

Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Física

Unidad Académica de Ingeniería Física

Trabajo Final de Graduación - IF5107

Desarrollo y mejora de procedimientos de calibración  
para cámaras audiométricas y calibradores acústicos

David José Villalobos Garita

d4v1dvg@estudiantec.cr

Programa de Estudios en Calidad, Ambiente y Metrología – Laboratorio de  
Metrología

Setiembre, 2022

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>4</b>
1.1. Identificación de la institución . . . . .	4
1.2. Justificación del trabajo . . . . .	5
1.3. Impacto social y ambiental . . . . .	6
1.4. Objetivos . . . . .	6
1.4.1. Objetivo general . . . . .	6
1.4.2. Objetivos específicos . . . . .	7
1.5. Alcances y limitaciones . . . . .	7
<b>2. Marco teórico</b>	<b>8</b>
2.1. Sobre los calibradores acústicos . . . . .	8
2.2. Sobre las cámaras audiométricas . . . . .	16
<b>3. Metodología</b>	<b>18</b>
3.1. Procedimiento para la calibración de calibradores acústicos . . . . .	18
3.2. Procedimiento para la verificación de cámaras audiométricas . . . . .	20
3.3. Cronograma . . . . .	22
<b>4. Resultados y discusión</b>	<b>23</b>
4.1. Resultados sobre los calibradores acústicos . . . . .	23
4.2. Resultados sobre las cámaras audiométricas . . . . .	33
<b>5. Conclusiones</b>	<b>37</b>

<b>6. Apéndices</b>	<b>40</b>
6.1. Procedimiento elaborado para la calibración de calibradores acústicos . . . . .	40
6.2. Código utilizado para realizar el análisis de varianza del número de repeticiones para la prueba de presión acústica. . . . .	60
6.3. Código utilizado para determinar la incertidumbre del nivel de presión acústica por medio del método de Montecarlo . . . . .	60
6.4. Distribuciones de probabilidad para el nivel de presión acústica según el método de Montecarlo . . . . .	65
6.5. Código utilizado para determinar la incertidumbre de la frecuencia por medio del método de montecarlo . . . . .	65
6.6. Distribuciones de probabilidad para la frecuencia según el método de Montecarlo	67
6.7. Capítulo agregado al procedimiento de verificación de cámaras audiométricas	68
6.8. Resultados de la verificación de la cámara audiométrica del Hospital Rafael Ángel Calderón Guardia . . . . .	72
<b>7. Anexos</b>	<b>73</b>
7.1. Información extraída de la norma ISO 8253-1 . . . . .	74
7.2. Certificado de calibración del calibrador acústico Bruel & Kjaer Tipo 4226 .	76
7.3. Certificado de calibración del sonómetro Larson Davis Modelo 824 . . . . .	86
7.4. Carta de finalización y cumplimiento emitida por PROCAME . . . . .	89

De acuerdo con las regulaciones del programa Licenciatura en Ingeniería Física del Instituto Tecnológico de Costa Rica, el presente documento fue revisado y aprobado por el comité formado por las siguientes personas:

---

Lautaro Javier Ramírez Varas  
Profesor tutor

---

Jose Carlos Castillo Fallas  
Profesor lector

---

Martín Esteban Corrales Quesada  
Profesor lector

## Resumen

Este proyecto tiene como objetivos principales la elaboración de un procedimiento para la calibración de calibradores acústicos, la revisión del procedimiento para verificación de cámaras audiométricas e implementación de mejoras al mismo y el análisis de los resultados de la verificación de la cámara audiométrica del Hospital Rafael Ángel Calderón Guardia. Para el desarrollo del procedimiento para calibración del calibrador acústicos se decidió implementar el método de inserción de voltaje para determinar el voltaje en circuito abierto del micrófono condensador y usar su relación con la sensibilidad de presión del micrófono para determinar el nivel de presión acústica emitido por el calibrador acústico. Se encontró que el procedimiento para verificación de cámaras audiométricas no consideraba el cálculo de incertidumbre de medida, por lo que se propuso un modelo para su estimación y se añadió al procedimiento ya existente. Se analizaron los resultados de verificación del Hospital Rafael Ángel Calderón Guardia, donde se encontró que las condiciones en su interior no cumplen con la atenuación sonora requerida por normas internacionales. Se recomienda realizar un estudio que permita identificar mejoras que se pueda implementar para mejorar el rendimiento de la cámara audiométrica.

*Palabra clave*— Acústica, audiología, inserción de voltaje

## 1. Introducción

### 1.1. Identificación de la institución

El Programa de Estudios en Calidad, Ambiente y Metrología (PROCAME) de la Universidad Nacional (UNA) es un programa que tiene el objetivo principal de contribuir al desarrollo de la metrología y la mejora de calidad en Costa Rica, mediante la integración de la investigación, extensión y docencia (PROCAME, 2017).

El programa cuenta con un laboratorio de metrología, el cuál fue construido sobre un estándar de calidad según la norma INTE-ISO/IEC 17025:2005. El laboratorio ofrece servicios de calibración para magnitudes de acústica, dimensional, masa, volumen, presión, temperatura y Físico-químico.

Actualmente, el laboratorio de metrología de PROCAME se encuentra acreditado por el

Ente Costarricense de Acreditación (ECA) bajo la acreditación número Lc-091. Los alcances de esta acreditación cubren las magnitudes de masa, volumen, temperatura y dimensional (ECA, 2011), por lo que queda claro que el laboratorio posee experiencia con el manejo de estas magnitudes.

El trabajo final de graduación se estaría realizando en el laboratorio de metrología del PROCAME, ubicado en el Campus Omar Dengo de la Universidad Nacional en Heredia, Costa Rica. La propuesta de proyecto fue analizada por la coordinación del laboratorio y se dio el visto bueno para su desarrollo.

Para contactar a un representante de PROCAME se puede escribir a Ernesto Montero Sánchez, quien será la persona asesora durante el desarrollo de este proyecto y es el responsable técnico del laboratorio de metrología. El correo de contacto es: ernesto.montero.sanchez@una.cr.

## 1.2. Justificación del trabajo

PROCAME es parte de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional de Costa Rica, por lo que es de su interés el estudio del efecto humano en el ambiente. Una de las formas en la que el ser humano contamina el ambiente, principalmente es zonas de alta población, es por medio de la contaminación acústica. La contaminación acústica presenta un problema para la salud de las personas, ya que esta puede conllevar a problemas como interrupción del sueño, anomalías en la presión sanguínea, problemas depresivos y pérdida de la audición (Osejos-Merino et al., 2019).

Para el control de la contaminación acústica existen dos instrumentos que son relevantes, las cabinas o cámaras audiométricas y los pistófonos o calibradores acústicos. Las cabinas audiométricas son espacios optimizados para la atenuación del ruido externo, permitiendo hacer exámenes o pruebas auditivas en su interior de forma controlada (Vigliano et al., 2021). Este dispositivo es de interés, ya que permite evaluar los efectos de la contaminación acústica directamente sobre las capacidades auditivas del paciente. Por otro lado, el calibrador acústico es un dispositivo que genera un nivel de presión de sonido conocido a una frecuencia determinada, utilizado principalmente para la calibración de sonómetros (Milhomem y M. Defilippo Soares, 2016). Los sonómetros son instrumentos que permiten medir el ruido en el ambiente, por lo que son la base de toda medición acústica.

La calibración de instrumentos de medición acústica a nivel nacional no es nueva pero sí escasa. A nivel de laboratorio primario, el Laboratorio Costarricense de Metrología (LCM) realiza calibraciones acústicas en calibradores acústicos con alcance en 50 dB a 140 dB con frecuencias entre 32 Hz y 20 kHz (LCM, 2021). Actualmente, el LCM no ofrece servicios para la verificación de cámaras audiométricas. En cuanto a laboratorios secundarios, se encontró únicamente al laboratorio de calibración SCM Metrología, quienes realizan calibraciones de calibradores acústicos con un alcance en 94 dB a 114 dB, con frecuencia entre los 0 Hz hasta los 1000 Hz (ECA, 2020).

Con el objetivo de mejorar la calidad de las mediciones acústicas que se realizan en Costa Rica y poner en práctica los conocimientos sobre metrología adquiridos a lo largo de la formación en Ingeniería Física, se pretende, en colaboración con PROCAME, desarrollar un método de calibración para cámaras audiométricas y calibradores acústicos bajo la modalidad de proyecto de graduación como parte del Trabajo Final de Graduación de la carrera Licenciatura en Ingeniería Física.

### **1.3. Impacto social y ambiental**

El proyecto tiene un impacto en la mejora de la calidad de exámenes audiométricos, específicamente en la verificación del correcto funcionamiento de las cámaras audiométricas, esto permitirá disminuir la probabilidad de un diagnóstico equivocado, aumentando la confianza de los pacientes en las audiometrías. El principal beneficiario de los resultados del proyecto serían las personas que requiere servicios audiométrica, especialmente aquellas que debido a circunstancias laborales se han visto expuestas a condiciones de ruido dañinas y requieren un correcto diagnóstico para obtener una mejora de condiciones laborales y compensación por daños a la salud.

### **1.4. Objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo general**

Desarrollar un procedimiento de calibración para calibradores acústicos y realizar una revisión del procedimiento y resultados de verificación ya existentes para cámara audiométricas.

### 1.4.2. Objetivos específicos

Plantear un procedimiento de calibración para calibradores acústicos, utilizando las capacidades técnicas del laboratorio de metrología PROCAME y normas internacionales.

Elaborar un proceso automático para el cálculo de la incertidumbre expandida de la calibración de calibradores acústicos, validando el proceso mediante la comparación de resultados entre el método de la “Guía para la expresión de la incertidumbre de medida” y el método estocástico de Montecarlo.

Identificar y proponer puntos de mejora en el procedimiento y hoja de cálculo del laboratorio de metrología PROCAME para la verificación de cámaras audiométricas.

Realizar un análisis cuantitativo de los resultados de verificación de cámaras audiométricas obtenidos previamente por el personal del laboratorio de metrología PROCAME.

## 1.5. Alcances y limitaciones

Una limitación que se tuvo al inicio de la ejecución del proyecto fue que durante las primeras dos semanas del periodo lectivo del segundo semestre del Tecnológico de Costa Rica, no se pudo asistir de forma presencial al laboratorio de metrología, debido a que el laboratorio pertenece a la Universidad Nacional de Costa Rica y durante estas fechas la universidad se encontraba en receso institucional. Debido a esta situación, el acceso se encontraba restringido para personas que no estuvieran asociadas directamente a la universidad. Durante este periodo de tiempo no se pudo hacer trabajo práctico, como alternativa se optó trabajar en los primeros avances del informe escrito y en recolección de material bibliográfico. No se considera que esta situación tuviera un efecto significativo en la ejecución del proyecto, ya que el tiempo perdido se pudo reponer en fechas posteriores.

## 2. Marco teórico

### 2.1. Sobre los calibradores acústicos

Los calibradores acústicos son dispositivos diseñados bajo los estándares de la norma internacional IEC 60942. Los calibradores están diseñados para producir niveles de presión acústica determinados a frecuencias especificadas. Dependiendo del tipo de calibrador, se puede seleccionar el nivel de presión y frecuencia deseados, sin embargo, algunos dispositivos están diseñados para operar bajo una única configuración. La norma clasifica los calibradores en tres categorías distintas basado en los límites de tolerancia para su correcto funcionamiento. Estas clases, ordenadas de mayor a menor precisión, son: patrón de laboratorio, clase 1 y clase 2. Como su nombre lo indica, los patrones de laboratorio están diseñados para ser utilizados en ambientes controlados, como puede ser un laboratorio metrológico. Por otro lado, los calibradores acústicos de clase 1 y 2 están diseñados para ser utilizados en operaciones de campo. Sus principales usos son la determinación de la sensibilidad electroacústica de micrófonos en configuraciones específicas y el ajuste o comprobación de sensibilidad en instrumentos de medición acústica (IEC, 2016).

Existen tres magnitudes de importancia a la hora de tratar con calibradores acústicos, el nivel de presión acústica, frecuencia y distorsión total. Para afirmar que un calibrador acústico cumple con los estándares internacionales, este se debe encontrar dentro de los márgenes de tolerancia establecidos en la IEC 60942 para las tres magnitudes de interés.

Para verificar la conformidad respecto al nivel de presión acústica existen dos métodos aceptados, el método de comparación y el método de inserción de voltaje. El método de comparación consiste en utilizar un calibrador patrón, previamente calibrado, para determinar la diferencia entre la presión acústica producida por el patrón y dispositivo bajo calibración (Milhomem y M. Defilippo Soares, 2016). En este método, primero se conecta el patrón a un micrófono y se mide el voltaje producido en la salida del micrófono, posteriormente se retira el patrón y se repite el procedimiento con el calibrando. La diferencia entre estos valores, al conocer la presión de referencia internacional, es posible convertir la diferencia en voltios a decibeles. Se considera que con este método se obtienen incertidumbres mayores en comparación al método de inserción de voltaje, por lo que este último método se suele preferir (Arcas et al., 2006).

El método de inserción de voltaje es una forma indirecta de medir el nivel de presión

acústica, utilizando un micrófono previamente calibrado cuya sensibilidad a circuito abierto sea conocida. Según la definición brindada por el fabricante Bruel Kjaer, 1971, el voltaje a circuito abierto del micrófono ( $V_{OC}$ ) es el voltaje en las terminales del micrófono a una frecuencia dada cuando este se encuentra ante una impedancia infinita, en embargo el método de inserción de voltaje permite estimar el  $V_{OC}$  ante un impedancia finita, dada por el preamplificador del micrófono.

En la Figura 1 se puede observar un diagrama simplificado del método de inserción de voltaje, donde el conjunto del micrófono y preamplificador se encuentran representados por una capacitancia  $C_M$ . El calibrador acústico sujeto a calibración, identificado como  $E_O$ , se conecta en serie con el micrófono y se enciende. El nivel de presión acústica producirá un voltaje  $V_O$  en la salida del preamplificador. Posteriormente, el calibrador es desconectado y se reemplaza por un generador de señales  $E_c$ . La amplitud de la señal es ajustada hasta obtener un voltaje  $V_c$  que sea igual a  $V_O$ . Cuando esta condición se cumpla, se mide el voltaje en la salida del generador de señales, el cual será igual a  $V_{OC}$ .

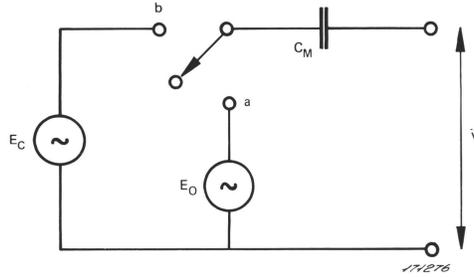


Figura 1: Esquema simplificado del método de inserción de voltaje (Bruel Kjaer, 1971)

Según Arcas et al., 2006, utilizando la ecuación 1, se puede estimar el nivel de presión acústica a partir del resultado para  $V_{OC}$ .

$$\begin{aligned}
 Lp_{RC,f} = & 20 \cdot \log\left(\frac{V_{oc}}{20 \mu\text{Pa}}\right) - s_{dB,f} - 20 \cdot \log\left(\frac{V_{PC}}{V_{PM}}\right) - \delta s_{ELV} - \delta s_t \\
 & - tcs_f \cdot (t_C - t_M) - pcs_f \cdot (p_C - p_M) - hcs_f \cdot (rh_C - rh_M) + tcc \cdot (t_R - t_C) \\
 & + pcc \cdot (p_R - p_C) + hcc \cdot (rh_R - rh_C)
 \end{aligned} \tag{1}$$

Donde  $Lp_{RC,f}$  corresponde al nivel de presión acústica para una frecuencia dada,  $s_{dB,f}$  es la sensibilidad en circuito abierto del micrófono,  $V_{PC}$  y  $V_{PM}$  corresponden respectivamente al voltaje de polarización del micrófono durante la calibración y el voltaje de polarización

reportado por el fabricante,  $\delta s_E L$  representa una corrección por diferencia de volumen entre las cámaras del calibrador acústico y el micrófono. En cuanto a los aportes de las condiciones ambientales,  $tcs_f$ ,  $pcs_f$  y  $hcs_f$  son los coeficientes del micrófono para cambios de temperatura, presión y humedad respecto a los valores de referencia dados por el fabricante ( $t_M$ ,  $p_M$  y  $rh_M$ ). Las condiciones de temperatura, presión y humedad relativa durante la calibración están representada respectivamente por  $t_C$ ,  $p_C$  y  $rh_C$ . Los coeficientes del calibrador acústico para cambios de temperatura, presión y humedad relativa vienen dados por  $tcc$ ,  $pcc$  y  $hcc$ , los cambios de las condiciones ambientales son respecto a valores de referencia presentes en la norma IEC 60942 y están representados por  $t_R$ ,  $p_R$  y  $rh_R$ .

A continuación se muestran las distintas fuentes de incertidumbre que se consideran a la hora de calcular la incertidumbre combinada para la calibración de calibradores acústicos (Hanes, 2001 y CEM, 2000):

Incertidumbre por medición del voltaje a circuito abierto  $u(V_{oc})$ : Esta incertidumbre es propia del método de medición. Corresponde a la incertidumbre combinada del certificado del multímetro, la resolución del multímetro y desviación de la unidad de inserción. En la ecuación 2 y 3 se muestra como estimar la incertidumbre por medición del  $V_{oc}$ .

$$e(V_{oc}) = \sqrt{\left(\frac{U_{mult}}{k}\right)^2 + \left(\frac{R_{mult}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{U_{signal}}{k}\right)^2 + \left(\frac{R_{signal}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\text{Max}(V_1 - V_2)}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)^2} \quad (2)$$

$$u(V_{oc}) = 20 \cdot \log \left( \frac{V_{oc}}{V_{oc} + e(V_{oc})} \right) \quad (3)$$

Donde  $U_{mult}$  es la incertidumbre del multímetro dada por el certificado de calibración,  $R_{mult}$  es la resolución del multímetro,  $U_{signal}$  es la incertidumbre del generador de señales dada por el certificado de calibración,  $R_{signal}$  es la resolución del generador de señales,  $k$  es el factor de cobertura de la distribución normal correspondiente a cada certificado. El factor  $\text{Max}(V_1 - V_2)$  corresponde a la máxima diferencia entre el voltaje medido con el calibrador acústico encendido ( $V_1$ ) y el voltaje medido con el generador de señales encendido ( $V_2$ ). El parámetro  $s$  corresponde a la desviación estándar de un número  $n$  de repeticiones. Se le asigna una distribución de probabilidad normal y su coeficiente de sensibilidad es 1.

