo, calculada a partir de sus valores medidos de NRR (Noise Reduction Rating), no es recomendable ya que, probablemente, subestimaré la cantidad de protección que una persona puede recibir cuando usa el protector correctamente (Lake, 2013).

Lamentablemente, no existe ninguna relación conocida entre los valores de NRR de un protector auditivo, generados a niveles donde la acústica lineal es válida, y los resultados del IPIL generados a niveles no lineales.

Recientemente, investigadores en Canadá (Sarray et al., 2019), han propuesto una métrica llamada OBIPIL (Octave Band Impulse Peak Insertion Loss). Esta métrica está derivada de los resultados de pérdida de inserción medidos en ATF en bandas de octava. Ellos proponen obtener la señal temporal desde cada banda y analizarla en forma independiente, para así obtener un IPIL equivalente, pero ahora expresado en frecuencia, y que podría servir para calcular la atenuación de un protector al ruido impulsivo.

Es interesante mencionar que, actualmente, un grupo de trabajo de la ISO (ISO/TC 43/SC 1 N 2582), está elaborando la parte 7 de la norma ISO 4869, que se denominará "Método para medir la respuesta de los protectores auditivos con ruido de impulso de alto nivel en un dispositivo de ensayo acústico". Esta norma prevé la medición de la respuesta de los dispositivos de protección auditiva en niveles elevados de ruido impulsivo. El objetivo es proporcionar un método que ayude a predecir las exposiciones al ruido, con el dispositivo de protección auditiva, en presencia de ruido impulsivo.

En la descripción del estándar, se menciona que esta norma especificará los ATF para la medición de la pérdida de inserción de los HPDs electrónicos y pasivos, lineales y no lineales. La norma contendrá información sobre la instrumentación, la calibración y los requisitos electroacústicos, los procedimientos para determinar los niveles de presión sonora en el ATF con y sin los dispositivos de protección auditiva colocados y los procedimientos para calcular los valores de pérdida de inserción correspondientes. El documento también describirá cómo realizar las mediciones y determinar la función de

transferencia compleja para un protector auditivo. Sin embargo, no existe una fecha estimada de publicación de esta norma, la que actualmente no ha pasado de la etapa de revisión.

Aunque la norma ANSI S12.42 es aceptada mayoritariamente a nivel internacional, algunos autores han señalado puntos débiles relacionados con el indicador IPIL utilizado para caracterizar la protección (Fackler et al., 2017). Además, es difícil poder considerar adecuadamente la conducción ósea y los mecanismos de protección del oído medio, que son potencialmente no lineales (reflejo acústico y contracción del ligamento estapedial anular del estribo), para corregir la atenuación medida en el ATF para ruidos impulsivos, principalmente los de tipo industrial (Sgard, 2022).

4. METODOLOGÍA

Para el logro de los dos objetivos específicos, se planteó un estudio que contemplaba una revisión exhaustiva del estado del arte y un estudio cuantitativo para evaluar el factor de riesgo ruido impulsivo mediante la medición de variables relevantes (métricas definidas para ruido impulsivo), a través de un sistema de medición válido para realizar este tipo de caracterización, utilizado en condiciones de laboratorio y en una muestra de ambientes laborales reales. Esto con el fin de comparar la efectividad del sistema de medición aplicado con el método estándar para la medición de ruido en Chile y para valorar adecuadamente la efectividad de protección auditiva suministrada por protectores auditivos en presencia de ruido impulsivo. El proyecto contempló los siguientes pasos metodológicos:

4.1 Estado del arte en la medición de ruido impulsivo (equipamientos y métodos de valoración)

La primera etapa del proyecto consistió en una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre el ruido impulsivo, sus técnicas de medida, equipamiento disponible, métodos de valoración de daño auditivo producido por ruido impulsivo y de valoración de la efectividad de un protector auditivo en presencia de este tipo de ruido. La revisión incluyó revistas especializadas, libros y normas internacionales. Para esto, se emplearon los recursos bibliográficos con que cuenta la Universidad Austral de Chile (UACH), que incluyen las bases de datos Web of Science (ISI), ScienceDirect (Elsevier), Ingenta Connect, Scielo, Latindex, SciFinder, Scopus, LILACS, Medline (PubMed y BIREME), AccessMedicine, ClinicalKey, Emerald, UptoDate, etc., además de las bases Open Access. Cuando una publicación no estuvo disponible en estas bases de datos, se recurrió al servicio de referencia electrónica de la Biblioteca Central de la UACH y, en otros casos, se adquirió la referencia con los recursos del proyecto. El cuerpo de esta revisión bibliográfica se ha presentado en la Sección 3 de este documento.

4.2 Definición del equipamiento y metodología más acorde para una correcta caracterización del ruido impulsivo

Un aspecto relevante en este proyecto es la implementación de un sistema de medición de ruido impulsivo, de acuerdo con los requerimientos técnicos necesarios. A partir de la revisión del estado del arte en el tema, se identificaron solamente dos opciones que potencialmente podían ser escogidas: el sistema desarrollado por NIOSH en 2014 y el sistema implementado por Bruel & Kjaer alrededor de 2016. Se descartó el sistema de NIOSH ya que no está disponible comercialmente y algunos de sus componentes, como la tarjeta de adquisición de señales ya no se fabrica por el diseñador original (National Instruments). A pesar de que la tarjeta podría reemplazarse por otra, el uso del software Labview para su control, que requiere la compra de una licencia, hace que el costo del equipo supere el presupuesto disponible. Por este motivo, se decidió adquirir el sistema desarrollado por la fábrica de origen danés, Bruel & Kjaer, que implementó el sistema de medición de ruido impulsivo como un kit autónomo y portátil, basado en la plataforma Pulse y que considera un módulo de adquisición de datos LAN-XI.

El software empleado por Bruel & Kjaer permite además obtener todas las métricas de ruido impulsivo en el dominio del tiempo y frecuencia, necesarios para valorar un ruido impulsivo de acuerdo con las recomendaciones militares del DoD. Además, este equipamiento posee representante en Chile (Tecsis Ltda.), el cual puede dar soporte técnico al producto. Luego de analizar la oferta económica de Tecsis y comprobar que se ajustaba al presupuesto asignado para este ítem, se decidió optar por esta alternativa.

Por otro lado, el equipo funciona conectado a un computador portátil que debe tener ciertos requerimientos mínimos para operar el sistema de medición de ruido impulsivo. Aun cuando varias opciones de computadores portátiles disponibles en el mercado nacional cumplen estos requisitos, se optó por invertir en un computador de alta gama, que posee rango militar, por lo cual permite su uso en ambientes hostiles. También, se seleccionó un computador con alta duración de batería (de igual forma se incluyó una batería extra), para su uso extenso en las medidas en terreno que fueron incluidas en este proyecto. Para este laptop se recibió una oferta económica de la empresa Soporte Inteligente, la cual se ajustó al presupuesto asignado para este ítem y que ofreció una garantía de 3 años.

A continuación, se describen las principales características del equipamiento seleccionado.

4.2.1 Sistema de evaluación de ruido impulsivo Bruel & Kjaer 7963

El sistema de evaluación de ruido impulsivo de la empresa Bruel & Kjaer se comercializa como un kit y se designa con el modelo 7963. El sistema se basa en la plataforma PULSE de la misma empresa, la cual se emplea como estándar en casi la totalidad de sus sistemas de análisis de ruido y vibración. La plataforma PULSE permite programar la

adquisición y análisis de señales en un computador. En el modelo 7963 se incorpora el software PULSE con los módulos necesarios para adquirir y analizar ruidos impulsivos.

El sistema portátil completo utiliza tres micrófonos de ¼" para realizar mediciones simultáneas en el oído izquierdo y derecho y en un punto cercano a la fuente de ruido impulsiva (por ejemplo, la boca del cañón de un arma). Los micrófonos son de alta presión, pre-polarizados (con un preamplificador CCLD), modelo 4944-A, que poseen una sensibilidad de 0.9 mV/Pa, una respuesta en frecuencia que va de 16 Hz a 70 kHz (± 2 dB) con una frecuencia límite inferior de 7 a 9 Hz. El rango dinámico de los micrófonos supera los 169 dB de nivel de presión sonora, es decir, 5.637 Pa, con un 3% de distorsión. El máximo nivel de presión sonora admitido es de 182 dB (peak), es decir, 25.178 Pa).

Después de cada evento de ruido impulsivo, los parámetros de ruido se calculan y se muestran inmediatamente por el software. La documentación completa de la sesión de mediciones está disponible en un informe compatible con Microsoft Excel, aunque se pueden rescatar los datos en formato texto. Todo el hardware necesario está contenido en el kit de hardware de ruido impulsivo que se identifica con el código UA-4133. La principal pieza del hardware es el de adquisición de datos, que incluye una unidad LAN-XI de 3 canales (tipificado como módulo 3052), que posee una tasa de muestreo de 262.144 muestras por segundo. Esta tasa de muestreo cumple con los estándares más exigentes que son el MIL-1474-D, que requiere un mínimo de 160.000 muestras/s, y el MIL-1474-E que exige una tasa mínima de 192.000 muestras/s.

El software basado en PULSE corresponde a un módulo dedicado (Impulse Noise Evaluation Type 7963), que corresponde al corazón del sistema de evaluación del ruido impulsivo. Con este módulo se controlan las mediciones y se realizan los cálculos. La Figura 5 muestra una disposición típica de medida con el sistema, en el caso que la fuente impulsiva corresponda a un rifle.

El kit completo (UA-4133) pesa 5,5 kg e incluye además de los indicado anteriormente un módulo de batería recargable, los cables de micrófonos (3 m de extensión), portamicrófonos y preamplificadores, calibrador sonoro (modelo 4231), y un trípode (UA-0801).

La compra del kit incluyó además un acuerdo de mantenimiento y soporte para el software, válido por un año por parte del fabricante.

La Tabla 1 indica los parámetros disponibles y entregados directamente por el software PULSE y su compatibilidad con las principales normativas disponibles para la evaluación del ruido impulsivo. Además, el sistema permite obtener en forma externa otros parámetros (por ejemplo, la curtosis), a partir del análisis de la señal graficada como presión (en Pa) versus tiempo (en segundos). En nuestro caso, esta señal fue analizada con el software MATLAB, disponible en nuestro laboratorio.

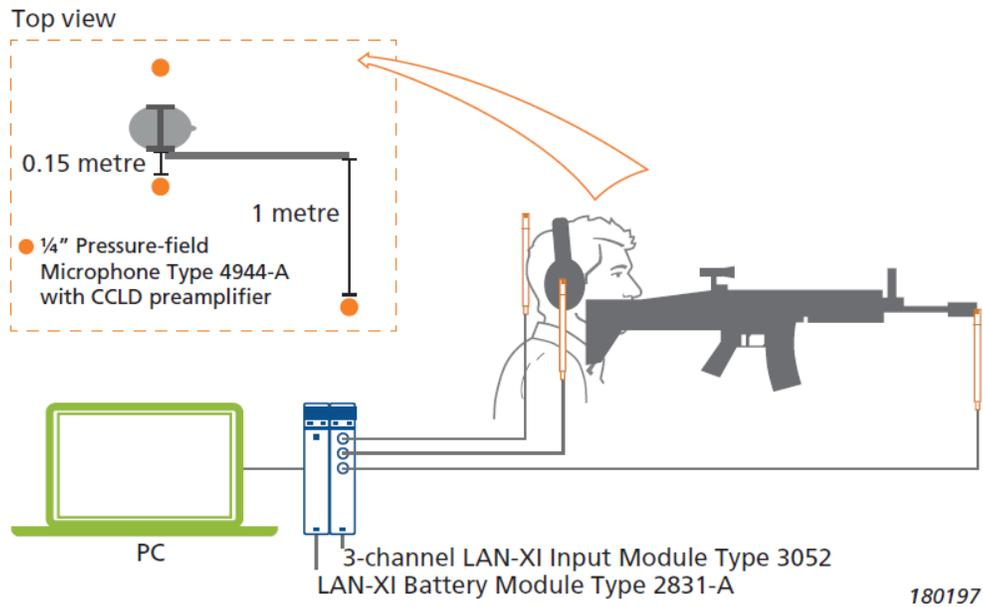


Figura 5: Disposición típica del arreglo experimental para medida de ruido impulsivo mediante el sistema B&K 7963. Fuente: Bruel & Kjaer.

Tabla 1: Resultados de medición disponibles y soportadas por el sistema B&K 7963, de acuerdo a las normativas existentes.

MIL-1474-D 1997	ANSI S12.7	ANSI S12.7	MIL-1474-E	MIL-1474-E	Nivel Peak Promedio
Duración A, Duración B, Categoría límite de ruido impulsivo.	Nivel de exposición Sonora (SEL), equivalente a L_xE , donde x corresponde a la ponderación en frecuencia.	Espectro FFT/CPB.	Unidades de riesgo auditivo (ARU) medidas de acuerdo con el modelo AHAH (auditory hazard assessment algorithm for humans)*	Igual energía equivalente promediada en intervalos de 100 ms (LIAeq100ms). Notar que la letra "I" se refiere a un impulso y no a una ponderación temporal.	Gráfico de presión (Pa) versus tiempo (segundos). El nivel peak se mide en $Lzpeak$.

* En este caso, se exporta la historia temporal del ruido impulsivo al modelo AHAH

La calibración del sistema se realiza mediante el software "Calibration Master" (incorporado en el software PULSE), que inicia automáticamente la calibración mientras se mueve el calibrador de un micrófono a otro. El historial completo de calibración de cada micrófono puede conservarse en la base de datos de transductores, lo cual permite un seguimiento de las variaciones de los datos de calibración a lo largo

de un periodo de tiempo. La calibración global permite crear una base de datos de calibración que se puede compartir en cada proyecto de medición.

En resumen, se pueden listar los siguientes usos y aspectos ventajosos del sistema B&K 7963:

Usos:

- Medición e informes precisos del ruido impulsivo con normativas internacionales
- Evaluación de la exposición al ruido impulsivo
- Medición de los valores máximos de ruido impulsivo para comparar y evaluar prototipos
- Análisis completo en el dominio del tiempo y frecuencia de señales de corta duración y alto nivel
- Cálculo de la categoría de límite de ruido de impulsos

Aspectos ventajosos:

- Posee una función de activación del nivel de presión sonora (trigger), que reduce la incidencia de registros falsos
- Permite comparar rápidamente los eventos impulsivos
- Presenta un procedimiento de medición sencillo para múltiples fuentes de ruido impulsivo
- La interfaz de usuario es fácil de usar, por lo que se requiere una formación mínima del personal encargado de realizar medidas en terreno.

4.2.2 Computador portátil DELL Rugged Latitude 5424

El sistema de medición de ruido impulsivo 7963 de Bruel & Kjaer que se describió anteriormente, utiliza un conjunto de hardware y software basado en la plataforma PULSE. Uno de los componentes que conforman este sistema, y que no es proporcionado directamente por Bruel & Kjaer, es una laptop que debió cumplir con los requisitos que la empresa indica expresamente, algunos de los cuales se listan a continuación:

- Procesador Intel® Core™ i7, 3 GHz o mejor
- 32 GB RAM de memoria
- Disco de estado sólido de 480 GB con 20 GB o más de espacio libre en el disco
- 1 Gbit Ethernet network, para uso dedicado a la adquisición de datos

- Resolución de pantalla 1920 × 1080 pixeles (full HD)

Considerando las especificaciones técnicas para la laptop, necesarias para el adecuado funcionamiento del sistema de medición de ruido impulsivo, además de la necesidad de un sistema portátil y robusto para medición en terreno y una adecuada autonomía, se optó por el computador portátil DELL modelo Rugged Latitude 5424. Este modelo posee las siguientes características técnicas principales:

- Procesador Intel Core octava generación I7-8650U 8MB Caché, hasta 4.2 GHz
- 32 GB en RAM en 2 módulos de 16 GB DDR4 PC 3200
- Disco SSD 512 GB NVME, tasas de 3200/2300 MB/s
- Pantalla 14 FHD 1920x1080

Se puede observar que las especificaciones de este laptop satisfacen las recomendaciones del sistema B&K 7963.

Otro aspecto importante es que además este laptop puede recargarse, sin dejar de funcionar, con una batería externa portátil PowerBank Dell 65Wh que se incluyó como accesorio del computador.

4.3 Adquisición del equipamiento definido

Una vez definido el equipamiento, se procedió a su compra mediante los procedimientos establecidos por el financiador del proyecto.

4.4 Implementación del sistema y capacitación en el uso

Una vez adquiridos los elementos que componen el sistema de medición de ruido impulsivo, se procedió a la implementación del sistema, controlado por el computador portátil. Desde el punto de vista del sistema completo (hardware y software), los requerimientos básicos para el sistema implementado fueron: ser capaz de capturar sonidos impulsivos de alto nivel, tener la capacidad de almacenar toda la forma de onda del impulso o evento impulsivo, y que incorporase el cómputo de las métricas apropiadas para caracterizar un ruido impulsivo.

En una primera etapa, se comenzaron a realizar pruebas preliminares para establecer la calibración y adecuado funcionamiento. Para estos, se instalaron los softwares de control de la tarjeta de adquisición de datos de alta velocidad y se realizaron los ajustes necesarios, incluyendo su calibración. En principio, se realizaron medidas en laboratorio con fuentes impulsivas definidas, y que habían demostrado ser adecuados para generar altos niveles de presión sonora y proporcionar repetibilidad.

Como fuentes generadoras de sonido se emplearon tres fuentes de ruido impulsivo:

- 1) Globos de látex
- 2) Pistola BRUNI modelo 92, con munición de salva de 9 mm

- 3) Revólver BRUNI modelo Olympic 380mm, con munición de salva de 9mm corta.

Para producir el ruido impulsivo de los globos, se empleó un alfiler para generar la explosión en un instante controlado. El módulo de adquisición de datos de 3 canales LAN-XI, tipo 3052, se conectó al notebook mediante un cable de red F-UTP/STP apantallado. Los micrófonos fueron conectados a cada una de las tres entradas del módulo de adquisición de datos mediante los cables suministrados con el sistema (cables de micrófono AO-0587-D-030, SMB a BNC).

Debido a que el sistema de evaluación de ruido impulsivo ha sido diseñado para evaluar los efectos de ruidos de disparos (rifles, escopetas, fusiles, etc.), hubo que modificar el sistema de adaptación de micrófonos en los oídos de la persona expuesta. Para esto, se adquirió una esfera de poliestireno expandido, de 20 cm de diámetro, para simular una cabeza humana. A la esfera se le adosó el sistema de adaptación de micrófonos, para poder tener un receptor hipotético, con un micrófono a cada lado, correspondiente a la posición del oído izquierdo y derecho, respectivamente. Los micrófonos se instalaron usando los adaptadores suministrados con el equipo, los cuales se fijaron con velcro a la esfera. La esfera fue posteriormente montada en un trípode, para regular la altura del receptor, que en nuestro caso se fijó a 1,5 m sobre el suelo.

El tercer micrófono, denotado como *muzzle* en el sistema, se ubicó cercano a la fuente de ruido, a una distancia de 1 m, y montado en un trípode mediante los accesorios suministrados con el equipo. Este micrófono se ubicó a aproximadamente 2 m de distancia del centro de la esfera de poliestireno. La Fig. 6 muestra dos fotografías del proceso experimental en ambas salas.



Figura 6: Fotografías que muestran el arreglo experimental para medir ruido impulsivo dentro de la sala anecoica (izquierda) y la sala reverberante (derecha).

El control y operación del sistema se realizó a través del software de la plataforma PULSE Labshop, instalado en el notebook, que posee los módulos necesarios para medir y evaluar ruidos impulsivos.

Se realizaron mediciones en dos ambientes acústicos completamente opuestos. Para esto, se midió dentro de una sala anecoica (de 52 m³) y luego en una sala reverberante (de 202 m³), para simular un campo acústico libre y otro difuso, respectivamente. Las salas están ubicadas en el Instituto de Acústica de la Universidad Austral de Chile, en Valdivia. En el proceso de medición participó todo el equipo de investigación, incluyendo un estudiante tesista. Las mediciones se realizaron entre el 13 y 17 de octubre de 2021.

Antes de cada medición, el sistema se calibró usando un calibrador de nivel sonoro (pistófono), clase 1, B&K tipo 4231, con un adaptador DP-0775 para micrófonos de ¼". El procedimiento de calibración está automatizado por el sistema.

En cada una de las salas se midieron cinco eventos impulsivos generados por cada fuente. Para cada evento se grabó 1 segundo de señal a la máxima tasa de muestreo del sistema. Los resultados entregados por el sistema fueron exportados en formato Excel para su posterior análisis. También, los eventos registrados se exportaron en formato de archivo de audio WAV. Los datos medidos fueron almacenados en el notebook para un posterior proceso.

Durante el proceso experimental, se suministró equipamiento de protección auditiva a quienes realizaron las medidas. Antes de efectuar medidas en ambientes laborales reales, y basándose en la experiencia adquirida con el instrumento en las medidas en laboratorio y en las etapas preliminares en un sitio industrial, se estableció un protocolo a seguir para realizar las medidas de ruido impulsivo en terreno utilizando el sistema de evaluación de ruido impulsivo Kit hardware, basado en el sistema Pulse© TYPE 7963. Este protocolo es complementario al manual interno de uso y operación del equipamiento (de ahora en adelante, "Manual"), que describe en detalle los procedimientos de calibración y operación del sistema completo y que se incluye en el Anexo 2.

4.4.1 Protocolo

Para realizar una medida en terreno, se deberán seguir los siguientes pasos:

1. El personal que participe del proceso de medición (se sugiere un mínimo de dos personas), deberá utilizar los equipos de protección personal requeridos en el lugar de medición, en particular el equipamiento de protección auditiva (se recomienda utilizar protectores de inserción/tapón en conjunto con protectores de copa).

2. Antes de transportar el equipamiento, verificar la carga adecuada de las baterías del sistema de medición y del notebook.
3. Hacer un “checklist” de todos los equipos que deberán ser transportados a terreno, incluyendo los accesorios. De ser posible, llevar cables extras en caso de algún inconveniente o imprevisto durante la medición.
4. En terreno, identificar la fuente de ruido impulsivo a medir. Anotar todos los detalles posibles de la fuente y, en particular, las posiciones normales de los trabajadores que operan la fuente o que sean considerados receptores sensibles del ruido emitido por ésta.
5. Inspeccionar previamente el lugar de medición y planificar el montaje del sistema, verificando que no haya elementos que impidan una correcta y segura circulación durante la medición, tanto para los equipos como para el operario.
6. Instalar el equipamiento en terreno y realizar las conexiones entre los distintos dispositivos (Módulo de adquisición de señales, batería, notebook y micrófonos).
7. Asegurarse que los cables no queden expuestos a daño de ningún tipo.
8. Iniciar el sistema de medición en el orden descrito en el Manual.
9. Realizar el procedimiento de calibración del sistema, de acuerdo con los pasos indicados en el Manual.
10. Instalar el trípode con la pelota de poliestireno en la posición normal del trabajador que opera la fuente (o cercana a éste), y adosar a la pelota el cintillo con velcro donde se instalan los micrófonos correspondientes al oído derecho e izquierdo.
11. Instalar el micrófono de fuente (muzzle) en un trípode estable, en una posición cercana a la fuente (se recomienda a 1 metro), tomando precauciones que la operación de la fuente no pueda dañar al micrófono.
12. Realizar la(s) medición(es) de acuerdo con lo especificado en el Manual.
13. Luego de cada medición válida, asegurarse que los datos han sido grabados en el disco del computador para su posterior proceso y análisis.
14. Llevar una bitácora de mediciones, donde se deberán anotar cualquier detalle importante de la medición realizada.

Como ejemplo, la Fig. 7 muestra una medición en terreno, para un operario de martillo en una estructura metálica.



Figura 7: Medición ruido impulsivo en los astilleros de ASENAV, Valdivia.

Una vez concluida la etapa de medidas en laboratorio y establecido el protocolo de medición, se llevó a cabo una campaña de medidas en terreno, seleccionando sitios industriales que se caracterizan por la presencia de altos niveles de ruido impulsivo. A partir de los datos medidos, se creó una base de datos de ruidos impulsivos, que sirvieron para caracterizar este tipo de ruidos en ambientes laborales típicos.

Las mediciones fueron realizadas en la ciudad de Santiago y Rancagua el 12 y 13 de enero de 2022, en diversas fuentes de ruido impulsivo en las empresas DTS-Komatsu (Santiago), Metalmack (Rancagua) y Goodyear (Rancagua). Posteriormente, se ejecutaron mediciones en la ciudad de Valdivia, en la empresa ASENAV.

Las medidas se efectuaron utilizando la misma esfera de poliestireno expandido montada en un trípode que se empleó en las medidas de laboratorio. La esfera se ubicó en una posición representativa del operario más expuesto a la fuente de ruido. El tercer micrófono, denotado como *muzzle* en el sistema, se ubicó cercano a la fuente de ruido y montado en un trípode mediante los accesorios suministrados con el equipo.

Las métricas de ruido impulsivo fueron obtenidas directamente desde el sistema de evaluación de ruido impulsivo Bruel & Kjaer 7963. Los datos almacenados para cada medición se ordenaron por columnas cuya descripción se indica en la Tabla 2.

Tabla 2: Descripción de la base de datos (dB, ref: 20 μ Pa).

Col.	Métrica	Descripción
A	Measurement time	Fecha y hora de la medición
B	Calculation	Módulo de cálculo del sistema (ImpulseNoise por defecto)
C	Function	Canal del micrófono correspondiente
D	01. Peak position	Posición temporal del peak de ruido (ms)
E	01. Peak	NPS del peak (dB)
F	02. 90% peak position	Posición temporal del 90% del peak de ruido (ms)
G	02. 90% peak	NPS del 90% del peak (dB)
H	03. 10% peak position	Posición temporal del 10% del valor peak de ruido (ms)
I	03. 10% peak	NPS del 10% del peak (dB)
J	04. Signal rise time	Tiempo de subida de la señal (ms)
K	05. 10% peak left position	Posición temporal de la caída de 3 dB a la izquierda del valor peak (ms)
L	05. 10% peak left	NPS de la caída de 3 dB a la izquierda del peak (dB)
M	06. 10% peak right position	Posición temporal de la caída de 3 dB a la derecha del valor peak (ms)
N	06. 10% peak right	NPS de la caída de 3 dB a la derecha del peak (dB)
O	07. A-duration	Duración A del impulso (ms)
P	08. L+ line	Valor del NPS en el punto de caída de 20 dB superior (dB)
Q	09. L- line	Valor del NPS en el punto de caída de 20 dB inferior (dB)
R	10. P time position	Tiempo final de la porción primaria (ms)
S	11. Primary portion	El tiempo cuando la sobrepresión cae fuera de la banda L+ y L- (ms)

T	12. B-duration	Duración B del impulso [porción primaria + fluctuaciones] (ms)
U	13. Fluctuation duration	Duración de las fluctuaciones (ms)
V	14. Category	Categoría W o X
W	15. Sound Exposure Level	Nivel de exposición sonora (SEL) integrada en el intervalo de tiempo seleccionado (dB)
X	16. Sound Pressure Level	NPS promediado en el intervalo de tiempo seleccionado (dB)
Y	17. N1 - allowable number of impulses/day (single protect.)	Número de impulsos permitidos por día con el uso de protección auditiva simple, de acuerdo a la norma MIL-1474-D y MIL-1474-E
Z	18. N2 - allowable number of impulses/day (double protect.)	Número de impulsos permitidos por día con el uso de doble protección auditiva, de acuerdo con la norma MIL-1474-D y MIL-1474-E

A la esfera también se adosó un micrófono de ¼” de un dosímetro de ruido Bruel & Kjaer modelo 4445 cuyos datos registrados se post-procesaron con el software VP 7790 de la empresa Bruel & Kjaer. Para todas las mediciones en terreno se siguió el protocolo definido en la metodología. La Fig. 8 muestra un ejemplo de medida en terreno

Del total de mediciones realizadas en terreno se descartaron aquellas medidas que presentaron ruidos externos imprevistos, o que tuvieron un nivel demasiado bajo, seleccionando finalmente un total de 198 ruidos impulsivos para el proceso de análisis. Con los datos medidos, se creó una base de datos que contenía los archivos de audio correspondientes a las fuentes de ruido impulsivo medidas en terreno. Los archivos, que contenían la información de 1 segundo, se obtuvieron directamente del sistema de evaluación de ruido impulsivo Bruel & Kjaer 7963 en formato WAV, con valores de amplitud normalizadas al máximo valor. Por lo tanto, los valores de amplitud de la señal están definidos en el rango [-1, +1]. Esto quiere decir que, para convertirlos en señales de presión sonora, se debe escalar respecto al valor peak (en N/m² o pascales) de cada señal. Este valor se obtiene desde la base de datos de métricas de ruido impulsivo (ver Tabla 2).