Incertidumbre por certificado del micrófono patrón  $u(mic)$ : Corresponde a la incertidumbre expandida indicada en el certificado de calibración del micrófono  $U_{mic}$ . Se le asigna una distribución de probabilidad normal y su coeficiente de sensibilidad es igual a 1.

$$u_{mic} = \frac{U_{mic}}{k} \quad (4)$$

Incertidumbre por deriva del micrófono patrón  $u(s_t)$ : La deriva del micrófono ( $der$ ) se puede encontrar especificada en el manual del fabricante o se puede estimar como la diferencia entre dos calibraciones seguidas. Se le asigna una distribución de probabilidad rectangular y su coeficiente de sensibilidad es igual a 1.

$$u(s_t) = \frac{der}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

Incertidumbre por desviación del voltaje de polarización del micrófono  $u(V_{PC})$ : El voltaje de polarización nominal es especificado por el fabricante. Cambios en el voltaje de polarización implican cambios en la sensibilidad del micrófono, por lo que se debe medir en la fuente de alimentación del micrófono. La incertidumbre del certificado de multímetro, la resolución del multímetro y una contribución de la desviación estándar de medidas repetidas ( $s$ ), se consideran contribuciones a la incertidumbre combinada.

$$e(V_{PC}) = \sqrt{\left(\frac{U_{mult}}{k}\right)^2 + \left(\frac{R_{mult}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)^2} \quad (6)$$

$$u(V_{PC}) = 20 \cdot \log\left(\frac{V_{PC}}{V_{PC} + e(V_{PC})}\right) \quad (7)$$

Incertidumbre por cambio de temperatura, presión y humedad del micrófono  $u(\delta Tcs)$ ,  $u(\delta Pcs)$  y  $u(\delta Hcs)$ : Corresponde a la incertidumbre debido al efecto sobre el micrófono que tiene la variación de condiciones ambientales al inicio y al final de la calibración. Se le atribuye una distribución de probabilidad rectangular, centrado en cero, con límites inferior y superior igual a la mitad del cambio en decibelios debido a los cambios en condiciones ambientales. La incertidumbre por el cambio de temperatura, presión y humedad para el micrófono se muestra respectivamente en las ecuaciones 8, 9 y 10, además todas tienen un coeficiente de sensibilidad igual a 1.

$$u(\delta Tcs) = \frac{tcs_f(t_f - t_i)}{2\sqrt{3}} \quad (8)$$

$$u(\delta Pcs) = \frac{pcs_f(p_f - p_i)}{2\sqrt{3}} \quad (9)$$

$$u(\delta Hcs) = \frac{hcs_f(rh_f - rh_i)}{2\sqrt{3}} \quad (10)$$

Incertidumbre por medición de temperatura, presión y humedad relativa  $u(t_C)$ ,  $u(p_c)$  y  $u(rh_C)$ : Corresponde a la incertidumbre propia del instrumento de medida indicada en el certificado de calibración. Se le asigna una distribución de probabilidad normal. El aporte a incertidumbre, junto con su coeficiente de sensibilidad, de la temperatura, presión y humedad corresponden a las ecuaciones 11 y 12, 13 y 14, 15 y 16.

$$u(T_c) = \frac{U_{cert}(t_c)}{k} \quad (11)$$

$$coef(t_c) = t_{cc} - tcs_f \quad (12)$$

$$u(P_c) = \frac{U_{cert}(p_c)}{k} \quad (13)$$

$$coef(p_c) = p_{cc} - pcs_f \quad (14)$$

$$u(H_c) = \frac{U_{cert}(rh_c)}{k} \quad (15)$$

$$coef(h_c) = h_{cc} - hcs_f \quad (16)$$

Incertidumbre por cambio de temperatura, presión y humedad del calibrador acústico  $u(\delta Tcc)$ ,  $u(\delta Pcc)$  y  $u(\delta Hcc)$ : Corresponde a la incertidumbre debido al efecto sobre el calibrador acústico que tiene la variación de condiciones ambientales al inicio y al final de la calibración. Se le atribuye una distribución de probabilidad rectangular, centrado en cero, con límites inferior y superior igual a la mitad del cambio en decibelios debido a los cambios en condiciones ambientales. La incertidumbre por el cambio de temperatura, presión y humedad para el micrófono se muestra respectivamente en las ecuaciones 17, 18 y 19, además todas tienen un coeficiente de sensibilidad igual a 1.

$$u(\delta Tcc) = \frac{tcc_f(t_f - t_i)}{2\sqrt{3}} \quad (17)$$

$$u(\delta Pcc) = \frac{pcc_f(p_f - p_i)}{2\sqrt{3}} \quad (18)$$

$$u(\delta Hcc) = \frac{hcc_f(rh_f - rh_i)}{2\sqrt{3}} \quad (19)$$

Finalmente, la incertidumbre expandida ( $U_{95\%}$ ) se calcula según lo indicado en la ecuación 20 y 21 y es multiplicada por el factor de cobertura  $k$  apropiado, según los grados de libertad efectivos, para obtener una cobertura del 95 %.

$$u_c^2 = u(V_{oc})^2 + u_{mic}^2 + u(V_{PC})^2 + u(\delta T_{cs})^2 + u(\delta P_{cs})^2 + u(\delta H_{cs})^2 + coef(t_c)^2 u(t_c)^2 + coef(p_c)^2 u(p_c)^2 + coef(rh_c)^2 u(rh_c)^2 + u(\delta T_{cc})^2 + u(\delta P_{cc})^2 + u(\delta H_{cc})^2 \quad (20)$$

$$U_{95\%} = u \cdot k \quad (21)$$

Para que un calibrador acústico se pueda declarar conforme con la normal IEC 60942, el valor absoluto de la diferencia entre el nivel de presión acústica nominal y el medido, considerando la incertidumbre expandida, no debe superar el nivel de tolerancia establecido por la norma para su clase de exactitud. El Cuadro 1 resume los límites de tolerancia para las tres clases de exactitud.

Cuadro 1: Límites de tolerancia para nivel de presión acústica según la clase de exactitud y el intervalo de frecuencia nominal (IEC, 2016)

Intervalo de frecuencias nominales (Hz)	Límites de tolerancia (dB)		
	Clase PL	Clase 1	Clase 2
31,5 a <160	-	0,5	-
160 a 1 250	0,2	0,4	0,75
>1 250 a 4000	-	0,6	-
>4 000 a 8 000	-	0,8	-
>8 000 a 16 000	-	1	-

Para determinar la conformidad respecto a la frecuencia del calibrador acústico, la diferencia en valor absoluto ( $desv_f$ ), expresada en porcentaje, entre la frecuencia nominal ( $f_{nom}$ ) y la frecuencia medida ( $f_{real}$ ), no debe superar los límites de tolerancia establecidos por la norma IEC 60942. Los valores límites corresponde a un porcentaje de la frecuencia objetivo y dependen de la clase de exactitud del calibrador acústico, tal como se muestra en el Cuadro 2. La forma matemática de este concepto viene dada por la ecuación 22.

$$desv_f = \frac{|(f_{real} + \delta F_{cert} + \delta F_{res} + \delta F_{EMP}) - f_{nom}|}{f_{nom}} \cdot 100 \quad (22)$$

Donde  $\delta F_{cert}$  es la corrección por el certificado de calibración,  $\delta F_{res}$  es el aporte por la resolución del contador de frecuencias y  $\delta F_{EMP}$  es el error máximo permitido del contador

de frecuencias. Las fuentes de incertidumbre que afectan de forma significativa a la medición de la frecuencia son (CEM, 2000 y Palma, 2016):

Incertidumbre por certificado de calibración del contador de frecuencias  $u(\delta F_{cert})$ : El valor de la incertidumbre expandida  $U$  y su respectivo coeficiente de cobertura  $k$  se pueden encontrar en el certificado de calibración del contador de frecuencias. Se le asigna una distribución de probabilidad normal y su coeficiente de sensibilidad es igual a 1

$$u(\delta F_{cert}) = \frac{U}{k} \quad (23)$$

Incertidumbre por resolución del contador de frecuencias  $u(\delta F_{res})$ : La resolución del instrumento  $R$  se puede encontrar en el manual del fabricante. Se le asigna una distribución de probabilidad rectangular y su coeficiente de sensibilidad es igual a 1.

$$u(\delta F_{res}) = \frac{R}{2\sqrt{3}} \quad (24)$$

Incertidumbre por error máximo permitido del contador de frecuencias  $u(\delta F_{EMP})$ : Es propio del instrumento de medida y se puede encontrar en el manual del fabricante. Se le asigna una distribución de probabilidad rectangular y su coeficiente de sensibilidad es igual a 1.

$$u(\delta F_{EMP}) = \frac{EMP}{\sqrt{3}} \quad (25)$$

Incertidumbre por repetibilidad  $u(rep)$ : Corresponde a la incertidumbre de tipo A, donde se utiliza la desviación estándar  $s$  de un número  $n$  de medidas repetidas. Se le asigna una distribución de probabilidad normal y su coeficiente de sensibilidad es igual a 1.

$$u(rep) = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (26)$$

La incertidumbre expandida para la diferencia entre la frecuencia medida y nominal se calcula expandiendo la incertidumbre combinada por un factor de cobertura  $k$  adecuado para una distribución normal con una probabilidad de cobertura del 95%. Las ecuaciones 27 y 21 describen como calcular la incertidumbre expandida.

$$u_c^2 = u(\delta F_{cert})^2 + u(\delta F_{res})^2 + u(\delta F_{EMP})^2 + u(rep)^2 \quad (27)$$

La diferencia entre las frecuencias, considerando la incertidumbre expandida, no debe superar los límites de tolerancia establecidos en la norma IEC 60942. En el Cuadro 2, se muestran los límites respectivos según la clase de exactitud del calibrador acústico.

Cuadro 2: Límites de tolerancia para la desviación de la frecuencia según la clase de exactitud (IEC, 2016)

Límite de tolerancia (%)		
Clase LP	Clase 1	Clase 2
1	1	2

De forma similar a la frecuencia, para verificar la conformidad respecto a la distorsión total, se debe calcular el porcentaje de la diferencia entre el valor nominal y el valor medido. Según la norma IEC 60942 (2016), se debe verificar que la conformidad aplique para todas las frecuencias en las que el calibrador acústico funciona. Además, para cada frecuencia se debe realizar la prueba de conformidad en el nivel de presión acústica mayor y menor que pueda emitir el dispositivo. El modelo matemático para calcular el porcentaje de diferencia de la distorsión total se muestra en la ecuación (28).

$$Dist_T = \frac{|(Dist_{real} + \delta Dist_{cert} + \delta Dist_{res} + \delta Dist_{EMP}) - Dist_{nom}|}{Dist_{nom}} \cdot 100 \quad (28)$$

Donde  $Dist_T$  es el porcentaje de la diferencia entre distorsión medida y la indicada por el fabricante,  $Dist_{real}$  es la distorsión medida,  $\delta Dist_{cert}$  es la corrección del certificado de calibración del analizador de distorsión,  $\delta Dist_{res}$  es la corrección debido a la resolución del analizador de distorsión,  $\delta Dist_{EMP}$  es la corrección debido al error máximo y  $Dist_{nom}$  es el valor de distorsión indicado por el fabricante como nominal. Las fuentes de incertidumbre y los cálculos de las mismas son idénticos entre la frecuencia y la distorsión armónica, por lo que la incertidumbre de la distorsión armónica se estima utilizando las ecuaciones 23, 24, 25, 26 y 27 utilizando los datos correspondientes al analizador de distorsiones, en lugar de los datos del contador de frecuencias (CEM, 2000 y Palma, 2016).

La distorsión total medida, junto con su respectiva incertidumbre expandida, no debe superar los límites de tolerancia mostrados en el Cuadro 3.

Cuadro 3: Límites de tolerancia para la desviación de la distorsión según la clase de exactitud (IEC, 2016)

Intervalo de frecuencias nominales (Hz)	Distorsión total (%)		
	Clase PL	Clase 1	Clase 2
31,5 a <160	-	4	-
160 a 1 250	2,5	3	4
>1 250 a 16 000	-	4	-

## 2.2. Sobre las cámaras audiométricas

Una cámara audiométrica se puede definir como un espacio amortiguado sonoramente, diseñado para controlar y atenuar el ruido que proviene tanto del interior como el exterior de la cámara, además, están reguladas por la norma internacional ISO 8253-1 (Gaetán et al., 2019). Las cámaras audiométricas pueden ser fijas o móviles, sin embargo, todas deben cumplir con los límites de nivel de presión acústica dentro de la cámara establecidos en la norma ISO 8253-1, los cuales se muestran en Cuadro 17, ubicada en la sección de anexos.

El modelo matemática que describe la medición de nivel de presión acústica viene descrito en la norma ISO 8253-1, el cual consiste en la indicación del sonómetro patrón, junto con correcciones debido a las condiciones ambientales y una corrección adicional que se realiza únicamente si el auricular de la cámara audiométrica no es del tipo supraaural. El modelo en forma matemática se muestra en la ecuación 29.

$$L_p = I_{son} - \delta_{aur} - tcs_f \cdot (t_C - t_M) - pcs_f \cdot (p_C - p_M) - hcs_f \cdot (rh_C - rh_M) \quad (29)$$

Donde  $L_p$  es el nivel de presión acústica corregido,  $I_{son}$  corresponde a la indicación del sonómetro patrón,  $\delta_{aur}$  es la corrección que se realiza cuando el auricular no es del tipo supraaural. El coeficiente para cambios de temperatura, la temperatura indicada por el termómetro y la temperatura de referencia vienen representados respetivamente por  $tcs_f$ ,  $t_C$  y  $t_M$ . El coeficiente para cambios de presión, la presión indicada por el barómetro y la presión de referencia vienen representados respetivamente por  $pcs_f$ ,  $p_C$  y  $p_M$ . El coeficiente para cambios de humedad relativa, la humedad relativa indicada por el higrómetro y la humedad relativa de referencia vienen representados respetivamente por  $hcs_f$ ,  $rh_C$  y  $rh_M$ . La corrección para auriculares distintos al supraaural consiste en restar a la indicación del

sonómetro la diferencia entre la atenuación sonora del auricular y el valor de referencia mostrado en la Tabla 18, ubicada en la sección de anexos.

Las incertidumbres asociadas a este modelo son (Pedroso et al., 2004):

Incertidumbre de la indicación del sonómetro  $u(I_{son})$ : Es propia del procedimiento de medición. Consiste en la incertidumbre combinada del certificado de calibración del sonómetro ( $e_{cert}$ ), la incertidumbre del certificado del micrófono ( $e_{mic}$ ), la incertidumbre del certificado del calibrador acústico ( $e_{CA}$ ), incertidumbre por repetibilidad ( $e_{rep}$ ), incertidumbre por la resolución del sonómetro ( $e_{res}$ ), incertidumbre por error debido a la temperatura ( $e_T$ ), incertidumbre por error debido a la humedad ( $e_H$ ) e incertidumbre debido a la deriva del sonómetro ( $e_{der}$ ). Se le asigna una distribución de probabilidad normal y un coeficiente de sensibilidad de 1.

$$u(I_{son}) = \sqrt{(e_{cert})^2 + (e_{mic})^2 + (e_{CA})^2 + (e_{rep})^2 + (e_{res})^2 + (e_T)^2 + (e_H)^2 + (e_{der})^2} \quad (30)$$

Incertidumbre por correcciones debido a condiciones ambientales  $u(Tcs)$ ,  $u(Pcs)$  y  $u(Hcs)$ : Corresponde a la incertidumbre debido al efecto sobre el micrófono del sonómetro ocasionado por el cambio en la presión, temperatura y humedad relativa entre el inicio y el final del proceso de verificación. Se les atribuye una distribución de probabilidad rectangular y un coeficiente de sensibilidad de 1. Se calcula de la misma manera que en las ecuaciones 8, 9 y 10, donde  $tcs_f$ ,  $pcs_f$  y  $hcs_f$  son respectivamente los coeficientes de temperatura, presión y humedad del sonómetro.

Incertidumbre por medición de condiciones ambientales  $u(t_C)$ ,  $u(p_C)$  y  $u(rh_C)$ : Corresponde a la incertidumbre propia del instrumento de medida indicada en el certificado de calibración. Se le asigna una distribución de probabilidad normal. El aporte a incertidumbre, junto con su coeficiente de sensibilidad, de la temperatura, presión y humedad corresponden a las ecuaciones 31 y 32, 33 y 34, 35 y 36.

$$u(t_c) = \frac{U_{cert}(t_c)}{k} \quad (31)$$

$$coef(t_c) = -tcs_f \quad (32)$$

$$u(p_c) = \frac{U_{cert}(p_c)}{k} \quad (33)$$

$$coef(p_c) = -pcs_f \quad (34)$$

$$u(h_c) = \frac{U_{cert}(rh_c)}{k} \quad (35)$$

$$coef(h_c) = -hcs_f \quad (36)$$

La incertidumbre expandida del nivel de presión acústica dentro de la cámara audiométrica se calcula expandiendo la incertidumbre combinada por un factor de cobertura  $k$  adecuado para una distribución normal con una probabilidad de cobertura del 95 %. Las ecuaciones 21 y 37 describen como calcular la incertidumbre expandida.

$$u_c^2 = u(I_{son})^2 + u(Tcs)^2 + u(Pcs)^2 + u(Hcs)^2 + coef(t_c)^2 u(t_c)^2 + coef(p_c)^2 u(p_c)^2 + coef(h_c)^2 u(h_c)^2 \quad (37)$$

### 3. Metodología

Para diseñar un procedimiento para la calibración de calibradores acústicos se inició con la recolección de material bibliográfico. Del análisis bibliográfico se identificaron los métodos ya existentes para la calibración sobre el nivel de presión acústica, que son el método de inserción de voltaje y el método de comparación directa. Se seleccionó el método de inserción de voltaje por producir incertidumbres de menor tamaño, además de coincidir con los intereses del laboratorio de metrología PROCAME. En el caso de los métodos para determinar la desviación en frecuencia y en distorsión armónica total, solo se identificó un método utilizado para cada uno, en donde la magnitud medida por un contador de frecuencia y un analizador de distorsiones, de forma respectiva, son comparados con los valores nominales indicados por el fabricante. En la Figura 2 se muestra el esquema para el montaje del equipo, el cual permite realizar las pruebas de nivel de presión acústica, frecuencia y distorsión armónica en un mismo sitio y de forma continua.

La marca y modelo de los equipos utilizados se resumen en la Tabla 4.

#### 3.1. Procedimiento para la calibración de calibradores acústicos

Del material bibliográfico, especialmente los provenientes del Centro Español de Metrología y del Centro Nacional de Calidad de Perú, se pudo consultar un modelo aceptado para la calibración de calibradores acústicos y las fuentes de incertidumbre que contribuyen

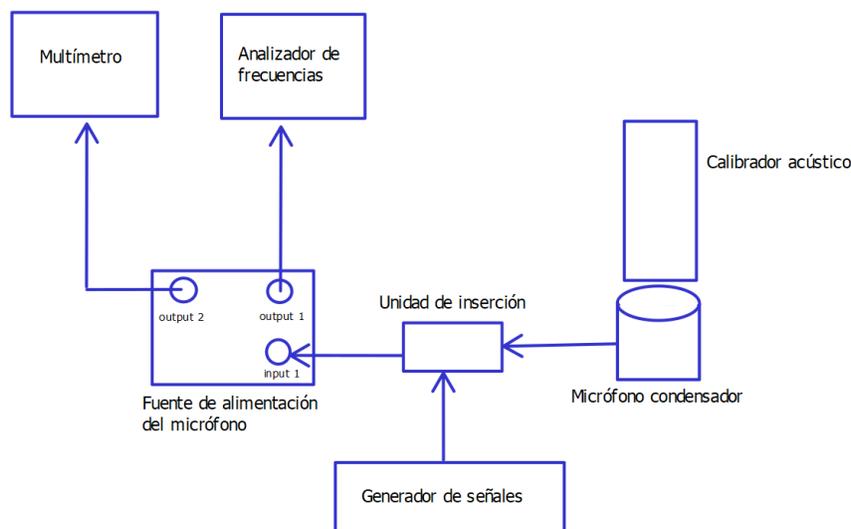


Figura 2: Esquema simplificado del método de inserción de voltaje

Cuadro 4: Equipo utilizado para la calibración de calibradores acústicos.

Equipo	Marca	Modelo
Micrófono condensador	Bruel & Kjaer	Type 4160
Fuente de alimentación del micrófono	Bruel & Kjaer	2804
Generador de señales	Keysight Technologies Inc	33509B
Multímetro	Keysight Technologies Inc	3458A
Contador de frecuencias	Tektronix	3100
Cronómetro	Traceable	1051

de manera significativa al mismo. Una vez que se tenía claridad de los procedimientos y las magnitudes necesarias para medir, se preparó una hoja de cálculo en Microsoft Excel, donde se pudieran digitar todas las mediciones realizadas. La hoja de cálculo fue programada de forma que los cálculos para la estimación de la incertidumbre y la construcción del certificado de calibración se dieran de forma automática.

Una vez que se tuvo listo el procedimiento y la hoja de cálculo, se realizaron una serie de visitas al laboratorio de metrología PROCAME, donde se analizaron los manuales de uso del generador de señales, multímetro y contador de frecuencia, con el objetivo de determinar las configuraciones adecuadas de los equipos para realizar los procesos de calibración. Con el equipo correctamente configurado, se procedió a ejecutar el procedimiento planeado para la calibración de los dos calibradores acústicos disponibles en el laboratorio. Las mediciones

fueron anotadas en la hoja de cálculo y se generó un certificado de calibración para cada uno de los dos instrumentos sujetos a prueba.

Adicionalmente, se repitió el procedimiento tres veces con un total de diez repeticiones, tres veces con cinco repeticiones y tres veces con tres repeticiones en orden aleatorio, con el objetivo de realizar un análisis de varianza y determinar si existía una diferencia significativa en la incertidumbre combinada al variar el número de repeticiones.

Para validar los resultados del cálculo de incertidumbre dados por la hoja de cálculo, se procedió a programar en Python una simulación de Montecarlo que estimara la distribución de probabilidad del nivel de presión acústica, frecuencia y distorsión armónica medida. Para la programación de este método estocástico se utilizaron librerías como Numpy y Matplotlib, usadas respectivamente para tener acceso simplificado a operaciones matemáticas complejas y la realización de gráficos como histogramas.

Para finalizar con el desarrollo del procedimiento de calibración para los calibradores acústicos, se elaboró una guía de procedimiento con el formato utilizado en laboratorio de metrología PROCAME. En la guía de procedimiento se elaboraron secciones de conceptos relevantes, una breve descripción del procedimiento junto con las tolerancias establecidas en las normas internacionales, instrucciones para realizar las pruebas de conformidad para el nivel de presión acústica, frecuencia y distorsión armónica. También se explican los modelos matemáticos y las fuentes de incertidumbres involucradas, además de instrucciones para el adecuado uso de la hoja de cálculo.

### **3.2. Procedimiento para la verificación de cámaras audiométricas**

Se inició revisando el procedimiento elaborado previamente por los miembros del laboratorio de metrología PROCAME para la calibración de audiómetros y verificación de cámaras audiométricas. Se encontró que el procedimiento para la verificación de cámaras audiométricas no hacía referencia al cálculo de la incertidumbre de medida.

Se procedió a realizar una revisión bibliográfica para identificar cuales eran las fuentes de incertidumbre comúnmente consideradas a la hora de estimar la incertidumbre de medida para la medición de ruido dentro de una cabina audiométrica. De las fuentes de incertidumbre encontradas, se analizó cuales eran válidas para el procedimiento utilizado por PROCAME. Se agregó un capítulo nuevo al procedimiento ya existente explicando los cálculos necesarios

para estimar la incertidumbre expandida con una probabilidad de cobertura del 95 %.

Se realizó una búsqueda de los certificados de calibración de todos los equipos necesarios para el proceso de verificación y se realizó una base datos de la resolución, error máximo permitido, correcciones por condiciones ambientales, incertidumbres expandidas y coeficientes de cobertura. Posteriormente se implementó el cálculo automático de incertidumbre expandida a la hoja de cálculo utilizada para el registro de resultados, según lo establecido en el nuevo capítulo del procedimiento. También se modificó la generación automática del certificado de calibración para que incorpore el resultado de la incertidumbre expandida tanto de forma tabular como gráfica.

El laboratorio de metrología contaba con mediciones de ruido dentro de la cámara audiométrica del Hospital Rafael Ángel Calderón Guardia, sin embargo, estos datos no habían recibido ningún tipo de análisis. Los datos se extrajeron del software Larson Davis AUDit y fueron convertidos a un formato compatible con la hoja de datos para el cálculo de incertidumbre. Para determinar conformidad con la norma ISO 8253, se verificó si la medición del ruido cumple con los límites de tolerancia aéreos y óseos, mostrados en el Cuadro 17. Para que una cámara audiométrica se pueda declarar conforme, esta debe cumplir con los límites aéreos y óseos de forma simultánea en todas las frecuencias en las que se realiza la prueba. De encontrarse una frecuencia que no cumple con ambos o solo con uno de los límites, se deberá declarar la cámara como inconforme. Los resultados también fueron graficados para facilitar la comprensión de resultados.

De la misma cámara audiométrica se tienen dos resultados tomados en momentos distintos, por lo que para determinar la consistencia del método se realizó una prueba de error normalizado para cada una de las frecuencias. Para ello se utilizó el criterio mostrado en la ecuación 38 para determinar si existe diferencia significativa entre ambos resultados.

$$\frac{|y_1 - y_2|}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2}} \leq 1 \quad (38)$$

Donde  $y_1$  es la magnitud de la primera medición,  $y_2$  es la magnitud de la segunda medición,  $U_1$  es la incertidumbre expandida de la primera medición y  $U_2$  es la incertidumbre expandida de la segunda medición. Si el resultado obtenido es menor a uno, entonces se dice que no existe diferencia significativa entre los resultados.

### 3.3. Cronograma

En el Cuadro 5 se muestra el cronograma para el desarrollo del trabajo final de graduación. El cronograma se encuentra dividido por objetivo específico, donde se muestran las actividades necesarias para cumplir dicho objetivo. También se muestran las fechas en las que se pretendía terminar la actividad y la fecha en la que realmente se culminó.

Cuadro 5: Cronograma de actividades para el desarrollo del trabajo final de graduación

Objetivo específico	Actividad	Fecha proyectada de finalización	Fecha de finalización
Plantear un procedimiento de calibración para calibradores acústicos.	Plantear un modelo para calibración de calibradores acústicos.	8/8/2022	6/8/2022
	Diseño del procedimiento para calibración de calibradores acústicos.	22/8/2022	17/8/2022
Elaboración de la hoja de cálculo para la estimación de la incertidumbre expandida del calibrador acústico.	Programación de la hoja de cálculo para la calibración de calibradores acústicos.	29/8/2022	24/8/2022
	Validación de la hoja por medio de simulación de Montecarlo.	5/9/2022	9/9/2022
Identificar mejoras para el procedimiento de verificación de cámaras audiométricas.	Agregar las fórmulas e información necesaria para el cálculo de incertidumbre en el procedimiento ya existente.	19/9/2022	22/9/2022
	Implementación del cálculo de incertidumbre en la hoja de datos ya existente.	26/9/2022	26/9/2022
Realizar un análisis cuantitativo de los resultados ya existentes de verificación de cámaras audiométricas obtenidos previamente por personal del laboratorio de metrología.	Revisar si las cámaras audiométricas revisadas cumplen con la norma ISO 8253-1, tomando en consideración la incertidumbre de medida.	10/10/2022	9/10/2022
	Realizar una comparación entre los resultados de la cámara audiométrica analizada y determinar si existen diferencias entre ellos.	24/10/2022	16/10/2022

## 4. Resultados y discusión

### 4.1. Resultados sobre los calibradores acústicos

El procedimiento elaborada para la calibración de calibradores acústico se encuentra en la sección de Anexos 6.1. El procedimiento se realizó bajo el formato solicitado por el laboratorio de metrología PROCAME y abarcó los pasos y materiales necesarios para realizar las pruebas de presión acústica y frecuencia del calibrador acústico. El procedimiento inicia describiendo conceptos básicos para contener el contenido del documento y luego continua con un breve marco teórico que describe los procedimientos que se van a realizar. El procedimiento también contiene una lista de verificaciones previas que se deben realizar antes de poder realizar la calibración. El proceso de calibración se explica de forma detallada y cuenta con fotografías de referencia para facilitar la comprensión del lector. El procedimiento ha sido revisado por los miembros del laboratorio de metrología, quienes han dado el visto bueno para su implementación.

El procedimiento se repitió nueve veces para comprobar la precisión del método utilizando un calibrador acústico de clase 1, identificado como Delta Ohm HD9109. La prueba se realizó con el equipo configurado para operar a 94 dB y 1000 Hz. Los resultados de las pruebas para determinar el error del instrumento y la precisión del método se muestran en el Cuadro 6 y la Figura 3. La Figura 3 muestra el resultado de la medición y como se compara con respecto a los límites de tolerancia mostrados en el Cuadro 1. Se obtuvo los resultados del Cuadro 6 mediante el uso de la hoja de datos programada para automatizar el cálculo de la incertidumbre expandida utilizando los métodos de cálculo establecidos en la Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM).

En el Cuadro 6 se puede observar que la mayor desviación ocurre en la prueba # 4, donde se midió una desviación de 0,285 dB respecto al valor nominal de 94 dB. Según el Cuadro 1, la máxima desviación permitida para un calibrador acústico de clase 1 a 1000 Hz es de 0,4 dB, por lo que el resultado de todas las mediciones muestran que el calibrador Delta Ohm HD9109 se encuentra en conformidad con lo estipulado en la norma. En el Cuadro 6 y en la Figura 3 también se puede observar que en la prueba # 6 se obtiene un resultado que parece diferir con el nivel de presión acústica medido en las demás pruebas. Esta diferencia entre resultados se puede atribuir a que la prueba 6 fue la primera prueba realizada el día 9 de setiembre y, por un error de omisión, no se esperaron los 30 minutos que el equipo debe estar encendido previo a la calibración. Este tiempo de espera está establecido en la página

Cuadro 6: Resultados de las mediciones de presión acústica para determinar la precisión del método.

Prueba	Nivel de presión acústica (dB)	Incertidumbre $k = 2$
1	94,226	0,039
2	94,231	0,035
3	94,186	0,036
4	94,285	0,039
5	94,146	0,036
6	93,949	0,043
7	94,165	0,034
8	94,172	0,037
9	94,206	0,042
Promedio		94,174
Desviación Estandar		0,094

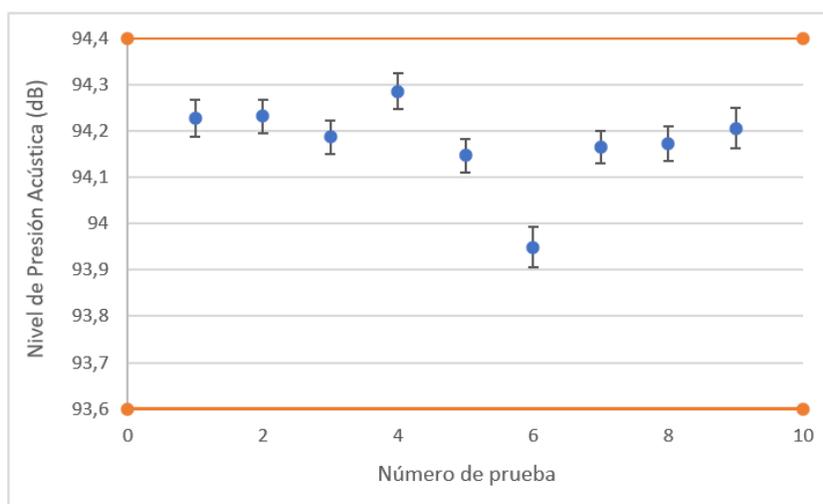


Figura 3: Mediciones del nivel de presión acústica del calibrador Delta Ohm HD9101 con valores nominales de 94 dB y 1000 Hz sin aplicar la corrección del error.

6 del procedimiento elaborado correspondiente al anexo 6.1.

De los resultados mostrados en el cuadro 6, las pruebas 3, 7 y 9 fueron realizadas con tres repeticiones, las pruebas 1, 2 y 5 con cinco repeticiones y las pruebas 4, 6 y 8 con diez repeticiones. Utilizando el código en lenguaje R mostrado en el apéndice 6.2, se realizó un análisis de varianza con un nivel de significancia del 95% para determinar si existe una

diferencia significativa entre la incertidumbre obtenida con tres, cinco y diez repeticiones. El resultado de la prueba de análisis de varianza se muestra resumido en el Cuadro 7.

Cuadro 7: Resultados del análisis de varianza para determinar el efecto del número de repeticiones en la incertidumbre expandida ( $\alpha = 0,05$ )

Respuesta:	Incertidumbre				
	DF	Sum Sq	Mean Sq	F value	P value
Repeticiones	2	1,4889E-5	7,4444E-6	0,7204	0,5243
Residuos	6	6,2000E-5	1,0333E-5	-	-

El resultado del análisis de varianza muestra un valor p mayor al valor  $\alpha$  establecido, lo que significa que se acepta la hipótesis nula y se decide que no existe diferencia significativa entre los resultados obtenidos con tres, cinco o diez repeticiones.

En la Figura 4 se puede observar el comportamiento de la incertidumbre expandida en función del número de repeticiones. Si bien no existe diferencia significativa entre los resultados promedios, se puede observar como la categoría de tres repeticiones presenta la mayor desviación en sus resultados. La categoría de cinco repeticiones muestra un promedio semejante a la categoría de tres, pero la desviación entre los datos es claramente menor. La categoría de diez repeticiones muestra una incertidumbre promedio más elevada en comparación con las otras dos categorías, además su desviación es más grande que la categoría de cinco repeticiones, pero menor a la categoría de tres repeticiones. De las tres categorías, la de cinco repeticiones es la que muestra las condiciones deseables, que son una baja incertidumbre promedio y una baja desviación entre los datos.

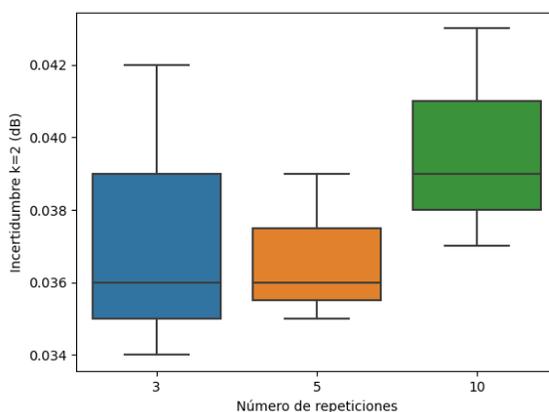


Figura 4: Variación de la incertidumbre expandida en función del número de repeticiones

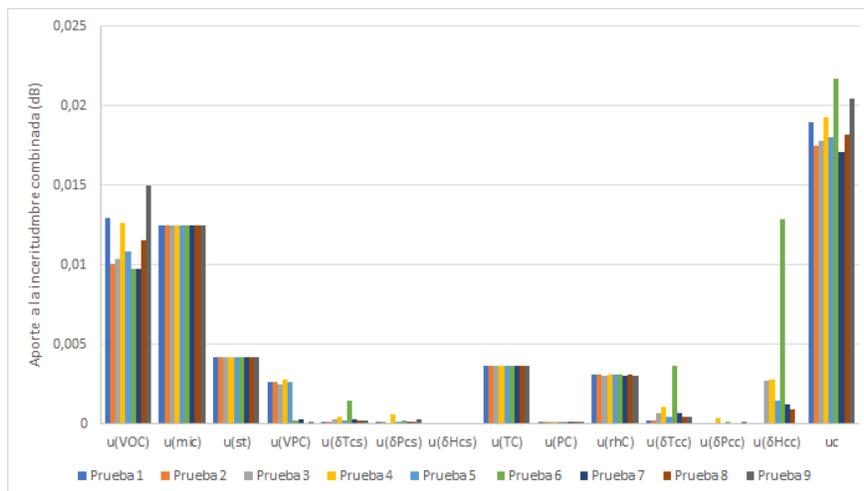
Con el objetivo de validar los resultados del nivel de presión acústica obtenidos por medio del uso de la hoja de datos realizada, se programó en Python un *script* capaz de estimar la presión acústica promedio y la incertidumbre de medida por medio del método estocástico de Montecarlo. El código elaborado se puede encontrar en el apéndice 6.3. En el Cuadro 8 se muestra la comparación entre los resultados del Cuadro 6. Las distribuciones de probabilidad para cada prueba se pueden encontrar en la sección 6.4 de los apéndices.

Cuadro 8: Diferencia entre los resultados obtenidos utilizando la hoja de datos (método GUM) y utilizando el método de Montecarlo para el nivel de presión acústica.

Prueba	Nivel de Presión (dB)	Diferencia (%)	Incertidumbre (dB)	Diferencia (%)
1	94,2287	0,0032	0,0383	0,5222
2	94,2337	0,0032	0,0352	0,5682
3	94,1731	0,0138	0,0360	0,8333
4	94,2709	0,0154	0,0389	0
5	94,1484	0,0025	0,0363	0,2755
6	94,0745	0,1333	0,0437	0,4577
7	94,1518	0,0138	0,0346	0,8671
8	94,1750	0,0031	0,0368	0,2717
9	94,1927	0,0137	0,0413	2,9056

Del Cuadro 8 se puede observar que en todos los casos, salvo en la incertidumbre de prueba 9, la diferencia entre los resultados del método de Montecarlo y el método de la GUM es menor al 1%. Como se mencionó previamente, en la incertidumbre de la prueba 9 se obtuvo un resultado de 0,0413 dB por el método de Montecarlo, mientras que el resultado de la hoja de datos es de 0,0425 dB. En el resto de pruebas, la incertidumbre entre ambos métodos varía hasta en el cuarto decimal, por lo que ambos métodos aparentan producir resultados semejantes entre sí.

En la Figura 5 se muestra a detalle la contribución de cada fuente de incertidumbre a la incertidumbre combinada y a la incertidumbre de la medición del voltaje en circuito abierto del micrófono. Se puede observar en la Figura 5a que las mayores contribuciones a la incertidumbre combinada del nivel de presión acústica son la incertidumbre por medición del  $V_{OC}$  y la incertidumbre por certificado de calibración del micrófono condensador. También se puede notar que la incertidumbre asociada a los cambios en las condiciones ambientales suelen ser despreciables, con la excepción de la prueba 6, donde hubo un gran cambio en la humedad relativa del laboratorio, pasando de una humedad inicial del 64,8% a una humedad



(a) Gráfico de pesos para la incertidumbre combinada

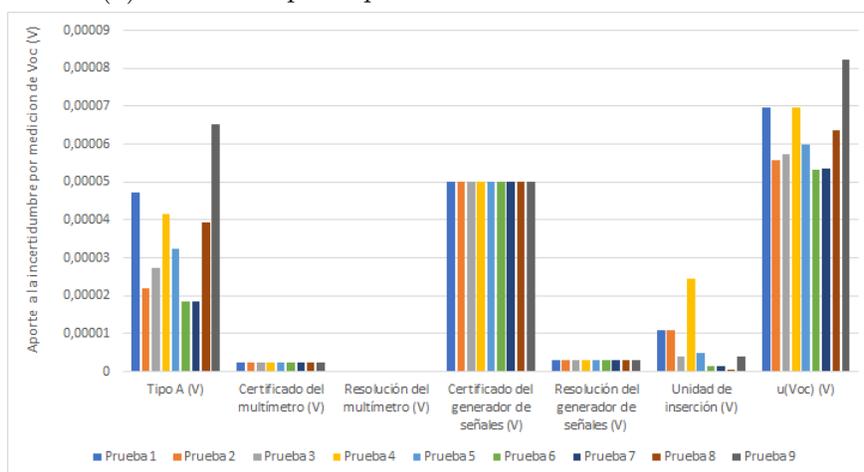
(b) Gráfico de pesos para la incertidumbre de la medición de  $V_{OC}$ 

Figura 5: Gráfico de pesos para la incertidumbre combinada (a) e incertidumbre de la medición del  $V_{OC}$  (b).

final de 47%. Grandes cambios en las condiciones ambientales pueden tener un gran impacto en la incertidumbre combinada, por lo que es importante implementar mecanismos de control en el laboratorio para asegurar estabilidad de las condiciones ambientales.

La Figura 5b muestra el motivo por el que previamente se encontró que no existe diferencia significativa entre 3, 5 y 10 repeticiones por prueba. En la prueba 2, 3, 5, 6 y 7 se consiguió una baja incertidumbre por repetibilidad, sin embargo, la incertidumbre debido al certificado de calibración del generador de señales es mucho mayor a la incertidumbre por repetibilidad, ocasionando que la incertidumbre final del  $V_{OC}$  sea mayor. Sería posible reducir la incertidumbre combinada si el laboratorio contara con un generador de señales y

un micrófono con mayor exactitud, ya que tendrían una menor incertidumbre por certificado de calibración.

Para verificar la estabilidad del método de medición de frecuencia, se realizaron cinco pruebas con el calibrador acústico configurado a 94 dB y otras cinco con una configuración de 114 dB. En el Cuadro 9 se muestran de forma resumida los resultados de la medición de frecuencia.

Cuadro 9: Resultados de las mediciones de frecuencia para determinar la precisión del método

Prueba	94 dB		114 dB	
	Frecuencia (Hz)	Incertidumbre $k = 2$	Frecuencia (Hz)	Incertidumbre $k = 2$
1	999,553	0,072	999,599	0,039
2	999,649	0,079	999,643	0,038
3	999,613	0,079	999,612	0,038
4	999,642	0,044	999,626	0,038
5	999,664	0,079	999,652	0,056
Promedio	999,624	0,071	999,626	0,042
Desv. Est.	0,044	0,015	0,022	0,008

Los resultados, tanto para la configuración en 94 dB y 114 dB, poseen una baja desviación estándar en la magnitud e incertidumbre de medida, por lo que el método produce resultados precisos. Para un calibrador acústico de clase 1, la desviación máxima permitida del valor nominal de frecuencia es de 1 %, por lo que el límite superior e inferior son, respectivamente, 1010 Hz y 990 Hz. Todos los resultados se encuentran dentro de la zona de tolerancia, por lo que el calibrador acústico se encuentra conforme según la norma IEC 60942. Del Cuadro 9 también se puede observar que en la configuración de 114 dB se obtiene una menor incertidumbre expandida. Esto se debe a que conforme se incrementan los decibelios, la amplitud de la señal que recibe el contador de frecuencias aumenta, permitiendo una lectura más estable y con menos ruido, reduciendo así la desviación estándar.

En el Cuadro 10, se muestra el resultado obtenido para el promedio e incertidumbre de la frecuencia medida. Para el caso de la frecuencia promedio en la mayoría de los casos, la diferencia respecto al método GUM ocurre hasta el quinto decimal. Para la diferencia en la incertidumbre expandida también se obtiene un buen resultado, donde en todos los casos la diferencia entre métodos ocurre también en el quinto decimal y es menor al 0,1 %. Los porcentajes de diferencia parecen indicar que no existe una diferencia significativa entre ambos métodos. Para la frecuencia, se obtuvo un porcentaje de diferencia menor entre el

Cuadro 10: Diferencia entre los resultados obtenidos utilizando la hoja de datos (método GUM) y utilizando el método de Montecarlo para la frecuencia.

	Frecuencia (Hz)	Diferencia (%)	Incertidumbre (dB)	Diferencia (%)
94 dB	999,55302	0,000002	0,07232	0,01521
	999,64903	0	0,07920	0
	999,61271	0,000003	0,07926	0,01262
	999,64194	0,000001	0,04429	0,02258
	999,66410	0,000003	0,07897	0,08864
114 dB	999,59904	0,000001	0,03859	0,02591
	999,64269	0,000003	0,03765	0
	999,61164	0,000004	0,03840	0,05208
	999,62556	0,000001	0,03796	0
	999,65229	0,000005	0,05593	0,01788

método GUM y Montecarlo que en el caso del nivel de presión acústica, donde la diferencia en la incertidumbre expandida se suele acercar al 1 % y en ocasiones superarlo, como ocurrió en la comparación de la prueba 9. El código utilizado para realizar la simulación de Montecarlo y las distribuciones de probabilidad obtenidas se encuentran respectivamente en los apéndices 6.5 y 6.6.