Estos archivos de audio se utilizaron además para valorar la exposición a ruido de impacto con el algoritmo AHAH (Auditory Hazard Assessment Algorithm for Humans), descrito por Fedele et al. (2013).

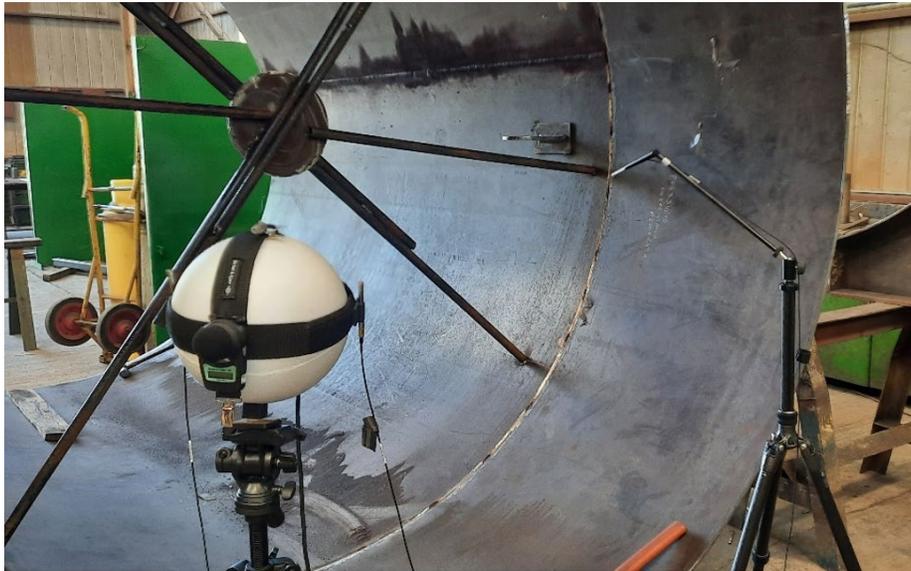


Figura 8: Medición del ruido impulsivo con el sistema.

4.5 Análisis de resultados experimentales

Con los datos obtenidos de equipos tradicionales, se desarrollaron funciones en lenguaje MatLab para postprocesar las señales. Se evaluaron y analizaron todos los parámetros de exposición al ruido impulsivo definidos en la literatura, incorporando métricas tales como el nivel de presión peak, duración del impulso en el tiempo (duraciones A, B, C y D), distribución espectral, número de impulsos, espaciado temporal, nivel de exposición sonora, y unidades de riesgo auditivo.

A partir de la base de datos de ruido impulsivo medidos en laboratorio y en terreno, se correlacionaron estadísticamente los parámetros de exposición al ruido impulsivo.

4.6 Valoración de la efectividad de protectores auditivos

Para abordar este objetivo, se empleó la revisión exhaustiva de la literatura disponible respecto al estado del arte en la valoración de la efectividad de protección auditiva suministrada por protectores auditivos en presencia de ruido impulsivo, descrita en el primer paso metodológico. Con esta fundamentación y a partir de los datos medidos en fuentes de ruido impulsivo y del análisis de sus resultados, se estableció la metodología adecuada y el marco teórico para modificar la recomendación de la norma europea EN 458, incorporando nuevas métricas en el proceso de cálculo de la atenuación efectiva proporcionada por un protector auditivo y la dosis de exposición con protección auditiva. Esto con el fin de recomendar una metodología fundamentada teórica y

técnicamente para la selección de un equipo de protección auditiva para prevenir el riesgo de hipoacusia laboral por ruido impulsivo.

Se establecieron las siguientes metodologías para valorar la dosis de exposición a ruido impulsivo con el uso de protección auditiva.

4.6.1 Método Europeo para valorar la atenuación de un protector auditivo para ruido impulsivo

La norma europea EN 458:2016 ha sido frecuentemente utilizada para estimar la atenuación suministrada por un protector auditivo a ruidos impulsivos. La norma explica las metodologías usadas para calificar un protector en condiciones de ruido continuo, lo que no difiere mucho de otras normativas utilizadas internacionalmente. Sin embargo, ésta presenta un anexo (B), que solamente es informativo, donde se explica una metodología para el caso de ruido impulsivo. Para la efectividad de un protector, se debe hacer referencia a la legislación nacional donde se aplique, que establezca el nivel peak máximo permitido.

En la norma, los ruidos impulsivos se clasificaron como tipo 1, 2 y 3, dependiendo del contenido espectral del ruido. El nivel peak ponderado en C (L'_{peak} en dBC), efectivo en el oído, se determina usando un valor de atenuación modificado (llamado d_m), del protector. Finalmente, el nivel equivalente ponderado en A en el oído (L'_{eq} en dBA), se determina por los métodos tradicionales usados para ruido continuo.

Un problema que presenta esta recomendación es que el método de clasificar los ruidos impulsivos en tres tipos es muy subjetivo y es esperable que su aplicación tenga mucha incerteza. Por otro lado, el método aplica una corrección a los valores de atenuación HML (de acuerdo con la ISO 4869-2) de los protectores auditivos, los cuales han sido medidos sin ruido impulsivo. Además, no considera los efectos no lineales de la atenuación de un protector en presencia de niveles peak muy intensos. Otro detalle es que no explicita una metodología para valorar el uso de dos protectores combinados (tapón y orejera, por ejemplo). Sin embargo, motivado por la falta de estándares aceptados, por su simpleza y considerando que los niveles peak encontrados en el ámbito industrial podrían ser, en general, menores a 150 dB, su aplicación en este contexto podría justificarse.

El método se resume de la siguiente forma:

1. Se mide el nivel L_{peak} en dBC del ruido
2. Se define el tipo de ruido usando la Tabla 3
3. Se determina el valor de atenuación modificado (d_m) de la Tabla 3
4. Se calcula el nivel de presión sonora peak ponderado en C, efectivo en el oído, como $L'_{peak} = L_{peak} - d_m$ (en dBC)
5. Se calcula el nivel equivalente ponderado en A, efectivo en el oído (L'_{eq} en dBA).

Para valorar si la atenuación del protector es suficiente, se comparan los resultados del método con los valores del nivel peak máximo en ponderación C y/o el nivel equivalente máximo en ponderación A, permitidos por la legislación nacional correspondiente.

La norma europea contiene un anexo (C), a modo informativo, donde explica tres procedimientos para predecir si el nivel de presión sonora ponderado en A, efectivo en el oído, es menor que 85 dBA. Un criterio se basa en un método gráfico, otro en si la diferencia entre los niveles peak en ponderación C y A es mayor o menor que 5 dB, y el tercero en un método auditivo (subjetivo), para estimar si el ruido es dominado por frecuencias medias a altas, o bien las componentes de baja frecuencia son prevalentes.

Un aspecto que no se menciona en la norma europea es la forma en la cual los valores H, M y L son calculados a partir de los datos de atenuación del protector. Estos valores se obtienen a partir del cómputo de los valores asumidos de protección, en donde existe una variable α que determina los niveles de protección. Si el cómputo se realiza con un $\alpha = 1$ (que es bastante común en los datos entregados por los fabricantes), el resultado de H, M y L será representativo del oído del percentil 84 (ISP, 2012). Para considerar el percentil 95, como en el caso del modelo AHAH, se debe usar un valor $\alpha = 1,64$, el cual se debe multiplicar a los valores de desviación estándar de atenuación por cada banda de frecuencia (Gerges y Arenas, 2010).

Tabla 3: Tipos de ruido impulsivo y valor de atenuación modificado según la norma EN 458:2016.

Tipo de ruido	Rango de frecuencia	Fuentes de ruido	d_m (dB) *
Tipo 1	Donde la mayor parte de la energía acústica se encuentra en baja frecuencia	Prensas punzonadoras, Apretado de piezas, Explosivos (1-8 kg)	L - 5
Tipo 2	Donde la mayor parte de la energía acústica se encuentra entre las frecuencias medias y altas	Pistolas de clavos, martillazos en placas, Martillos (acero y aluminio), Rifles, Tiros de prueba	M - 5
Tipo 3	Donde la mayor parte de la energía acústica se encuentra en frecuencias altas	Pistolas (livianas y pesadas)	H

* Los valores de H, M y L se obtienen de acuerdo con la ISO 4869-2 (2018) desde los datos de atenuación pasiva en bandas de octava.

4.6.2 Método usando Pérdida de Inserción de Peak Impulsivo (IPIL)

Cuando la atenuación de un protector auditivo ha sido determinada mediante su valor IPIL, de acuerdo con la norma ANSI/ASA S12.42 en un dispositivo ATF, este valor podría usarse en principio para el cómputo de la exposición a ruido impulsivo. La norma STD-MIL-1474E establece que el $L_{IAeq100ms}$, con protector, se puede calcular por la ecuación:

$$L_{IAeq100ms} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \{ 10^{(L_{Ai} - IPIL)/10} \Delta t_i \} \right] \text{ dBA}, \quad (3)$$

donde L_{Ai} es el nivel ponderado en A de la forma de onda para la i -ésima muestra, Δt_i es el tiempo de la muestra en segundos, n es el número de muestras, y $T = n \Delta t_i$ es el tiempo de integración en segundos (típicamente de 0,1 s). Notar que la ecuación anterior puede usarse también para calcular el $L_{IAeq100ms}$ sin protector, a partir del valor de nivel ponderado en A, utilizando $IPIL = 0$.

En el uso de la ecuación (3) se deben emplear el valor IPIL que esté más cercano al nivel peak medido del ruido impulsivo. El IPIL usado no debe ser mayor a 41 dB. Esto se debe al ruido de conducción ósea y es un límite más bien conservador, es decir, en la mayoría de los casos la protección verdadera será más alta que la calculada.

Otras consideraciones de este método son las siguientes:

1. Si los niveles máximos de ruido impulsivo superan el $L_{peak} = 180$ dB, se debe obtener el IPIL del protector auditivo al nivel máximo de ruido impulsivo medido, para considerar los efectos no lineales sobre la pérdida de inserción y la posible pérdida del sello acústico debido al ruido impulsivo.
2. Alternativamente, la forma de onda impulsiva puede registrarse bajo el protector auditivo, a la entrada del canal auditivo, utilizando sujetos humanos o un ATF que cumpla con la norma ANSI/ASA S12.42. Esto debe realizarse utilizando un mínimo de cinco repeticiones del impulso y volviendo a colocar el protector auditivo para cada impulso. La ecuación (3) puede utilizarse entonces para calcular el $L_{IAeq100ms}$.
3. El método ANSI/ASA S12.42 para medir la pérdida de inserción máxima, no considera las variaciones en la duración del impulso y es una estimación conservadora del rendimiento. El método ANSI S12.42 da como resultado valores de IPIL que representan el peor caso de rendimiento nominal. Especialmente, en el caso de los impulsos de corta duración, los valores de IPIL serían superiores a los medidos con el procedimiento ANSI/ASA S12.42.

4.6.3 Método de valoración usando el módulo de protectores auditivos del AHAH

Como se ha mencionado anteriormente, el modelo AHAH es un símil electroacústico de la respuesta del oído humano que considera la mayoría de los efectos auditivos producidos por una señal de presión sonora en el dominio del tiempo. El modelo, que ha sido implementado en un software de libre distribución (pero no de código abierto),

posee un módulo de protección auditiva, el cual permite incluir en el modelo electroacústico las características físicas de un protector auditivo, tanto del tipo orejera como tapón, además de incorporar el efecto combinado de dos de estos tipos de protectores. El módulo ha incorporado las no linealidades de los protectores auditivos en el modelo AHA AH (Fedele y Kalb, 2015). Por este motivo, y a pesar de algunas limitaciones en su aplicación práctica, parecería ser el modelo ideal para valorar la efectividad de un equipo de protección auditiva. La Fig. 9 presenta un diagrama esquemático del modelo completo.

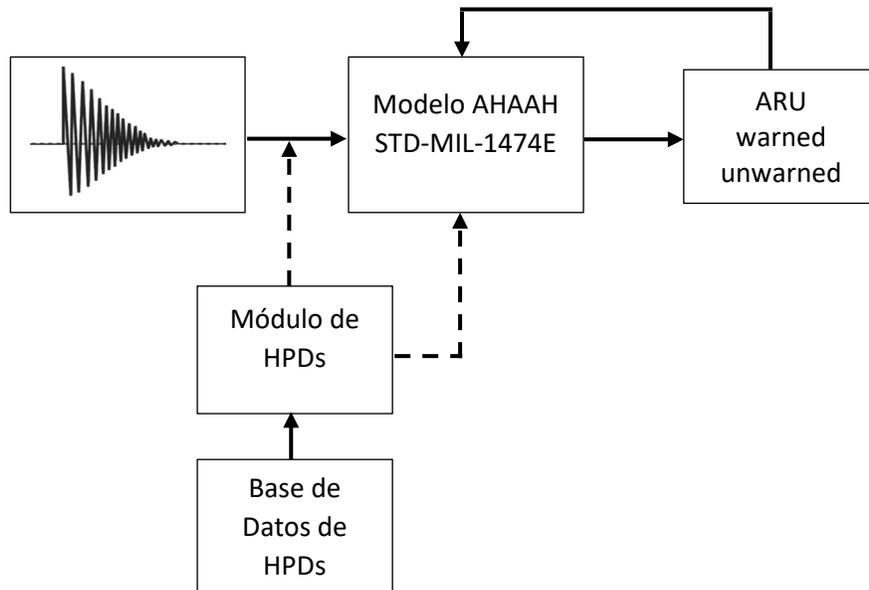


Figura 9: Diagrama esquemático de la aplicación del modelo AHA AH.

Sin embargo, el cálculo con el programa AHA AH es más complejo. El programa AHA AH dispone de múltiples opciones para procesar los archivos de entrada. La primera es la posición de medición: en campo libre, a la entrada del canal auditivo, o en el tímpano. La suposición de campo libre implica que no hay reflexión ni absorción, lo que no siempre es posible en presencia de objetos que perturben la señal de campo libre. La medición en la entrada del canal auditivo no es posible porque el trabajador expuesto lleva un protector, y la medición en el tímpano requiere el uso de un micrófono en el oído o un ATF.

El software y el manual del AHA AH están disponibles para su descarga en el sitio web del US Army Research Laboratory (ARL).

A la hora de aplicar la protección auditiva dentro del AHA AH, existen dos modos: por defecto y usuario avanzado. El modo por defecto aplica los ajustes preestablecidos de tapones, orejeras y doble protección, tal como se describe en la guía del usuario (Fedele et al., 2013). El modo de usuario avanzado permite al usuario seleccionar un protector

específico o una combinación de protectores. Una vez elegida la configuración del protector auditivo, el programa sitúa, por defecto, la posición del micrófono en el tímpano y el ángulo de incidencia es normal (a 90 grados respecto al oído). El usuario puede cambiar la configuración por defecto cuando se le solicite. Un impulso con incidencia normal en el oído representa el peor escenario posible.

Al igual que en el análisis sin protector auditivo, se requiere una señal de presión-tiempo (que se importa desde un archivo de audio con extensión WAV) y un valor de calibración como entrada, el cual puede ser el nivel peak en dB o en pascales. Estos datos se pueden obtener directamente del sistema de análisis adquirido en este proyecto.

Se requieren varios pasos para preparar una señal para el análisis. La señal preparada se guarda con extensión AHA (que es, básicamente, un archivo de texto compatible con el software), y se vuelve a cargar en el software para calcular el ARU correspondiente, con protección auditiva. El AHAH muestra los resultados en ARU, que pueden convertirse en un número permitido de exposiciones, basándose en un límite equivalente a 24 horas de 200 ARUs, para exposiciones ocupacionales que ocurren 2 o más veces por semana, o de 500 ARUs, para exposiciones ocasionales que no ocurren más de una vez por semana. El software puede calcular las ARUs para las exposiciones "advertidas" e "inadvertidas" (*warned* y *unwarned*, respectivamente).

El software entrega una comparación de la señal presión-tiempo con y sin el protector, además de información respecto a la atenuación en frecuencia. Esta información se puede copiar al portapapeles del computador para utilizarlo como reporte. El software también guarda la información de los desplazamientos en la membrana basilar por bandas de frecuencias y los ARUs asociados a cada desplazamiento como un archivo de texto, con extensión HAZ. Todos los detalles e instrucciones para el uso del software están incluidos en el trabajo de Fidele et al. (2013).

Algunas de las limitaciones observadas del método son las siguientes:

1. Sólo se puede procesar una forma de onda a la vez mediante el procedimiento de pasos múltiples, es decir, no se puede procesar archivos por lotes.
2. Algunas características de la interfaz gráfica hacen que el programa se bloquee y reporte errores inesperados.
3. El programa no es muy amigable para un usuario no entrenado.
4. La opción de guardar la señal calculada bajo el protector auditivo como archivo de audio no parece estar funcionando en la versión descargada. Sin embargo, los datos de esta señal quedan guardados como parte del texto del archivo con extensión AHA, que incluye el nombre del protector auditivo.
5. Para aplicar el módulo de protección auditiva, se requiere de los datos de atenuación medidos en laboratorio para cada protector con un ATF, además de los parámetros físicos y mecánicos del protector, por lo cual el usuario debe tener esa información.

Muchos de estos problemas son errores de programación los cuales, probablemente, se corregirán en futuras versiones del software. El software fue codificado inicialmente en el lenguaje de programación Delphi. Se ha encontrado información en internet sobre una futura versión compatible en Matlab, lo cual permitiría realizar análisis de varios archivos en forma secuencial y expandir las potencialidades de su uso. En todo caso, no se encontró ninguna versión disponible del AHAH para Matlab.

4.6.4 Cálculo de la dosis de ruido impulsivo

El método de energía equivalente permite establecer un nivel de ruido equivalente ponderado en A, para una jornada de trabajo de 8 horas (L_{Aeq8h}), el cual es definido por la directiva de la Comunidad Europea (EU, 2003). Normalizando a 8 horas, la exposición a N eventos impulsivos idénticos se puede calcular como:

$$L_{Aeq8h} = L_{Aeq,T} + 10\log\left[\frac{T}{T_0}\right] + 10\log(N) \text{ dBA}, \quad (4)$$

donde T es la duración temporal de la energía del impulso y T_0 es la duración de referencia (8 horas o 28800 segundos).

Si el límite de energía equivalente para un día de 8 horas se fija en 85 dBA, el número permitido de impulsos en la jornada laboral (NPI), se calcula como (Nakashima, 2015):

$$NPI = 10^{\frac{85-(L_{Aeq8h}-IPIL)}{10}}, \quad (5)$$

donde IPIL es el valor obtenido para un protector auditivo en uso. La ecuación (5) permite así obtener el NPI con el uso de protector y sin uso de protector (con IPIL = 0 en la ecuación anterior).

Si se usa la métrica $L_{IAeq100ms}$ para el cálculo de la dosis, se debe aplicar una corrección cuando se mide la duración A del impulso. Esta corrección reduce la sobreestimación de la dosis por esta métrica, cuando los impulsos tienen una duración A mayor que 0.2 ms. Para esto, el L_{IAeq8h} (nivel equivalente de ruido impulsivo ponderado en A para 8 horas), para un impulso individual, y cuando la duración A es mayor que 0.2 pero menor que 2.5 ms, se obtiene mediante la ecuación:

$$L_{IAeq8h} = L_{IAeq100ms} - 54.6 - 15\log\left[\frac{\text{duración } A}{0.2ms}\right] \text{ dBA}, \quad (6)$$

y si la duración A es igual o mayor que 2.5 ms se calcula como:

$$L_{IAeq8h} = L_{IAeq100ms} - 71.0 \text{ dBA}. \quad (7)$$

Notar que este criterio establece que, para el propósito del cálculo, las duraciones A están limitadas a un máximo de 2.5 ms y a un mínimo de 0.2 ms, aunque se hayan medido valores fuera de este rango.

Si no se mide la duración A, se debe usar un valor de 0.2 ms en la ecuación (6). Esto resultará en una sobrestimación de la exposición para impulsos de larga duración, pero será una estimación más precisa del riesgo de exposición para impulsos de corta duración.

Si se utiliza un tiempo de registro de los ruidos impulsivos mayores que 100 ms, el término -54.6 se reemplaza por $10\log(\text{tiempo de registro}/28800)$, donde el tiempo de registro está en segundos.

Una vez que se ha determinado el $LIAeq8h$, se puede estimar la dosis de ruido impulsivo en porcentaje (para un impulso), mediante la ecuación:

$$D(\%) = 100/2^{\frac{85-LIAeq8h}{3}}. \quad (8)$$

Luego, la ecuación (8) se puede multiplicar por el número de impulsos, dentro del periodo de 8 horas, para calcular la dosis impulsiva total en la jornada.

La ecuación (5) también es aplicable para determinar el número permitido de impulsos (NPI), donde sólo se debe reemplazar $LAeq8h$ por $LIAeq8h$, calculada por la ecuación (6) o (7).

Es importante notar que el estándar STD-MIL-1474E, para el caso de ruidos impulsivos, recomienda que la dosis no supere el 100% en un periodo de 24 horas, cuando se emplea protección auditiva. Además, el $LIAeq8h$ es equivalente a la métrica usada en la mayoría de los países europeos para evaluar riesgo de daño auditivo por ruido impulsivo.

Finalmente, para ejemplificar la aplicación de las metodologías de valoración de la efectividad de protectores auditivos en presencia de ruido impulsivo, se realizaron cuatro ejemplos de cómputo a protectores auditivos, dos del tipo tapón inserto premoldeado y dos del tipo orejera con arnés sobre la cabeza, utilizando las tres metodologías descritas anteriormente. A modo de referencia, las fotografías de cada protector se muestran en la Fig. 10. Los valores de atenuación media y desviación estándar, realizados de acuerdo con la norma ANSI S3.19 (1974), fueron obtenidos directamente de la base de datos del software AHAH. Como fuente de ruido impulsiva, se utilizó una de las señales grabadas en terreno que reportara un alto nivel peak.



3M E-A-R Ultra Fit



Surefire EP3 (con válvula cerrada)



David Clark 19A



3M PELTOR Tactical Sport

Figura 10: Protectores usados en los ejemplos de evaluación.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Resultados de las medidas de ruido impulsivo con el sistema

5.1.1 Resultados de las medidas en laboratorio

Los resultados completos de las medidas en sala anecoica y reverberante, para cada uno de los tipos de fuentes, se pueden ver en el Anexo 1 de este informe. Los resultados promedios se entregan en las siguientes tablas, para los valores de posición de valor peak (Peak position, ms), Nivel peak (Peak, dB), tiempo de subida de la señal (Signal rise time, ms), duración A (A-duration, ms), duración B (B-duration, ms) y nivel de exposición sonora integrado sobre todo el intervalo temporal (Sound exposure level, SEL dB). La Tabla 4 muestra los resultados promedio de cada una de las fuentes impulsivas en sala anecoica, medidos en el oído (promedio del oído izquierdo y derecho) y los valores obtenidos a 1 m de la fuente (Muzzle).

La Tabla 5 muestra los mismos resultados, pero medidos en sala reverberante. En el caso de la sala reverberante, se descartaron algunas mediciones por lo que el promedio se obtuvo para 5 impulsos generados por globos, 4 por el revólver y 3 por la pistola.

Tabla 4: Resultados promedios de las métricas más importantes, entregadas por el sistema de evaluación de ruido impulsivo, para las distintas fuentes medidas en sala anecoica.

Fuente	Peak position	Peak	Signal rise time	A-duration	B-duration	SEL
Globo (Oído)	0.056	133.2	0.315	0.499	2.985	98.7
Revólver (Oído)	0.055	148.4	0.014	0.166	1.029	106.4
Pistola (Oído)	0.056	137.5	0.042	0.109	2.520	99.0
Globo (Muzzle)	0.050	143.8	0.356	0.471	2.827	108.7
Revólver (Muzzle)	0.050	161.2	0.009	0.129	0.716	117.5
Pistola (Muzzle)	0.051	149.6	0.034	0.145	2.101	110.1

Tabla 5: Resultados promedios de las métricas más importantes, entregadas por el sistema de evaluación de ruido impulsivo, para las distintas fuentes medidas en sala reverberante.

Fuente	Peak position	Peak	Signal rise time	A-duration	B-duration	SEL
Globo (Oído)	0.056	130.9	0.341	0.555	3.326	97.3
Revólver (Oído)	0.055	148.1	0.009	0.165	168.365	116.6
Pistola (Oído)	0.056	150.2	0.025	0.238	1.461	111.1
Globo (Muzzle)	0.050	140.1	0.296	0.535	4.751	106.5
Revólver (Muzzle)	0.050	157.7	0.009	0.095	4.483	114.6
Pistola (Muzzle)	0.050	170.8	0.031	0.243	10.850	129.5

A partir de los resultados promedios, podemos observar que la posición del peak (tiempo en el cual se produce el valor peak del impulso), es prácticamente el mismo para todas las medidas cercanas a la fuente (muzzle), con un valor de 0,05 ms, y también el mismo para la medida en los oídos del receptor, con un valor de 0,055 ms. Esto tiene sentido ya que el sistema de adquisición de datos mide los tres canales simultáneamente y el sonido impulsivo demora un poco más de tiempo en llegar a la posición de la esfera de poliestireno. También se aprecia que los valores no cambian en ninguno de los dos ambientes (anecoica y reverberante), lo cual indica que la presencia de reverberación no afectó este valor.

En cuanto a los niveles peak, podemos observar que la fuente que produjo el mayor nivel en la sala anecoica fue el revólver, alcanzando un nivel peak promedio de 148,4 y 161,4 dB en los oídos y cerca de la fuente, respectivamente. Esto también se refleja en los valores obtenidos del nivel de exposición sonora para cada caso. Además, el sonido impulsivo del revólver tuvo los valores más cortos de tiempo de subida, tanto en sala anecoica como en reverberante.

Por otro lado, en cámara reverberante, es la pistola la fuente impulsiva que produjo los mayores valores de nivel peak, alcanzando 150,2 dB en la posición de los oídos y un sorprendente nivel de 170,8 dB cerca de la fuente.

Respecto a las métricas de duración A y B, se aprecian grandes diferencias en los valores de la duración B en sala anecoica y en reverberante. En el caso de la duración A, existen también diferencias, aunque no son tan significativas. Los valores de duración B difieren notablemente entre ellos en el caso reverberante. Es difícil justificar estas

diferencias en este momento, aunque se sospecha que, en el caso reverberante, se debe considerar tiempos más largos de la señal temporal, ya que la duración B considera la envolvente del impulso y, por ende, la reverberación debería afectar más a este valor.

El sistema de evaluación de ruido impulsivo también proporciona los espectros en ancho de banda de porcentaje constante. Las Figs. 11 a la 16 muestran los resultados en bandas de tercios de octava para cada tipo de fuente, medida cerca de ésta, para los dos ambientes acústicos. Las amplitudes de los espectros están dadas en dB ponderados en A (dBA, ref: 20 μ Pa).

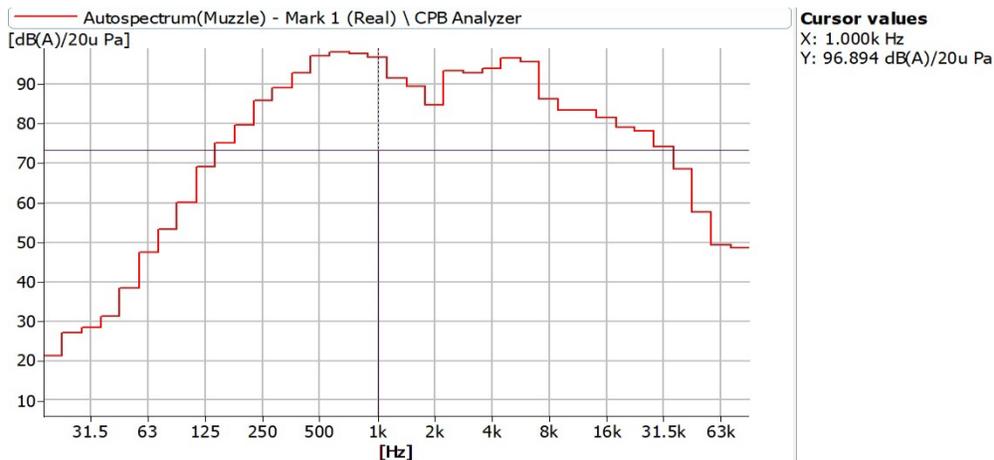


Figura 11: Resultados de un espectro en tercios de octava típico, para una explosión de globo en sala anecoica.