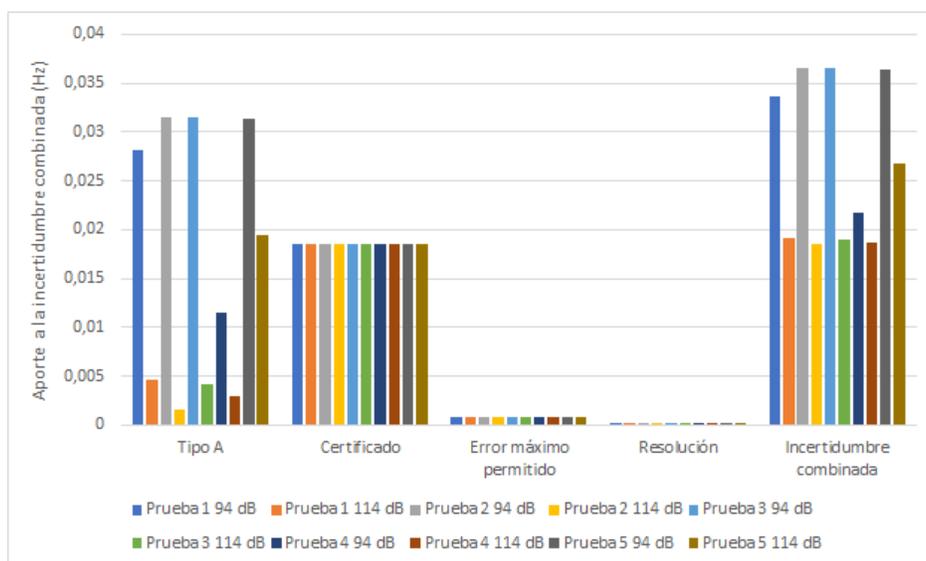


Figura 6: Gráfico de pesos para la incertidumbre combinada de la frecuencia

La Figura 6 se puede observar el peso que tiene cada fuente de incertidumbre en la incertidumbre combinada. La incertidumbre por repetibilidad y el certificado de calibración

del contador de frecuencias son las fuentes con mayor impacto en la incertidumbre combinada. La única fuente de incertidumbre que es posible reducir es la incertidumbre por repetibilidad. Las pruebas realizadas con el calibrador acústico configurado a 114 dB están asociadas a una menor desviación estándar, esto se debe a la sensibilidad del contador de frecuencias para detectar señales. La señal a 94 dB tiene una amplitud de aproximadamente  $47 \text{ mV}_{\text{RMS}}$ , mientras que la señal a 114 dB tiene una amplitud aproximada de  $470 \text{ mV}_{\text{RMS}}$ , por lo que es más difícil obtener lecturas estables para la configuración de 94 dB. Esta limitación es propia del método de medición y su única solución es adquirir un contador de frecuencias con mejor sensibilidad, sin embargo, la incertidumbre expandida obtenida en todos los casos se encuentra dentro de los límites de tolerancia de la norma IEC 60942, por lo que no se considera necesario tomar acciones correctivas.

Todos los resultados y pruebas presentados hasta el momento han sido obtenidos utilizando calibradores acústico con una cavidad acústica de 25,4 mm de diámetro, junto con un micrófono también de 25,4 mm de diámetro, sin embargo, no todos los calibradores acústicos tienen estas dimensiones. Es común encontrar calibradores con cavidades de 12,7 mm, sin embargo, el laboratorio de metrología PROCAME no cuenta con un micrófono compatible. En su lugar, el laboratorio cuenta con un adaptador que permite calibrar este tipo de calibradores acústicos utilizando un micrófono de 25,4 mm de diámetro. El problema se origina en la falta de documentación sobre el adaptador, ya que se recibió sin ningún tipo de hoja de datos o instructivo por parte del proveedor. Rápidamente se pudo observar que en el adaptador ocurría una pérdida de presión, lo que ocasionaba que el proceso de calibración diera resultados erróneos por lo que era necesario determinar una corrección debido al uso del adaptador. Para determinar el error asociado al uso del adaptador se utilizó el calibrador acústico Bruel Type 4226, el cual es el calibrador acústico con mayor exactitud con el que cuenta el laboratorio. El procedimiento consistió en realizar el proceso de calibración tres veces para los niveles de presión de 94 dB, 104 dB y 114 dB, y comparar el resultado obtenido con el resultado teórico, correspondiente a los resultados mostrados en el certificado de calibración CDK1902836, ubicado en el anexo 7.2. Los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 11.

El principal motivo por el que puede haber un cambio en la presión detectada por el micrófono al utilizar adaptadores es por un cambio en el volumen efectivo de carga en el micrófono (G.R.A.S Sound & Vibration, 2013). Esta corrección se puede calcular utilizando la ecuación 39, donde  $\Delta P$  es el cambio en presión sonora,  $\Delta V$  es el cambio en volumen efectivo y  $V_{ref}$  es el volumen efectivo nominal del micrófono. Las dimensiones del adaptador

Cuadro 11: Resultados obtenidos para la determinación del error por el uso de adaptador de 12,7 mm a 25,4 mm

Calibración	Nivel de presión (dB)	Resultado sin corregir (dB)	Resultado esperado (dB)	Error (dB)
1	94	81,66	94,05	12,39
	104	91,94	104,04	12,10
	114	101,95	114,03	12,08
2	94	81,58	94,05	12,47
	104	92,01	104,04	12,04
	114	102,07	114,03	11,96
3	94	80,69	94,05	13,36
	104	92,4	104,04	11,64
	114	102,15	114,03	11,88

se midieron con un calibrador vernier digital y fueron utilizadas para calcular la corrección por diferencia de volumen efectivo como se muestra en la Figura 7 y el Cuadro 12. El volumen efectivo del micrófono condensador Bruel & Kjaer Type 4160 es de 677,85 mm<sup>3</sup> según las dimensiones presentes en la hoja de datos del fabricante (Bluer & Kjaer, 2021).

$$\Delta P = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{V_{ref} + \Delta V}{V_{ref}} \right) \quad (39)$$

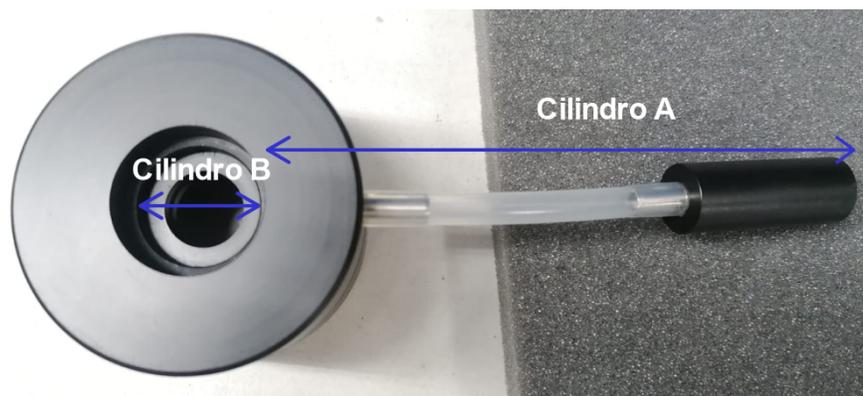


Figura 7: División espacial del adaptador para facilitar el cálculo del volumen interno

Al aplicar la corrección de 12,35 dB a los resultados sin corregir se obtienen los resultados mostrados en el Cuadro 13.

Al aplicar la corrección se obtienen resultados desfavorables, ya que se observa una reducción menor en el error en comparación con la que se esperaba. Para la presión de 94 dB de la primera calibración se obtiene un buen resultado, donde el error entre el resultado

Cuadro 12: Dimensiones del adaptador y determinación de la corrección por diferencia de volumen efectivo

Cilindro A	Diametro (mm)	3,49
	Altura (mm)	93,46
Cilindro B	Diametro (mm)	20
	Altura (mm)	3,94
Volumen efectivo micrófono (mm <sup>3</sup> )		677,85
Corrección (dB)		12,35

Cuadro 13: Resultados de aplicar la corrección debido a la diferencia de volumen efectivo

Calibración	Nivel de presión (dB)	Resultado Corregido (dB)	Resultado esperado (dB)	Error (dB)
1	94	94,01	94,05	0,04
	104	104,29	104,04	-0,25
	114	114,30	114,03	-0,27
2	94	93,93	94,05	0,12
	104	104,36	104,04	-0,32
	114	114,42	114,03	-0,39
3	94	93,04	94,05	1,01
	104	104,75	104,04	-0,71
	114	114,50	114,03	-0,47

corregido y el esperado es de tal solo 0,04 dB, lo que se puede considerar como una diferencia bastante pequeña, sin embargo, este es el único caso con un resultado positivo. Para el resto de mediciones, el error es bastante grande, tomando como referencia de comparación que el máximo error permisible para un calibrador acústico de clase 1, como el calibrador Bruel & Kjaer Type 4226, es de 0,4 dB. Bajo estas circunstancias, resulta complicado distinguir si el error presente en las mediciones se debe a un mal cálculo del factor de corrección, una deriva del instrumento respecto a lo indicado en su certificado de calibración vigente o un error en la ejecución del procedimiento. Las mayores diferencias entre el resultados corregido y el resultado teórico ocurre durante la tercera calibración, en particular se destaca el caso del nivel de presión de 94 dB, donde el error es de 1,01 dB.

Realizar calibraciones con el adaptador resulta más complicado que una calibración que no requiere del adaptador. El motivo principal es que las indicaciones del multímetro fluctúan de forma significativa, además de tardar más de un minuto en estabilizar, situación que no ocurre cuando se utiliza el diámetro del micrófono coincide con la cavidad acústica del calibrador. Estas fluctuaciones en la medición del voltaje de polarización del micrófono

ocasionan mediciones tanto inexactas como imprecisas, por lo que incluso implementando una corrección por diferencia de volumen efectivo no se obtienen resultados consistentes. Una opción es tratar de obtener medidas más exactas de las dimensiones del adaptador, sin embargo, esto solo conllevaría a pequeños cambios en la corrección por diferencia de volumen, pero no arreglaría los problemas de estabilidad. La opción que mejoraría de forma significativa los resultados sería adquirir un micrófono de 12,7 mm de diámetro, aunque optar por esta solución implicaría una inversión económica significativa.

## 4.2. Resultados sobre las cámaras audiométricas

El capítulo desarrollado para el procedimiento de verificación de cámaras audiométricas, sobre la estimación de la incertidumbre de medida, se puede encontrar en el apéndice 6.7. En el capítulo se amplía sobre las fórmulas matemáticas necesarias, además de brindar una breve explicación de cada fuente de incertidumbre y cual tipo de distribución de probabilidad fue asignada. En la Figura 8 se muestra el gráfico de pesos para las fuentes de incertidumbre consideradas. La incertidumbre combinada está principalmente dominada por los aportes del error máximo permitido del sonómetro por desviaciones en las condiciones ambientales de calibración con respecto a la temperatura y humedad relativa de referencia. Los certificados de calibración del sonómetro, micrófono y calibrador acústico, junto con la resolución y deriva del sonómetro, resultan ser aportes no significativos a la incertidumbre combinada, debido principalmente a la diferencia en un orden de magnitud con respecto a los valores de error máximo permitido.

En la Figura 9 se puede observar el comportamiento del ruido medido dentro de la cámara audiométrica del Hospital Rafael Ángel Calderón Guardia, con respecto a la frecuencia del ruido. Estos datos fueron obtenidos previamente por el personal del laboratorio de metrología PROCAME en el año 2019, pero se mantuvieron sin analizar hasta la fecha actual. También se puede observar de forma graficada el comportamiento de los límites aéreos y óseos establecidos por la norma ISO 8253-1. Los resultados para la verificación mostrada en la Figura 9a y 9b tienen un comportamiento similar entre si. El nivel de presión cumple con la norma ISO 8253 hasta una frecuencia de 100 Hz. La presión sonora inicia con una tendencia a disminuir, sin embargo, al superar los 100 Hz el nivel de presión aumenta de forma drástica, superando el límite aéreo. En el intervalo de frecuencias de 100 Hz a 2500 Hz, el nivel de presión acústica fluctúa por encima de ambos límites sin un patrón aparente. A partir de los 2500 Hz, el nivel de presión vuelve a cumplir con el límite aéreo, pero no con

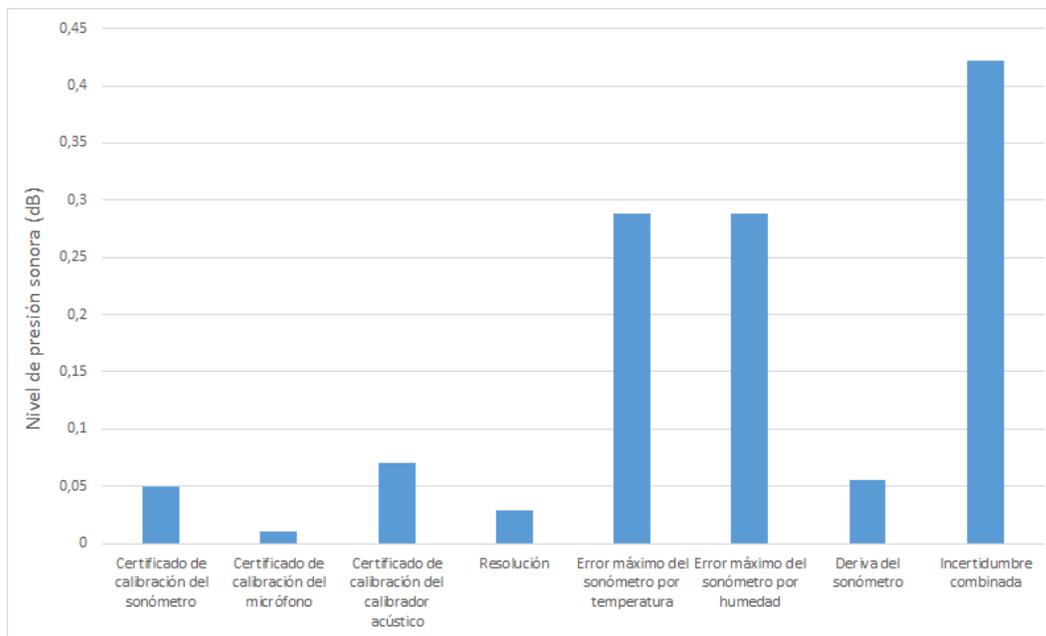


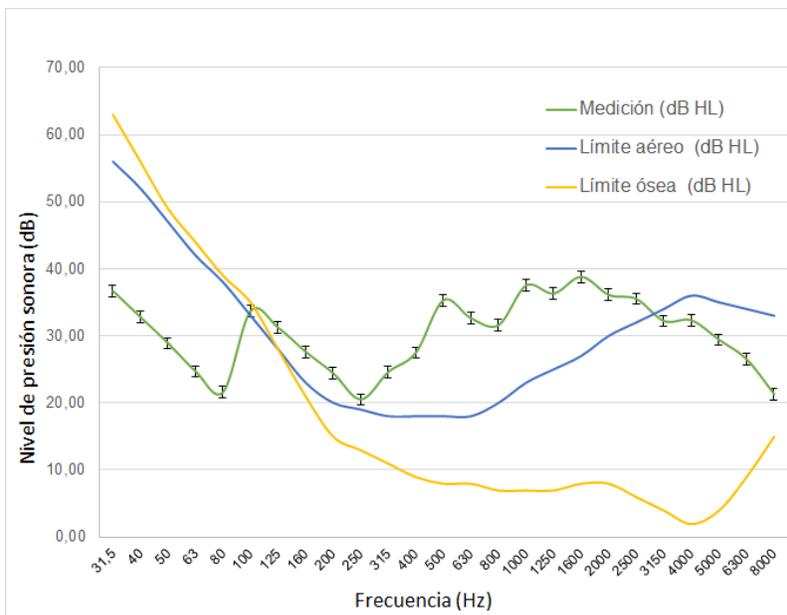
Figura 8: Gráfico de pesos para la incertidumbre combinada de la verificación de cámaras audiométricas.

el límite osea, por lo que en el intervalo de 2500 Hz hasta 8000 Hz, la cámara audiométrica sigue inconforme con la norma ISO 8253.

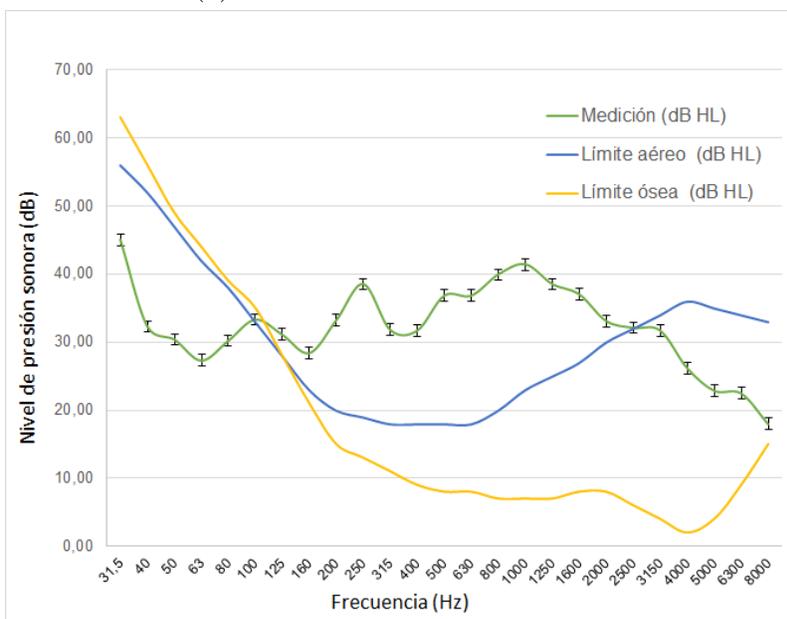
El resultado de la verificación en ambos casos es que la cámara audiométrica se declara inconforme con la norma internacional, por lo que es necesario implementar mejoras en las capacidad de atenuación sonora de la habitación. Los resultados también se pueden encontrar de forma tabular en las Tablas 15 y 16 en la sección de apéndices.

En el Cuadro 14 se encuentra el error normalizado entre la primera y segunda medición de la cámara audiométrica. De las 25 mediciones a distintas frecuencias, solo en las de 40 Hz, 100 Hz, 125 Hz, 160 Hz y 3150 Hz se pueden considerar que no existe una diferencia significativa entre los resultados obtenidos. En el resto de frecuencias se puede observar un distinto grado de variación según el error normalizado, destacando el caso de la frecuencia de 250 Hz, donde se da la mayor diferencia entre ambas mediciones, con un error normalizado igual a 15,21.

Al contar únicamente con los resultados de medición, es complicado identificar las causas por las que existen estas diferencias en las mediciones, especialmente porque no se conocen las condiciones bajo las que fueron tomadas. Se consideran dos posibles explicaciones, existe un error en el procedimiento que no garantiza la estabilidad de las mediciones o la diferen-



(a) Resultado de la verificación 1



(b) Resultado de la verificación 2

Figura 9: Comparación entre los resultados de medición de ruido dentro de la cámara audiométrica en comparación a los límites aéreos y óseos.

La diferencia entre resultados es debido a factores ajenos al procedimiento, como una construcción inadecuada de la cámara audiométrica que permita el ingreso de ruido desde el exterior.

El equipo utilizado para realizar estas mediciones corresponde al kit "Sistema de cali-

Cuadro 14: Error normalizado entre las dos mediciones realizadas a la cámara audiométrica

Frecuencia (Hz)	Medición 1 (dB)	Incertidumbre 1 (dB)	Medición 2 (dB)	Incertidumbre 2 (dB)	Error normalizado
31,5	36,70	0,84	45,00	0,84	7,01
40	32,80	0,84	32,30	0,84	0,42
50	28,90	0,84	30,40	0,84	1,27
63	24,70	0,84	27,30	0,84	2,20
80	21,60	0,84	30,20	0,84	7,27
100	33,70	0,84	33,30	0,84	0,34
125	31,20	0,84	31,10	0,84	0,08
160	27,60	0,84	28,40	0,84	0,68
200	24,40	0,84	33,20	0,84	7,44
250	20,50	0,84	38,50	0,84	15,21
315	24,60	0,84	31,80	0,84	6,08
400	27,50	0,84	31,70	0,84	3,55
500	35,30	0,84	36,80	0,84	1,27
630	32,60	0,84	36,80	0,84	3,55
800	31,60	0,84	39,90	0,84	7,01
1000	37,50	0,84	41,40	0,84	3,30
1250	36,30	0,84	38,50	0,84	1,86
1600	38,80	0,84	37,00	0,84	1,52
2000	36,10	0,84	33,10	0,84	2,53
2500	35,50	0,84	32,10	0,84	2,87
3150	32,20	0,84	31,70	0,84	0,42
4000	32,30	0,84	26,20	0,84	5,15
5000	29,40	0,84	22,90	0,84	5,49
6300	26,50	0,84	22,50	0,84	3,38
8000	21,30	0,84	18,00	0,84	2,79

bración de audiómetros”, modelo AUDCAL, fabricado por la compañía Larson Davis. Todos los equipos contenidos en el kit se encuentran debidamente calibrados, tal como se puede observar en el certificado de calibración ubicado en el anexo 7.3, con una validez hasta mayo del 2023. Además, el procedimiento de verificación fue construido según normas internacionales, especialmente ISO 17020 y ISO 8253-1. El proceso de verificación también es asistido por el software de computadora AUDit, elaborado también por la empresa Larson Davis. Todos estos factores le dan fortaleza a la validez del método de verificación, por lo que se considera poco probable que la causa de la diferencia entre los resultados de ambas mediciones sea debido a un error en el método de medición.

Los resultados de ambas mediciones concuerdan en que la cámara audiométrica se encuentra no conforme con la norma ISO 8253-1, por lo que es razonable asumir que existen deficiencias en la construcción de la cámara audiométrica que permiten que ruido proveniente del exterior afecten los resultados de las audiometrías. Bajo estas condiciones, las fuentes de

error pueden ser muy numerosas, como por ejemplo un incremento en el tránsito de personas fuera de la cámara audiométrica, el paso de vehículos de emergencia ingresando al hospital, entre otros. Apuntar una causa exacta para el resultado del error normalizado resulta imposible debido a que no se estuvo presente durante la toma de datos, sin embargo, debido a la evidencia expuestos anteriormente, es razonable deducir que la causa general es un fallo en la construcción de la cámara audiométrica.