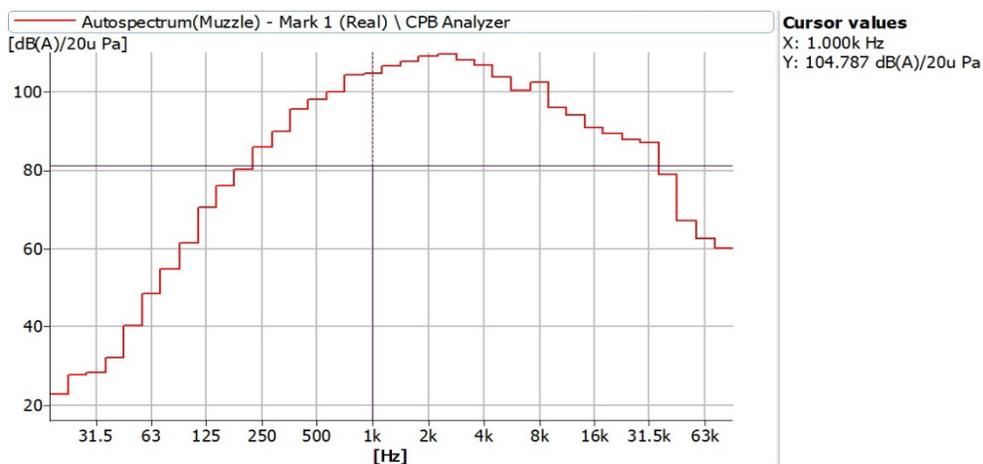


Figura 12: Resultados de un espectro en tercios de octava típico, para un disparo del revólver en sala anecoica.

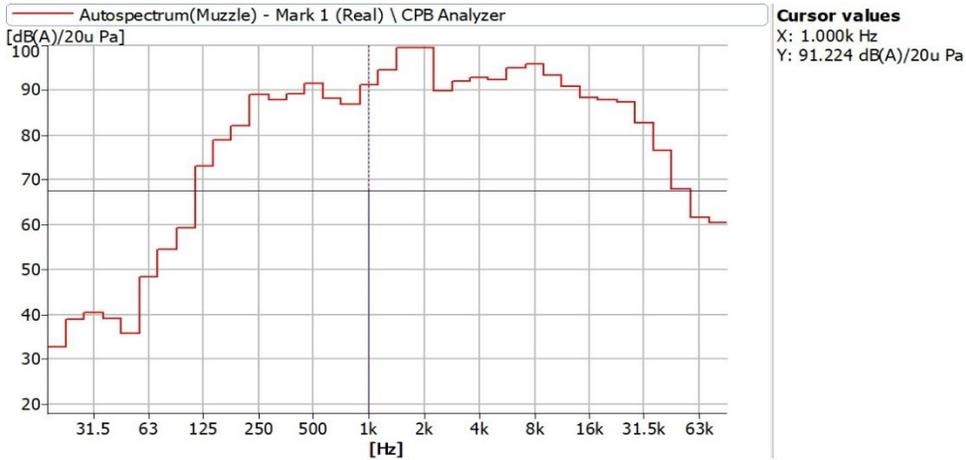


Figura 13: Resultados de un espectro en tercios de octava típico, para un disparo de la pistola en sala anecoica.

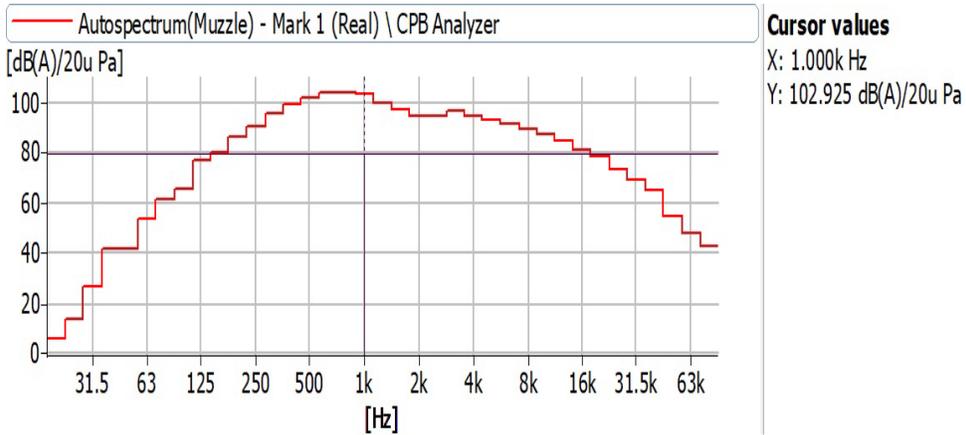


Figura 14: Resultados de un espectro en tercios de octava típico, para una explosión de globo en sala reverberante.

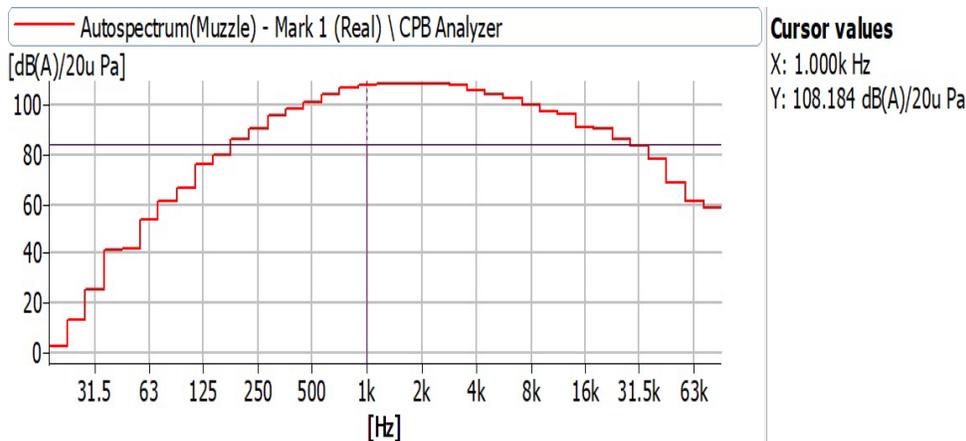


Figura 15: Resultados de un espectro en tercios de octava típico, para un disparo del revólver en sala reverberante.

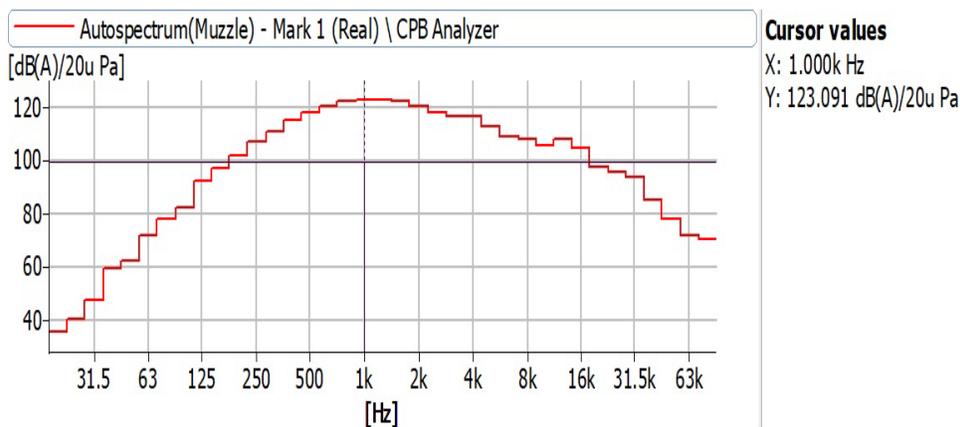


Figura 16: Resultados de un espectro en tercios de octava típico, para un disparo de la pistola en sala reverberante.

Los resultados de los espectros indican que, en el caso de sala anecoica, donde la reverberación no afecta a la medición de la fuente de ruido impulsivo, los espectros de las tres fuentes tienen formas diferentes, donde el revólver parece contener más energía en las frecuencias medias (1-4 kHz), en comparación a las otras dos fuentes. Esto es importante, considerando que, en ese rango, el oído humano es más sensible. El sonido impulsivo del revólver posee el mayor nivel en ponderación A, llegando casi a los 105 dBA en la banda de 1000 Hz.

En el caso de la sala reverberante, las formas de los espectros son muy similares, siguiendo la forma estándar de la curva de ponderación A, lo que indica que estos ruidos contienen energía en un rango ancho de frecuencias. Claramente, en este caso el ruido impulsivo producido por el disparo de la pistola posee la mayor energía promedio, alcanzando los 123 dBA en la banda de 1000 Hz.

Finalmente, los sonidos impulsivos se grabaron además en formato WAV, lo que permite leer estos archivos utilizando otros programas compatibles, para visualizar las formas de onda de presión sonora en función del tiempo y realizar su análisis. Las Figs. 17 a la 22 fueron elaboradas con una rutina en Matlab y muestran las señales instantáneas típicas para cada tipo de fuente, medida cerca de ésta, para los dos ambientes acústicos. Aunque los archivos WAV contienen 1 segundo de largo temporal, para mejor visualización las Figs. 17 a la 19 muestran los primeros 60 ms de la señal, mientras que las Figs. 20 a la 22 muestran los primeros 100 ms.

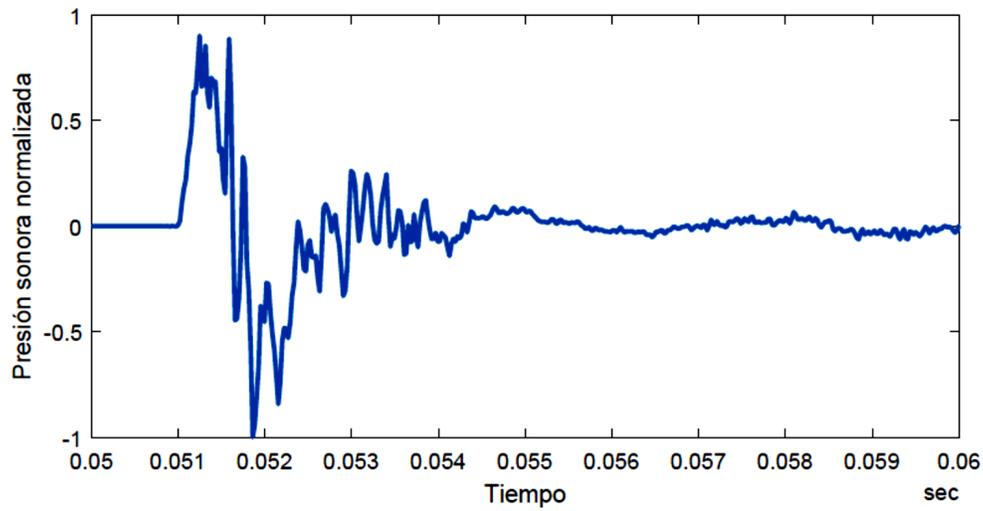


Figura 17: Resultados de la presión sonora en función del tiempo, para una explosión de globo en sala anecoica.

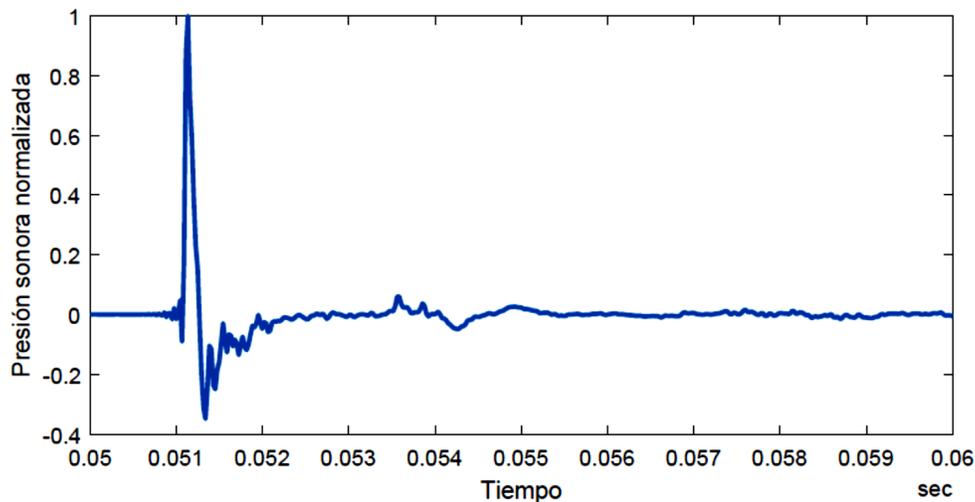


Figura 18: Resultados de la presión sonora en función del tiempo, para un disparo del revólver en sala anecoica.

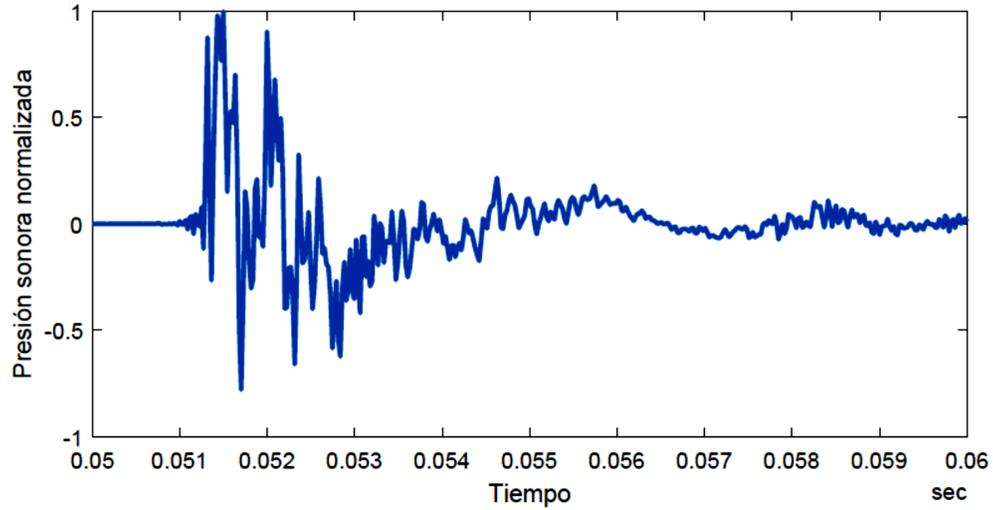


Figura 19: Resultados de la presión sonora en función del tiempo, para un disparo de la pistola en sala anecoica.

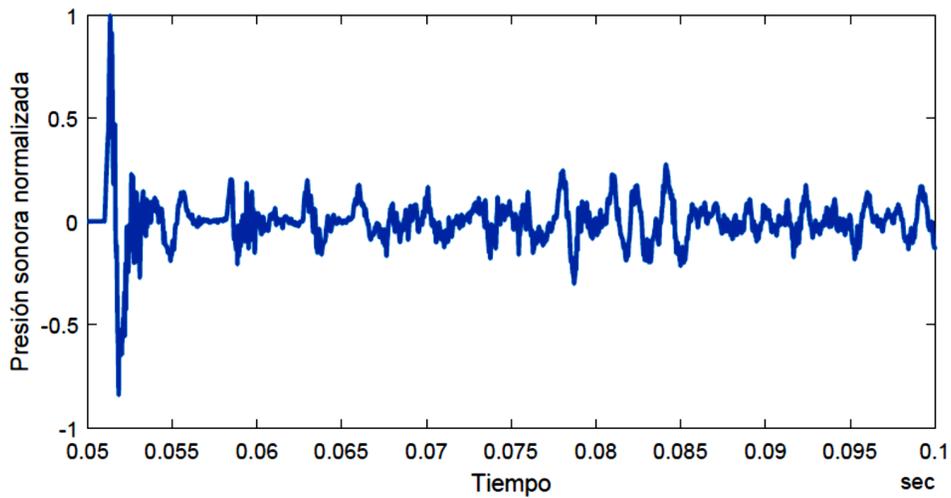


Figura 20: Resultados de la presión sonora en función del tiempo, para una explosión de globo en sala reverberante.

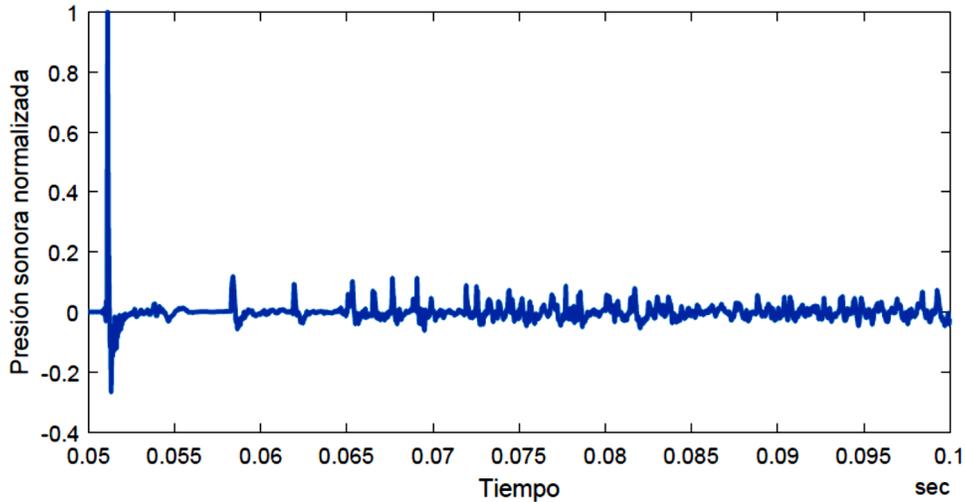


Figura 21: Resultados de la presión sonora en función del tiempo, para un disparo del revólver en sala reverberante.

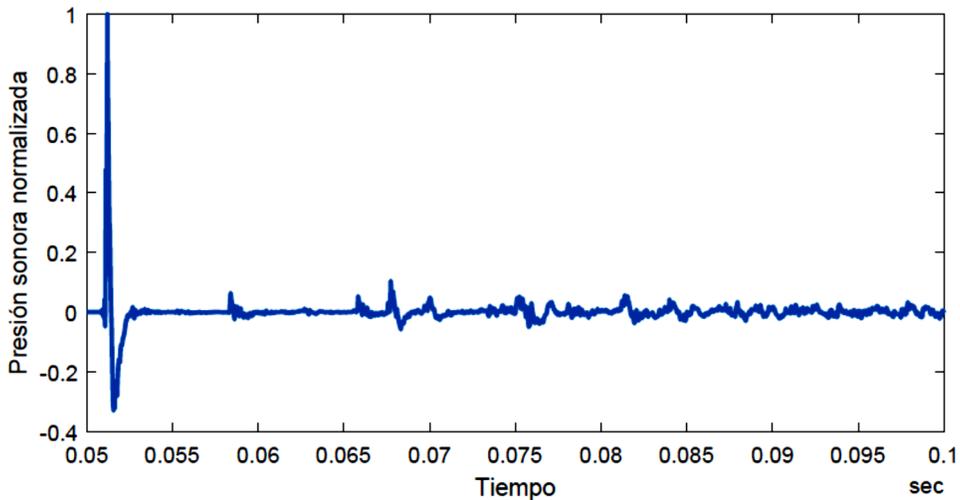


Figura 22: Resultados de la presión sonora en función del tiempo, para un disparo de la pistola en sala reverberante.

Las figuras que representan los valores de presión sonora instantánea poseen formas similares, distinguiéndose claramente el tiempo de subida, hasta alcanzar un valor máximo de compresión (valor peak), para dar paso a una caída un poco más lenta hasta llegar a un valor mínimo en expansión para luego volver a subir. En ese sentido, las formas de onda medidas en sala anecoica y reverberante coinciden con la clasificación de Coles et al. (1968), es decir, ondas tipo A no reverberante (también denominadas ondas de Friedlander) y ondas tipo B reverberante.

Se puede observar también que, en el caso de la explosión de un globo, el tiempo de subida fue siempre mayor que en los impulsos generados por el revólver y la pistola, en los dos ambientes. De igual forma, se aprecia que el impulso generado por el revólver tiene el tiempo de subida más rápido, en ambos ambientes, lo cual explica que, en casi todos los casos, los valores de duración A sean los más bajos.

De las figuras anteriores podemos observar claramente el efecto de la reverberación en las formas de onda, el cual le va sumando energía reverberante al sonido impulsivo directo, producto de las reflexiones en las paredes de la sala, incrementando así significativamente su duración. También se puede observar que el tiempo en el cual ocurre el valor peak tiende a ser el mismo en todos los casos, independiente de si el campo acústico es libre de reflexiones o es reverberante. Esto ya se había observado de los resultados de la Tabla 4 y 5.

5.1.2 Resultados de las Medidas en Terreno

Los cuatro sitios de medición se definieron como sitios 1 al 4, de la siguiente forma:

- 1) Sitio 1: Industria metalmecánica
- 2) Sitio 2: Industria metalmecánica
- 3) Sitio 3: Taller de vulcanizado y mantenimiento de neumáticos
- 4) Sitio 4: Astillero de tamaño mediano que produce barcos de crucero y ferries.

A partir del análisis de los 198 archivos de audio y la base de datos de las métricas obtenidas, se pudo identificar tres tipos de ruidos impulsivos característicos en los cuatro sitios de medición:

- 1) Ruidos de impacto producido por el volteo de placas metálicas pesadas, proceso realizado en forma manual o bien con grúa horquilla
- 2) Ruidos de impactos producidos por golpes de martillos pesados en estructuras o elementos metálicos
- 3) Ruidos impulsivos producidos por la liberación rápida de gases comprimidos.

La Fig. 23 muestra la respuesta temporal (presión sonora versus tiempo) y el correspondiente espectro en bandas de tercios de octava característicos para cada uno de estos tipos de ruido.

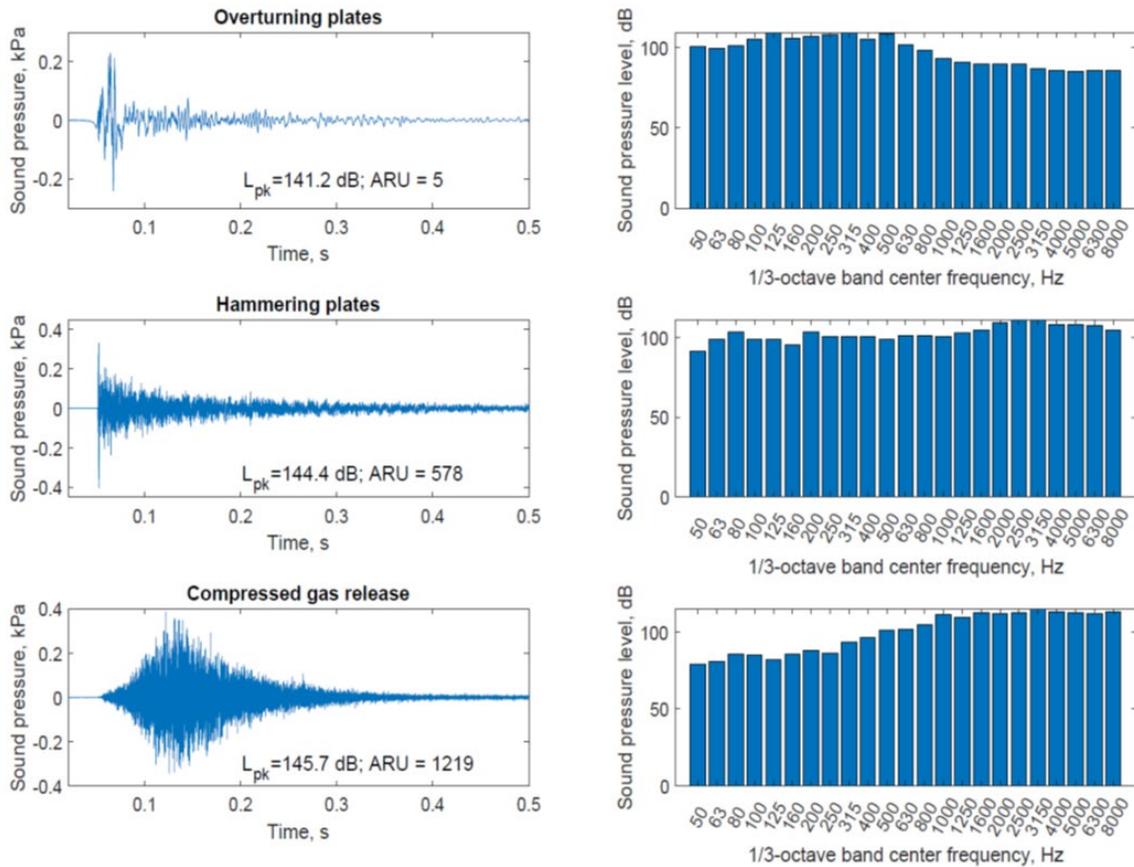


Figura 23: Formas de onda y espectros en tercios de octava característicos para los tres tipos de ruidos impulsivos prevalentes en los sitios medidos.

De esta figura podemos observar que en el caso de los ruidos producto del volteo de planchas metálicas, la duración energética es más corta mientras que el contenido espectral es prevalente en frecuencias bajas. En el caso de los ruidos impulsivos producto del golpe de martillos, la señal impulsiva posee una mayor duración temporal, con un tiempo de caída más largo y contenido espectral más uniformemente repartido que en los otros casos. El ruido impulsivo generado por liberación de gas tiene una forma temporal más atípica, con un tiempo de subida y de caída más lento que en los otros casos, y donde en el espectro predominan las frecuencias altas.

Otra observación es que en los cuatro sitios se midieron valores muy variables para las diferentes actividades laborales. El valor peak máximo medido fue de 149,3 dB en el sitio 3, el cual correspondió a la operación de una herramienta Cheetah de gas presurizado. Los valores obtenidos en los sitios fueron muy heterogéneos, por lo que sus medianas se muestran en la Tabla 6. Observamos que los valores de nivel peak más altos se midieron en los sitios 2 y 3, aunque el sitio 3 reportó valores SEL

aproximadamente 5 dB más bajos que el sitio 2. Los valores de ruido impulsivo más bajo se midieron en el sitio 1.

Tabla 6: Medianas de los valores de ruido impulsivo medidos en cada sitio

Sitio	Lpeak, dB	A-duration, ms	B-duration, ms	SEL, dB	SPL, dB
1	126.5	0.1842	357.089	105.8	110.7
2	138.6	0.3429	424.087	118.5	122.4
3	138.6	0.0655	208.279	113.8	121.0
4	132.5	0.1978	58.8712	107.5	119.7

La Fig. 24 muestra los resultados de un histograma de los niveles peak y los valores de nivel de exposición sonora (SEL), calculados por el sistema.

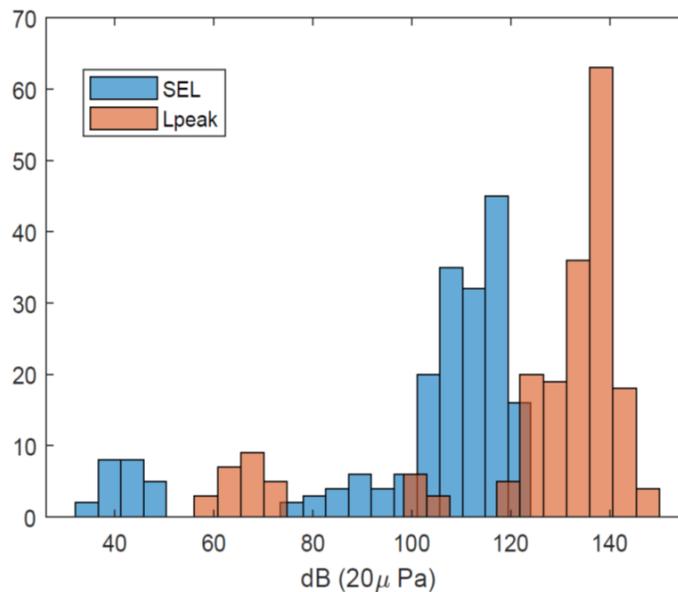


Figura 24: Histograma de los niveles peak (Lpeak) y los valores de nivel de exposición sonora (SEL), obtenidos a partir de todas las mediciones.

Observamos que un número significativo de niveles peak están en la vecindad de 140 dB (máximo valor permitido en la legislación chilena), mientras la mayoría de los valores SEL están entre 105 a 120 dB. De hecho, se puede notar que aproximadamente el 15% de las medidas realizadas en los cuatro sitios industriales exhibieron niveles peak mayores que 140 dB. Estos niveles representan condiciones inadecuadas para los trabajadores y significa que en estos recintos industriales deben llevarse a cabo acciones de control del ruido para cumplir la legislación, incluyendo el uso obligatorio de protección auditiva. Otra cuestión fundamental es el uso adecuado de los equipos de

protección auditiva por parte de los trabajadores. Dados los elevados valores máximos medidos en la industria y los consiguientes riesgos auditivos potenciales, el control y la supervisión adecuados del uso de los protectores auditivos debe ser una preocupación constante de los supervisores y prevencionistas de riesgos.

Los datos obtenidos desde el dosímetro que se había montado en la esfera de poliestireno expandido finalmente no se utilizaron en este trabajo, ya que cuando los niveles superaban los 140 dB, la señal se recortaba, debido a las limitaciones metrológicas del instrumento. Por otro lado, el dosímetro no grababa la evolución temporal de la presión sonora y solamente registraba las variaciones de nivel en el tiempo. Por esto, el cómputo de la gran mayoría de las métricas de ruido impulsivo era imposible. Esto corrobora la necesidad de utilizar un sistema especializado y diseñado para medir ruido impulsivo.

La relación entre los niveles peak y los SEL en todos los sitios se puede ver en la Fig. 25. Los resultados muestran una alta correlación, en particular para los niveles peak menores a 80 dB. En este caso, se puede indicar que los valores SEL podrían determinarse aproximadamente desde los niveles peak por la ecuación que se indica en la figura, obtenida a partir de la regresión lineal de los datos.

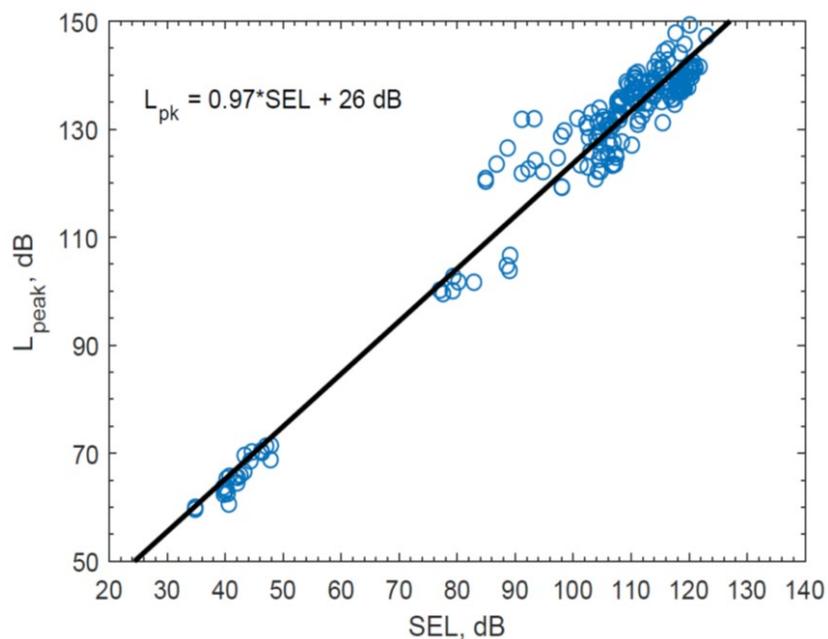


Figura 25: Gráfico que muestra la relación entre los niveles peak y los valores SEL obtenidos a partir de todas las mediciones realizadas en los cuatro sitios.

La Fig. 26 muestra un gráfico entre los valores de las métricas duración A y duración B, calculadas a partir de las de las señales registradas. Podemos observar que muy pocos valores de la duración A son similares a los de la duración B, lo que se asocia al hecho

de que los ruidos impulsivos se midieron en entornos bastante reverberantes, lo que es típico de estos sitios industriales. De hecho, podemos observar un gran grupo de resultados de duración B concentrados en torno a los 450 ms.

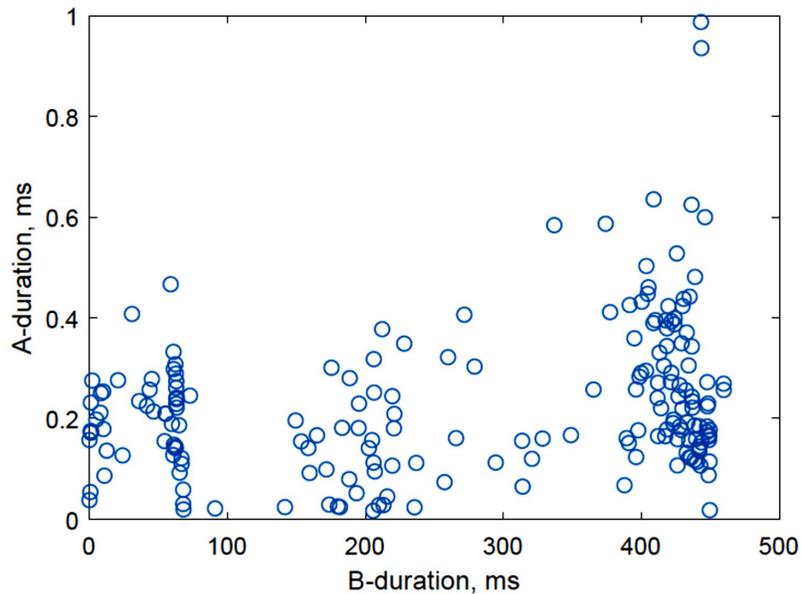


Figura 26: Gráfico que muestra la relación entre los valores de las métricas duración A y duración B, calculadas para cada medición.

Finalmente, los resultados calculados de las unidades de riesgo auditivo (ARU) y del nivel equivalente ponderado en A y normalizado a un valor nominal de 8 horas de trabajo diario, $LIAeq8h$, para cada uno de los 198 ruidos impulsivos, se compararon con los correspondientes valores de nivel peak ponderado en C, $Lpk\ dBC$. Los resultados de esta correlación se muestran en la Fig. 27. Par el cálculo de las regresiones lineales, no se utilizaron los seis datos marcados en color rojo. Estos valores correspondieron a ruidos de impulso por volteo de placas metálicas que impactaban sobre una superficie de goma, lo que parece haber distorsionado las señales de alguna forma.

Podemos apreciar la excelente correlación entre los datos en ambos casos, donde el R cuadrado es superior a 0,92, siendo casi 0,99 en el caso de la correlación entre el $LIAeq8h$ y el $Lpk\ dBC$. Esto quiere decir que ambas métricas predicen muy bien el nivel peak ponderado en C que utilizan la mayoría de las normativas, incluyendo la chilena, por medio de las ecuaciones que se muestran en las figuras.

En la Fig. 27 se ha indicado el valor de referencia de $ARU = 200$, que está dada en la norma MIL-STD-1474E como un valor máximo de exposición para eventos recurrentes (equivalente a un ruido ocupacional). Si se extrapola el valor de la intersección con la recta, esto equivale a un nivel Lpk menor a los 140 dBC, mientras que en el caso del

Lleq8h, los 140 dBC de nivel peak equivalen aproximadamente a 73 dBC. En otras palabras, el uso del Lleq8h indicaría que 73 dBC de ruido impulsivo serían equivalentes a los 85 dBA establecidos para el ruido continuo en la mayoría de las legislaciones, incluyendo la chilena. Por otro lado, el uso de las unidades de riesgo auditivo, de acuerdo con la norma MIL-STD-1474E parece estar sobreprotegiendo al oído, en comparación con el Lleq8h, que se basa en la energía del ruido.

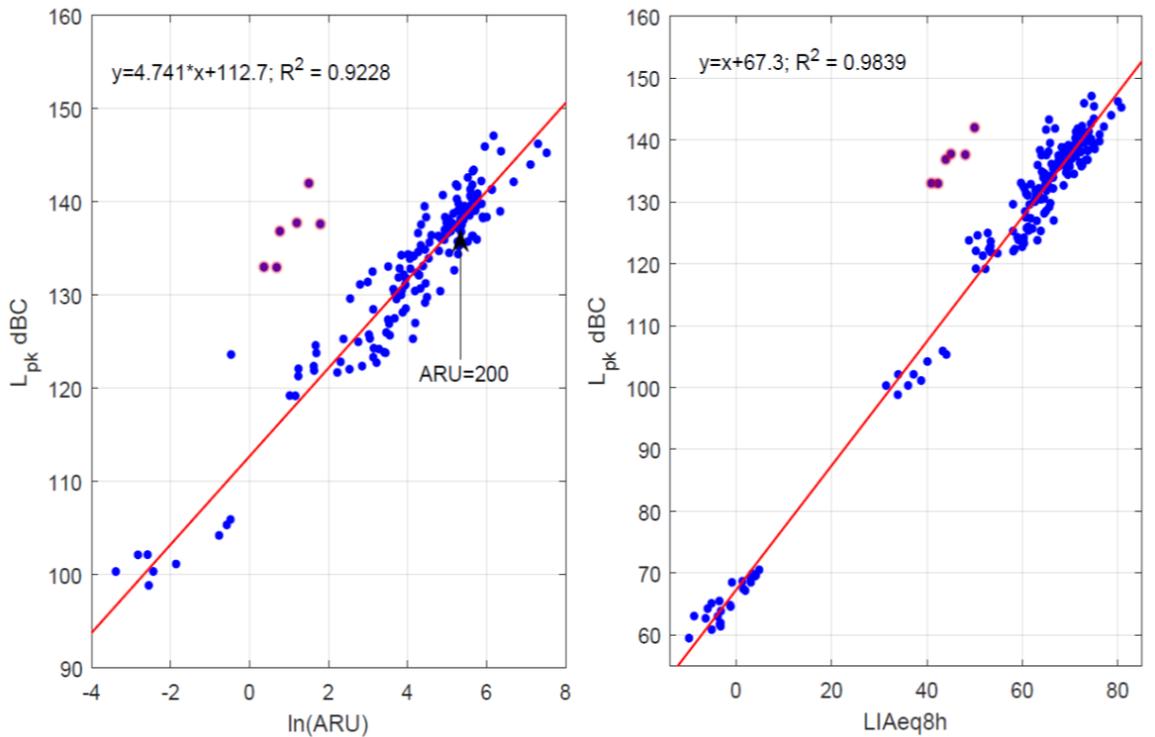


Figura 27: Correlación entre los valores de nivel peak ponderado en C, L_{pk} dBC, y las unidades de riesgo auditivo (ARU) y del nivel equivalente ponderado en A y normalizado a un valor nominal de 8 horas de trabajo diario, LIAeq8h, para cada ruido impulsivo medido en terreno.

5.2 Resultados de la aplicación de las metodologías de valoración de la efectividad de protectores auditivos

Como se indicó en la metodología de este proyecto, se valoró la efectividad de cuatro protectores auditivos en presencia de ruido impulsivo, utilizando tres técnicas para este efecto. Como fuente de ruido impulsiva, se utilizó una de las señales grabadas en terreno (en taller Goodyear, correspondiente a liberación de aire comprimido desde Cheeta al ambiente) y que reportó un elevado nivel peak ($L_{peak} = 147,2$ dB).

5.2.1 Método AHAH

La forma de la onda de presión sonora en función del tiempo, y que se muestra en la Fig. 28, nos indica que un tiempo de integración de 100 ms es demasiado corto para integrar

la energía de este impulso. Por este motivo, se utilizó un tiempo de integración de 300 ms para realizar la valoración. Consecuentemente, el término -54.6 de la ecuación (6) se reemplazó por $10\log(0.3/28800) = -49.8$ dB. El espectro del ruido impulsivo en bandas de octava, para las frecuencias centrales entre 31.5 y 8000 Hz, se muestra en la Fig. 29.

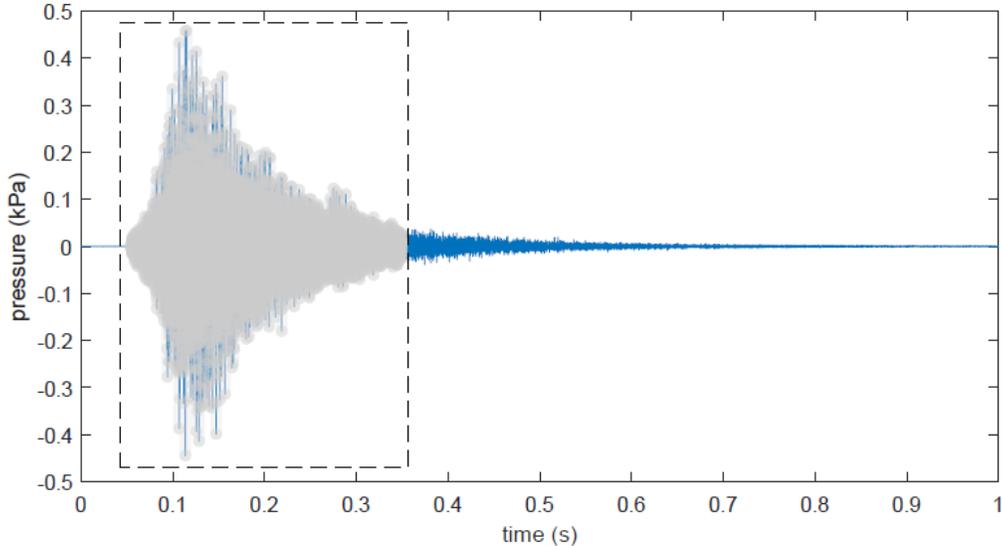


Figura 28: Forma de onda del ruido impulsivo usado como ejemplo en la valoración de la efectividad de protectores auditivos, indicando la ventana de integración de 300 ms.

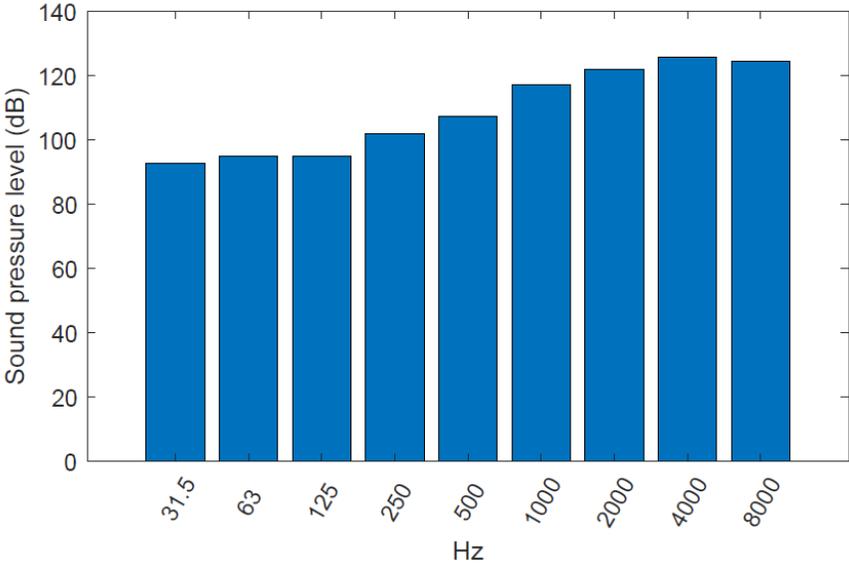


Figura 29: Espectro en bandas de octava para el ruido impulsivo de la Figura 28.

En el caso de la aplicación del modelo AHA AH, el archivo de audio correspondiente al impulso medido en terreno se importó al software AHA AH (ver. 2.1). Una vez calibrada la señal con el valor peak medido y procesada la forma de onda con el protector auditivo respectivo, se obtuvieron los ARUs y se guardó los datos de la presión sonora en el oído, debajo del protector auditivo, en un archivo de texto. Este archivo fue importado desde un programa en Matlab, elaborado a partir de las funciones implementadas por Zechmann (2022), para el medidor de ruido impulsivo. Las Figuras 5 a la 8 muestran los resultados del proceso de la señal impulsiva en el modelo AHA AH, con cada protector. En estas figuras podemos observar, en la parte superior de ellas, el resultado del espectro de PÉRDIDA TOTAL (“TOTAL LOSS”, en línea verde), el cual lo determina el modelo AHA AH, incluyendo las características de atenuación de los componentes individuales del modelo electroacústico del protector auditivo. Se muestran también la atenuación debida al comportamiento del protector auditivo (orejera, tapón, o combinación de ambos), como si éste fuera un único pistón acústico rígido (“EARMUFF AS RIGID PISTON”, en línea gris), el espectro de las fugas alrededor del protector auditivo (“LEAKAGE AROUND EARMUFF”, en línea azul) y el espectro de atenuación para la transmisión del sonido a través del protector auditivo combinado, denominado deformación del material (“MATERIAL DEFORMATION”, en línea negra). En la sección inferior de las figuras, el software entrega una comparación gráfica entre la forma de onda de presión original (línea azul) y la forma de onda resultante bajo el protector auditivo (línea verde).

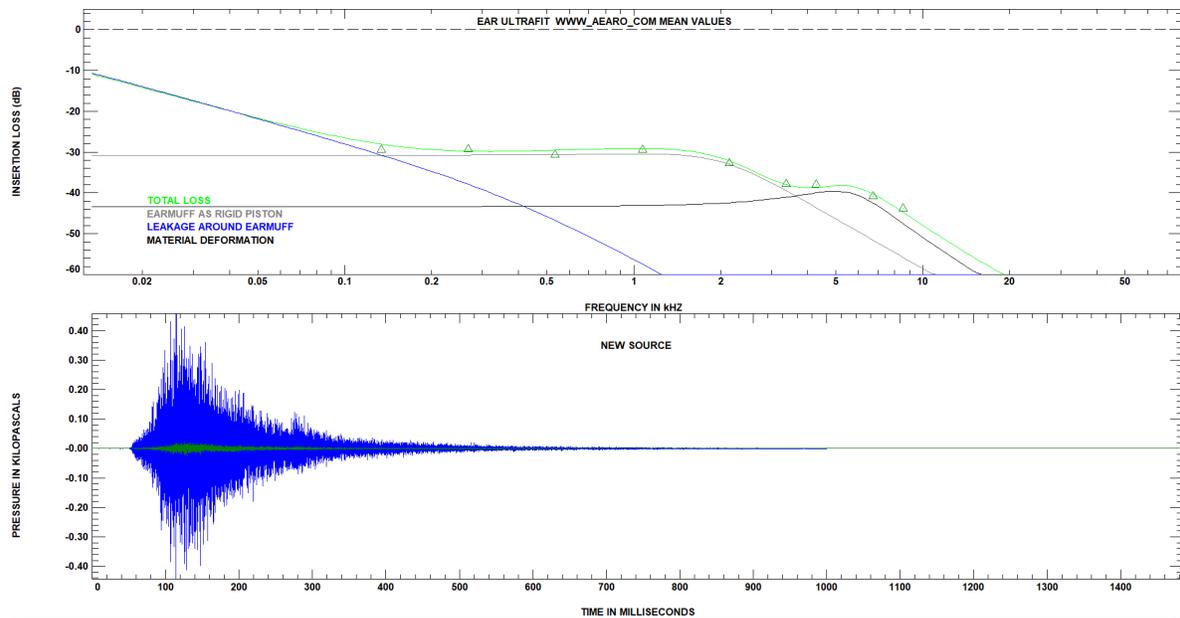


Figura 30: Resultados obtenidos por el software que implementa el algoritmo AHA AH usando el protector auditivo EAR Ultrafit 3M.

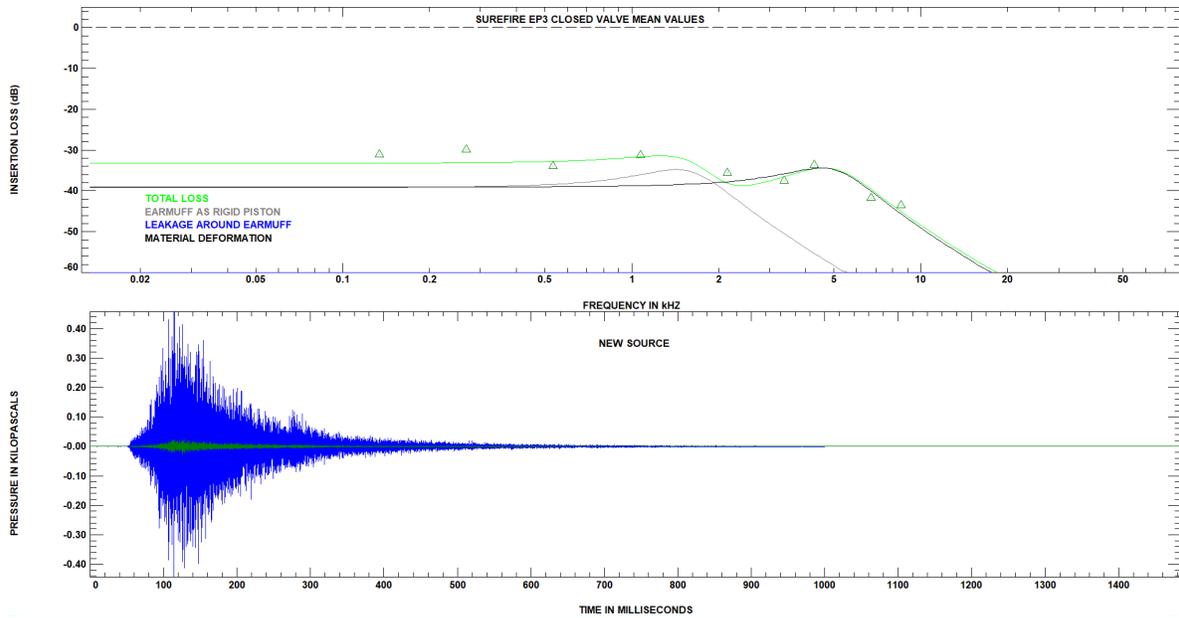


Figura 31: Resultados obtenidos por el software que implementa el algoritmo AHAH usando el protector auditivo Surefire EP3 con válvula cerrada.

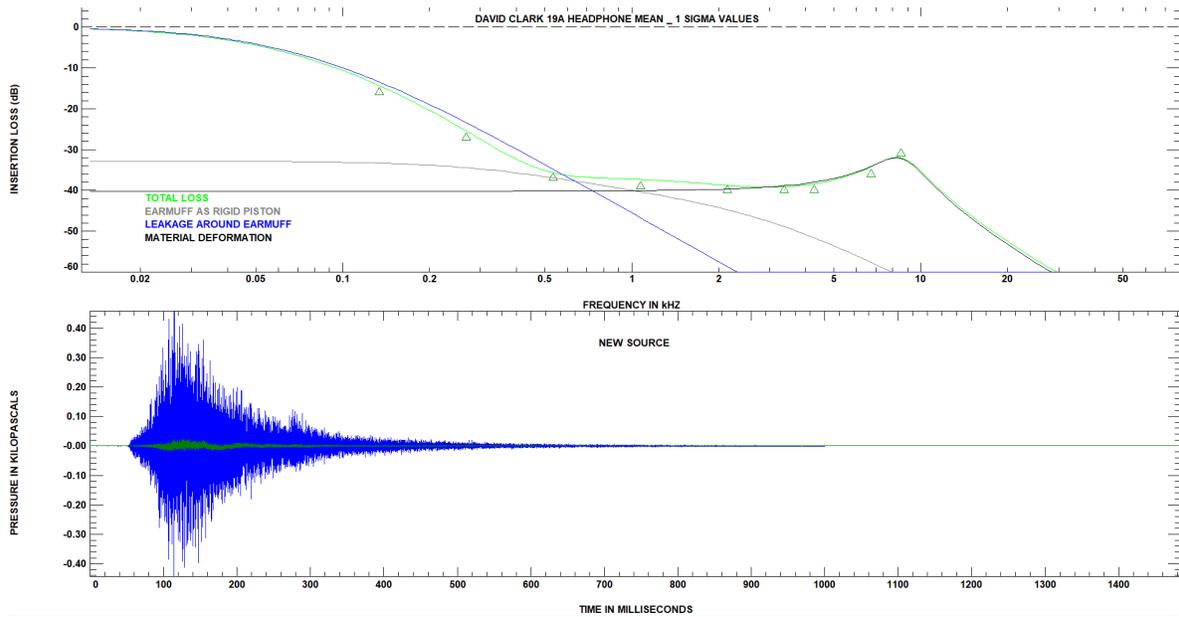


Figure 32: Resultados obtenidos por el software que implementa el algoritmo AHAH usando el protector auditivo David Clark 19A.

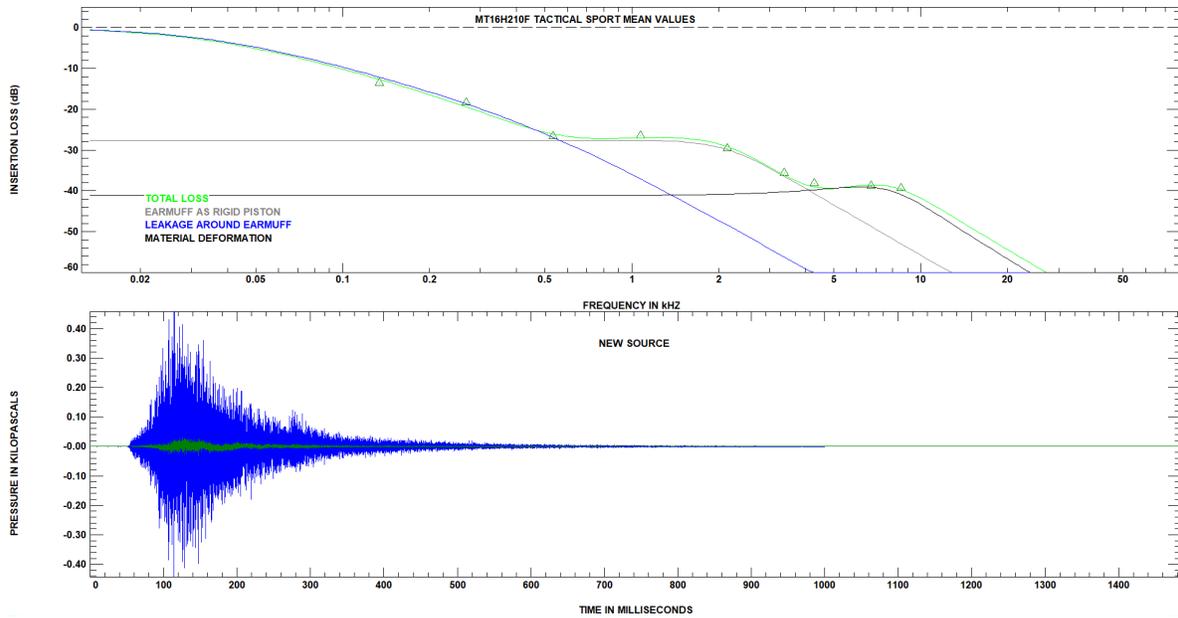


Figure 33: Resultados obtenidos por el software que implementa el algoritmo AHA AH usando el protector auditivo 3M PELTOR Tactical Sport.

Los resultados de la presión en función del tiempo que se obtienen luego de procesar la señal original con el algoritmo AHA AH fueron guardadas como un archivo de texto, el cual se importó desde el software Matlab para poder obtener las métricas. Los resultados temporales se muestran en la Fig. 34. Es notoria la diferencia de las formas temporales entre los protectores tipo tapón y los de orejeras. En los del tipo tapón se aprecia que la forma original del ruido impulsivo se conserva aproximadamente, produciéndose una notoria disminución de la amplitud. En el caso de los protectores tipo orejera, no sólo disminuye la amplitud de la presión impulsiva sino también se produce un cambio en la forma de la presión en el dominio del tiempo. Esto se debe al efecto que producen la cavidad de la orejera y los otros elementos del protector que se consideran en el modelo electroacústico.