## 5. Conclusiones

Se pudo elaborar un procedimiento para calibración de calibradores acústicos sencillo de replicar, con el que se pueden obtener resultados precisos, tanto para nivel de presión sonora como para frecuencia. El procedimiento fue bien recibido por el personal del laboratorio de metrología PROCAME y será implementado para su uso regular. También se encontró que incrementar el número de repeticiones de medida no disminuye la incertidumbre combinada, debido a que la incertidumbre asociada al certificado de calibración del generador de señales es mucho mayor. Debido al peso que este instrumento tiene en la incertidumbre de medida, se recomienda encargar una calibración al generador de señales Keysight 33509B del laboratorio de metrología PROCAME, con el objetivo de identificar si existe una deriva apreciable con respecto al certificado de calibración vigente. Adicionalmente, se encontró que el uso del adaptador para micrófono de 25,4 mm de diámetro a una cavidad acústica de 12,7 mm, no es adecuado para el procedimiento de calibración. A pesar del costo económico que conlleva, se recomienda realizar cotizaciones para adquirir un micrófono condensador con un diámetro de 12,7 mm.

Los resultados de la comparación entre la incertidumbre expandida calculada por medio del método especificado en la Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM) y el método estocástico de Montecarlo, sugieren que no existe diferencia entre los resultados de ambos métodos. Para el caso de la medición de nivel de presión sonora obtuvieron resultados con diferencias menores al 1 %, mientras que para la medición de frecuencia, las diferencias fueron menores al 0,1 %. La hoja de datos creada para automatizar el proceso del cálculo de incertidumbre expandida fue utilizada para obtener los resultados por el método de la GUM, por lo que es seguro confirmar que sus resultados se encuentran validados por la comparación con el método de Montecarlo.

Se identificó que la mayor carencia en el procedimiento existente para la verificación de

cámaras audiométricas era la omisión completa del cálculo de la incertidumbre de medida. Se propuso un modelo para el cálculo de la incertidumbre de medida, del cual se pudo identificar que la mayor fuente de incertidumbre corresponde al error máximo permitido del sonómetro debido a la desviación de las condiciones ambientales de calibración con respecto a las condiciones ambientales de referencia.

Del análisis de los resultados de la verificación de la cámara audiométrica del Hospital Rafael Ángel Calderón Guardia se concluye que la cámara audiométrica no cumple con el estándar internacional ISO 8253-1, debido que a partir de una frecuencia de 100 Hz, no cumple con los niveles de atenuación requeridos para la vía de transmisión aérea y ósea. También se encontró que las dos mediciones realizadas para el ruido dentro de la cámara audiométrica difieren en algunas de las frecuencias medidas, según lo indica el resultado del error normalizado, dando la impresión de que el método de verificación tiene baja precisión. Sin embargo, debido a la calidad de los equipos utilizados para la verificación y considerando que fueron calibrados recientemente, se deduce que la causa más probable para la fluctuación en los resultados es la pobre construcción de la cámara audiométrica, la cual falla en atenuar el ruido proveniente del exterior.

Finalmente, y a modo de perspectiva futura, se recomienda al laboratorio de metrología PROCAME, realizar un estudio posterior para ejecutar la validación del método desarrollado en este proyecto y poder solicitar al ECA el inicio del proceso de acreditación en la magnitud de frecuencia y nivel de presión sonora en calibradores acústicos. Además, se recomienda presentar los resultados sobre las cámaras audiométricas a la gestión del hospital Calderón Guardia y sugerir realizar un estudio para determinar si existen mejoras que se puedan implementar a la cámara audiométrica sin la necesidad de recurrir a una completa reconstrucción. Como última recomendación se sugiere a la Unidad Académica de Ingeniería Física, utilizar este proyecto como un primer paso para iniciar una relación académica con el laboratorio de metrología PROCAME, ya que podría permitir fortalecer la formación en metrología que reciben los estudiantes de la carrera y abrir las puertas para que otros estudiantes puedan realizar proyectos en este laboratorio.

## Referencias

- Arcas G., Ruiz M., Lopez J., Recuero M. y Fraile R. (2006). «A Virtual Instrument to Evaluate the Uncertainty of Measurement in the Calibration of Sound Calibrators». *World Scientific Publishing Co.*, págs. 119-129.
- Bluer & Kjaer (2021). *1" LABORATORY STANDARD MICROPHONE*. URL: <https://www.bksv.com/en/transducers/acoustic/microphones/microphone-cartridges/4160>.
- Bruel Kjaer (1971). «Microphone Preamplifier Type 2627».
- CEM (2000). «AC-005 Procedimiento para la calibración de Calibradores Sonoros.»
- ECA (2011). *Laboratorio de Calibración Acreditado – N.º LC-091*. URL: <https://www.eca.or.cr/component/spsimpleportfolio/item/109-procame-calibracion>.
- (2020). *Laboratorio de Calibración Acreditado – N.º LC-020*. URL: <https://www.eca.or.cr/files/61/Laboratorios-de-calibracion/8/SCM-Alcance-acreditacion-LC-020.pdf>.
- G.R.A.S Sound & Vibration (2013). «G.R.A.S. 42AC/42AC-S2 Pistonphone».
- Gaetán S., Tenutta M., Bertinatti A., Vicente F., Muratore J., Maggi A. y Ferreyra S. (2019). «EVALUACIÓN DE CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS DE CABINAS AUDIOMÉTRICAS FIJA Y MÓVIL DEL CINTRA». *Mecánica Computacional*, págs. 67-76.
- Hanes P. (2001). *COMPARISON OF MEASUREMENT UNCERTAINTY BUDGETS FOR CALIBRATION OF SOUND CALIBRATORS: EUROMET PROJECT 576*. Teddington: National Physical Laboratory.
- IEC (2016). *Electroacústica. Calibradores acústicos. IEC 60942*.
- ISO (2010). «Acústica. Métodos de ensayo audiométricos. Parte 1: Audiometría de tonos puros por conducción aérea y por conducción ósea. (Número 8253-1)».
- LCM (2021). *Laboratorio de Acústica*. URL: <https://lcm.go.cr/laboratorio-de-acustica/>.
- Milhomem T. A. y M. Defilippo Soares Z. (2016). «Calibration of sound calibrators: an overview». *Journal of Physics: Conference Series* 733, pág. 012055. DOI: 10.1088/1742-6596/733/1/012055.
- Osejos-Merino M., Cano-Andrade R., Chasing-Guagua E., Aguilar-Cano C. y Chasing-Salazar S. (2019). «Acoustic pollution and its incidence in population health along Alejo Lascano Avenue in Jipijapa city – Ecuador». *Dominio de las ciencias* 5.1, págs. 538-559.
- Palma L. (2016). *Calibración de calibradores acústicos*. Lima: Laboratorio de Acústica de la Dirección de Metrología de INACAL.
- Pedroso M., Gerges S. y Goncalves A. (2004). «Uncertainty in audiometer calibration». *Metrología*, págs. 1-7.

PROCAME (2017). *Programa de Calidad, Ambiente y Metrología*. URL: <https://www.procame.una.ac.cr/>.

Vigliano M., Huarte A., Borro D., Lasarte U. y Manrique-Rodriguez M. (2021). «Realistic Environment Audiometric Booth: Development and Clinical Validation». *Audiology and Neurotology* 26.5.

## **6. Apéndices**

### **6.1. Procedimiento elaborado para la calibración de calibradores acústicos**

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL          ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES          PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD,          AMBIENTE Y METROLOGÍA          LABORATORIO DE METROLOGÍA</b>	
Procedimiento de calibración <b>PC- Calibradores Acústicos</b>		Página 1 de 19
Aprobado por:	Fecha de implementación:	Copia N°. 01 Versión 01

**1. Alcance:** Este procedimiento abarca los instrumentos de medición sonora conocidos como calibradores acústicos con diámetro de (6,27 a 12,54) mm, de las clases de exactitud PL, 1, 2 de acuerdo a la norma INTE/IEC 60942:2016.

**2. Términos y definiciones:** Son de aplicación los términos y definiciones generales de la referencia INTE/IEC 60942 2016:

**Calibración [1]:** Conjunto de operaciones que establece bajo condiciones especificadas, la relación entre los valores de una magnitud indicados por un instrumento de medida o un sistema de medida, o los valores representados por una medida materializada o por un material de referencia, y los valores correspondientes de esa magnitud realizados por patrones.

**Incertidumbre de medida [1]:** Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza.

**Calibrador sonoro [3]:** Dispositivo que genera una presión acústica sinusoidal de nivel y frecuencia especificados cuando se acopla a modelos especificados de micrófono en configuraciones específicas. También se le denomina calibrador acústico.

**Desviación típica experimental [2]:** Para una serie de n mediciones de un mismo mensurando, las magnitudes que caracteriza la dispersión de los resultados, dada por la fórmula:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Siendo  $x_i$  el resultado de la i-ésima medición y  $\bar{x}$  la media aritmética de las n resultados considerados.

**Las condiciones ambientales de referencia para especificar el rendimiento de un calibrador acústico son:**

- temperatura del aire: 23 °C
- presión atmosférica: 101,325 kPa
- humedad relativa: 50 %

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL</b> <b>ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES</b> <b>PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD,</b> <b>AMBIENTE Y METROLOGÍA</b> <b>LABORATORIO DE METROLOGÍA</b>	
Procedimiento de calibración <b>PC- Calibradores Acústicos</b>		Página 2 de 19
Aprobado por:	Fecha de implementación:	Copia N°. 01 Versión 01

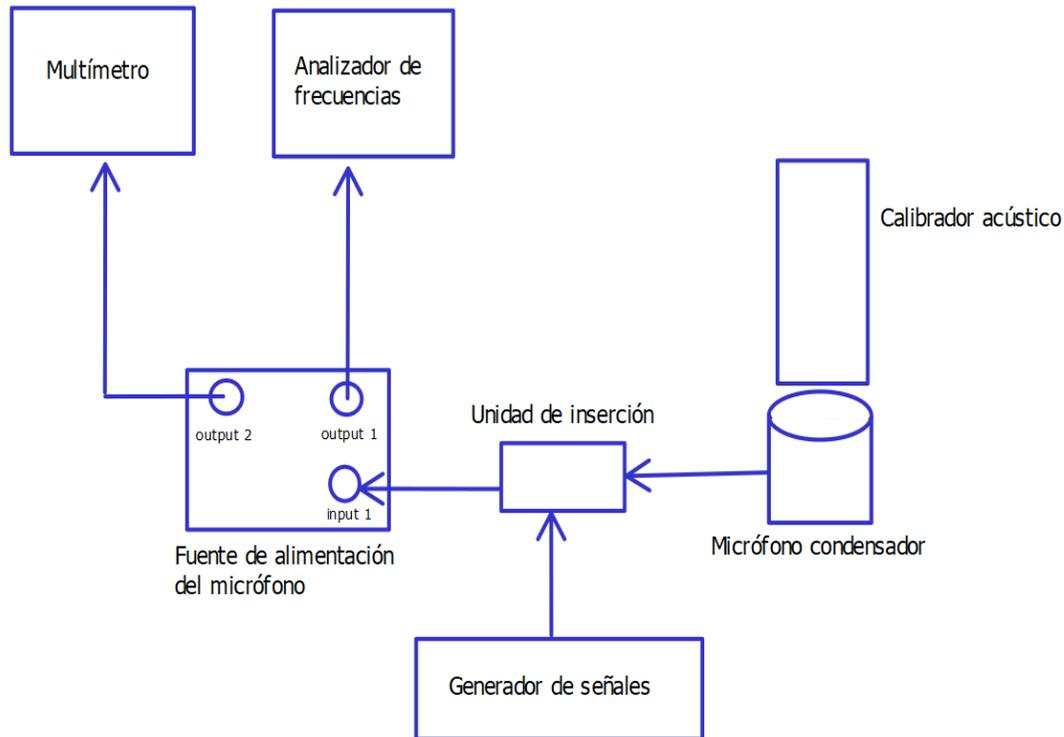


Figura 1. Esquema de la conexión entre equipos para realizar la calibración de calibradores acústicos.

En la Figura 1 se muestran en diagrama de bloques, las conexiones necesarias entre equipos para montar la estación de calibración para calibradores acústicos. La estación está conformada por un multímetro, un contador de frecuencias, un generador de señales y un micrófono condensador junto con su respectiva fuente de alimentación. La correcta calibración de un calibrador acústico consta de tres pruebas: la prueba de nivel de presión acústica, la prueba de frecuencia y la prueba de distorsión armónica.

La prueba de nivel de presión acústica consiste en el uso del multímetro y generador de señales como instrumentos patrón, donde por medio del método de inserción de voltaje se estima el voltaje en circuito abierto del micrófono condensador. Se elaborará más sobre los detalles para la realización del método de inserción de voltaje en la sección 5.2 del presente procedimiento. La prueba de nivel de presión acústica se realiza para todos los niveles de presión, en todas las frecuencias, que el dispositivo sujeto a calibración esté diseñado para operar. Pueden existir calibradores diseñados para operar a un único nivel de presión acústica a una sola frecuencia (usualmente 94 dB a 1 kHz), pero también existen dispositivos que pueden operar a más de un nivel de presión, con una amplia selección de frecuencias.

La prueba de frecuencia se realiza por medio de una comparación directa entre la frecuencia nominal del instrumento contra la frecuencia medida por el contador de frecuencias, el cual es utilizado

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL          ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES          PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD,          AMBIENTE Y METROLOGÍA          LABORATORIO DE METROLOGÍA</b>	
Procedimiento de calibración <b>PC- Calibradores Acústicos</b>		Página 3 de 19
Aprobado por:	Fecha de implementación:	Copia N°. 01 Versión 01

como instrumento patrón. La prueba se realiza para todas las frecuencias en las que el calibrador acústico puede operar, utilizando el nivel de presión acústica principal. Es común encontrar calibradores que operan a una única presencia, típicamente a 1 kHz, sin embargo, existen calibradores que ofrecen la opción de cambiar la frecuencia en incrementos de octava.

Para realizar las pruebas de calibración se cuenta con una hoja de datos elaborada en Excel, diseñada para facilitar la toma de datos, correcciones a las magnitudes medidas, el cálculo de incertidumbre y el desarrollo del certificado de calibración. La hoja de datos cuenta con espacios claramente identificados, donde el técnico deberá anotar los resultados de las mediciones, además de especificar datos del calibrador acústico como la clase de exactitud, frecuencia nominal y diámetro de la cámara acústica. La hoja de datos se encargará de realizar el cálculo de incertidumbre de manera automática, según los lineamientos de Guía para Estimación de la Incertidumbre de Medida (GUM). El certificado de calibración también será confeccionado de forma automática por la hoja de datos, donde se mostrarán de forma resumida los resultados del proceso de calibración.

Las tolerancias establecidas para cada uno de los ensayos realizados se corresponden con los indicados en Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3, mientras que los valores máximos para la incertidumbre de medida se muestran en la Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6, dichas tablas se encuentran en la sección de anexos.

**3. Condiciones y preparación para la calibración:** La calibración se realiza en las instalaciones del laboratorio de metrología.

El lugar donde se realiza la calibración debe mantener las condiciones ambientales en el intervalo comprendido de 18 °C a 24 °C y de 35 % a 60 % de humedad relativa, con una variación máxima durante la calibración de 0,5 °C y 5 %. Se registraran las condiciones de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica al iniciar y al finalizar el proceso de calibración.

Los patrones utilizados serán de la exactitud adecuada, según la exactitud del instrumento a calibrar, los mismos deben estar debidamente calibrados y con su Certificado de Calibración actualizado. En el local de calibración no existirán corrientes de aire ni vibraciones que afecten visiblemente las características técnicas-metroológicas del instrumento patrón. No existirán fuentes de calor cercanas al instrumento que puedan afectar de manera perceptible su funcionamiento.

#### 4. Equipos y materiales utilizados.

- Micrófono condensador de 12,54 mm de diámetro con preamplificador.
- Fuente de alimentación para micrófono configurada a un voltaje de polarización de 200 V.
- Unidad de inserción de voltaje.
- Generador de señales.
- Multímetro Keysight 3458A o equivalente.

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL          ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES          PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD,          AMBIENTE Y METROLOGÍA          LABORATORIO DE METROLOGÍA</b>	
Procedimiento de calibración <b>PC- Calibradores Acústicos</b>		Página 4 de 19
Aprobado por:	Fecha de implementación:	Copia N°. 01
		Versión 01

- Contador de frecuencias Tektronix FCA 3100 o equivalente.
- Computadora con el archivo “Hoja de Datos Calibrador Acústico.xslm”
- Cronómetro
- Adaptador para micrófonos de 25,4 mm de diámetro a entrada de 12,7 mm.

**4.1 Instrumentos para la medición de condiciones ambientales:** Se usarán los instrumentos para la medición de las condiciones ambientales (temperatura , presión y humedad relativa) con una incertidumbre expandida con un nivel de confianza 95 % no mayor que 1 °C para temperatura y 5 % para humedad relativa y 100 Pa para presión.

**4.2 Accesorios:** De ser necesario se utilizaran pinceles, brochas o paños de algodón para limpiar el dispositivo u otras partes del instrumento a calibrar que así lo requiera.

Si la recámara acústica del calibrador acústico es de 12,7 mm, será necesario el uso del adaptador Bruel & Kjaer UA-1609. El uso de este adaptador deberá ser especificado en la hoja de datos en la sección correspondiente.

## 5. Descripción de la calibración.

**5.1 Comprobaciones previas:** Se realizara un examen exterior y otro de funcionamiento al instrumento, tomando en cuenta la siguiente lista de chequeo.

Examen exterior	C	NC	N.A
La pantalla del calibrador acústico se encuentra completa, sin rayones ni rota			
Los botones del calibrador acústico se encuentran completos, sin roturas			
Las baterías se encuentran cargadas o el nivel es adecuado para el proceso de calibración			
En caso de que se entregue cables de conexión estos se encuentran completos sin roturas ni quiebres			
Comprobación de Funcionamiento	C	NC	N.A
En calibrador acústico digitales, el botón encender/apagar enciende la pantalla de indicación y muestra la magnitud completa (todos los dígitos y su unidad de medida)			
El dispositivo cambia la indicación al cambiar de una frecuencia temporal y de banda			
Comprobación del estado del inserto con el micrófono (visual o mediante una verificación de calibración de terreno)			

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL          ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES          PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD,          AMBIENTE Y METROLOGÍA          LABORATORIO DE METROLOGÍA</b>	
Procedimiento de calibración <b>PC- Calibradores Acústicos</b>		Página 5 de 19
Aprobado por:	Fecha de implementación:	Copia N°. 01
		Versión 01

El resultado del examen exterior y la comprobación del funcionamiento se evaluarán como conforme (C), no conforme (NC) y no aplica (NA) en cada caso, según el instrumento cumpla o no las exigencias antes planteadas. Si el resultado de alguna de las comprobaciones antes referidas es no conforme se informará al cliente y no se continuará el proceso de calibración, si el cliente así lo solicita, y se anotara el resultado en las observaciones del certificado de calibración.

Nota: recordar que los equipos (calibrando, patrones y fuente de alimentación del micrófono) deben estar ambientados a las condiciones del laboratorio al menos 30 minutos antes de la calibración.

## 5.2 Proceso de calibración.

### Prueba de nivel de presión acústica:

Se debe verificar que el equipo esté correctamente conectado, según se muestra en la Figura 1. Las condiciones ambientales iniciales y los datos del instrumento, como fabricante, modelo, número de serie y demás, deben ser llenados en el espacio correspondiente en la hoja de datos, tal como se muestra en la Figura 8 en la sección de anexos. Todos los tiempos que se establezcan en este procedimiento deberán ser controlados mediante un cronómetro de mano.



Figura 2. Configuración adecuada para la conexión del multímetro y la unidad de inserción a la fuente de alimentación del micrófono.

Una vez esperado el tiempo de estabilización indicado por el fabricante para el calibrador acústico, se iniciará la recolección de datos. En caso de que no exista una especificación para el tiempo de estabilización, se recomienda asumir que el tiempo es igual a treinta segundos, sin embargo, queda a criterio del técnico si se requiere un tiempo mayor. Primero se determinará la corrección debido a la diferencia entre el voltaje de polarización teórico y el voltaje que entrega la fuente de alimentación. El voltaje de polarización se mide en la parte trasera de la fuente de alimentación, configurando el multímetro para mediciones en corriente continua y colocando la sonda positiva en la terminal identificada como "Polarization Voltage" y la sonda negativa en la terminal de tierra. Ambas terminales se muestran circuladas en la Figura 3. Estos resultados serán anotados en la sección de la hoja de datos que se muestra en la Figura 9.

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL          ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES          PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD,          AMBIENTE Y METROLOGÍA          LABORATORIO DE METROLOGÍA</b>	
Procedimiento de calibración <b>PC- Calibradores Acústicos</b>		Página 6 de 19
Aprobado por:	Fecha de implementación:	Copia N°. 01 <span style="float: right;">Versión 01</span>



Figura 3. Terminales de la fuente de alimentación necesarias para la medición del voltaje de polarización real.