Con las señales temporales anteriores, se calcularon la duración A y todas las métricas necesarias para comparar las propiedades del ruido impulsivo, sin y con el protector auditivo. Los resultados se muestran en la Tabla 7. Además, se realizó el análisis espectral de cada señal en bandas de octavas, entre las frecuencias centrales de 31.5 a 8000 Hz, para poder comparar la atenuación calculada para cada protector auditivo en el dominio de la frecuencia.

Tabla 7: Resultados del cómputo de métricas para el ruido impulsivo con y sin cada protector auditivo, usando la metodología AHA AH.

	Sin protector	Con protector			
		EAR UltraFit	EP3 (closed)	19A	Peltor TacSport
ARU (w)	1835	0.5078	0.6271	0.3230	0.8518
ARU (u)	1835	0.5079	0.6272	0.3231	0.8520
Lpeak, dB	147.2	122.4	123.1	122.4	124.3
LIAeq300ms, dBA	130.4	106.4	106.8	104.8	108.5
LIAeq8h, dBA	80.7	56.6	57.0	55.0	58.7
LpeakC, dBC	145.3	122.0	122.4	120.1	124.5
NPI (ARU_u)*	0.1	400	319	619	235
Dosis (%)	36.3	0.14	0.15	0.10	0.23
NPI**	2	706	649	1034	441
TEM 24h***, s	0	56.25	50.93	87.09	31.62

* Número permitido de impulsos en una jornada laboral calculado a partir de los ARUs en la condición “unwarned” y basándose en un límite equivalente de 200 ARUs.

** Número permitido de impulsos en una jornada laboral calculado a partir de la dosis y basándose en un límite equivalente de LIAeq8h = 85 dBA.

*** Máximo tiempo de exposición diario, de acuerdo con el Art. 80 del DS594 (1999), que se basa en un límite equivalente para 8 h de un LpeakC = 95 dBC.

La Fig. 35 muestra los niveles de presión sonora, en dB por bandas de octava, que se obtienen sin y con los cuatro protectores auditivos del ejemplo. Se puede observar que las atenuaciones al ruido impulsivo suministradas por cada protector difieren bastante en frecuencia y donde el protector David Clark modelo 19A es el que reduce más el nivel de ruido impulsivo en las bandas de 500, 1000 y 2000 Hz. Esto explica que haya reportado el menor nivel equivalente ponderado en A, para una jornada de 8 horas y, en consecuencia, la menor dosis de ruido con el uso del protector. Se observa, además, que los dos protectores tipo tapón inserto exhiben la mayor atenuación en bajas frecuencias. Estos resultados también son consistentes con los resultados obtenidos mediante el cómputo de las unidades de riesgo auditivo, ARUs, utilizando el software que implementa el algoritmo AHA AH.

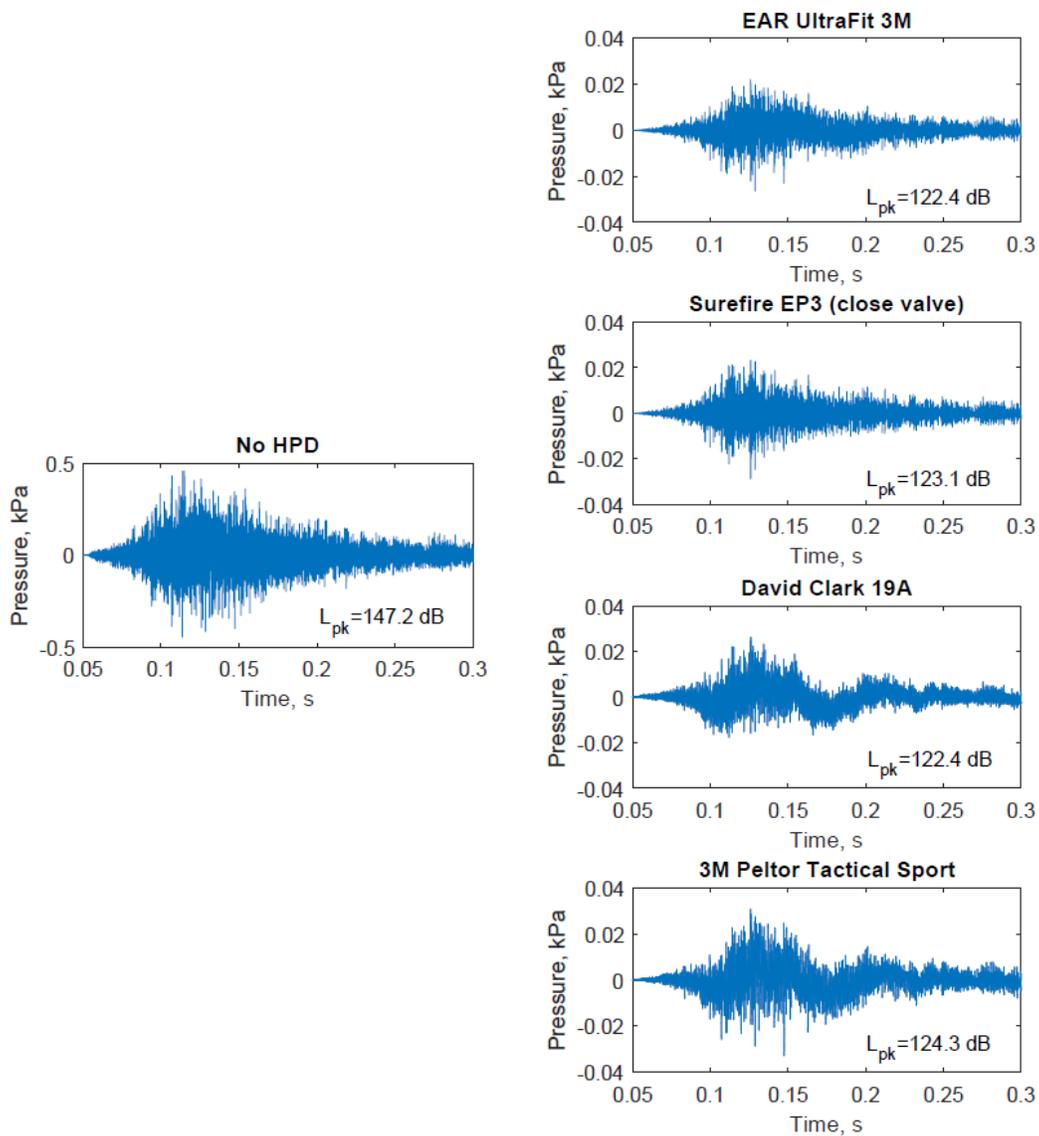


Figura 34: Gráficos de la presión sonora en función del tiempo para el caso sin protector y los resultados para cada protector auditivo, luego de procesar la señal con el algoritmo AHA AH.

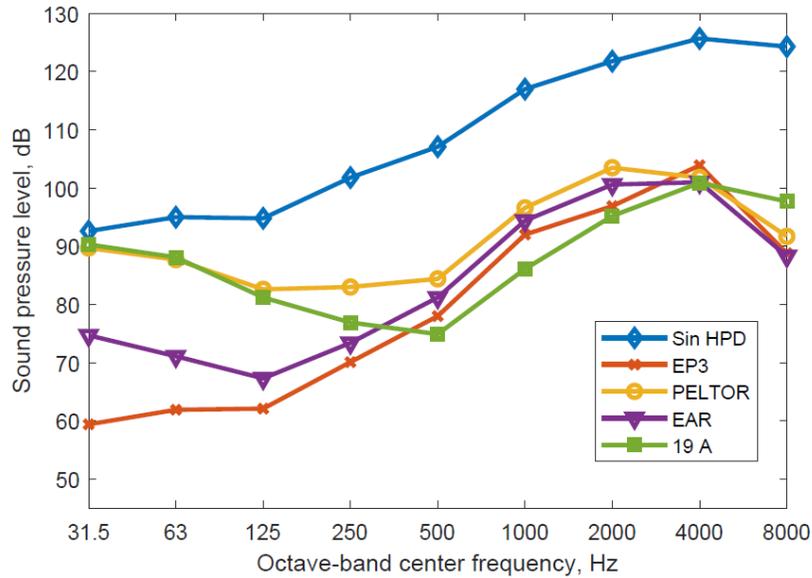


Figura 35: Resultados del nivel de presión sonora en bandas de octava para el ruido impulsivo, con y sin uso de cada protector auditivo.

Es importante mencionar que el módulo HPD del software AHA AH calcula, por defecto, la forma de onda de presión vs tiempo en el tímpano del usuario del protector. Esto puede generar algunas distorsiones en los resultados, ya que el ruido impulsivo se graba en terreno, normalmente, en la posición de la oreja de la persona. Este es un detalle que necesita mejorarse en versiones futuras del software.

5.2.2 Método europeo

Utilizando la misma grabación de ruido impulsivo como fuente, se puede aplicar el método descrito en la norma europea, resumido en los siguientes pasos:

1. Se mide el nivel L_{peak} en dBC del ruido: En nuestro caso, el nivel medido fue de 145.3 dBC.
2. Se define el tipo de ruido usando la Tabla 3: El tipo de fuente de ruido usado en este ejemplo (liberación rápida de aire comprimido al ambiente), no aparece en la Tabla 1. Dado que se tiene la información espectral en bandas de octavas, nos permite establecer que este tipo de ruido tiene su energía concentrada mayormente en el rango de las frecuencias altas (ver Fig. 29). Por este motivo, se definió este ruido como de tipo 3.
3. Se determina el valor de atenuación modificado (dm) de la Tabla 3, que en nuestro caso correspondería al valor H del protector.
4. Se calcula el nivel peak ponderado en C, efectivo en el oído, como $L'_{peak} = 145.3 - H$ (en dBC), para compararlo con el valor máximo establecido en la legislación nacional.

Dado que los valores de H, M y L no estaban disponibles para los protectores auditivos usados en este ejemplo, estos valores se obtuvieron de acuerdo con el procedimiento de la norma ISO (ISO 4869-2, 1994, 2018; Gerges y Arenas, 2010), directamente desde los datos de atenuación pasiva en bandas de octava de la base de datos del software AHA AH. Los resultados se muestran en las primeras filas de la Tabla 8. Los valores de L'peak efectivo en el oído, en dBC, se muestran en la cuarta fila de la Tabla 8. Además, los valores del máximo tiempo de exposición diario permitido, de acuerdo con la legislación chilena, se indican en la última fila de la Tabla 3.

Tabla 8: Resultados de los valores obtenidos de H, M y L para cada protector auditivo, directamente de los valores de atenuación de la base de datos del software AHA AH.

	Protector Auditivo			
	EAR UltraFit	EP3 (closed)	19A	Peltor TacSport
H	34	31	40	32
M	31	29	35	26
L	30	28	25	20
L'peakC, dBC	111.3	114.3	105.3	113.3
TEM 24h*, s	650	337	2710	425

* Máximo tiempo de exposición diario, de acuerdo al Art. 80 del DS594 (1999), que se basa en un límite equivalente para 8 h de un LpeakC = 95 dBC.

Comparando estos resultados con aquellos obtenidos con el algoritmo AHA AH (ver Tabla 7), se observa que la metodología de la norma europea reporta valores mucho más permisivos de tiempo de exposición. Esto se puede deber a que los valores HML están calculados para el percentil 84, mientras que el algoritmo AHA AH es representativo del oído del percentil 95. Sin embargo, existe consistencia en que el protector David Clark 19A es el que posee mejor rendimiento, de acuerdo con este criterio, seguido del tapón inserto EAR UltraFit. No existe correspondencia entre los otros protectores, los cuales dan resultados inversos en ambas metodologías, aunque las diferencias entre sus valores de nivel peak, efectivo en el oído, son de sólo 1 dBC.

- Ahora, como último paso, se calcula el nivel equivalente, ponderado en A, efectivo en el oído (L'Aeq). Este cálculo lo realizamos de acuerdo a la metodología del anexo 2, parte B, de la guía para la selección y control de protectores auditivos (ISP, 2012), donde el ruido corresponderá al impulso grabado.

Primero, se calcula la diferencia entre los niveles de presión sonora, ponderados en C y en A. En nuestro caso, $L_{Ceq} - L_{Aeq} = 129.9 - 130.4 = -0.5$. Como este valor es menor que 2 dB, la reducción del nivel del ruido predicha se obtiene como:

$$PNR = M - \frac{H-M}{4}(LCeq - LAeq - 2). \quad (9)$$

Finalmente, el $L'Aeq = LAeq - PNR = 130.4 - PNR$. Con este valor, se pueden calcular la Dosis y el Número Permitido de Impulsos (NPI), en una jornada laboral, para una persona que utiliza correctamente el protector auditivo. Los resultados para cada protector se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9: Cómputo de la dosis y número permitido de impulsos en una jornada laboral para una persona que utiliza correctamente cada protector auditivo individualmente.

	Protector Auditivo			
	EAR UltraFit	EP3 (closed)	19A	Peltor TacSport
PNR	32.9	30.2	38.1	29.7
L'Aeq, dBA	97.5	100.2	92.3	100.7
L'Aeq8h	47.7	50.4	42.5	50.9
Dosis (%)	0.018	0.033	0.005	0.037
NPI	5499	2998	18497	2671

Podemos observar que, nuevamente, los valores obtenidos de NPI son varias veces mayores que los correspondientes calculados con el algoritmo AHAH. De igual manera pueden existir diferencias importantes si los cálculos, aplicando la norma europea, se hubiesen realizado con los valores de HML representativo del oído del percentil 95 en lugar del 84.²

Observamos consistencia en los resultados de esta metodología con el AHAH pues, nuevamente, el protector de mejor desempeño fue el de orejera David Clark 19A, seguido por el tapón EAR UltraFit, el EP3 y la orejera Peltor.

Es interesante mencionar que, en algunos países de la Unión Europea y en el Reino Unido, se recomienda añadir 4 dB al cálculo de L'Aeq, para considerar efectos del "mundo real". Si se aplicara esta recomendación, los resultados recalculados se indican en la Tabla 10.

² En nuestro caso no fue posible realizar este cálculo, pues los valores de atenuación de la base de datos del software que implementa el algoritmo AHAH no incluyen, en su mayoría, los valores de desviación estándar.

Tabla 10: Cómputo de la dosis y número permitido de impulsos en una jornada laboral, aplicando el factor de +4 dB al cómputo de L'Aeq, para una persona que utiliza correctamente cada protector auditivo individualmente.

	Protector Auditivo			
	EAR UltraFit	EP3 (closed)	19A	Peltor TacSport
PNR	32.9	30.2	38.1	29.7
L'Aeq, dBA	101.5	104.2	96.3	104.7
L'Aeq8h	51.7	54.4	46.5	54.9
Dosis (%)	0.046	0.084	0.014	0.094
NPI	2182	1190	7341	1060

Aplicando la corrección de +4 dB, las dosis calculadas se incrementan aproximadamente en un factor 2.5, mientras que los valores de NPI disminuyen alrededor de un 60%. Estos valores corregidos se acercan más a los obtenidos por el AHAAH, aun cuando siguen siendo mayores.

Un aspecto que resulta subjetivo en la metodología de la norma europea es la definición de los tipos de ruido impulsivo, definidos en la Tabla 3. Esta clasificación es limitada respecto a los tipos de fuentes impulsivas que define y podría resultar en errores importantes al no considerar que todas las fuentes no son homogéneas. Por ejemplo, en este estudio se verificó que las características de los ruidos de impacto producidos por golpes de martillos dependen mucho del tipo y tamaño de las superficies donde se ejecutan los golpes. Esto puede cambiar notablemente la forma espectral del ruido y la aplicación directa de la Tabla 3 podría resultar en una mala clasificación del tipo de ruido.

De acuerdo con la literatura (Bies et al., 2018), la clasificación HML se basa en el rango de bandas de octava para frecuencias altas (H: 2000 – 8000 Hz), frecuencias medias (M: 1000 – 2000 Hz), y frecuencias bajas (L: 63 – 1000 Hz). En ese sentido, una propuesta de clasificación podría ser la obtención del valor energético total, para cada uno de estos rangos de frecuencia, antes de aplicar la tipificación de la Tabla 3, mediante la ecuación:

$$L_{p,RANGO} = 10 \log \left[\sum_{i=f_inf}^{f_sup} 10^{\frac{L_{pi}}{10}} \right] \text{ dB}, \quad (10)$$

donde f_inf y f_sup son las frecuencias centrales de la banda de octava inferior y superior, respectivamente.

En nuestro ejemplo de ruido impulsivo medido en terreno, sin uso de protector (ver el espectro en bandas de octava de la Fig. 29), los resultados de la ecuación (10) se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11: Suma energética de las bandas de octava para HML del ruido impulsivo

Rango	Frecuencia central de las bandas de octava, Hz							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
H							H = 129 dB	
M					M = 123.1 dB			
L	L = 117.6							

En este caso, podemos estimar que el ruido impulsivo es predominantemente de alta frecuencia, por lo cual se clasifica objetivamente como de tipo 3. En caso de que el mayor valor energético sea igual para dos o más valores de HML, debería valorarse la atenuación del protector para todos los casos en que esto ocurra y considerar aquel que ofrezca mayor protección al usuario.

5.2.3 Método usando IPIL

Desafortunadamente, no fue posible obtener los datos de IPIL para todos los protectores auditivos que están en la base de datos del software AHAH. Solamente el fabricante del protector Surefire EP3 ha reportado medidas de IPIL, realizadas siguiendo el estándar ANSI/ASA S12.42. Por este motivo, se procedió a valorar sólo la eficiencia de este protector al ruido de impulso grabado en terreno, mediante el método de la Pérdida de Inserción de Peak Impulsivo, para que sirviera como ejemplo de aplicación. Los datos medidos de IPIL para el protector EP3, con la válvula cerrada, se muestran en la Figura 36.

Para la valoración del protector, consideramos la ecuación (4),

$$L_{Aeq8h} = L_{Aeq,T} + 10 \log \left[\frac{T}{T_0} \right] + 10 \log(N) \text{ dBA},$$

en la cual $T = 300 \text{ ms}$ (0.3 s), es la duración temporal de la energía del impulso, $L_{Aeq,T} = 130.4 \text{ dBA}$, T_0 es la duración de referencia (28800 s) y $N = 1$, pues nos interesa evaluar la respuesta del protector a un solo impulso. El resultado es $L_{Aeq8h} = 80.6 \text{ dBA}$, sin el protector.

El número permitido de impulsos en la jornada laboral (NPI), se calcula con la ecuación (5),

$$NPI = 10^{\frac{85 - (L_{Aeq8h} - IPIL)}{10}},$$

donde, para este protector, se escoge el valor de $IPIL = 37.4 \text{ dB}$ (ver Figura 36), que es el más cercano al $L_{peak} = 147.2 \text{ dB}$ del ruido impulsivo. Reemplazando los valores en

la ecuación (5), nos entrega el número permitido de impulsos en la jornada laboral NPI = 15135.

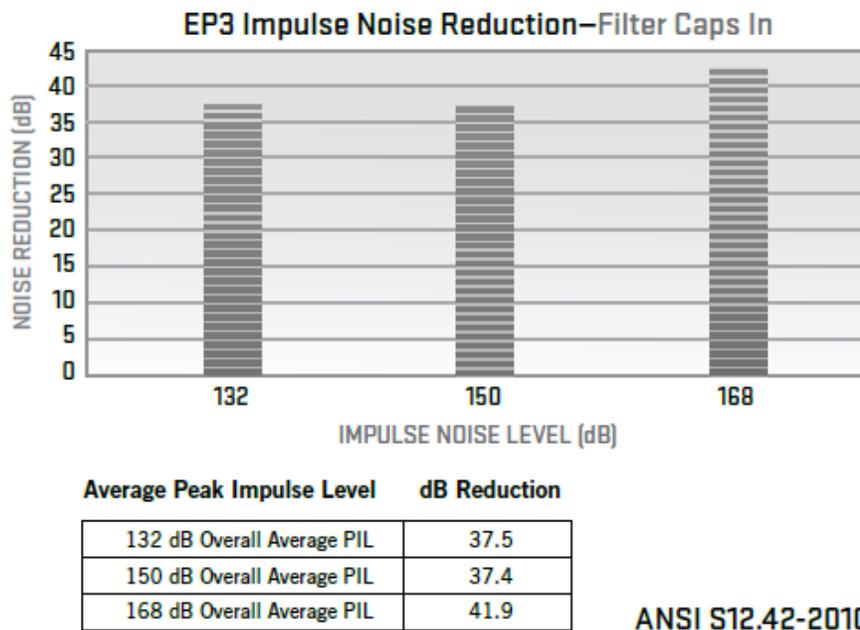


Figura 36: Datos de la pérdida de inserción de peak impulsivo (IPIL), entregados por el fabricante del protector Surefire EP3.

El NPI calculado es más de 20 veces el NPI estimado usando el método AHAH, y mucho más que usando el criterio de las unidades de riesgo auditivo. Esta sobreestimación de la atenuación ha sido reportada por otros autores anteriormente empleando otros protectores auditivos y es una de las razones por las cuales el uso de esta metodología está en debate.

La mayoría de los criterios para evaluar riesgo de daño auditivo no utilizan el nivel máximo de presión para evaluar el peligro de la exposición al ruido impulsivo y no hay información que relacione el IPIL con los criterios de riesgo auditivo. Varios investigadores (Williams, 2012), han afirmado que el IPIL no debería usarse como métrica para estimar la exposición permitida al ruido impulsivo de una persona usando el protector auditivo. La principal crítica es que la simple sustracción del IPIL del nivel de presión sonora peak de una fuente de ruido impulsivo y la afirmación de que la cantidad resultante corresponde a la exposición efectiva experimentada por el usuario del protector, es excesivamente simplista y potencialmente inexacta. Además, el uso del IPIL por parte de los fabricantes de protectores auditivos, como herramienta de marketing, podría ser preocupante, sin disponer aún de los estudios apropiados que avalen el uso del IPIL.

Más recientemente, similares críticas a esta metodología han sido indicadas en el trabajo de Nakashima y Giguere (2020), quienes hacen notar que las ecuaciones (3) y (5) se aplican estrictamente a las métricas de pérdida de inserción (IL, Insertion Loss), basadas en la energía. Por este motivo, sería incorrecto utilizar el IPIL directamente, ya que éste es un IL de valores peak sin ponderación, en lugar de un IL basado en energía y ponderado en A. Este hecho causa que el uso del IPIL medido en ATF produzca una sobreestimación de la atenuación del protector, lo que concuerda con nuestros resultados. Otra dificultad del método es que no considera apropiadamente la vía de conducción ósea. Varios estudios han confirmado que el uso de un ATF acarrea una sobreestimación de la pérdida por inserción del protector, porque los ATF no pueden compensar la conducción ósea (Williams, 2012; Murphy et al., 2015), un aspecto relevante en la exposición a ruidos impulsivos.

6. CONCLUSIONES

De las medidas en laboratorio, se puede concluir que, en condiciones de campo libre, el revólver es la fuente de ruido impulsiva que genera mayor energía acústica, mientras que, en campo difuso, la pistola parece ser la fuente más intensa.

Se observó que, en el caso de las medidas en sala reverberante, el análisis y determinación de las métricas presenta dificultades. Esto fue particularmente notorio en la determinación de la duración B. Se comprueba que es una de las razones en la actualización E de la norma MIL-STD-1474, realizada en 2015, donde se desechó el uso de la duración B como métrica para determinar el riesgo auditivo, dejando solamente la duración A en las ecuaciones.

Se debe notar que el estudio experimental realizado, tanto en laboratorio como en terreno, consideró solamente el efecto de un ruido impulsivo aislado y no el caso en que el un ruido impulsivo está mezclado con un ruido continuo, algo común en los entornos industriales. En este caso, se sugiere determinar, adicionalmente, el factor de cresta y la curtosis para incluirlos como métricas suplementarias para poder cuantificar la dosis total de exposición a ruido ocupacional.

A partir de las medidas en terreno, este trabajo demostró que los niveles de ruido producidos por el ruido de impacto en los sitios industriales pueden alcanzar valores excesivamente altos. Algunos de los ruidos medidos presentaron niveles máximos equivalentes a los medidos con armas de fuego. Se observó que alrededor del 15% de las mediciones realizadas en los cuatro sitios industriales exhibieron niveles máximos superiores a 140 dB, que es el límite admisible sin protección auditiva en la legislación.

De acuerdo con la información recopilada en este proyecto, aunque no está exenta de críticas, la metodología del AHAH corresponde al mejor modelo desarrollado para estimar la respuesta del oído a un ruido impulsivo y a la predicción del riesgo auditivo a niveles intensos. Usando esto como base, se estimó coherente comparar los resultados

aplicando otras metodologías con este modelo. De esta manera, se puede estimar si la metodología brinda resultados que se aproximen a los del último estándar STD-MIL-1474E, que expresa los resultados en función de unidades de riesgo auditivo. El ejercicio se desarrolló usando un ruido real, grabado en terreno, y que exhibió un alto nivel de presión sonora peak, que resulta inaceptable sin protección auditiva. Se valoró la protección al ruido impulsivo suministrada por cuatro protectores auditivos comerciales de distinto tipo. A partir de los resultados se puede concluir lo siguiente:

1. Para valorar la eficiencia de un protector a ruido impulsivo, es absolutamente indispensable medir el ruido impulsivo con un sistema que posea el rango dinámico y la frecuencia de muestreo suficiente, para poder capturar con mayor precisión el evento en el dominio del tiempo. El sistema debe proporcionar un valor de referencia (usualmente el nivel peak), para calibrar la amplitud del archivo de audio registrado.
2. Valorar la eficiencia de un protector por medio del módulo de HPD del AHA AH sería, en principio, la metodología ideal. Sin embargo, resulta demasiado complejo aplicar este método, fundamentalmente porque se necesitaría contar con todos los datos físicos del protector para construir el análogo electroacústico. Además, sin una versión del algoritmo implementada en un programa de código abierto, su aplicación práctica resulta muy difícil para personas sin entrenamiento avanzado. De todas maneras, el AHA AH es una excelente herramienta para ser usada en investigación y en un proceso de comparación referencial.
3. La aplicación del método de la Pérdida de Inserción de Peak Impulsivo (IPIL) no es recomendable como metodología de valoración de la eficiencia de un protector a ruido impulsivo. En primer lugar, se requiere tener los datos de atenuación medidos en una cabeza artificial (ATF) y con fuentes de alta intensidad. Aún existen aspectos de instrumentación no resueltos por completo para la aplicación de la norma que describe este procedimiento de medida. Por otro lado, el valor IPIL es una pérdida de inserción de valores peak sin ponderación, muy diferente a los valores de pérdida de inserción basados en energía y medidos en ponderación A. Además, otra dificultad del método es que no considera apropiadamente la vía de conducción ósea. Todos estos aspectos implican que esta metodología produce una sobreestimación de la atenuación del protector.
4. La aplicación del método descrito en el anexo B de la norma europea EN458 (2016), resulta ser rápido de aplicar y entrega resultados fáciles de interpretar. Sin embargo, el método posee dos deficiencias. La primera es que la tipificación del ruido impulsivo es, en esencia, subjetiva. La segunda, es que emplea los valores H, M y L de un protector auditivo, obtenidos a partir de sus datos de atenuación pasiva, de acuerdo a la norma ISO 4869. Estos valores son, en general, obtenidos para el percentil 84, lo cual puede sobreestimar la eficiencia del protector en un grupo poblacional importante. Para evitar esta

sobrestimación, que se puede sumar a otras dificultades prácticas del uso de los protectores auditivos, es que se recomienda incorporar a la metodología de esta norma, tres requisitos adicionales: a) incorporar el análisis espectral del ruido impulsivo (el cual es fácil de obtener a partir de la información del archivo de audio), y obtener los niveles de presión sonora totales de las bandas de octava para cada rango de frecuencias (H: 2000 – 8000 Hz, M: 1000 – 2000 Hz, y L: 63 – 1000 Hz) mediante el principio de suma energética (ver ecuación (10)). En base a esta información, tipificar el tipo de ruido impulsivo como tipo 1, 2 o 3; b) Considerar el cómputo de los valores de atenuación HML del protector utilizando un $\alpha = 1,6$, de tal forma que se utilicen los valores que cubran al percentil 95; c) Considerar la recomendación de varias normativas europeas de añadir 4 dB al cálculo del nivel de presión sonora ponderado en A, efectivo en el oído ($L'A_{eq}$), con objeto de considerar efectos del “mundo real”.

5. Un dato relevante debería ser el resultado del grupo de trabajo que está elaborando la parte 7 de la norma ISO 4869, cuyo objetivo es proporcionar un método que ayude a predecir las exposiciones al ruido, con el dispositivo de protección auditiva, en presencia de ruido impulsivo.
6. Luego de ejecutar este proyecto, se visualiza una línea de investigación futura, que podría extender el número de protectores auditivos (incluyendo combinaciones de protectores), a probar con las metodologías desarrolladas en este proyecto. Esto podría entregar mayor conocimiento a un problema muy complejo de resolver con la actual información disponible.

7. REFERENCIAS

3M (2015). Technical Data Bulletin #234 Hearing Protection for Impulse Noise, 3M Personal Safety Division. July 2015.

ANSI S1.13 (1971). Methods for the Measurement of Sound Pressure Levels, American National Standard ANSI S1.13-1971. Acoustical Society of America, Melville, New York.

ANSI S12.7 (1986). Methods for measurement of impulse noise, American National Standard ANSI S12.7-1986. Acoustical Society of America, Melville, New York.

ANSI S3.19 (1974). Method for measurement of real-ear protection of hearing protectors and physical attenuation of earmuffs. Melville (NY): American National Standards Institute; 1974.

ANSI S3.44 (1996). Determination of occupational noise exposure and estimation of noise-induced hearing impairment, American National Standard ANSI S3.44-1996. Acoustical Society of America, Melville, New York.

ANSI/ASA S12.42 (2010). Methods for the measurement of insertion loss of hearing protection devices in continuous or impulsive noise using microphone-in-real-ear or

acoustic test fixture procedures. Melville (NY): American National Standards Institute; 2010.

ANSI/ASA S12.6 (2016). Methods for measuring the real-ear attenuation of hearing protectors. Melville (NY): American National Standards Institute; 2016, Revisada en 2020.

Arenas JP, Suter AH (2014). Comparison of occupational noise legislation in the Americas: An overview and analysis. *Noise and Health* 16:306-319.

Arlinger S, Mellberg P (1980). A comparison of TTS caused by a noise band and by trains of clicks, *Scand. Audiol. Suppl.* 12:242-248.

Atherley GR, Martin AM (1971). Equivalent-continuous noise level as a measure of injury from impact and impulse noise, *Ann. Occup. Hyg.* 14:11-23.

Berger EH (2005). Preferred methods for measuring hearing protector attenuation, in *Proceedings of Inter-Noise 05*, Noise Control Foundation, Poughkeepsie, NY, p. 58.

Berger EH, Hamery P (2008). Empirical evaluation using impulse noise of the level-dependency of various passive earplug designs, *J. Acoust. Soc. Am.*, 123 (5), 3528-3528.

Berger EH, Royster LH, Royster JD, Driscoll DP, Layne M (2000). *The Noise Manual*. 5th ed. Fairfax, VA: Am. Ind. Hygiene Assoc.

Bies DA, Hansen CH, Howard CQ (2018). *Engineering noise control*. 5th edition, CRC Press, Boca Raton, FL

Brueck SE, Kardous CA, Oza A, Murphy WJ (2014). Measurement of exposure to impulsive noise at indoor and outdoor firing ranges during tactical training exercises. Report No. 2013-0124-3208. National Institute for Occupational Safety and Health.

Bruel PV (1980). The influence of high crest factor noise on hearing damage, *Scand. Audiol. Suppl.* 12: 25-32.

Buck K (2009). Performance of different types of hearing protector undergoing high-level impulse noise. *Int. J. Occup. Safety Ergonom.*, 15(2), 227-240.

CHABA (1992). Hazardous exposure to impulse noise. Report of the working group on hazardous exposure to impulse noise. Washington, DC: National Academy Press.

Coles RRA, Garinther GR, Hodge DC, Rice CG (1968). Hazardous exposure to impulse noise. *J. Acoust, Soc. Am.* 43:336-343.

Crocker MJ (2007). *Handbook of Noise and Vibration Control*. New York: John Wiley and Sons.

Crocker MJ, Arenas JP (2021). *Engineering Acoustics: Noise and Vibration Control*, John Wiley and Sons, Chichester, UK.

Dancer A, Buck K, Parmentier G, Hamery P (1998). The specific problems of noise in military life. *Scn. Aud. Suppl.* 48:123-130.

Dancer A, Buck K, Vassout P, Lenoir M (1985). Influence of the peak level and the duration of the shock waves (gun noise) on the hearing of Guinea pig. *Acustica* 59:21-29.

Davis RI, Qiu W, Heyer NJ, Zhao Y, Qiuling Yang MS, Li N, Tao L, Zhu L, Zeng L, Yao D (2012). The use of the kurtosis metric in the evaluation of occupational hearing loss in workers in China: implications for hearing risk assessment. *Noise Health* 14:330-342.

de Almeida-Agurto D, Gerges SNY, Arenas JP. (2011). MIRE-IL methodology applied to measuring the noise attenuation of earmuff hearing protectors, *Appl. Acoust.*, 72(7), 451-457.

DoD (1997). MIL-STD-1474D. Design Criteria Standard, Noise Limits. U.S. Department of Defense, Washington, D.C.

DoD (2015). MIL-STD-1474E. Design Criteria Standard, Noise Limits. U.S. Department of Defense, Washington, D.C.

DS594 (1999). Aprueba reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo. Ministerio de Salud, Chile.

ECD (1986). European Council Directive 86/188/EEC. Protection of workers from risks related to exposure to noise at work. Brussels, Belgium.

EN458 (2016). Hearing protectors – recommendations for selection, use, care and maintenance. European Standard. European Committee for Standardization. Brussels, Belgium.

EU (2003). European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA). Directive 2003/10/EC – noise.

Fackler CJ, Berger EH, Murphy BJ, Stergar ME (2017). Spectral analysis of hearing protector impulsive insertion loss, *Int. J. Audiol.*, 56 (sup1), 13-21.

Fackler CJ, Berger EH, Stergar ME (2017). Uncertainty of ANSI/ASA S12.42 hearing protection device impulsive measurements, *J. Acoust. Soc. Am.*, 141, 3687.

Fedele P, Kalb J (2015). Level-Dependent Nonlinear Hearing Protector Model in the Auditory Hazard Assessment Algorithm for Humans. ARL-TR-7271, US Army Research Laboratory.

Fedele PD, Binseel MS, Kalb JT, Price GR (2013). Using the Auditory Hazard Assessment Algorithm for Humans (AHAAH) with hearing protection software, Release MIL-STD-1474E, Army Research Laboratory, Report ARL-TR-6748, Aberdeen, MD.

Federal Register (1971). Occupational safety and health standards. Federal Register 36(105): part II.

Federal Register vol. 74, No. 149, August 5, 2009, Proposed Rules pages 39149-39196

Gerges SNY, Arenas JP (2010). Fundamentos y control de ruido y vibraciones, 2da edición, NR Editora, Florianópolis, Brasil.

Hakanson H, Erlandsson B, Ivarsson A, Nilsson P (1980). Differences in noise doses achieved by simultaneous registrations from stationary and ear-borne microphones, Scand. Audiol. Suppl. 12:47-53.

Hamernik RP, Henderson D (1974). Impulse noise trauma. A study of histological susceptibility, Arch. Otolaryngol. 99:118-121.

Hamernik RP, Hsue KD (1991). Impulse noise: some definitions, physical acoustics and other considerations. J. Acoust. Soc. Am. 90:189-196.

Hamery P, Zimpfer V, Buck K, De Mezzo, S (2015). Very high level impulse noises and hearing protection. Proceedings Euronoise, Maastricht, 31 May-3 June 2015.

Henderson D, Hamernik RP (1982). Asymptotic threshold shift from impulse noise. In New Perspectives on Noise Induced Hearing Loss (Eds. RP Hamernik, D Henderson, RJ Salvi), Raven Press, New York, p. 265.

Henderson D, Hamernik RP (2007). Auditory hazards of impulse and impact noise. In Handbook of Noise and Vibration Control (Ed. MJ Crocker), John Wiley and Sons, New York.

Henderson D, Hamernik RP, Sitler RW (1974). Audiometric and histological correlates to exposure to 1-msec noise impulses in the chinchilla. J. Acoust. Soc. Am. 56:1210-1221.

Hodge DC, Garinther GR (1970). Validation of the single-impulse correction factor of the CHABA impulse-noise damage-risk criterion. J. Acoust. Soc. Am. 48:1429-1430.

<https://www.bksv.com/en/Campaign/HQ/Impulse-noise-system/Impulse-noise-evaluation>

<https://www.bksv.com/en/instruments/daq-data-acquisition/analyzer-system/impulse-noise-evaluation-system>

<https://www.bksv.com/en/instruments/daq-data-acquisition/analyzer-system/impulse-noise-evaluation-system>

<https://www.dell.com/cl/empresas/p/latitude-14-5424-laptop/pd?oc=xctol542414mmcla>

Hynson K, Hamernik RP, Henderson D (1976). B-duration impulse definition: some interesting results, J. Acoust. Soc. Am. 1:S30.

ISO 1999 (1990). Acoustics - Determination of occupational noise exposure and estimation of noise-induced hearing impairment. Geneva: International Organization for Standardization.

ISO 4869-2 (1994)/Cor.1:2006 Acoustics – hearing protectors – part 2: Estimation of effective A-weighted sound pressure levels when hearing protectors are worn. Technical corrigendum 1. Geneva: International Organization for Standardization; 2006.

ISO 4869-2 (2018). Acoustics — Hearing protectors — Part 2: Estimation of effective A-weighted sound pressure levels when hearing protectors are worn. Geneva: International Organization for Standardization.

ISP (2012). Guía Técnica: Guía para la selección y control de protectores auditivos, Segunda impresión, Departamento de Salud Ocupacional, Instituto de Salud Pública, Ministerio de Salud, Chile.

Ivarsson A, Nilsson P (1980). Advances in measurement of noise and hearing, Acta Otolaryngol. 366:1–67.

Kardous CA (2013). Development and validation testing of an impulse noise meter. EPHB Report No. 349-11a. National Institute for Occupational Safety and Health.

Kardous CA, Franks JR, Davis RR (2005a). NIOSH/NHCA best-practices workshops on impulsive noise. Noise Control Eng. J. 53:53-60.

Kardous CA, Willson RD (2004). Limitations of using dosimeter in impulse noise environments. J. Occup. Env. Hyg. 1:456-462.

Kardous CA, Willson RD, Murphy WJ (2005b). Noise dosimeter for monitoring exposure to impulse noise. Appl. Acoust. 66:974-985.

Kryter KD, Garinther GR (1966). Auditory effects of acoustic impulses from firearms, Acta Otolaryngol. Suppl. 211:1966.

Lake S. (2022). NRR or IPIL for Gunshot Noise Hearing Protection Selection? white paper, Westone Laboratories, Inc., Colorado Springs, CO.

Luz G, Hodge R (1971). The recovery from impulse noise-induced TTS in monkeys and men: A descriptive model. J. Acoust. Soc. Am. 49:1770-1777.

Martin A (1976). The equal energy concept applied to impulse noise, in The Effects of Noise on Hearing (Eds. D Henderson, RP Hamernik, DS Dosanjh, J Mills), Raven, New York, pp. 421–453.

McBride D (2018). Evidence updates on risk factors for occupational noise-induced hearing loss (ONIHL). Update 2: Review of impact and impulse noise evidence. ONIHL Expert Advisory Group, Wellington, Report of September 2018.

McBride D. (2010). Guideline for diagnosing occupational noise-induced hearing loss. Part 1: noise effects and duration. Wellington: Accident Compensation Corporation.

Meinke DK, Flamme GA, Murphy WJ, Finan DS, Stewart M, Tasko SM, Lankford JE (2016). Measuring gunshots with commercial sound level meters. Presented at the Annual Conference of the National Hearing Conservation Association, San Diego, CA.

MIL-1474-D (1997). Design Criteria Standard, Noise Limits. U.S. Department of Defense, Washington, D.C.

MIL-1474-E (2015). Design Criteria Standard, Noise Limits. U.S. Department of Defense, Washington, D.C.

Mlynski R, Kozlowski E (2019). Selection of level-dependent hearing protectors for use in an indoor shooting range, *Int. J. Environ. Res. Public Health* 16:2266.

Mrena R, Savolainen S, Kuokkanen JT, and Ylikoski J (2002). Characteristics of tinnitus induced by acute acoustic trauma: A long-term follow-up. *Audiol. NeuroOtol.* 7:122-130.

Murphy W J, Flamme GA, Meinke DK, Sondergaard J, Finan DS, Lankford JE, Khan A, Vernon J, Stewart M (2011). Measurement of impulse peak insertion loss for four hearing protection devices in field conditions. *Int. J. Audiol.*, 51 Suppl 1(01):S31-42.

Murphy WJ, Fackler CJ, Berger EH (2015). Measurement of impulse peak insertion loss from two acoustic test fixtures and four hearing protector conditions with an acoustic shock tube. *Noise Health*, 17(78), 364 – 373.

Murphy WJ, Kardous CA (2012). A case for using A-weighted equivalent energy as a damage risk criterion. EPHB Report No 350-11a, Department of Health and Human Services, CDCP/NIOSH.

Nakashima A (2015). A comparison of metrics for impulse noise exposure: analysis of noise data from small caliber weapons. Defense Research and Development Canada, Scientific Report DRDC-RDDC-2015-R243.

Nakashima A, Giguere C (2020). Toward an improved hearing safety standard for impulse noise exposure in the Canadian Armed Forces. *J. Veteran Family Health*, 6(1), 98-107.

NIOSH (1998). Criteria for a recommended standard—Occupational noise exposure (revised criteria 1998). Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) Pub. No. 98-126.

Okada A, Fukuda F, Yamamura K (1972). Growth and recovery of temporary threshold shift at 4 kHz due to a steady state noise and impulse noises, *Int. Z. Angew. Physiol.* 30:105–111.

Parmentier G, Dancer A, Buck K, Kronenberger G, Beck C (2000). Artificial head (ATF) for evaluation of hearing protectors, *Acta Acustica* 86:847-852.

Patterson JH, Hamernik RP (1992). An experimental basis for the estimation of auditory system hazard following exposure to impulse noise. In: A Dancer, D Henderson, RJ Salvi, RP Hamernik (Eds.). *Noise-induced hearing loss*. Philadelphia: BC Decker.

Perkins C, Hamernik RP, Henderson D (1975). The effect of interstimulus interval on the production of hearing loss from impulse noise, *J. Acoust. Soc. Am.* 1:S1.

Pfander F (1975), *Das Knalltrauma*, Springer, Berlin, 1975.

Pfander F, Bongartz H, Brinkmann H, Kietz H (1980). Danger of auditory impairment from impulse noise: a comparative study of the CHABA damage-risk criteria and those of the Federal Republic of Germany, *J. Acoust. Soc. Am.* 67: 628–633.

Price GR (1983). Mechanisms of loss for intense sound exposures, in *Hearing and Other Senses* (Ed. RR Ray and G Gourwithc), Amphora, Groton, CT.

Price GR (2007). Validation of the auditory hazard assessment algorithm for the human with impulse noise data. *J. Acoust. Soc. Am.* 122:2786–2802.

Price GR, Kalb JT (1991). Insights into hazard from intense impulses from a mathematical model of the ear. *J. Acoust. Soc. Am.* 90:219-227.

Roberto M, Hamernik RP, Salvi S, Henderson D, Milone R (1985). Impact noise and the equal energy hypothesis. *J. Acoust. Soc. Am.* 77(4), 1514–1520.

Roberts B, Seixas NS, Mukherjee B, Neitzel RL (2018). Evaluating the risk of noise-induced hearing loss using different noise measurement criteria". *Ann. Work Expo. Health* 62:295-306.

Sarray S, Nakashima A, Dajani HR, Bouchard M, Lo D, Ghinet S. (2019). Octave band impulse peak insertion loss: a method to characterize hearing protection devices when firing with small arms. *Proceedings 26th International Congress on Sound and Vibration, ICSV26, Montreal*.

Schroeter J, Poesselt C (1986). The use of acoustical test fixtures for the measurement of hearing protector attenuation. Part II: Modeling the external ear, simulating bone conduction, and comparing test fixture and real-ear data. *J. Acoust. Soc. Am.*, 80, 505-527.

Sgard F. Comunicación personal, 5 de abril de 2022.

Sjostrom M, Lewne M, Alderling M, Willix P, Berg P, Gustavsson P, Svartengren M (2013). A job-exposure matrix for occupational noise: development and validation. *Ann. Occup. Hyg.* 57:774-783.

Smooenburg GF (1982). Damage-risk criteria for impulse noise. In: RP Hamernik, D Henderson, RJ Salvi (Eds.). *New perspectives on noise-induced hearing loss*. New York: Raven Press.

Starck J, Toppila E, Pyykko I (2003). Impulse noise and risk criteria. *Noise and Health* 5:63-73.

Taylor W, Pelmeur PL (1976). Noise levels and hearing thresholds in the drop forging industry, Med. Res. Council Project Rep., Grant G972/784/C, London, England.

Walker IG, Behar A (1971). Limitations in the use of tape-recording for impulse noise measurement and TTS studies, *Proceedings of the 7th International Congress on Acoustics*, Akademia Kiado, Budapest.

Williams R (2012). Assessment of the Applicability of ANSI S12.42-2010 as a General Measure of Protection from Impulsive Noise by Measurement of Impulsive and Continuous Noise Insertion Loss of the HGU-56/P and the CEP, US Army Aeromedical Research Laboratory, Report No. 2012-14.

Wong GSK, Embleton TFW (1995). *AIP Handbook of condenser microphones (Theory, Calibration, and Measurements)*. Woodbury, NY: American Institute of Physics Press.

Xie HW, Qiu W, Heyer NJ, Zhang MB, Zhang P, Zhao YM, Hamernik RP (2016). The use of the kurtosis-adjusted cumulative noise exposure metric in evaluating the hearing loss risk for complex noise. *Ear Hear.* 37:312-323.

Yamamura K, Takashima H, Miyake H, Okada A (1974). Effect of combined impact and steady state noise on Temporary Threshold Shift (TTS), *Med. Lav.* 65:215-223.

Ylikoski ME (1994). Prolonged exposure to gunfire noise among professional soldiers. *Scand. J. Work Env. Health* 20:87-92.

Zechmann E (2022). Impulsive Noise Meter (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/25632-impulsive-noise-meter>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved March 17, 2022.

ANEXO 1: RESULTADOS EXPERIMENTALES

A.1.1 RESULTADOS DE MEDIDAS EN SALA ANECOICA

Fuente de ruido	Measurement time	Calculation	Function	01. Peak position	01. Peak	04. Signal rise time	07. A-duration	12. B-duration	15. Sound Exposure Level
Globo1	15-10-2021 10:00:03	ImpulseNoise	Expanded Time(Left Ear) - Mark 1	0.056	134.4	0.296	0.371	2.219	98.43349247
Globo1	15-10-2021 10:00:03	ImpulseNoise	Expanded Time(Right Ear) - Mark 1	0.056	135.1	0.302	0.366	2.202	98.25931297
Globo2	15-10-2021 10:00:32	ImpulseNoise	Expanded Time(Left Ear) - Mark 1	0.056	133.8	0.175	0.519	2.780	99.69817561
Globo2	15-10-2021 10:00:32	ImpulseNoise	Expanded Time(Right Ear) - Mark 1	0.056	133.8	0.136	0.524	3.184	99.44453282
Globo3	15-10-2021 10:00:53	ImpulseNoise	Expanded Time(Left Ear) - Mark 1	0.056	130.9	0.339	0.584	3.575	98.27931384
Globo3	15-10-2021 10:00:53	ImpulseNoise	Expanded Time(Right Ear) - Mark 1	0.056	130.9	0.360	0.600	3.538	98.21292125
Globo4	15-10-2021 10:01:22	ImpulseNoise	Expanded Time(Left Ear) - Mark 1	0.056	134.5	0.374	0.462	2.906	99.46041733
Globo4	15-10-2021 10:01:22	ImpulseNoise	Expanded Time(Right Ear) - Mark 1	0.056	136.0	0.386	0.480	2.985	99.2614426
Globo5	15-10-2021 10:01:49	ImpulseNoise	Expanded Time(Left Ear) - Mark 1	0.056	131.7	0.412	0.531	3.175	98.11558748
Globo5	15-10-2021 10:01:49	ImpulseNoise	Expanded Time(Right Ear) - Mark 1	0.056	131.0	0.374	0.552	3.283	97.82584957
Revolver1	15-10-2021 10:03:14	ImpulseNoise	Expanded Time(Left Ear) - Mark 1	0.055	148.7	0.009	0.159	0.738	106.58477
Revolver1	15-10-2021 10:03:14	ImpulseNoise	Expanded Time(Right Ear) - Mark 1	0.055	149.3	0.009	0.147	0.763	105.9860151
Revolver2	15-10-2021 10:03:30	ImpulseNoise	Expanded Time(Left Ear) - Mark 1	0.055	147.3	0.016	0.195	0.919	106.8051589
Revolver2	15-10-2021 10:03:30	ImpulseNoise	Expanded Time(Right Ear) - Mark 1	0.055	148.2	0.014	0.148	0.638	106.1320696
Revolver3	15-10-2021 10:09:58	ImpulseNoise	Expanded Time(Left Ear) - Mark 1	0.055	147.4	0.030	0.179	0.830	106.8632004
Revolver3	15-10-2021 10:09:58	ImpulseNoise	Expanded Time(Right Ear) - Mark 1	0.055	148.3	0.030	0.176	3.276	109.21425369
Revolver4	15-10-2021 10:10:14	ImpulseNoise	Expanded Time(Left Ear) - Mark 1	0.055	148.3	0.008	0.166	0.811	107.2149893
Revolver4	15-10-2021 10:10:14	ImpulseNoise	Expanded Time(Right Ear) - Mark 1	0.055	148.6	0.009	0.175	0.926	106.6526077
Revolver5	15-10-2021 10:10:30	ImpulseNoise	Expanded Time(Left Ear) - Mark 1	0.055	148.7	0.009	0.159	0.772	105.7261657
Revolver5	15-10-2021 10:10:30	ImpulseNoise	Expanded Time(Right Ear) - Mark 1	0.055	149.0	0.009	0.156	0.617	105.2095225
Pistola1	15-10-2021 10:15:28	ImpulseNoise	Expanded Time(Left Ear) - Mark 1	0.056	135.4	0.033	0.073	3.353	96.08304148
Pistola1	15-10-2021 10:15:28	ImpulseNoise	Expanded Time(Right Ear) - Mark 1	0.056	136.8	0.083	0.118	2.777	97.81603126
Pistola2	15-10-2021 10:15:43	ImpulseNoise	Expanded Time(Left Ear) - Mark 1	0.055	139.8	0.026	0.081	1.846	101.0901213
Pistola2	15-10-2021 10:15:43	ImpulseNoise	Expanded Time(Right Ear) - Mark 1	0.056	141.2	0.047	0.105	1.478	100.274432
Pistola3	15-10-2021 10:15:56	ImpulseNoise	Expanded Time(Left Ear) - Mark 1	0.056	137.0	0.008	0.050	2.945	98.15750158
Pistola3	15-10-2021 10:15:56	ImpulseNoise	Expanded Time(Right Ear) - Mark 1	0.056	137.3	0.008	0.065	2.878	99.77802286
Pistola4	15-10-2021 10:16:11	ImpulseNoise	Expanded Time(Left Ear) - Mark 1	0.056	138.3	0.110	0.210	2.965	100.860491
Pistola4	15-10-2021 10:16:11	ImpulseNoise	Expanded Time(Right Ear) - Mark 1	0.056	137.3	0.040	0.192	1.389	99.33253547
Pistola5	15-10-2021 10:16:31	ImpulseNoise	Expanded Time(Left Ear) - Mark 1	0.056	136.8	0.031	0.105	2.529	98.56717034
Pistola5	15-10-2021 10:16:31	ImpulseNoise	Expanded Time(Right Ear) - Mark 1	0.056	135.3	0.031	0.095	3.036	97.94756689
Globo1	15-10-2021 10:00:03	ImpulseNoise	Expanded Time(Muzzle) - Mark 1	0.050	143.6	0.196	0.484	2.951	108.2235675
Globo2	15-10-2021 10:00:32	ImpulseNoise	Expanded Time(Muzzle) - Mark 1	0.050	145.9	0.220	0.394	2.347	109.9914965
Globo3	15-10-2021 10:00:53	ImpulseNoise	Expanded Time(Muzzle) - Mark 1	0.050	144.4	0.333	0.367	2.198	108.4902642
Globo4	15-10-2021 10:01:22	ImpulseNoise	Expanded Time(Muzzle) - Mark 1	0.051	141.9	0.547	0.606	3.653	108.9517508
Globo5	15-10-2021 10:01:49	ImpulseNoise	Expanded Time(Muzzle) - Mark 1	0.051	142.9	0.485	0.506	2.987	108.0740137
Revolver1	15-10-2021 10:03:14	ImpulseNoise	Expanded Time(Muzzle) - Mark 1	0.050	160.4	0.009	0.152	0.754	117.1033458
Revolver2	15-10-2021 10:03:30	ImpulseNoise	Expanded Time(Muzzle) - Mark 1	0.050	161.0	0.009	0.142	0.807	117.4548337
Revolver3	15-10-2021 10:09:58	ImpulseNoise	Expanded Time(Muzzle) - Mark 1	0.050	162.0	0.008	0.114	0.645	117.8041313
Revolver4	15-10-2021 10:10:14	ImpulseNoise	Expanded Time(Muzzle) - Mark 1	0.050	163.2	0.009	0.123	0.709	118.5219783
Revolver5	15-10-2021 10:10:30	ImpulseNoise	Expanded Time(Muzzle) - Mark 1	0.050	159.5	0.011	0.115	0.666	116.5489848
Pistola1	15-10-2021 10:15:28	ImpulseNoise	Expanded Time(Muzzle) - Mark 1	0.050	145.8	0.057	0.169	3.355	108.8469781
Pistola2	15-10-2021 10:15:43	ImpulseNoise	Expanded Time(Muzzle) - Mark 1	0.050	157.2	0.010	0.174	1.005	114.6893587
Pistola3	15-10-2021 10:15:56	ImpulseNoise	Expanded Time(Muzzle) - Mark 1	0.051	146.3	0.009	0.074	2.789	107.409717
Pistola4	15-10-2021 10:16:11	ImpulseNoise	Expanded Time(Muzzle) - Mark 1	0.051	151.5	0.056	0.163	1.587	111.1915825
Pistola5	15-10-2021 10:16:31	ImpulseNoise	Expanded Time(Muzzle) - Mark 1	0.051	147.4	0.039	0.146	1.768	108.3604323