El método de inserción de voltaje se realiza de la siguiente manera: primero se enciende el calibrador acústico (verificando que el generador de señales esté apagado y desconectado de la unidad de inserción) y se espera el tiempo de estabilización del calibrador acústico. El multímetro se configura para realizar mediciones de voltaje en corriente alterna y una vez pasado el tiempo de estabilización, se anota el voltaje medido por el multímetro en la salida de la fuente de alimentación. El voltaje medido será el voltaje promedio tras un tiempo de diez segundos. Para ello se debe presionar la tecla “Shift” del multímetro, seguido del botón “Auto Zero”. En el menú desplegado se debe seleccionar la opción “Math” y luego la opción “Stat”, presionando “Enter” para confirmar la selección. A partir de este punto el multímetro empezará a almacenar valores de voltaje en memoria. Pasados los diez segundos, se apretará la tecla “Shift”, seguida de la tecla “Trig”. En el menú desplegado se deberá seleccionar la opción “Rmath” y luego la opción “Mean”. Para finalizar, se apretará la tecla “Enter” y el multímetro mostrará el voltaje promedio.



Figura 4. Configuración del multímetro para el cálculo de valores promedio.

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL          ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES          PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD,          AMBIENTE Y METROLOGÍA          LABORATORIO DE METROLOGÍA</b>	
Procedimiento de calibración <b>PC- Calibradores Acústicos</b>		Página 7 de 19
Aprobado por:	Fecha de implementación:	Copia N°. 01 Versión 01

Se apaga el calibrador acústico, se conecta el generador de señales a la unidad de inserción de voltaje y luego se enciende. El generador de señales debe estar configurado a la misma frecuencia nominal del calibrador acústico. La amplitud del voltaje pico-pico de la señal generada debe ser ajustada hasta que el voltaje medido por el multímetro en la salida de la fuente de alimentación sea el mismo que el indicado cuando el calibrador acústico estaba encendido. En ocasiones, debido a la resolución del generador de señales, no será posible obtener exactamente el mismo voltaje, en este caso se debe procurar que la diferencia entre ambos voltajes sea la menor posible. Se debe anotar el voltaje indicado por el multímetro. El generador de señales se mantiene encendido y se desconecta de la estación de calibración, posteriormente se utilizará el multímetro para medir el voltaje en circuito abierto del generador de señales y se anotará en el espacio correspondiente de la hoja de datos. Este proceso se repite un total de cuatro veces más para un total de diez repeticiones. La sección de la hoja de datos donde se anotan los resultados del método de inserción de voltaje se muestra en la Figura 10.



Figura 5. Medición del voltaje en circuito del generador de señales.

Según la norma IEC 60942, la prueba de nivel de presión acústica se debe repetir para todos los niveles de presión acústica en todas las frecuencias en las que el calibrador acústico esté diseñado para operar.

**Prueba de frecuencia:**

La prueba de frecuencia se debe realizar al nivel de presión acústica principal, el cual se encuentra especificado en los instructivos del fabricante, para cada una de las frecuencias en las que el calibrador acústico esté diseñado para operar. En casos donde no se especifique un nivel de presión principal, se utilizará un nivel de presión acústica de 94 dB, el cual corresponde a una presión de un pascal.

Se debe verificar que la función “Pacing” del contador de frecuencias se encuentre encendida. Para ello se debe presionar el botón bajo la opción “Settings” y luego “Stat”. La función “Pacing” debería estar encendida, caso contrario se debe apretar el botón bajo “Pacing”. También se debe verificar que el conector BNC del cable esté conectado en la entrada A del contador de frecuencias.

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL          ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES          PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD,          AMBIENTE Y METROLOGÍA          LABORATORIO DE METROLOGÍA</b>	
Procedimiento de calibración <b>PC- Calibradores Acústicos</b>		Página 8 de 19
Aprobado por:	Fecha de implementación:	Copia N°. 01 <span style="float: right;">Versión 01</span>



Figura 6. Configuración adecuada para el adecuado funcionamiento del contador de frecuencias.

Para iniciar la prueba de frecuencia primero se debe esperar el tiempo de estabilización del contador de frecuencias y del calibrador acústico. El calibrador acústico debe estar configurado en la menor frecuencia que se permita. Una vez pasado el tiempo de estabilización, se deben anotar las condiciones de temperatura, presión y humedad relativa.

La prueba se inicia anotando el valor de frecuencia nominal indicado por el fabricante, junto con el nivel de presión acústica principal utilizado para la calibración. Posteriormente se inicia el proceso de medición de frecuencia, donde se deben realizar diez mediciones y los resultados se deben anotar en el espacio mostrado en la Figura 11 mostrada en los anexos. Para medir la frecuencia se presiona el botón “Meas”, “Frequency Burst” y luego se presiona el botón bajo la opción “Input A”. Entre cada medición se debe esperar el tiempo de estabilización para asegurar una medida correcta.



Figura 7. Medición de frecuencia del calibrador acústico utilizando el contador de frecuencias.

En caso que el contador de frecuencias no realice ninguna lectura de frecuencia, se deberá proceder a aumentar la sensibilidad del dispositivo. Para ello se debe presionar el botón “Settings”, luego se

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL          ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES          PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD,          AMBIENTE Y METROLOGÍA          LABORATORIO DE METROLOGÍA</b>	
Procedimiento de calibración <b>PC- Calibradores Acústicos</b>		Página 9 de 19
Aprobado por:	Fecha de implementación:	Copia N°. 01
		Versión 01

presiona el botón bajo “Trigger Level” y se reduce hasta que el contador de frecuencias muestre una lectura estable. Se recomienda ajustar el “Trigger Level” entre 50 % y 40 %, según se considere necesario.

Al finalizar la prueba para una frecuencia, el calibrador se debe ajustar a la siguiente frecuencia en orden creciente, esperar el tiempo de estabilización y repetir la prueba para la nueva frecuencia.

**5.3 Registro y tratamiento de datos:** Para cada valor de prueba aplicado durante la determinación se anotará en el registro de calibración según se muestra en el PC-18 R-01.

## 6. Resultados.

### 6.1 Determinación del error de indicación:

#### Prueba de nivel de presión acústica:

Se utiliza como base el cálculo

$$LSP_{real} = 20 \cdot \log \left( \frac{V_{OC}/S_{dB,f}}{20 \mu Pa} \right) - 20 \cdot \log \left( \frac{V_{PC}}{V_{PM}} \right) - 20 \cdot \log \left( \frac{v_{cal}}{v_{cal} + \Delta v} \right) - s_t - tcs_f(t_C - t_M) - pcs_f(p_C - p_M) - hcs_f(rh_C - rh_M) + tcc(t_R - t_C) + pcc(p_R - p_C) + hcc(rh_R - rh_C)$$

$$Error = |LSP_{real} - LSP_{ref}|$$

Donde:

$LSP_{real}$  = Nivel de presión acústica medido

$V_{OC}$  = Voltaje de circuito abierto del micrófono patrón

$S_{dB,f}$  = Sensibilidad del micrófono patrón (V/dB)

$V_{PC}$  = Voltaje de polarización del micrófono en condiciones de calibración

$V_{PM}$  = Voltaje de polarización de micrófono según las especificaciones del fabricante

$v_{cal}$  = Volumen efectivo del calibrador acústico

$\Delta v$  = Diferencia entre el volumen efectivo del calibrador acústico y el volumen efectivo del micrófono patrón

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL</b> <b>ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES</b> <b>PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD,</b> <b>AMBIENTE Y METROLOGÍA</b> <b>LABORATORIO DE METROLOGÍA</b>	
Procedimiento de calibración <b>PC- Calibradores Acústicos</b>		Página 10 de 19
Aprobado por:	Fecha de implementación:	Copia N°. 01 Versión 01

$s_t$  = Aporte de la deriva del instrumento

$tcs_f$  = Coeficiente para cambios de temperatura del micrófono patrón

$t_C$  = Temperatura durante la calibración

$t_M$  = Temperatura de referencia indicada por el fabricante

$p_{cs_f}$  = Coeficiente para cambios de presión atmosférica del micrófono patrón

$p_C$  = Presión atmosférica durante la calibración

$p_M$  = Presión atmosférica de referencia indicada por el fabricante

$hcs_f$  = Coeficiente para cambios de humedad del micrófono patrón

$rh_C$  = Humedad relativa durante la calibración

$rh_M$  = Humedad relativa de referencia indicada por el fabricante

$tcc$  = Coeficiente para cambios de temperatura del calibrador acústico

$pcc$  = Coeficiente para cambios de presión atmosférica del calibrador acústico

$hcc$  = Coeficiente para cambios de humedad del calibrador acústico

$t_R$  = Temperatura de referencia para el calibrador acústico según la IEC 60942

$p_R$  = Presión atmosférica de referencia para el calibrador acústico según la IEC 60942

$rh_R$  = Humedad relativa de referencia para el calibrador acústico según la IEC 60942

### Prueba de frecuencia:

Se utiliza como base el cálculo

$$desv_f = \frac{|(f_{real} + \delta F_{cert} + \delta F_{res} + \delta F_{EMP}) - f_{nom}|}{f_{nom}} \cdot 100$$

Donde:

$desv_f$  = la diferencia porcentual en valor absoluto entre la frecuencia medida y la frecuencia nominal indicada por el fabricante

$f_{real}$  = frecuencia medida por el contador de frecuencias

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL</b> <b>ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES</b> <b>PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD,</b> <b>AMBIENTE Y METROLOGÍA</b> <b>LABORATORIO DE METROLOGÍA</b>	
Procedimiento de calibración <b>PC- Calibradores Acústicos</b>		Página 11 de 19
Aprobado por:	Fecha de implementación:	Copia Nº. 01
Versión 01		

$f_{nom}$  = frecuencia nominal indicada por el fabricante

$\delta F_{cert}$  = corrección por el certificado de calibración

$\delta F_{res}$  = aporte por la resolución del contador de frecuencias

$\delta F_{EMP}$  = es el error máximo permitido del contador de frecuencias

### Prueba de distorsión armónica total:

$$Dist_T = \frac{|(Dist_{real} + \delta Dist_{cert} + \delta Dist_{res} + \delta Dist_{EMP}) - Dist_{nom}|}{Dist_{nom}} \cdot 100$$

Donde:

$Dist_T$  = porcentaje de la diferencia entre distorsión medida y la indicada por el fabricante

$Dist_{real}$  = distorsión medida por el analizador de distorsiones

$Dist_{nom}$  = valor de distorsión indicado por el fabricante como nominal

$\delta Dist_{cert}$  = corrección del certificado de calibración del analizador de distorsión

$\delta Dist_{res}$  = corrección debido a la resolución del analizador de distorsión

$\delta Dist_{EMP}$  = es la corrección debido al error máximo permitido

**6.2 Cálculo de la incertidumbre:** INTE/ISO/IEC 98-3 Guía de la expresión de incertidumbre en la medición.

### Estimación de la incertidumbre para el nivel de presión acústica:

Incertidumbre por medición del voltaje a circuito abierto  $u(V_{oc})$ : Esta incertidumbre es propia del método de medición. Corresponde a la incertidumbre combinada del certificado del multímetro, la resolución del multímetro, certificado del generador de señales, resolución del generador de señales y desviación de la unidad de inserción.

$$e(V_{oc}) = \sqrt{\left(\frac{U_{mult}}{k}\right)^2 + \left(\frac{R_{mult}}{2\sqrt{3}}\right)^2 \left(\frac{U_{signal}}{k}\right)^2 + \left(\frac{R_{signal}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{Max(V_1 - V_2)}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \frac{s}{\sqrt{n}}}$$

$$u(V_{oc}) = 20 \cdot \log\left(\frac{V_{oc}}{V_{oc} + e(V_{oc})}\right)$$

Donde  $U_{mult}$  es la incertidumbre del multímetro dada por el certificado de calibración,  $R_{mult}$  es la resolución del multímetro,  $U_{signal}$  es la incertidumbre del generador de señales dada por el certificado

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL          ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES          PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD,          AMBIENTE Y METROLOGÍA          LABORATORIO DE METROLOGÍA</b>	
Procedimiento de calibración <b>PC- Calibradores Acústicos</b>		Página 12 de 19
Aprobado por:	Fecha de implementación:	Copia N°. 01 <span style="float: right;">Versión 01</span>

de calibración,  $R_{mult}$  es la resolución del generador de señales,  $k$  es el factor de cobertura de la distribución normal correspondiente a cada certificado. El factor  $Max(V_1 - V_2)$  corresponde a la máxima diferencia entre el voltaje medido en el generador de señales ( $V_1$ ) y el voltaje medido en la unidad de inserción de voltaje ( $V_2$ ). El parámetro  $s$  corresponde a la desviación estándar de un número  $n$  de repeticiones.

Incertidumbre por certificado del micrófono patrón  $u(mic)$ : Corresponde a la incertidumbre expandida indicada en el certificado de calibración del micrófono  $U_{mic}$ . Se le asigna una distribución de probabilidad normal y su coeficiente de sensibilidad es igual a 1.

$$u_{mic} = \frac{U_{mic}}{k}$$

Incertidumbre por deriva del micrófono patrón  $u(s_t)$ : La deriva del micrófono ( $der$ ) se puede encontrar especificada en el manual del fabricante o se puede estimar como la diferencia entre dos calibraciones seguidas. Se le asigna una distribución de probabilidad rectangular y su coeficiente de sensibilidad es igual a 1.

$$u(s_t) = \frac{der}{\sqrt{3}}$$

Incertidumbre por desviación del voltaje de polarización del micrófono  $u(V_{PC})$ : El voltaje de polarización nominal es especificado por el fabricante. Cambios en el voltaje de polarización implican cambios en la sensibilidad del micrófono, por lo que se debe medir en la fuente de alimentación del micrófono. La incertidumbre del certificado de multímetro, la resolución del multímetro y una contribución de la desviación estándar de medidas repetidas ( $rep$ ), se consideran contribuciones a la incertidumbre combinada.

$$e(V_{PC}) = \sqrt{\left(\frac{U_{mult}}{k}\right)^2 + \left(\frac{R_{mult}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + rep^2}$$

$$u(V_{PC}) = 20 \cdot \log\left(\frac{V_{PC}}{V_{PC} + e(V_{PC})}\right)$$

Incertidumbre por cambio de temperatura, presión y humedad del micrófono  $u(\delta Tcs)$ ,  $u(\delta Pcs)$  y  $u(\delta Hcs)$ : Corresponde a la incertidumbre debido al efecto sobre el micrófono ocasionado por la diferencia de las condiciones ambientales de calibración durante el inicio y el final del proceso. Se le atribuye una distribución de probabilidad rectangular y todas tienen un coeficiente de sensibilidad igual a 1.

$$u(\delta Tcs) = \frac{tcs_f(t_f - t_i)}{2\sqrt{3}}$$

$$u(\delta Pcs) = \frac{pcs_f(p_f - p_i)}{2\sqrt{3}}$$

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL          ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES          PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD,          AMBIENTE Y METROLOGÍA          LABORATORIO DE METROLOGÍA</b>	
Procedimiento de calibración <b>PC- Calibradores Acústicos</b>		Página 13 de 19
Aprobado por:	Fecha de implementación:	Copia Nº. 01
		Versión 01

$$u(\delta H_{cs}) = \frac{hcs_f(rh_f - rh_i)}{2\sqrt{3}}$$

Incertidumbre por medición de temperatura, presión y humedad relativa  $u(t_c)$ ,  $u(p_c)$  y  $u(rh_c)$ :  
 Corresponde a la incertidumbre propia del instrumento de medida indicada en el certificado de calibración. Se le asigna una distribución de probabilidad normal. El aporte a incertidumbre, junto con su coeficiente de sensibilidad, de la temperatura, presión y humedad se muestran a continuación.

$$u(t_c) = \frac{u_{cert}(t_c)}{k}$$

$$coef(t_c) = t_{cc} - tcs_f$$

$$u(p_c) = \frac{u_{cert}(p_c)}{k}$$

$$coef(p_c) = p_{cc} - pcs_f$$

$$u(rh_c) = \frac{u_{cert}(rh_c)}{k}$$

$$coef(rh_c) = h_{cc} - hcs_f$$

Incertidumbre por cambio de temperatura, presión y humedad del calibrador acústico  $u(\delta T_{cc})$ ,  $u(\delta P_{cc})$  y  $u(\delta H_{cc})$ :  
 Corresponde a la incertidumbre debido al efecto sobre el calibrador acústico ocasionado por la diferencia de las condiciones ambientales de calibración durante el inicio y el final del proceso. Se le atribuye una distribución de probabilidad rectangular y todas tienen un coeficiente de sensibilidad igual a 1.

$$u(\delta T_{cc}) = \frac{t_{cc}(t_f - t_i)}{2\sqrt{3}}$$

$$u(\delta P_{cc}) = \frac{p_{cc}(p_f - p_i)}{2\sqrt{3}}$$

$$u(\delta H_{cc}) = \frac{h_{cc}(rh_f - rh_i)}{2\sqrt{3}}$$

Finalmente, se calcula la incertidumbre expandida ( $U_{95\%}$ ) con un factor de cobertura  $k$  apropiado, según los grados de libertad efectivos, para obtener una cobertura del 95 %.

$$u_c^2 = u(V_{oc})^2 + u_{mic}^2 + u(s_t)^2 + u(V_{PC})^2 + u(\delta Tcs)^2 + u(\delta Pcs)^2 + u(\delta Hcs)^2 + coef(t_c)^2 u(t_c)^2 +$$

$$coef(p_c)^2 u(p_c)^2 + coef(rh_c)^2 u(rh_c)^2 + u(\delta T_{cc})^2 + u(\delta P_{cc})^2 + u(\delta H_{cc})^2$$

$$U_{95\%} = k \cdot u$$

### Estimación de la incertidumbre para la diferencia entre frecuencia:

Incertidumbre por certificado de calibración del contador de frecuencias  $u(\delta F_{cert})$ :  
 El valor de la incertidumbre expandida  $U$  y su respectivo coeficiente de cobertura  $k$  se pueden encontrar en el certificado de calibración del contador de frecuencias. Se le asigna una distribución de probabilidad normal y su coeficiente de sensibilidad es igual a 1.

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD, AMBIENTE Y METROLOGÍA LABORATORIO DE METROLOGÍA</b>	
Procedimiento de calibración <b>PC- Calibradores Acústicos</b>		Página 14 de 19
Aprobado por:	Fecha de implementación:	Copia N°. 01
		Versión 01

$$u(\delta F_{cert}) = \frac{U}{k} \quad (1)$$

Incertidumbre por resolución del contador de frecuencias  $u(\delta F_{res})$ : La resolución del instrumento  $R$  se puede encontrar en el manual del fabricante. Se le asigna una distribución de probabilidad rectangular y su coeficiente de sensibilidad es igual a 1.

$$u(\delta F_{res}) = \frac{R}{2\sqrt{3}} \quad (2)$$

Incertidumbre por error máximo permitido del contador de frecuencias  $u(\delta F_{EMP})$ : Es propio del instrumento de medida y se puede encontrar el manual del fabricante. Se le asigna una distribución de probabilidad rectangular y su coeficiente de sensibilidad es igual a 1

$$u(\delta F_{EMP}) = \frac{EMP}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

Incertidumbre por repetibilidad  $u(rep)$ : Corresponde a la incertidumbre de tipo A, donde se utiliza la desviación estándar  $s$  de un número  $n$  de medidas repetidas. Se le asigna una distribución de probabilidad normal y su coeficiente de sensibilidad es igual a 1.

$$u(rep) = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

La incertidumbre expandida para la diferencia entre la frecuencia medida y nominal se calcula expandiendo la incertidumbre combinada por un factor de cobertura  $k$  adecuado para una distribución normal con una probabilidad de cobertura del 95 %.

$$u_c^2 = u(\delta F_{cert})^2 + u(\delta F_{res})^2 + u(\delta F_{EMP})^2 + u(rep)^2 \quad (5)$$

$$U_{95\%} = k \cdot u$$

### Estimación de la incertidumbre para la diferencia entre distorsión total:

Incertidumbre por certificado de calibración del analizador de distorsión  $u(\delta Dist_{cert})$ : El valor de la incertidumbre expandida  $U$  y su respectivo coeficiente de cobertura  $k$  se pueden encontrar en el certificado de calibración del analizador de distorsión. Se le asigna una distribución de probabilidad normal y su coeficiente de sensibilidad es igual a 1.

$$u(\delta Dist_{cert}) = \frac{U}{k} \quad (6)$$

Incertidumbre por resolución del analizador de distorsión  $u(\delta Dist_{res})$ : La resolución del instrumento  $R$  se puede encontrar en el manual del fabricante. Se le asigna una distribución de probabilidad rectangular y su coeficiente de sensibilidad es igual a 1.

$$u(\delta Dist_{res}) = \frac{R}{2\sqrt{3}} \quad (7)$$

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL          ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES          PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD,          AMBIENTE Y METROLOGÍA          LABORATORIO DE METROLOGÍA</b>	
Procedimiento de calibración <b>PC- Calibradores Acústicos</b>		Página 15 de 19
Aprobado por:	Fecha de implementación:	Copia N°. 01
Versión 01		

Incertidumbre por error máximo permitido del analizador de distorsión  $u(\delta Dist_{EMP})$ : Es propio del instrumento de medida y se puede encontrar el manual del fabricante. Se le asigna una distribución de probabilidad rectangular y su coeficiente de sensibilidad es igual a 1

$$u(\delta Dist_{EMP}) = \frac{EMP}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

Incertidumbre por repetibilidad  $u(rep)$ : Corresponde a la incertidumbre de tipo A, donde se utiliza la desviación estándar  $s$  de un número  $n$  de medidas repetidas. Se le asigna una distribución de probabilidad normal y su coeficiente de sensibilidad es igual a 1.

$$u(rep) = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

La incertidumbre expandida para la diferencia entre la frecuencia medida y nominal se calcula expandiendo la incertidumbre combinada por un factor de cobertura  $k$  adecuado para una distribución normal con una probabilidad de cobertura del 95 %.

$$u_c^2 = u(\delta Dist_{cert})^2 + u(\delta Dist_{res})^2 + u(\delta Dist_{EMP})^2 + u(rep)^2 \quad (10)$$

$$U_{95\%} = k \cdot u$$

## 7. Referencias:

- [1] Vocabulario Internacional de términos básicos y generales de metrología (VIM). Traducción al español del VIM versión del 2012.
- [2] JCGM 100:2008: Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement
- [3] Comisión Electrotécnica Internacional. (2016). Electroacústica. Calibradores acústicos. IEC 60942.