A.1.2 RESULTADOS DE MEDIDAS EN SALA REVERBERANTE

Fuente de ruido	Measurement time	Calculation	Function	01. Peak position	01. Peak	04. Signal rise time	07. A-duration	12. B-duration	15. Sound Exposure Level
Globo1	15-10-2021 11:18:03	ImpulseNoise	Expanded Time(Left Ear) - Mark 1	0.056	134.3	0.172	0.453	2.732	98.5
Globo1	15-10-2021 11:18:03	ImpulseNoise	Expanded Time(Right Ear) - Mark 1	0.056	135.0	0.153	0.448	2.654	100.1
Globo2	15-10-2021 11:19:59	ImpulseNoise	Expanded Time(Left Ear) - Mark 1	0.056	132.3	0.370	0.412	2.455	96.5
Globo2	15-10-2021 11:19:59	ImpulseNoise	Expanded Time(Right Ear) - Mark 1	0.056	132.6	0.367	0.594	3.585	98.2
Globo3	15-10-2021 11:20:23	ImpulseNoise	Expanded Time(Left Ear) - Mark 1	0.057	128.0	0.433	0.674	3.999	96.5
Globo3	15-10-2021 11:20:23	ImpulseNoise	Expanded Time(Right Ear) - Mark 1	0.056	128.7	0.319	0.654	3.792	98.1
Globo4	15-10-2021 11:20:47	ImpulseNoise	Expanded Time(Left Ear) - Mark 1	0.056	131.3	0.413	0.618	3.729	96.7
Globo4	15-10-2021 11:20:47	ImpulseNoise	Expanded Time(Right Ear) - Mark 1	0.056	131.4	0.395	0.594	3.543	98.4
Globo5	15-10-2021 11:21:14	ImpulseNoise	Expanded Time(Left Ear) - Mark 1	0.056	126.6	0.396	0.558	3.552	94.2
Globo5	15-10-2021 11:21:14	ImpulseNoise	Expanded Time(Right Ear) - Mark 1	0.056	128.5	0.389	0.544	3.224	96.1
Revolver1	15-10-2021 11:26:34	ImpulseNoise	Expanded Time(Left Ear) - Mark 1	0.056	144.9	0.011	0.142	158.668	113.5
Revolver1	15-10-2021 11:26:34	ImpulseNoise	Expanded Time(Right Ear) - Mark 1	0.056	145.2	0.012	0.179	181.075	114.7
Revolver2	15-10-2021 11:41:13	ImpulseNoise	Expanded Time(Left Ear) - Mark 1	0.055	146.9	0.008	0.172	171.550	117.9
Revolver2	15-10-2021 11:41:13	ImpulseNoise	Expanded Time(Right Ear) - Mark 1	0.055	147.5	0.009	0.188	189.194	118.3
Revolver3	15-10-2021 11:51:51	ImpulseNoise	Expanded Time(Left Ear) - Mark 1	0.055	150.5	0.009	0.166	167.159	117.0
Revolver3	15-10-2021 11:51:51	ImpulseNoise	Expanded Time(Right Ear) - Mark 1	0.055	150.7	0.009	0.168	167.300	117.5
Revolver4	15-10-2021 11:52:42	ImpulseNoise	Expanded Time(Left Ear) - Mark 1	0.055	149.4	0.009	0.146	153.977	116.5
Revolver4	15-10-2021 11:52:42	ImpulseNoise	Expanded Time(Right Ear) - Mark 1	0.055	149.8	0.008	0.157	157.996	117.2
Pistola1	15-10-2021 11:53:40	ImpulseNoise	Expanded Time(Left Ear) - Mark 1	0.055	151.5	0.008	0.166	1.039	110.2
Pistola1	15-10-2021 11:53:40	ImpulseNoise	Expanded Time(Right Ear) - Mark 1	0.055	151.6	0.008	0.165	1.099	111.4
Pistola2	15-10-2021 11:54:09	ImpulseNoise	Expanded Time(Left Ear) - Mark 1	0.055	148.6	0.009	0.324	1.988	110.2
Pistola2	15-10-2021 11:54:09	ImpulseNoise	Expanded Time(Right Ear) - Mark 1	0.055	148.0	0.009	0.218	1.314	109.8
Pistola3	15-10-2021 11:54:46	ImpulseNoise	Expanded Time(Left Ear) - Mark 1	0.056	151.2	0.008	0.266	1.612	112.4
Pistola3	15-10-2021 11:54:46	ImpulseNoise	Expanded Time(Right Ear) - Mark 1	0.056	150.3	0.105	0.289	1.711	112.7
Globo1	15-10-2021 11:18:03	ImpulseNoise	Expanded Time(Muzzle) - Mark 1	0.050	144.4	0.355	0.455	3.723	109.5
Globo2	15-10-2021 11:19:59	ImpulseNoise	Expanded Time(Muzzle) - Mark 1	0.050	141.3	0.274	0.444	4.367	105.9
Globo3	15-10-2021 11:20:23	ImpulseNoise	Expanded Time(Muzzle) - Mark 1	0.050	141.4	0.314	0.515	4.855	106.9
Globo4	15-10-2021 11:20:47	ImpulseNoise	Expanded Time(Muzzle) - Mark 1	0.050	138.2	0.289	0.622	5.424	106.9
Globo5	15-10-2021 11:21:14	ImpulseNoise	Expanded Time(Muzzle) - Mark 1	0.050	134.9	0.249	0.641	5.386	103.5
Revolver1	15-10-2021 11:26:34	ImpulseNoise	Expanded Time(Muzzle) - Mark 1	0.050	158.8	0.010	0.089	0.605	113.4
Revolver2	15-10-2021 11:41:13	ImpulseNoise	Expanded Time(Muzzle) - Mark 1	0.050	158.8	0.009	0.119	3.726	114.8
Revolver3	15-10-2021 11:51:51	ImpulseNoise	Expanded Time(Muzzle) - Mark 1	0.050	157.6	0.009	0.079	6.936	115.8
Revolver4	15-10-2021 11:52:42	ImpulseNoise	Expanded Time(Muzzle) - Mark 1	0.050	155.7	0.009	0.094	6.664	114.2
Pistola1	15-10-2021 11:53:40	ImpulseNoise	Expanded Time(Muzzle) - Mark 1	0.050	170.5	0.075	0.282	16.631	130.2
Pistola2	15-10-2021 11:54:09	ImpulseNoise	Expanded Time(Muzzle) - Mark 1	0.050	171.4	0.009	0.227	0.973	129.9
Pistola3	15-10-2021 11:54:46	ImpulseNoise	Expanded Time(Muzzle) - Mark 1	0.050	170.6	0.009	0.219	14.945	128.4

ANEXO 2: MANUAL INTERNO DE USO Y OPERACIÓN DEL EQUIPAMIENTO IMPULSE NOISE EVALUATION BRUEL & KJAER 7963

Este anexo describe las características generales del sistema de evaluación de ruido impulsivo Kit hardware, basado en el sistema Pulse© TYPE 7963, para ser ocupado en mediciones en terreno por personal capacitado. El sistema está compuesto por un módulo de adquisición de datos de 3 canales LAN-XI 3052, con su módulo de batería 2831, 3 micrófonos de presión modelo 4994-A y un notebook de altas prestaciones, que cumple los requerimientos del sistema Pulse para su correcto funcionamiento. Se incluye una descripción general del hardware y software, el proceso de calibración, el protocolo de medición, incluyendo cuidados operativos y, finalmente, un pequeño apartado para indicar cómo interpretar los datos obtenidos y su exportación para análisis posteriores.

A.2.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE EVALUACIÓN DE RUIDO DE IMPULSO

El sistema de evaluación de ruido impulsivo de la empresa danesa Bruel & Kjaer se dispone como un kit y se designa con el modelo 7963. Este sistema se basa en la plataforma PULSE de la misma empresa, que permite desarrollar la adquisición y análisis de señales impulsivas mediante el uso de un computador. En el caso del modelo 7963 se incorpora, además, el software PULSE Labshop, con los módulos necesarios para medir ruidos impulsivos.

A.2.1.1 Descripción del Hardware

a) Módulo de adquisición de datos 3 canales LAN-XI, tipo 3052 (ver Fig. A1): es un sistema portátil completo que utiliza tres micrófonos de ¼" para realizar mediciones simultáneas en el oído izquierdo, el oído derecho y en un punto cercano a la fuente de ruido impulsiva (ver Fig. A5). Posee una capacidad de tasa de muestreo de 262.144 muestras/segundo, cumpliendo ambos estándares militares, MIL-1474-D y MIL-1474-E.



Figura A1: Módulo de adquisición de datos de 3 canales de alta frecuencia LAN-XI, tipo 3052.

b) Micrófono de campo de presión de $\frac{1}{4}$ " pre-polarizado, tipo 4944-A (ver Fig. A2): Los micrófonos tipo 4944-A, son de alta presión, pre-polarizados (con un preamplificador CCLD), que poseen una sensibilidad nominal de 0.9 mV/Pa, una respuesta en frecuencia que va de 16 Hz a 70 kHz (± 2 dB), con una frecuencia límite inferior de 7 a 9 Hz. El rango dinámico de los micrófonos supera los 169 dB de nivel de presión sonora y el máximo nivel de presión sonora admitido es de 182 dB (peak).



Figura A2: Micrófono de campo de presión modelo 4944-A.

c) Módulo de batería para LAN-XI, modelo 2831 (ver Fig. A3): es un módulo complementario, que permite dar autonomía de trabajo al módulo 3052.



Figura A3: Módulo de batería para LAN-XI, modelo 2831.

d) Pistófono con adaptador DP-0775 (ver Fig. A4): permite, en conjunto con el módulo del software Calibration Master, ejecutar el procedimiento de calibración para cada micrófono. Es capaz de emitir una señal acústica normalizada de 1 kHz a 94 dB y 114 dB, según se requiera. Para emitir un tono puro a 94 dB se debe encender el calibrador, pulsando el botón on/off. Si se requiere emitir un tono a 114 dB, se debe mantener presionado el botón +20dB.



Figura A4: Calibrador de nivel sonoro (pistófono), clase 1, tipo 4231 con adaptador DP-0775.

e) Para interconectar todo el equipamiento también se utilizarán cables, trípode, un sistema de sujeción de cabeza y un cable de red, entre otros accesorios.

f) Adicionalmente, el sistema Pulse requiere para su funcionamiento un notebook de altas prestaciones, tanto en procesamiento, memoria y almacenamiento. En este caso, se emplea un notebook de marca DELL, modelo Latitude 5424. El equipo se conecta al módulo de adquisición LAN-XI, tipo 3052, utilizando un cable de red F-UTP/STP

apantallado. En la Fig. A5 se muestra un esquema de montaje experimental del equipamiento para hacer las mediciones de ruido impulsivo en el caso de un operador de un fusil.

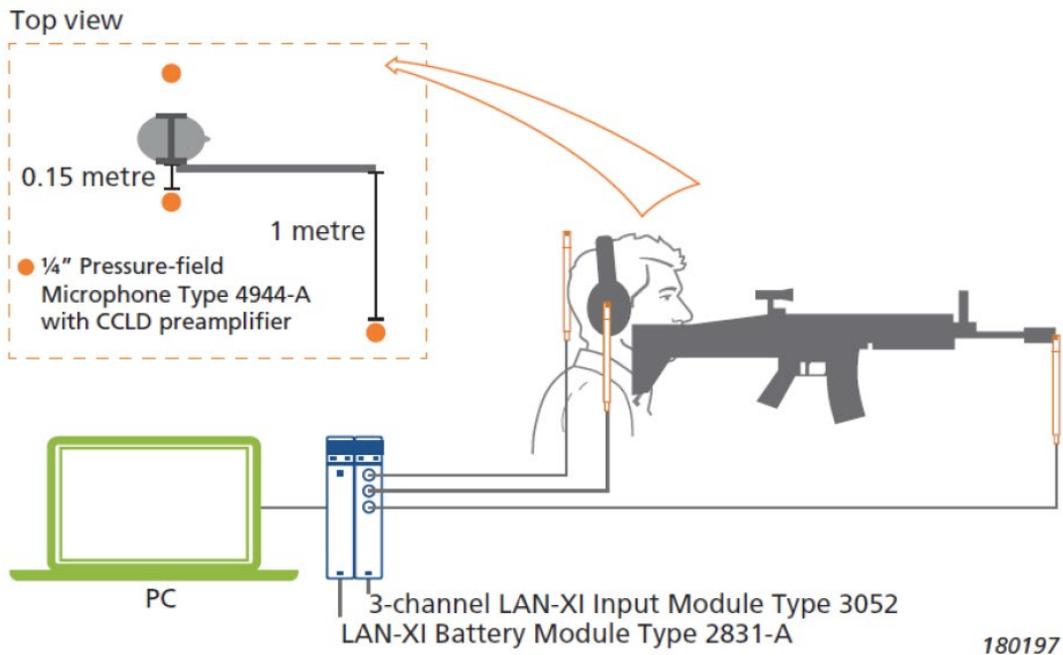


Figura A5: Disposición típica del arreglo experimental para medida de ruido impulsivo mediante el sistema B&K 7963. Fuente: Bruel & Kjaer.

A.2.1.2 Descripción del Software

El software PULSE© Type 7963 es el corazón del sistema de evaluación de ruido impulsivo. Es donde se realizan los procedimientos de calibración, preparación y ejecución de las mediciones, como también, el procesamiento y cálculo en tiempo real, para luego presentar los resultados de todas las métricas en pantalla y su almacenamiento o exportación a un archivo externo (Excel©).

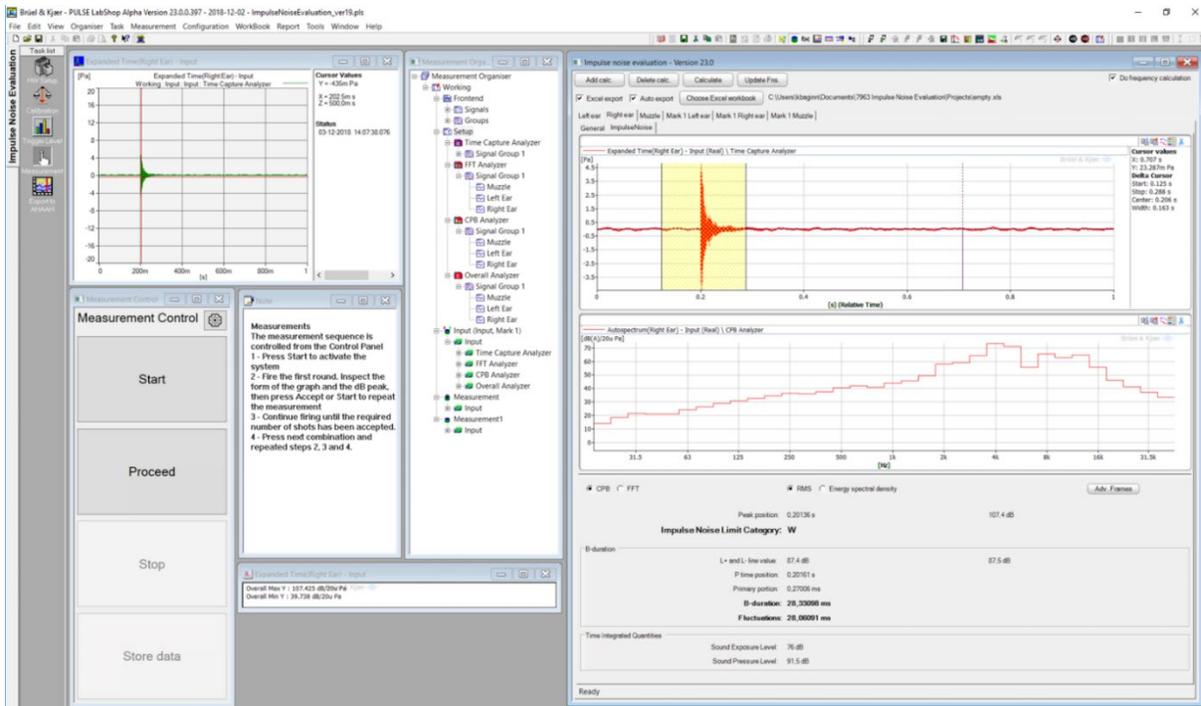


Figura A6: Imagen de referencia del software Pulse © Type 7963.

El sistema Pulse realiza mediciones simultáneas en ambos oídos y en la fuente de ruido, para luego realizar los cálculos de diversas métricas en los dominios del tiempo y frecuencia. Antes de cada medición se debe realizar un procedimiento de calibración mediante la rutina *Calibration Master* y una vez que se efectúa cada medición, los parámetros de ruido impulsivo se procesan, calculan y muestran inmediatamente en pantalla. Como en la práctica siempre es necesario realizar muchas mediciones, todos los datos de la sesión de medición quedan disponibles en un archivo de proyecto con extensión propietaria de Pulse. Además, las señales de audio registradas en cada sesión pueden ser exportadas a un formato de audio tipo WAV y todas las métricas obtenidas para cada set de medición se pueden exportar a un archivo Excel®. Por este motivo, es útil tener instalada una versión de Microsoft Office que permita leer y/o editar este tipo de archivos.

A continuación, se describen las plantillas o ventanas del software Pulse© necesarias para la realización correcta de las mediciones de ruido impulsivo: *HWSetup*, *Calibration*, *Trigger Level*, y *Measurement*.

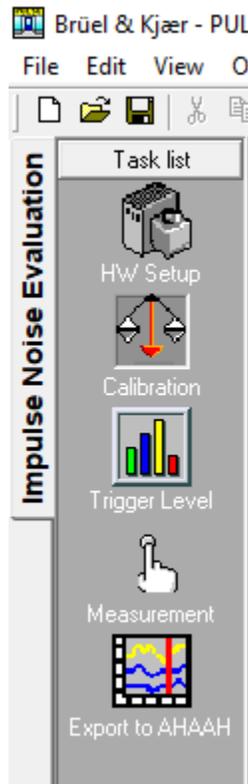


Figura A7: Menú básico funcionamiento Pulse©

a) HW Setup: es donde Pulse© comprueba que los distintos elementos del sistema están bien conectados físicamente para llevar a cabo las mediciones, es decir, que el módulo de adquisición LAN-XI 3052 esté encendido y conectado a los 3 micrófonos de presión y que también se encuentre conectado al notebook vía cable de red (ver Fig. A8). Si alguna de las conexiones no está bien realizada, Pulse© emite un mensaje de error e indica donde está el problema, para revisar y solucionarlo.

Hardware Setup Measurement Template: Working						
All	Basic	Channel	DOF	Transducer ID	Transducer Type	Transducer
Filter	Status	Signal Name	Input Sensitivity	Max Peak Input	Max Peak Input (Absolute)	Channel Input
1.1.1	■	Muzzle	768,3uV/Pa	10V	13,02k Pa	CCLD
1.1.2	■	Left Ear	699,5uV/Pa	10V	14,3k Pa	CCLD
1.1.3	■	Right Ear	780,4uV/Pa	10V	12,81k Pa	CCLD

Configuration Organiser

- Stand alone LAN-XI Modules (frame 1)
 - 3052-A-030 3-ch Input Module LAN-XI 102.4kHz (Mic, CCLD, V) (slot 1)
 - 4944 A Muzzle
 - 4944 A Left Ear
 - 4944 A Right Ear

Figura A8: Tabla resumen funcionamiento Hardware en Pulse©

b) Calibration: es donde Pulse© ejecuta el proceso de calibración, en conjunto con el pistófono con adaptador DP-0775 (ver Fig. A4), indicando en pantalla el estado de progreso del proceso de calibración para cada micrófono, con un indicador en verde si

superó con éxito y en rojo si hubo algún problema. En este último caso, se debe realizar nuevamente la calibración completa, para los 3 micrófonos (ver Sección A.2.2).

c) Trigger Level: es donde Pulse© permite configurar los parámetros internos del software (ver Fig. A9), relacionado con las condiciones de las señales acústicas a medir en terreno. Se pueden modificar, por ejemplo, el tiempo de respuesta a la señal de ruido impulsivo específica, dada una condición especial de terreno.

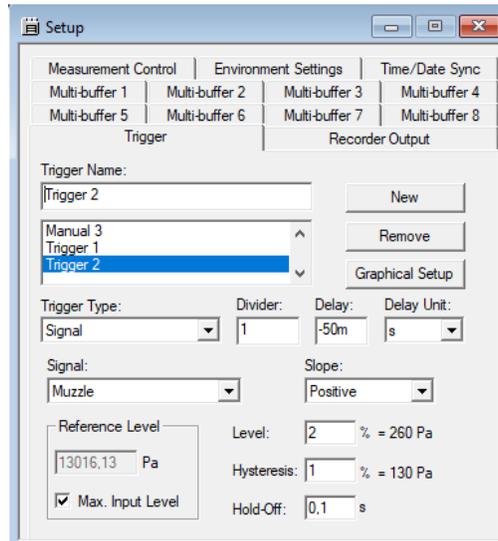


Figura A9: Menú de configuración Trigger en Pulse©

d) Measurement: es donde Pulse©, ejecuta la rutina de medición propiamente tal, el cálculo de métricas y el despliegue de información en pantalla, para finalmente ofrecer las opciones para guardado y exportación de los datos y métricas obtenidas a un archivo. Tiene 4 etapas, todas ellas automáticas: *Start*, *Proceed*, *Stop* y *Store data*.

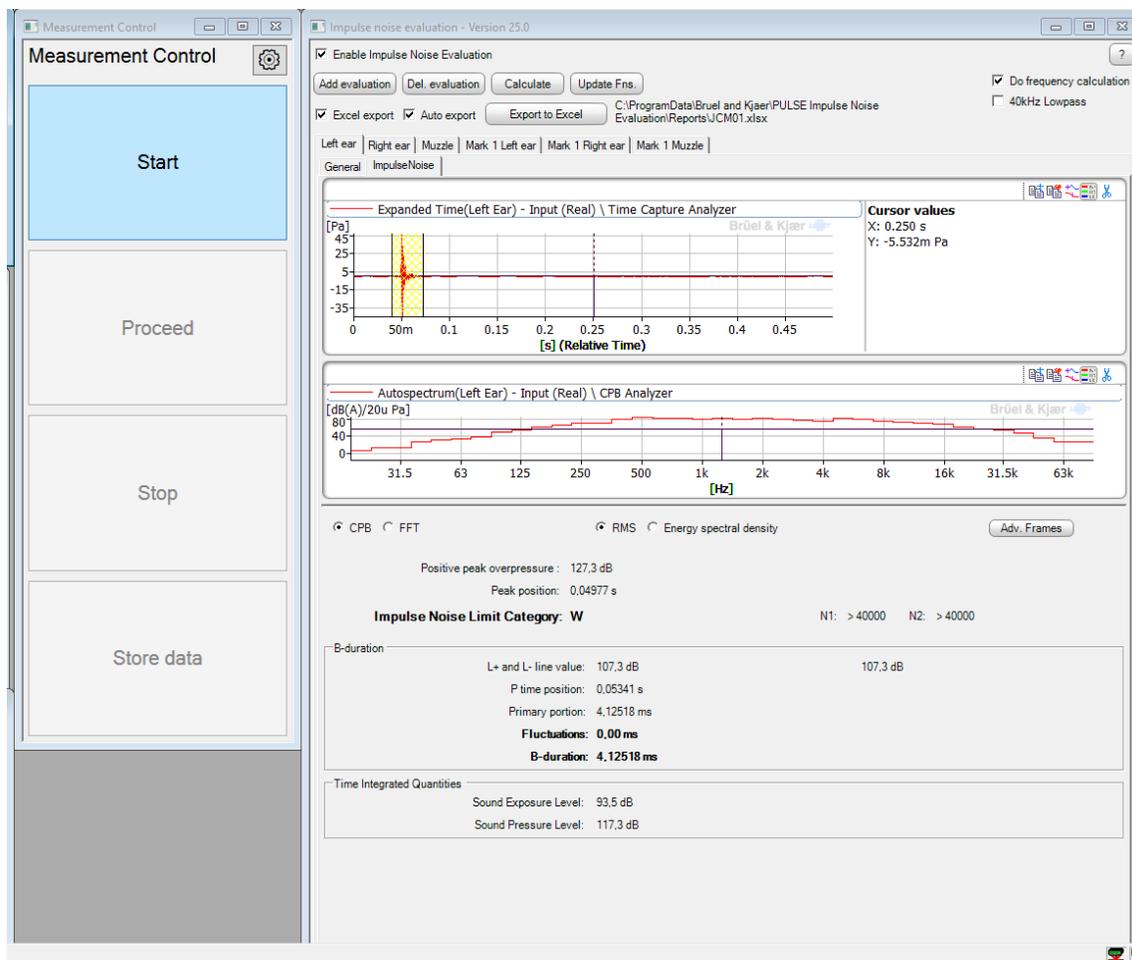


Figura A10: Menú de control de mediciones en Pulse©

A.2.2 CALIBRACIÓN DEL SISTEMA

El proceso de calibración consiste en verificar que los parámetros del sistema de evaluación de ruido impulsivo estén correctos y se aplica en todo escenario de medición de parámetros físicos donde se utilice instrumental de precisión. Es necesario efectuarlo cada vez que realice un nuevo set de mediciones o haya algún cambio en las condiciones ambientales en el lugar de medición. Así, se obtienen resultados con una fiabilidad máxima, para que la medición pueda ser considerada válida.

El sistema Pulse © incluye una rutina de calibración automatizada, llamada *Calibration Master*, que permite comprobar el buen funcionamiento del sistema.

Para realizar este procedimiento, se deben seguir los siguientes pasos previos:

- Instalar el módulo de adquisición 3052, con su batería de respaldo 2831.
- Conectar los micrófonos tipo 4944, al módulo de adquisición 3052.

- Ubicar e instalar los micrófonos en la posición de medición real.
- Desde el software basado en Pulse©, se debe ejecutar la rutina *Calibration Master*, que inicia el proceso de calibración en forma automática para cada transductor. El operario debe ir alternando el calibrador 4231 entre los tres micrófonos, hasta concluir el proceso. Además, el sistema permite crear un archivo histórico de calibraciones para cada transductor (micrófono), que permitirá dar seguimiento a posibles variaciones en la calibración de cada dispositivo.

A.2.3 MEDICIONES

Para llevar a cabo el procedimiento de medición en forma exitosa, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Verificar que el sistema completo, incluyendo módulos de adquisición y batería, micrófonos y Notebook, estén correctamente interconectados y energizados, utilizando el módulo de batería previamente cargado.
- Configurar las opciones de *trigger*, dependiendo de las condiciones de medición en terreno.
- Realizar el proceso de calibración, según detalle (ver Sección A.2.2).
- Proceder a realizar las mediciones y guardar los archivos de datos.

Nota: Un lugar de medición muy reverberante puede afectar el desempeño del sistema, para el cálculo de métricas en tiempo real. Esto puede modificarse en la ventana *measurement* del software basado en Pulse©.

A.2.4 REPORTE DE RESULTADOS

Como se ha mencionado anteriormente, el sistema de evaluación de ruido impulsivo, basado en Pulse ©, despliega y entrega la información de las métricas, en tiempo real y en pantalla (ver Fig. A11). Sin embargo, siempre será necesario y oportuno guardar y/o exportar los datos obtenidos. El sistema permite guardar toda la información relevante para cada set de mediciones realizadas, que por defecto y diseño se guardan en un formato de proyecto, propietario de B&K. Además, se pueden exportar los datos en formato Excel para analizar posteriormente. También, los eventos registrados se pueden exportar en formato de archivo de audio WAV.