## 8. Anexos

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL          ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES          PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD,          AMBIENTE Y METROLOGÍA          LABORATORIO DE METROLOGÍA</b>	
Procedimiento de calibración <b>PC- Calibradores Acústicos</b>		Página 16 de 19
Aprobado por:	Fecha de implementación:	Copia Nº. 01 <span style="float: right;">Versión 01</span>

<b>No. Certificado:</b>	<b>XXX-XXXX Vi</b>	<b>No. Solicitud:</b>	<b>XX-XXX-XX</b>
Datos Generales del Certificado			
Instrumento			
Fabricante			
Modelo			
No de serie			
Código			
Ubicación			
Cliente			
Dirección			
Nivel de presión acústica principal			dB
			dB
			dB
Intervalo de Frecuencia	Hz a		Hz
Incremento del intervalo de frecuencia			Hz
Presión Atmosférica Inicial	80 kPa		
Presión Atmosférica Final	80 kPa		
Temperatura Inicial	23 °C		
Temperatura Final	24 °C		
Humedad relativa Inicial	60 %		
Humedad relativa Final	65 %		
Fecha de calibración	XXXX-XX-XX		
Fecha de emisión	XXXX-XX-XX		
Lugar de calibración	Laboratorio de Metrología PROCAME		
Trazabilidad	100, con N° de serie 228645, con certificado de calibración N° ULM-TF-001-2013, trazable a		
	100, con N° de serie 228645, con certificado de calibración N° ULM-TF-001-2013, trazable a		
	100, con N° de serie 228645, con certificado de calibración N° ULM-TF-001-2013, trazable a		
OBSERVACIONES			
OBSERVACIONES	* La incertidumbre expandida reportada se obtuvo multiplicando la incertidumbre estándar combinada por un factor de cobertura con el que se alcanza una probabilidad de cobertura de al menos 95%. La incertidumbre estándar de la medición se determinó.		
Continuación Trazabilidad	Comprobación de funcionamiento		
Examen exterior	Satisfactorio		
<i>último línea</i>			
Calibrado por:		Nº	
Supervisado por:		Nº	

Figura 8. Sección de la hoja de datos dedicada a las condiciones ambientales y datos del calibrador acústico.

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL          ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES          PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD,          AMBIENTE Y METROLOGÍA          LABORATORIO DE METROLOGÍA</b>	
Procedimiento de calibración <b>PC- Calibradores Acústicos</b>		Página 17 de 19
Aprobado por:	Fecha de implementación:	Copia N°. 01
Versión 01		

Mediciones para determinar la corrección por voltaje de polarización	
Repetición	Voltaje medido (V)
1	
2	
3	
4	
5	

Figura 9. Sección de la hoja de datos dedicada a los resultados de la medición del voltaje de polarización.

Repetición	Voltaje medido con el Calibrador Acústico encendido (V)	Voltaje medido con el Generador de señales encendido (V)	Voltaje en circuito abierto del micrófono (V)
1			
2			
3			
4			
5			

Figura 10. Sección de la hoja de datos dedicada a los resultados del método de inserción de voltaje.

Mediciones para determinar el error en frecuencia	
Repetición	Frecuencia medida (Hz)
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	

Figura 11. Sección de la hoja de datos dedicada a los resultados de la medición de frecuencia.

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL          ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES          PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD,          AMBIENTE Y METROLOGÍA          LABORATORIO DE METROLOGÍA</b>	
Procedimiento de calibración <b>PC- Calibradores Acústicos</b>		Página 18 de 19
Aprobado por:	Fecha de implementación:	Copia N°. 01
		Versión 01

Tabla 1. Límites de tolerancia para nivel de presión acústica según la clase de exactitud y el intervalo de frecuencia nominal (IEC, 2016).

Intervalo de frecuencias nominales (Hz)	Límites de tolerancia (dB)		
	Clase PL	Clase 1	Clase 2
31,5 a < 160	-	0,50	-
160 a 1 250	0,20	0,40	0,60
> 1 250 a 4000	-	0,60	-
> 4 000 a 8 000	-	0,80	-
> 8 000 a 16 000	-	1,00	-

Tabla 2. Límites de tolerancia para la desviación de la frecuencia según la clase de exactitud (IEC, 2016).

Límite de tolerancia (%)		
Clase LP	Clase 1	Clase 2
1,0	1,0	2,0

Tabla 3. Límites de tolerancia para la desviación de la frecuencia según la clase de exactitud (IEC, 2016).

Intervalo de frecuencias nominales (Hz)	Distorsión total (%)		
	Clase PL	Clase 1	Clase 2
31,5 a < 160	-	4,0	-
160 a 1 250	2,5	3,0	4,0
> 1 250 a 16 000	-	4,0	-

Tabla 4. Incertidumbre de la medición para nivel de presión acústica generado por frecuencia y por Clase de Calibrador.

Rango de frecuencias nominales (Hz)	Incertidumbre de medición para el nivel de presión acústica generado (dB)		
	Clase PL	Clase 1	Clase 2
31.5 a < 160	-	0.2	-
160 a 1250	0.1	0.15	0.35
> 1250 a 4000	-	0.25	-
> 4000 a 8000	-	0.35	-
> 8000 a 16000	-	0.5	-

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL          ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES          PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD,          AMBIENTE Y METROLOGÍA          LABORATORIO DE METROLOGÍA</b>	
Procedimiento de calibración <b>PC- Calibradores Acústicos</b>		Página 19 de 19
Aprobado por:	Fecha de implementación:	Copia N°. 01
Versión 01		

Tabla 5. Incertidumbre de la medición para evaluación de la frecuencia por Clase de Calibrador.

<b>Incertidumbre de medición para la frecuencia (%)</b>		
Clase PL	Clase 1	Clase 2
0,3	0,3	0,3

Tabla 6. Incertidumbre de la medición para evaluación de la distorsión armónica por frecuencia y por Clase de Calibrador.

<b>Rango de las frecuencias nominales (Hz).</b>	<b>Incertidumbre de la medición para la distorsión total (%).</b>		
	Clase PL.	Clase 1.	Clase 2.
31,5 a < 160	-	1	-
160 1250	0,5	0,5	1
> 1250 a 16000	-	1	-

## 6.2. Código utilizado para realizar el análisis de varianza del número de repeticiones para la prueba de presión acústica.

```

1  #Carga los resultados experimentales al programa
2  ensamble = read.table("/Users/villa/Desktop/Documentos TFG/AnovaRepeticiones.txt",
3                      header = TRUE)
4  str(ensamble)
5  attach(ensamble)
6
7  #Define el número de repeticiones como factor
8  Rep <- factor(Rep)
9  ensamble.lm = lm(Inc ~ Rep)
10
11 #Calcula el ANOVA y devuelve los resultados
12 anova(ensamble.lm)
13 summary(ensamble.lm)

```

## 6.3. Código utilizado para determinar la incertidumbre del nivel de presión acústica por medio del método de Montecarlo

```

#Importación de librerías para operaciones matemáticas y construcción de figuras
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

n_iteraciones = 1*10**6 # Número de iteraciones para la simulación
sensibilidad_micro = 0.047 # Sensibilidad del micrófono (V/Pa)

VoltajeCircuitoAbierto = np.array([0.0479318151, 0.0478136174, 0.0478245016])
# Resultado de la medición de voltaje de circuito abierto del micrófono
VoltajePolarizacion = np.array([196.926399, 196.924322, 196.922363, 196.921564, 196.919581])
# Resultados de la medición del voltaje de polarización.
VoltajeInsercion = np.array([7.535*10**(-7), 1.2403*10**(-6), 1.39778*10**(-5)])
# Diferencias entre el voltaje de generador de señales y la unidad de inserción

coefVolumen_Calibrador = 0 # Coeficiente de sensibilidad para cambios de volumen efectivo
VolumenEfectivoCalibrador = 0 # mm^3
VolumenEfectivoMicrofono = 677.8468798 # mm^3

coefTemp_Micro = -0.003 #dB/°C Coeficiente ante cambios de temperatura para el micrófono
TempRef_Micro = 23 #°C Temperatura de referencia para el micrófono
coefTemp_Cal = 0.0074 #dB/°C Coeficiente ante cambios de temperatura para el calibrador
TempRef_Cal = 23 #°C Temperatura de referencia para el calibrador

```

```

Temp_Lab_i = 26 #°C Temperatura en el laboratorio al inicio de la calibración
Temp_Lab_f = 25.8 #°C Temperatura en el laboratorio al final de la calibración

coefPr_Micro = -0.0155 #dB/kPa Coeficiente ante cambios de presión para el micrófono
PrRef_Micro = 101.325 #kPa Presión de referencia para el micrófono
coefPr_Cal = 0.0088496 #dB/kPa Coeficiente ante cambios de presión para el calibrador
PrRef_Cal = 101.3 #kPa Presión de referencia para el calibrador
Pr_Lab_i = 88.45 # Presión en el laboratorio al inicio de la calibración
Pr_Lab_f = 88.39 # Presión en el laboratorio al final de la calibración

coefHum_Micro = 0 #dB/% Coeficiente ante cambios de humedad para el micrófono
HumRef_Micro = 0 #°C Humedad relativa de referencia para el micrófono
coefHum_Cal = 0.0025 #dB/% Coeficiente ante cambios de humedad para el calibrador
HumRef_Cal = 50 # Humedad relativa de referencia para el calibrador
Hum_Lab_i = 41.7 # Humedad relativa en el laboratorio al inicio de la calibración
Hum_Lab_f = 41.7 # Humedad relativa en el laboratorio al final de la calibración

def Voc (n_iteraciones, sensibilidad_micro, VoltajeCircuitoAbierto,VoltajeInsercion):
    '''
    Calcula el nivel de presión acústica, junto con su incertidumbre según lo establecido en el
    marco teórico.
    '''

    Voltaje_Promedio = np.mean(VoltajeCircuitoAbierto) #Calcula el promedio de los voltaje en circuito abierto del
    #micrófono

    dB_NPA = 20 * np.log10((Voltaje_Promedio/sensibilidad_micro)/(20*10**(-6))) #Convierte el voltaje promedio en dB

    U_mult = np.random.normal(0, 0.00000089/2, n_iteraciones)
    # Incertidumbre por certificado de calibración del multímetro

    R_mult = np.random.uniform(-1*10**(-8)/2, 1*10**(-8)/2, n_iteraciones)
    # Incertidumbre por resolución del multímetro

    U_signal = np.random.normal(0, 0.0001/2, n_iteraciones)
    # Incertidumbre por certificado de calibración del generador de señales

    U_Insercion = np.random.uniform(-np.amax(VoltajeInsercion)/2, np.amax(VoltajeInsercion)/2, n_iteraciones)
    # Incertidumbre debido a la diferencia entre el voltaje medido con el calibrado encendido y el generador de señales
    # encendido

    R_signal = np.random.uniform(-0.00001/2, 0.00001/2, n_iteraciones)
    # Incertidumbre por resolución del generador de señales

    V_DesvEst = np.random.normal(0, np.std(VoltajeCircuitoAbierto, ddof=1), n_iteraciones)
    # Incertidumbre por repetibilidad

    Incertidumbre_Voc = 20*np.log10(Voltaje_Promedio/(Voltaje_Promedio+U_mult+R_mult+U_signal+R_signal \
    + V_DesvEst + U_Insercion))

    # Incertidumbre en dB por la medición de Voc

    Aporte_Voc = dB_NPA + Incertidumbre_Voc # Aporte de Voc al resultado de la medición

```

```

return Aporte_Voc

def Polarizacion (n_iteraciones, VoltajePolarizacion):
    """
    Calcula la corrección debido a la diferencia entre el voltaje de polarización teórico y real,
    junto con su incertidumbre según lo establecido en el marco teórico.
    """

    PolarizacionPromedio = np.mean(VoltajePolarizacion) # Voltaje de polarización promedio
    correccionPolarizacion = -20*np.log10(PolarizacionPromedio/200)
    # Corrección debido a la diferencia entre voltajes de polarización

    U_mult = np.random.normal(0, 0.00000089 / 2,
                               n_iteraciones) # Incertidumbre por certificado de calibración del multímetro

    R_mult = np.random.uniform(-1 * 10 ** (-8) / 2, 1 * 10 ** (-8) / 2,
                               n_iteraciones) # Incertidumbre por resolución del multímetro

    P_DesvEst = np.random.normal(0, np.std(VoltajePolarizacion, ddof=1), n_iteraciones)
    # Incertidumbre por repetibilidad

    Incertidumbre_Polarizacion = 20 * np.log10(PolarizacionPromedio/(PolarizacionPromedio+U_mult+R_mult+P_DesvEst))
    # Calculo de la incertidumbre por medición del voltaje de polarización

    Aporte_Polarizacion = correccionPolarizacion + Incertidumbre_Polarizacion # Aporte del voltaje de polarización

    return Aporte_Polarizacion

def Volumen(coefVolumen_Calibrador,VolumenEfectivoCalibrador,VolumenEfectivoMicrofono):
    """
    Calcula la corrección debido a la diferencia entre el volumen efectivo del calibrador acústico y del micrófono,
    junto con su incertidumbre según lo establecido en el marco teórico.
    """

    dif_Volumen = (VolumenEfectivoCalibrador - VolumenEfectivoMicrofono) #Se calcula la diferencia entre volúmenes.
    correccionVolumen = -coefVolumen_Calibrador*(dif_Volumen)
    #Se calcula la corrección debido a la diferencia en volumen efectivo.
    return correccionVolumen

def Temperatura(coefTemp_Micro, TempRef_Micro, coefTemp_Cal, TempRef_Cal, Temp_Lab_i,Temp_Lab_f,n_iteraciones):
    """
    Calcula la corrección debido a la diferencia entre la temperatura de referencia y la temperatura del laboratorio
    para el micrófono y el calibrador, junto con su incertidumbre según lo establecido en el marco teórico.
    """

    Temp_Lab = np.array([Temp_Lab_i,Temp_Lab_f]) # Crea un arreglo con la temperatura inicial y final.

    CorreccionTemp_Micro = -coefTemp_Micro*(np.amax(Temp_Lab) -TempRef_Micro) # Corrección por parte del micrófono
    CorreccionTemp_Cal = coefTemp_Cal*(TempRef_Cal-np.amax(Temp_Lab)) # Corrección por parte del calibrador

    U_termometro = np.random.normal(0,0.7/2,n_iteraciones)*(coefTemp_Cal-coefTemp_Micro)
    # Incertidumbre por certificado de calibración del termómetro

    Dif_Temp_Cal = coefTemp_Cal*(Temp_Lab_f-Temp_Lab_i)
    # Calcula la corrección del calibrador por el cambio en condiciones ambientales.

```

```

Dif_Temp_Mic = coefTemp_Micro*(Temp_Lab_f-Temp_Lab_i)
# Calcula la corrección del micrófono por el cambio en condiciones ambientales.

U_correccion_Micro = np.random.uniform(-Dif_Temp_Mic/2,Dif_Temp_Mic/2,n_iteraciones)
#Incertidumbre debido a la corrección de temperatura por parte del micrófono
U_correccion_Cal = np.random.uniform(-Dif_Temp_Cal / 2, Dif_Temp_Cal / 2, n_iteraciones)
# Incertidumbre debido a la corrección de temperatura por parte del calibrador acústico

Aporte_Temperatura = CorreccionTemp_Micro+CorreccionTemp_Cal+U_termometro+ U_correccion_Micro + U_correccion_Cal
# Corrección total junto con incertidumbre
return Aporte_Temperatura

def Presion(coefPr_Micro, Pr_Lab_i, Pr_Lab_f, PrRef_Micro, coefPr_Cal, PrRef_Cal,n_iteraciones):
    '''
    Calcula la corrección debido a la diferencia entre la presión de referencia y la presión del laboratorio
    para el micrófono y el calibrador, junto con su incertidumbre según lo establecido en el marco teórico.
    '''

    Pr_Lab = np.array([Pr_Lab_i, Pr_Lab_f]) # Crea un arreglo con la presión inicial y final.

    CorreccionPr_Micro = -coefPr_Micro * (np.amax(Pr_Lab) - PrRef_Micro) # Corrección por parte del micrófono
    CorreccionPr_Cal = coefPr_Cal * (PrRef_Cal - np.amax(Pr_Lab)) # Corrección por parte del calibrador

    U_barometro = np.random.normal(0, 0.01 / 2, n_iteraciones) * (coefPr_Cal - coefPr_Micro)
    # Incertidumbre por certificado de calibración del barómetro

    Dif_Pr_Cal = coefPr_Cal * (Pr_Lab_f - Pr_Lab_i)
    # Calcula la corrección del calibrador por el cambio en condiciones ambientales.
    Dif_Pr_Mic = coefPr_Micro * (Pr_Lab_f - Pr_Lab_i)
    # Calcula la corrección del micrófono por el cambio en condiciones ambientales.

    U_correccion_Micro = np.random.uniform(-Dif_Pr_Mic / 2, Dif_Pr_Mic / 2, n_iteraciones)
    # Incertidumbre debido a la corrección de presión por parte del micrófono
    U_correccion_Cal = np.random.uniform(-Dif_Pr_Cal / 2, Dif_Pr_Cal / 2, n_iteraciones)
    # Incertidumbre debido a la corrección de presión por parte del micrófono
    Aporte_Presion = CorreccionPr_Micro + CorreccionPr_Cal + U_barometro + U_correccion_Micro + U_correccion_Cal
    # Corrección total junto con incertidumbre
    return Aporte_Presion

def Humedad(coefHum_Micro, HumRef_Micro, coefHum_Cal, HumRef_Cal, Hum_Lab_i, Hum_Lab_f,n_iteraciones):
    '''
    Calcula la corrección debido a la diferencia entre la humedad relativa de referencia y la presión del
    laboratorio para el micrófono y el calibrador, junto con su incertidumbre según lo establecido en el
    marco teórico.
    '''

    Hum_Lab = np.array([Hum_Lab_i, Hum_Lab_f]) # Crea un arreglo con la humedad relativa inicial y final.

    CorreccionHum_Micro = -coefHum_Micro * (np.amax(Hum_Lab) - HumRef_Micro) # Corrección por parte del micrófono
    CorreccionHum_Cal = coefHum_Cal * (HumRef_Cal - np.amax(Hum_Lab)) # Corrección por parte del calibrador

    U_higrometro = np.random.normal(0, 2.5 / 2, n_iteraciones) * (coefHum_Cal - coefHum_Micro)
    # Incertidumbre por certificado de calibración del higrómetro