Measurement	Calculation	Function	01. Peak posit	01. Peak	02. 90% pe	02. 90% pea	03. 10% peak	03. 10% pe	04. Signal ri	05. 10% pea	05. 10% pe	06. 10% pe	06. 10% peal
15-10-2021 10: ImpulseNoise	Expanded		0,0559082	134,39767	0,055906	133,48252	0,0556098	114,3977	0,29618	0,0556098	114,3977	0,055981	114,39767
15-10-2021 10: ImpulseNoise	Expanded		0,05605316	135,10965	0,056048	134,1945	0,0557455	115,1096	0,302128	0,0557455	115,1096	0,056111	115,10965
15-10-2021 10: ImpulseNoise	Expanded		0,05023193	143,5536	0,050227	142,63845	0,0500313	123,5536	0,195504	0,0500313	123,5536	0,050515	123,5536
15-10-2021 10: ImpulseNoise	Expanded		0,05596542	130,87339	0,055954	129,95824	0,0556157	110,8734	0,338632	0,0556157	110,8734	0,0562	110,87339
15-10-2021 10: ImpulseNoise	Expanded		0,05610657	130,87502	0,056101	129,95987	0,0557411	110,875	0,360156	0,0557411	110,875	0,056341	110,87502
15-10-2021 10: ImpulseNoise	Expanded		0,05038452	144,44377	0,050379	143,53462	0,050046	124,4498	0,333011	0,050046	124,4498	0,050413	124,44377
15-10-2021 10: ImpulseNoise	Expanded		0,05596542	130,87339	0,055954	129,95824	0,0556157	110,8734	0,338632	0,0556157	110,8734	0,0562	110,87339
15-10-2021 10: ImpulseNoise	Expanded		0,05610657	130,87502	0,056101	129,95987	0,0557411	110,875	0,360156	0,0557411	110,875	0,056341	110,87502
15-10-2021 10: ImpulseNoise	Expanded		0,05038452	144,44377	0,050379	143,53462	0,050046	124,4498	0,333011	0,050046	124,4498	0,050413	124,44377
15-10-2021 10: ImpulseNoise	Expanded		0,05606842	134,493	0,056061	133,57785	0,0556862	114,493	0,374472	0,0556862	114,493	0,056148	114,493
15-10-2021 10: ImpulseNoise	Expanded		0,05620575	136,04386	0,0562	135,13471	0,0558141	116,0499	0,385807	0,0558141	116,0499	0,056234	116,04386
15-10-2021 10: ImpulseNoise	Expanded		0,05057907	141,91577	0,050573	141,00062	0,0500262	121,9158	0,546886	0,0500262	121,9158	0,050632	121,91577
15-10-2021 10: ImpulseNoise	Expanded		0,0561142	131,74719	0,05611	130,83204	0,0556983	111,7472	0,411513	0,0556983	111,7472	0,056229	111,74719
15-10-2021 10: ImpulseNoise	Expanded		0,05619812	131,0101	0,056188	130,09495	0,0558133	111,0101	0,374167	0,0558133	111,0101	0,056365	111,0101
15-10-2021 10: ImpulseNoise	Expanded		0,05052567	142,9477	0,050521	142,03255	0,0500364	122,9477	0,484994	0,0500364	122,9477	0,050542	122,9477
15-10-2021 10: ImpulseNoise	Expanded		0,05498123	148,71353	0,05498	147,79838	0,0549712	128,7135	0,008721	0,0549712	128,7135	0,05513	128,71353
15-10-2021 10: ImpulseNoise	Expanded		0,05516434	149,31579	0,055162	148,40064	0,0551535	129,3158	0,008942	0,0551535	129,3158	0,0553	129,31579
15-10-2021 10: ImpulseNoise	Expanded		0,05009079	160,35941	0,050089	159,44426	0,0500805	140,3594	0,008782	0,0500805	140,3594	0,050233	140,35941
15-10-2021 10: ImpulseNoise	Expanded		0,0549736	147,3332	0,054972	146,41805	0,054956	127,3332	0,015865	0,054956	127,3332	0,055151	127,3332

Figura A11: Archivo Excel de ejemplo con datos de mediciones en Pulse©

Por último, es importante recalcar las ventajas que posee este sistema:

- Configuración simple y rápida, para realizar mediciones en terreno.
- Realiza mediciones simultáneas en ambos oídos y fuente de ruido.
- Cálculo y presentación de resultados directamente a través del software.
- Validación en terreno del valor máximo mostrado después de cada medición.
- Evaluación comparativa de los valores máximos de ruido impulsivo para varios sets de mediciones.
- Tasa/velocidad de muestreo de 262 kHz, que excede la norma militar MIL-STD-1474-E y 1474-E.

El notebook asociado a este sistema posee las siguientes características:

- Notebook Dell Latitude 5424 (Rugged)
- Procesador Intel Core I7-8650U
- Memoria RAM 32 GB RAM DDR4-2666
- Disco SSD 512GB
- Tarjeta de Video independiente AMD 540 4 GB
- Pantalla FHD 1920x1080 14"
- Licencia Windows 10 Pro x64

A.2.5 PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN Y MEDICIÓN

Previo a ejecutar este procedimiento, se debe montar el sistema de evaluación de ruido impulsivo en el lugar donde se realizará la medición, respetando las recomendaciones del fabricante, relativas a la distancia y altura de los micrófonos que captarán la señal de ambos oídos del trabajador, como también para el micrófono que captará la señal de la fuente de ruido impulsivo.

A continuación, se indican los pasos a seguir para ejecutar el procedimiento de calibración:

1) Confirmar que el sistema de evaluación de ruido impulsivo esté bien interconectado, léase módulo de adquisición 3052 con módulo de batería 2831 cargado, micrófonos conectados con cable BNC al módulo 3052, y notebook Dell conectado al módulo de adquisición con cable de red apantallado (ver Fig. A12).



Figura A12: Montaje típico de sistema de evaluación de ruido impulsivo.

2) Iniciar el sistema de medición en el siguiente orden:

2.1) Activar el módulo de batería Type 2831 con Switch frontal a posición “Active” (ver Fig. A13) y esperar hasta que en la pantalla del módulo LAN-XI 3052 se indique “No LAN Link – Single Module”.



Figura A13: Módulo de adquisición LAN-XI 3052 con batería type 2831.

2.2) Iniciar el notebook Dell, esperando hasta que en la pantalla del módulo LAN-XI 3052 se encienda el led “Status” en verde (ver Fig. A14) y en el display se indique “169.254.194.152 Single Module”. Se debe desarrollar un ciclo de conexión exitoso entre el módulo de adquisición y el notebook.



Figura A14: Pantalla en módulo de adquisición LAN-XI 3052.

3) Para iniciar el software basado en Pulse, se debe hacer doble clic en el icono *INE Impulse Noise Evaluation*, ubicado en el escritorio del notebook (ver Fig. A15).



Figura A15: Icono de INE (Impulse Noise Evaluation), ubicado en el escritorio del notebook Dell.

3.1) Al iniciarse el software, este provocará que el módulo LAN-XI 3052 realice un ciclo dinámico de verificación de las conexiones de micrófono, tras lo cual se iluminará al menos uno de los tres canales del módulo (ver Fig. A16).



Figura A16: Ciclo dinámico inicial de módulo LAN-XI 3052.

4) Se debe crear un nuevo archivo de proyecto para el nuevo set de mediciones, utilizando una plantilla predefinida (ver Fig. A17). Se debe seguir la siguiente secuencia: *File-New-From Template*, colocando un nombre al nuevo proyecto. Por defecto, se recomienda utilizar la plantilla *Impulse Noise Evaluation*.

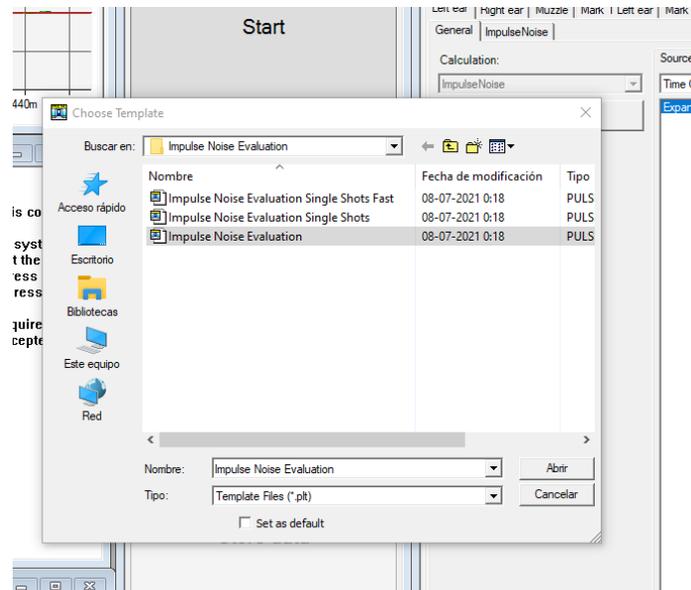


Figura A17: Creación nuevo proyecto de medición basado en plantilla.

4.1) Luego de crear el nuevo proyecto, el módulo LAN-XI 3052 realizará un ciclo dinámico de verificación de las conexiones de micrófono, tras lo cual se iluminarán los 3 canales del módulo. Si ello no ocurre (por ejemplo, solo se ilumina el canal 1), se debe presionar el botón F2 en el notebook, lo que repetirá este proceso.

4.2) Después de unos segundos, verificar que las luces led de cada canal del módulo LAN 3052 estén fijas en color verde (ver Fig. A18). Si esto no ocurre, verificar las conexiones de micrófono, especialmente en los terminales BNC.



Figura A18: Indicador de estado correcto, para 3 canales en LAN-XI 3052.

5) Luego del paso anterior, presionar Alt+F3 para activar la ventana de calibración en el software Pulse Labshop (ver Fig. A19).

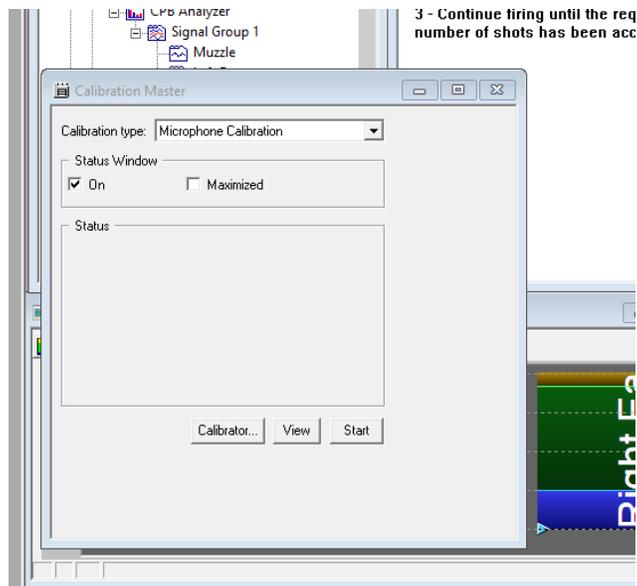


Figura A19: Ventana de calibración en software Pulse.

6) Conectar el calibrador 4231, con el adaptador DP-0775, al primer micrófono (ver Fig. A20). Luego, pulsando el botón de encendido del calibrador, se iniciará la emisión de la señal acústica normalizada.



Figura A20: Micrófono 4944-A conectado a calibrador.

7) Iniciar el proceso de calibración presionando “Start” en la ventana de calibración (ver Fig. A19).

8) Este proceso de calibración se debe repetir para cada micrófono, a medida que el software compruebe y valide la medición en cada transductor. Durante el avance del proceso, en la ventana del software se mostrarán en rojo los micrófonos aún no calibrados y en verde cuando estos ya estén calibrados (ver Fig. A21).

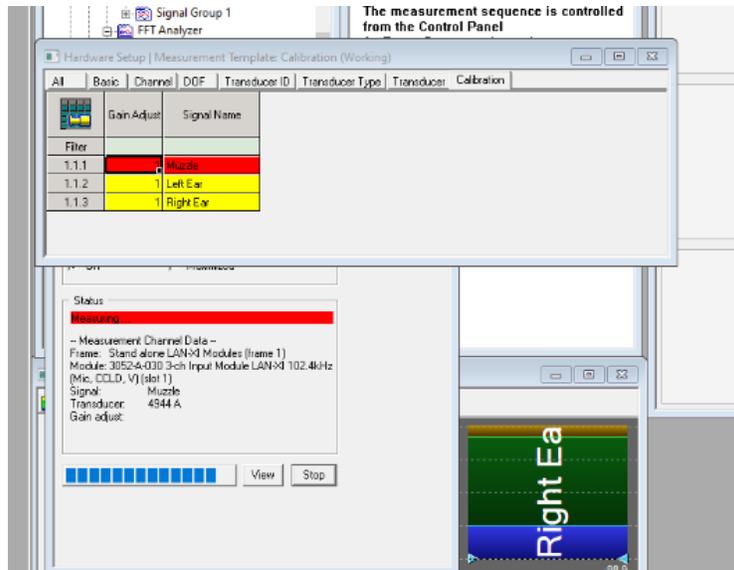


Figura A21: Proceso de calibración de micrófonos 4944-A.

9) Se debe cambiar el pistófono a cada micrófono, hasta que el software indique que se procesó en forma correcta (que se indica cuando la fila del canal cambia a color verde, ver Fig. A22). Si se presenta algún problema, el micrófono no calibrado quedará en estado de color rojo. Si esto ocurre, hay que repetir el procedimiento para los 3 micrófonos, verificando la conexión física de los micrófonos y del módulo de adquisición LAN-XI 3052 al notebook vía el cable de red.

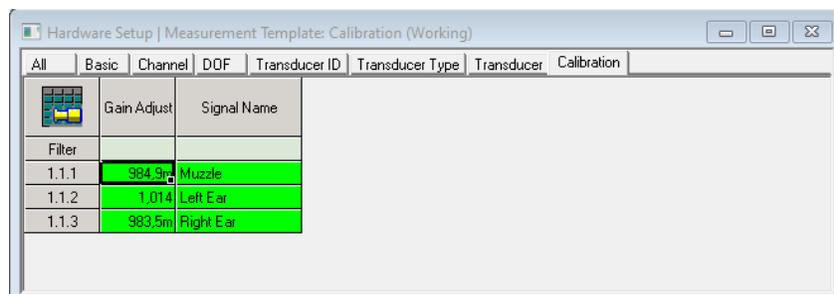


Figura A22: Micrófonos 4944-A calibrados.

A.2.6 AJUSTE DE PARÁMETROS DE MEDICIÓN

Antes de realizar las mediciones de ruido impulsivo, debemos ajustar algunos parámetros que permitirán obtener las señales, en bandas de octava, sin ponderación o lineal, tal como lo requiere el método de evaluación de protectores auditivos desarrollado. A continuación, se describe el procedimiento a seguir:

1.- En la ventana “Measurement Organizer” ir a CPB Analyzer y hacer click con botón derecho del mouse, seleccionando luego la opción Properties (Propiedades).

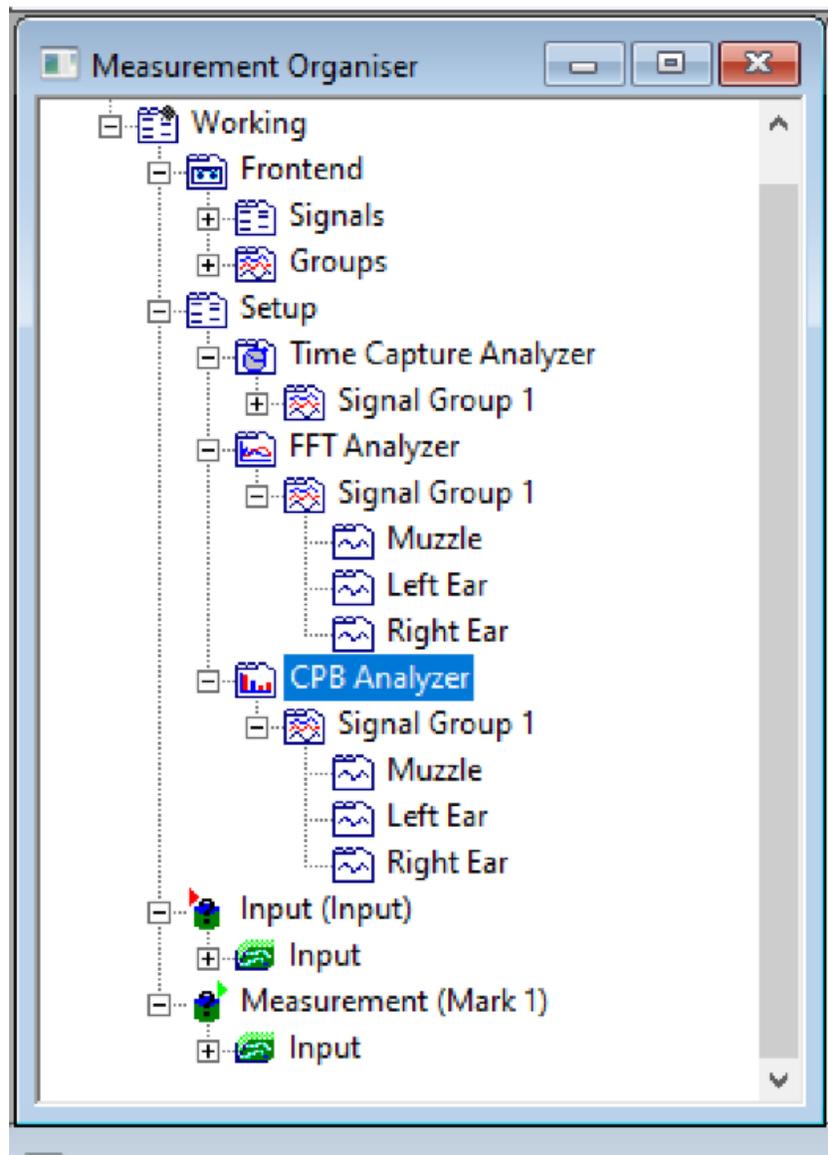


Figura A23: Ventana Measurement Organizer.

2.- Se desplegará la ventana “CPB Analyzer” de edición de parámetros, pero sólo se deberán hacer ajustes en la pestaña “Set-up”:

- a.- En Filter setting Bandwith ajustar la configuración a 1/1 Octave,
- b.- En Lower Centre Frecuency ajustar a 125 Hz
- c.- En Upper Centre Frecuency ajustar a 8 kHz
- d.- En Acoustic Weighting ajustar a Linear

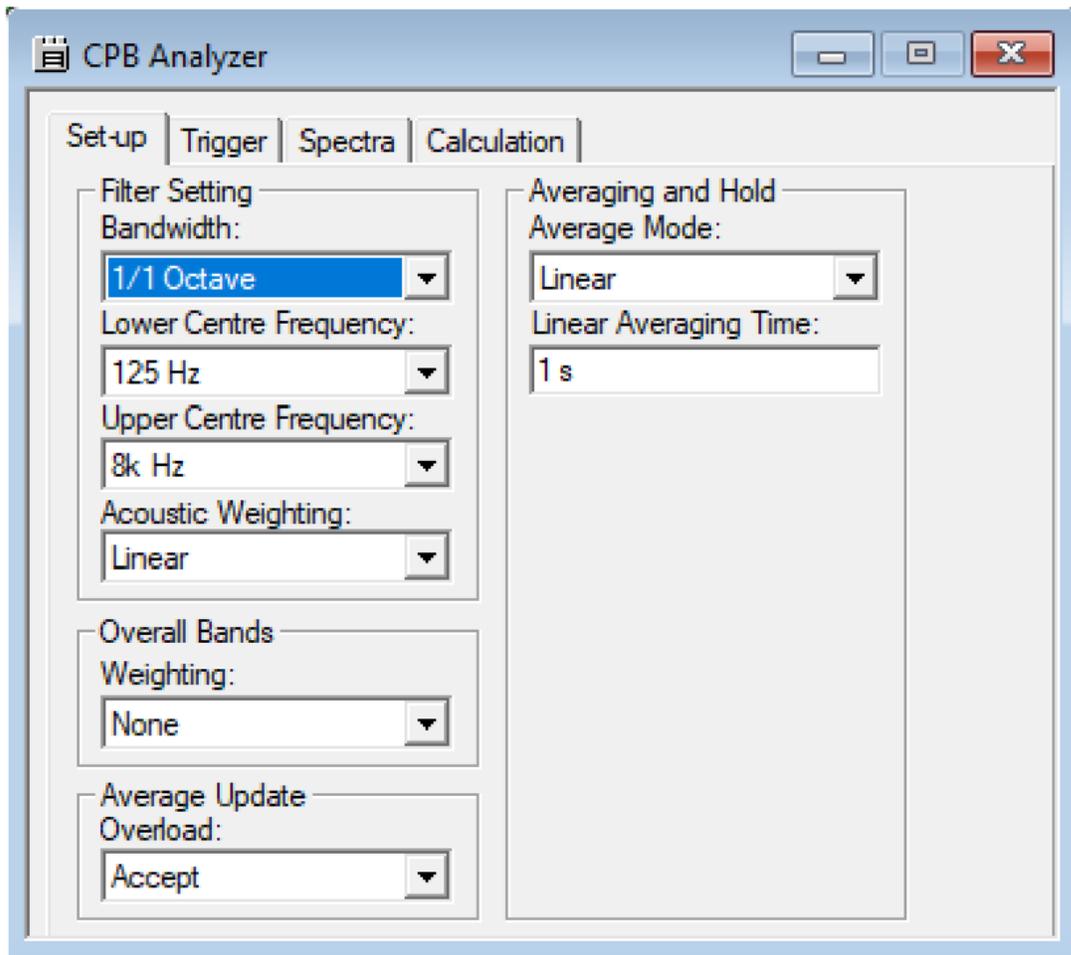


Figura A24: Ventana CPB Analyzer.

En Fig. A25 se muestra una señal de ruido impulsivo en el dominio del tiempo y también en el dominio de la frecuencia, grabada utilizando sistema Pulse, con los parámetros ajustados según este anexo.

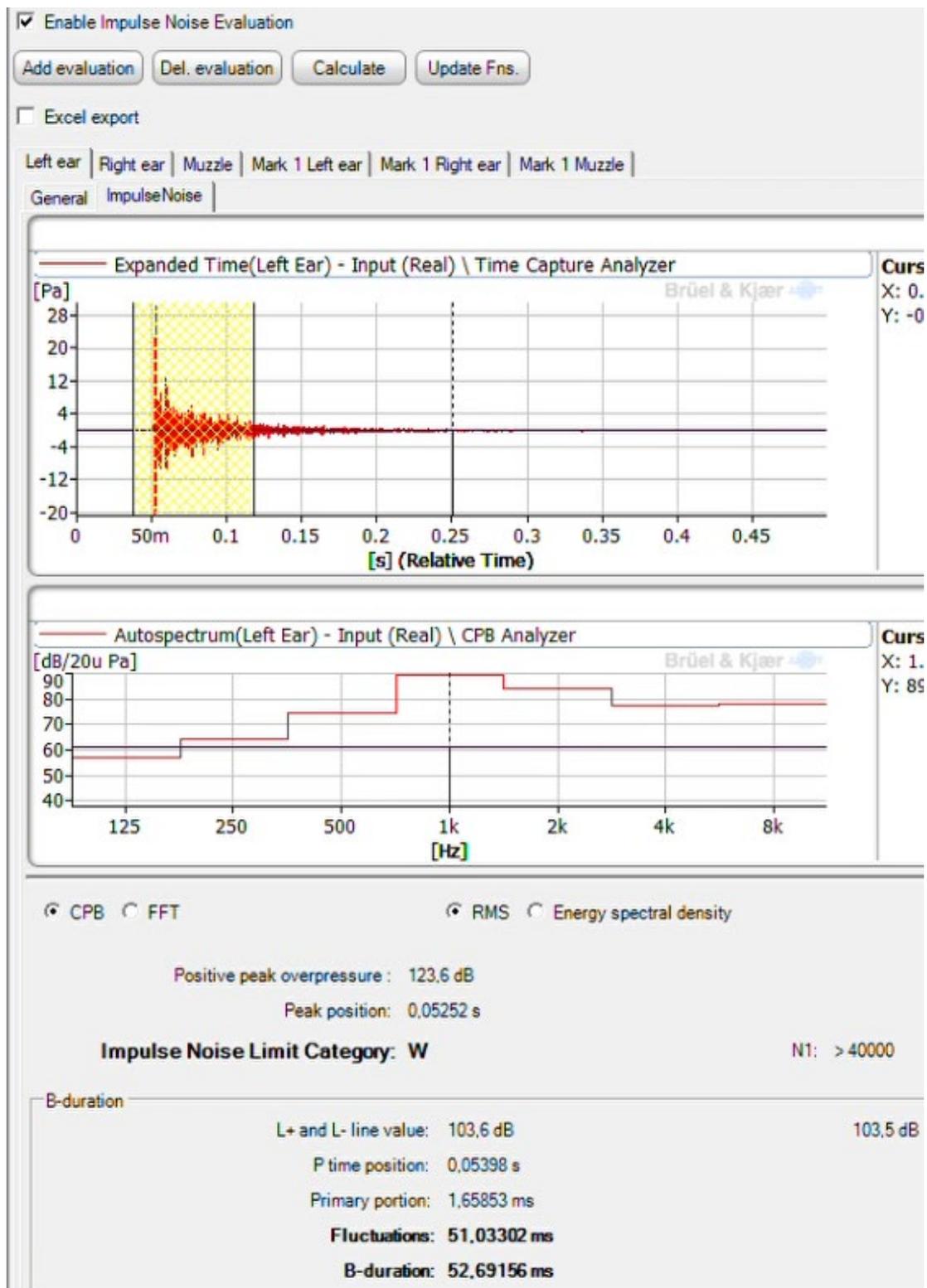


Figura A25: Señal ruido impulsivo en banda de octava y ponderación lineal.

A.2.7 RECOMENDACIONES PARA USO EN TERRENO (CUIDADOS OPERATIVOS)

El equipamiento, en general, es robusto y está diseñado para trabajo en terreno. Sin embargo, es necesario identificar algunos componentes que son críticos en el sistema y para los cuales hay que aplicar criterios de protección específicos, en especial para los micrófonos y cables de conexión.

Se sugiere tener en consideración las siguientes recomendaciones:

- 1) Inspeccionar previamente el lugar de medición y planificar el montaje del sistema, verificando que no haya elementos que impidan una correcta y segura circulación durante la medición, tanto para los equipos como para el operario.
- 2) Ubicar los componentes del sistema sobre una superficie plana y en disposición horizontal, en particular, el módulo de adquisición 3052 y el notebook.
- 3) En el caso de los micrófonos, utilizar siempre que sea posible trípodes para su ubicación y en el caso de uso de la sujeción para cabeza incluido, cerciorarse que el (los) micrófono(s) estén correctamente enganchados al accesorio, para evitar la caída de éstos (ver Figs. A23 y A24).



Figura A23: Montaje de los micrófonos 4944-A en trípode.

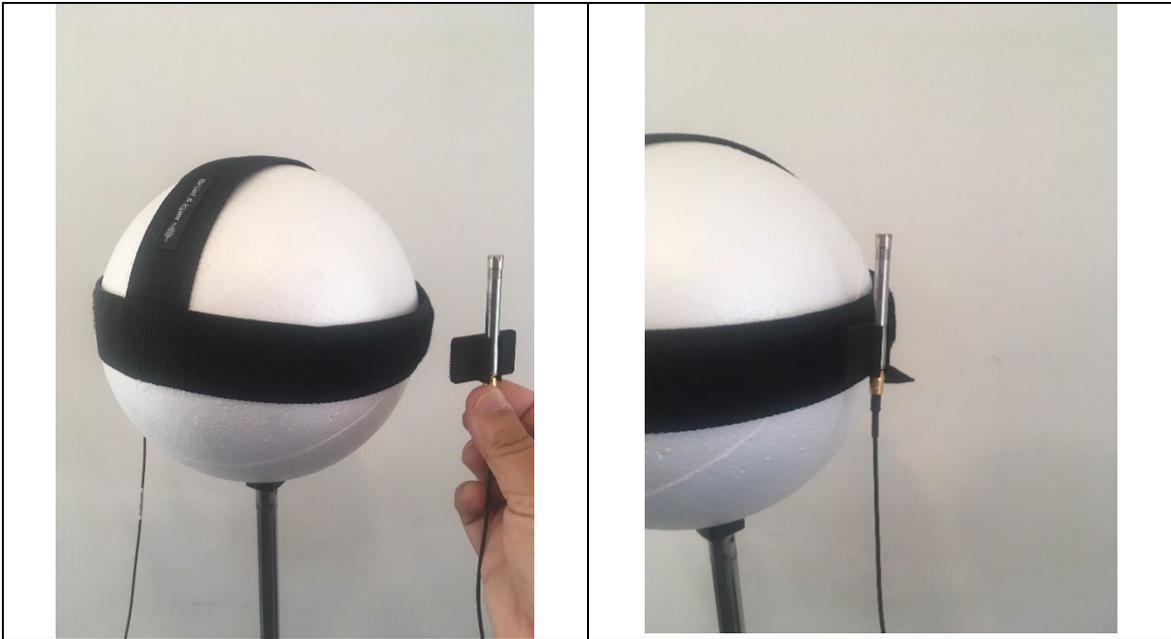


Figura A24: Montaje de los micrófonos 4944-A en la sujeción para cabeza.

4) Al montar el sistema, desplegar el cableado de micrófonos y red en forma segura, tanto para el equipamiento como para el operario, para así evitar tropezar con los cables o producir estiramientos de algún tipo, evitando así su corte interno o externo. Es crítico en este ítem el cable de micrófono, que además de ser propietario y específico del fabricante, su valor es alto y su stock bajo, según el proveedor.

Algunos enlaces a sitios web de utilidad para el uso y comprensión del sistema se incluyen a continuación:

<https://www.bksv.com/en/transducers/acoustic/microphones/microphone-set/4944-a>

<https://www.bksv.com/es/instruments/daq-data-acquisition/lan-xi-daq-system/daq-modules/type-3052>

<https://www.bksv.com/es/instruments/daq-data-acquisition/lan-xi-daq-system/daq-modules/type-2831>

<https://www.bksv.com/pt/transducers/acoustic/calibrators/sound-calibrator-4231>

<https://www.bksv.com/en/transducers/acoustic/accessories/adaptors/dp-0775>

<https://www.bksv.com/en/instruments/daq-data-acquisition/analyzer-system/impulse-noise-evaluation-system>