```

```

Dif_Hum_Cal = coefHum_Cal * (Hum_Lab_f - Hum_Lab_i)
# Calcula la corrección del calibrador por el cambio en condiciones ambientales.
Dif_Hum_Mic = coefHum_Micro * (Hum_Lab_f - Hum_Lab_i)
# Calcula la corrección del micrófono por el cambio en condiciones ambientales.

U_correccion_Micro = np.random.uniform(-Dif_Hum_Mic / 2, Dif_Hum_Mic / 2, n_iteraciones)
# Incertidumbre debido a la corrección de humedad por parte del micrófono
U_correccion_Cal = np.random.uniform(-Dif_Hum_Cal / 2, Dif_Hum_Cal / 2, n_iteraciones)
# Incertidumbre debido a la corrección de humedad por parte del micrófono
Aporte_Humedad = CorreccionHum_Micro+CorreccionHum_Cal+U_higrometro + U_correccion_Micro + U_correccion_Cal
# Corrección total junto con incertidumbre
return Aporte_Humedad

def Certificado_Microfono(n_iteraciones):
    '''
    Calcula el aporte del certificado de calibración a la incertidumbre total
    '''

    Aporte_Microfono = np.random.normal(0,0.025/2,n_iteraciones)
    return Aporte_Microfono

def Deriva(n_iteraciones):
    '''
    Calcula el aporte de la deriva del calibrador a la incertidumbre total
    '''

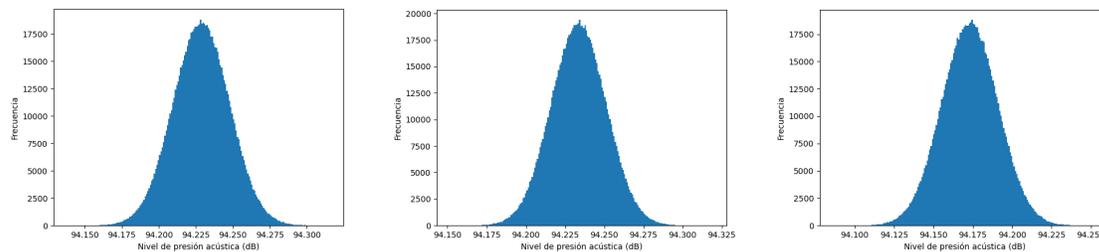
    Aporte_Deriva = np.random.uniform(-0.025/3,0.025/3,n_iteraciones)
    return Aporte_Deriva

resultado = Voc(n_iteraciones, sensibilidad_micro, VoltajeCircuitoAbierto, VoltajeInsercion) + \
    Polarizacion (n_iteraciones, VoltajePolarizacion) + \
    Volumen(coefVolumen_Calibrador, VolumenEfectivoCalibrador, VolumenEfectivoMicrofono) + \
    Temperatura(coefTemp_Micro, TempRef_Micro, coefTemp_Cal, TempRef_Cal, Temp_Lab_i,Temp_Lab_f,n_iteraciones) + \
    Presion(coefPr_Micro, Pr_Lab_i, Pr_Lab_f, PrRef_Micro, coefPr_Cal, PrRef_Cal,n_iteraciones) + \
    Humedad(coefHum_Micro, HumRef_Micro, coefHum_Cal, HumRef_Cal, Hum_Lab_i, Hum_Lab_f, n_iteraciones) + \
    Certificado_Microfono(n_iteraciones) + Deriva(n_iteraciones)
# Llama a todas las funciones para obtener el resultado de la simulación de Montecarlo

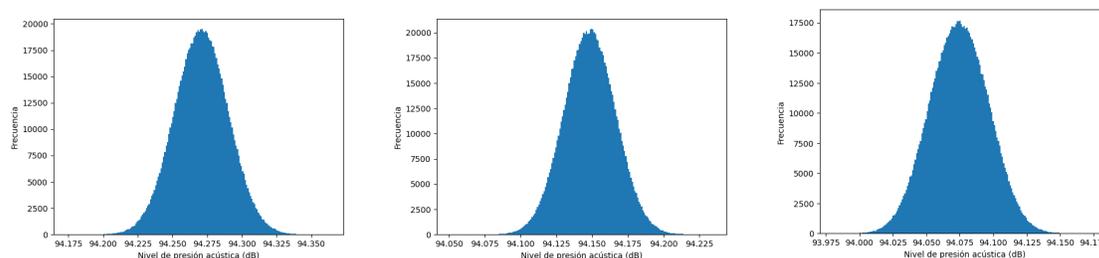
plt.hist(resultado, 200) # Genera el histograma que representa la densidad de probabilidad
print('El nivel de presión acústica es de: ', np.mean(resultado), 'dB') # Muestra la indicación Promedio
print('La incertidumbre expandida es igual a: ', np.std(resultado)*2, 'dB') # Muestra la desviación estándar
plt.xlabel('Nivel de presión acústica (dB)')
plt.ylabel('Frecuencia')
plt.show() # Muestra el histograma

```

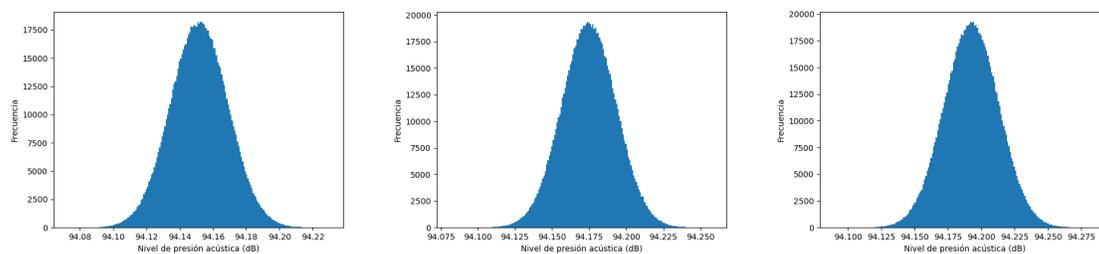
## 6.4. Distribuciones de probabilidad para el nivel de presión acústica según el método de Montecarlo



(a) Resultado de la prueba 1 (b) Resultado de la prueba 2 (c) Resultado de la prueba 3



(d) Resultado de la prueba 4 (e) Resultado de la prueba 5 (f) Resultado de la prueba 6



(g) Resultado de la prueba 7 (h) Resultado de la prueba 8 (i) Resultado de la prueba 9

Figura 10: Distribuciones de probabilidad para el nivel de presión acústica según el método de Montecarlo

## 6.5. Código utilizado para determinar la incertidumbre de la frecuencia por medio del método de montecarlo

```
# Importación de librerías para operaciones matemáticas y construcción de figuras
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

n_iteraciones = 1*10**6 # Número de iteraciones para la simulación
```

```

Frecuencia_Nominal = 1000 # Frecuencia teórica establecida por el fabricante (Hz)
Lista_Frecuencias = np.array([999.618343, 999.633896, 999.662635, 999.637164, 999.545376])
# Resultados de la prueba de frecuencia
Certificado_Frecuencimetro = 0.037 # Incertidumbre expandida dada por el certificado del frecuenciómetro
Resolucion_Frecuencimetro = 0.000001 # Resolución del contador de frecuencias
Desv_Fraccional = 0.0000014 # Desviación fraccional del contador de frecuencias
FactorCobertura = 2.0839

Frecuencia_Promedio = np.mean(Lista_Frecuencias) # Calcula la frecuencia promedio de la lista de frecuencias
Frecuencia_DesvEst = np.std(Lista_Frecuencias, ddof=1) # Calcula la desviación estándar de la lista de frecuencias

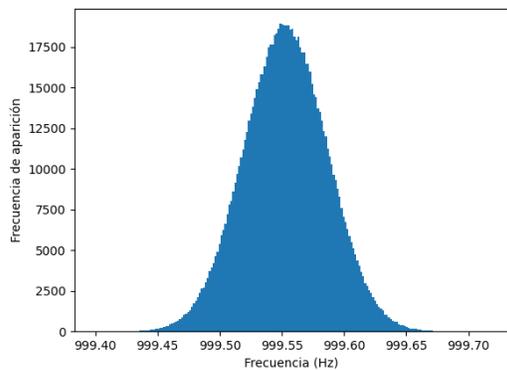
U_TipoA = np.random.normal(0, Frecuencia_DesvEst/np.sqrt(10), n_iteraciones) # Incertidumbre por repetibilidad
U_Certificado = np.random.normal(0, Certificado_Frecuencimetro/2, n_iteraciones)
# Incertidumbre por certificado de calibración
U_EMP = np.random.uniform(-Desv_Fraccional*Frecuencia_Nominal, Desv_Fraccional*Frecuencia_Nominal, n_iteraciones)
# Incertidumbre por error máximo permitido
U_Resolucion = np.random.uniform(-Resolucion_Frecuencimetro/2, Resolucion_Frecuencimetro/2, n_iteraciones)
# Incertidumbre por resolución

Resultado = Frecuencia_Promedio + U_TipoA + U_Certificado + U_EMP + U_Resolucion
# Resultado de la simulación de Montecarlo

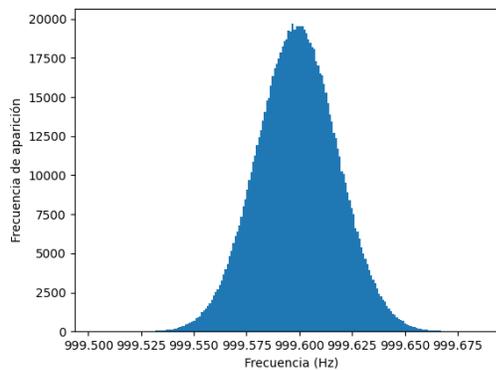
plt.hist(Resultado, 200) # Genera el histograma que representa la distribución de probabilidad
print(np.mean(Resultado)) # Imprime la frecuencia promedio del resultado
print(np.std(Resultado)*FactorCobertura) # Imprime la desviación estandar del resultado
plt.xlabel('Frecuencia (Hz)')
plt.ylabel('Frecuencia de aparición')
plt.show() # Muestra el histograma

```

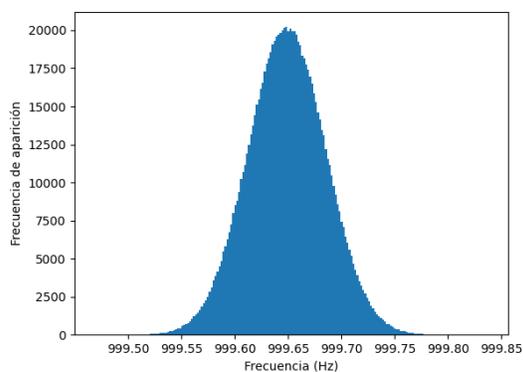
## 6.6. Distribuciones de probabilidad para la frecuencia según el método de Montecarlo



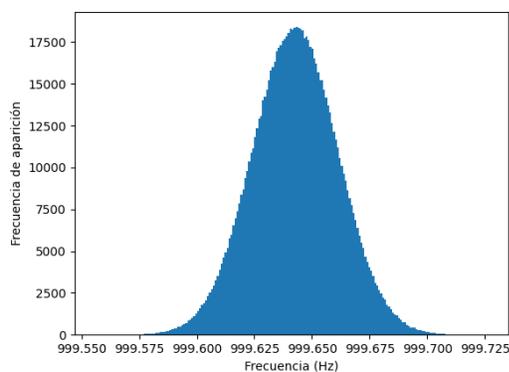
(a) Prueba 1 94 dB



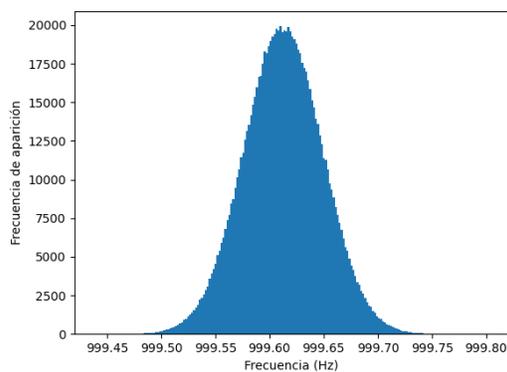
(b) Prueba 1 114 dB



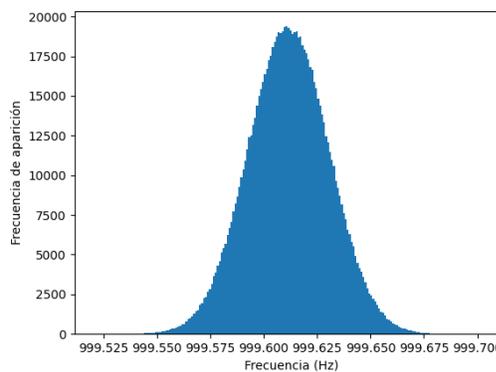
(c) Prueba 2 94 dB



(d) Prueba 2 114 dB

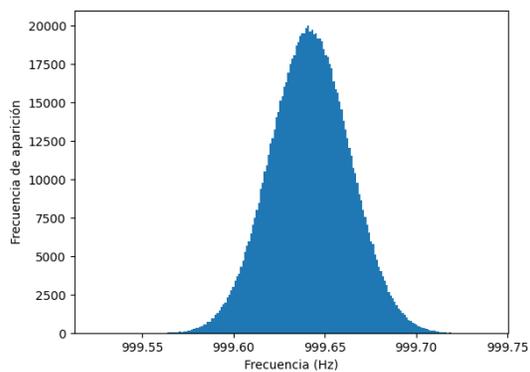


(e) Prueba 3 94 dB

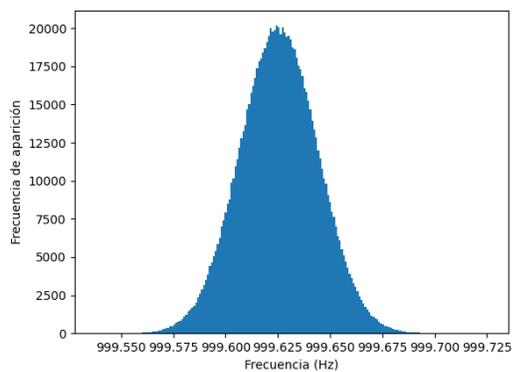


(f) Prueba 3 114 dB

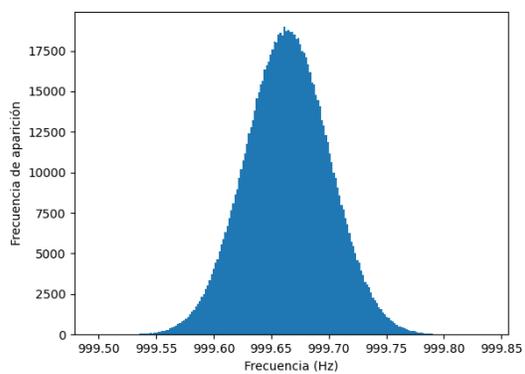
Figura 11: Distribuciones de probabilidad para la frecuencia según el método de Montecarlo



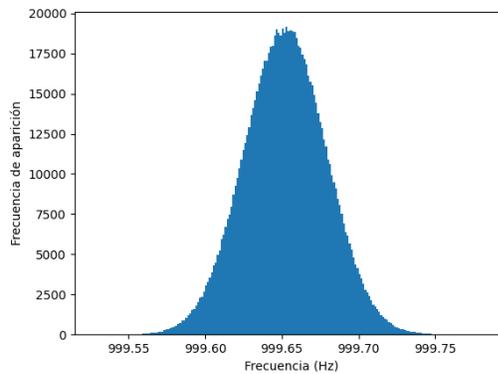
(g) Prueba 4 94 dB



(h) Prueba 4 114 dB



(i) Prueba 5 94 dB



(j) Prueba 5 114 dB

Figura 11: Distribuciones de probabilidad para la frecuencia según el método de Montecarlo (continuación).

## 6.7. Capítulo agregado al procedimiento de verificación de cámaras audiométricas

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL          ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES          PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD,          AMBIENTE Y METROLOGÍA          LABORATORIO DE METROLOGÍA</b>		
<b>Procedimiento de verificación          PI-02 VERIFICACIÓN DE CÁMARAS AUDIOMÉTRICAS</b>		Página 12 de 21	
Aprobado por: Ligia Bermúdez Hidalgo, Coordinadora, PROCAME.	Fecha de implementación:	Copia N°. 01	Versión 01

## 6.1 Fuentes de incertidumbre

Las fuentes de incertidumbre y ecuaciones que permiten la estimación de la incertidumbre expandida se desarrollan a lo largo de esta sección.

### 6.1.1 Incertidumbre debido a la indicación del sonómetro ( $u(I_{son})$ )

Es propia del procedimiento de medición. Consiste en la incertidumbre combinada del certificado de calibración del sonómetro ( $e_{cert}$ ), la incertidumbre del certificado del micrófono ( $e_{mic}$ ), la incertidumbre del certificado del calibrador acústico ( $e_{CA}$ ), incertidumbre por repetibilidad ( $e_{rep}$ ), incertidumbre por la resolución del sonómetro ( $e_{res}$ ), incertidumbre por error debido a la temperatura ( $e_T$ ), incertidumbre por error debido a la humedad ( $e_H$ ) e incertidumbre debido a la deriva del sonómetro ( $e_{der}$ ). Se le asigna una distribución de probabilidad normal y un coeficiente de sensibilidad de 1.

$$u(I_{son}) = \sqrt{(e_{cert})^2 + (e_{mic})^2 + (e_{CA})^2 + (e_{rep})^2 + (e_{res})^2 + (e_T)^2 + (e_H)^2 + (e_{der})^2}$$

Donde:

$$e_{cert} = \frac{U_{certificado\_sonómetro}}{k}$$

Con  $U_{certificado\_sonómetro}$  siendo la incertidumbre expandida reportada en el certificado de calibración del sonómetro y  $k$  siendo el factor de cobertura respectivo.

$$e_{mic} = \frac{U_{certificado\_micrófono}}{k}$$

Con  $U_{certificado\_micrófono}$  siendo la incertidumbre expandida reportada en el certificado de calibración del micrófono y  $k$  siendo el factor de cobertura respectivo.

$$e_{CA} = \frac{U_{certificado\_calibrador\_acústico}}{k}$$

Con  $U_{certificado\_calibrador\_acústico}$  siendo la incertidumbre expandida reportada en el certificado de calibración del calibrador acústico y  $k$  siendo el factor de cobertura respectivo.

$$e_{rep} = \frac{1}{2\sqrt{3}}$$

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL          ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES          PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD,          AMBIENTE Y METROLOGÍA          LABORATORIO DE METROLOGÍA</b>		
<b>Procedimiento de verificación          PI-02 VERIFICACIÓN DE CÁMARAS AUDIOMÉTRICAS</b>		Página 13 de 21	
Aprobado por: Ligia Bermúdez Hidalgo, Coordinadora, PROCAME.	Fecha de implementación:	Copia Nº. 01	Versión 01

Durante el proceso de verificación no se realizan mediciones repetidas, pero se revisa que las mediciones del sonómetro no varíen más de 1 dB. Para estimar la incertidumbre por repetibilidad ( $e_{rep}$ ), se asume una distribución de probabilidad rectangular, centrada en cero, con límite iguales a  $\pm 0,5$  dB.

$$e_{res} = \frac{D}{2\sqrt{3}}$$

Con  $D$  siendo la resolución del sonómetro reportada en el manual emitido por el fabricante.

$$e_T = \frac{error_{Temp}}{\sqrt{3}}$$

Con  $error_{Temp}$  siendo el error máximo que posee el sonómetro debido a cambios de temperatura. Esta información se encuentra especificada en el manual emitido por el fabricante.

$$e_H = \frac{error_{Hum}}{\sqrt{3}}$$

Con  $error_{Hum}$  siendo el error máximo que posee el sonómetro debido a cambios de humedad. Esta información se encuentra especificada en el manual emitido por el fabricante.

$$e_{der} = \frac{|u_2 - u_1|}{\sqrt{3}}$$

Con  $u_2$  siendo la incertidumbre sin expandir del certificado de calibración más reciente del sonómetro y  $u_1$  siendo la incertidumbre sin expandir del certificado de calibración anterior al más reciente.

### 6.1.2 Incertidumbre debido al efecto que tiene el cambio de condiciones ambientales sobre el micrófono

Corresponde a la incertidumbre debido al efecto sobre el micrófono del sonómetro ocasionado por el cambio en la presión ( $u(\delta Pcs)$ ), temperatura ( $u(\delta Tcs)$ ) y humedad relativa ( $u(\delta Hcs)$ ) entre el inicio y el final del proceso de verificación. Se les atribuye una distribución de probabilidad rectangular y un coeficiente de sensibilidad de 1.

$$u(Tcs) = \frac{tcs_f(t_f - t_i)}{2\sqrt{3}}$$

$$u(Pcs) = \frac{pcs_f(p_f - p_i)}{2\sqrt{3}}$$

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD, AMBIENTE Y METROLOGÍA LABORATORIO DE METROLOGÍA</b>		
<b>Procedimiento de verificación PI-02 VERIFICACIÓN DE CÁMARAS AUDIOMÉTRICAS</b>		Página 14 de 21	
Aprobado por: Ligia Bermúdez Hidalgo, Coordinadora, PROCAME.	Fecha de implementación:	Copia Nº. 01	Versión 01

$$u(Hcs) = \frac{hcs_f(rh_f - rh_i)}{2\sqrt{3}}$$

Donde  $tcs_f$ ,  $pcs_f$  y  $hcs_f$  son los coeficientes de temperatura, presión y humedad del micrófono, respectivamente. Además  $t_i$ ,  $p_i$  y  $rh_i$  son la temperatura, presión y humedad relativa al inicio del proceso de verificación, de forma similar  $t_f$ ,  $p_f$  y  $rh_f$  corresponden a las condiciones ambiental al final de la verificación.

### 6.1.3 Incertidumbre debido a la medición de condiciones ambientales

Corresponde a la incertidumbre propia del termómetro. Barómetro e higrómetro, indicado en el certificado de calibración respectivo. Se le asigna una distribución de probabilidad normal.

$$u(t_c) = \frac{U_{\text{certificado\_termómetro}}}{k}$$

Donde  $U_{\text{certificado\_termómetro}}$  es la incertidumbre expandida indicada en el certificado de calibración del termómetro,  $k$  es el factor de cobertura respectivo y el coeficiente de sensibilidad es igual a  $-tcs_f$ .

$$u(p_c) = \frac{U_{\text{certificado\_barómetro}}}{k}$$

Donde  $U_{\text{certificado\_barómetro}}$  es la incertidumbre expandida indicada en el certificado de calibración del barómetro,  $k$  es el factor de cobertura respectivo y el coeficiente de sensibilidad es igual a  $-pcs_f$ .

$$u(h_c) = \frac{U_{\text{certificado\_higrómetro}}}{k}$$

Donde  $U_{\text{certificado\_higrómetro}}$  es la incertidumbre expandida indicada en el certificado de calibración del higrómetro,  $k$  es el factor de cobertura respectivo y el coeficiente de sensibilidad es igual a  $-hcs_f$ .

## 6.2 Cálculo de la incertidumbre expandida

La incertidumbre expandida ( $U_{95\%}$ ) del nivel de presión acústica dentro de la cámara audiométrica se calcula expandiendo la incertidumbre combinada ( $u_c$ ) por un factor de cobertura  $k$  adecuado para una distribución normal con una probabilidad de cobertura del 95 %.

$$u_c = \sqrt{u(I_{son})^2 + u(Tcs)^2 + u(Pcs)^2 + u(Hcs)^2 + coef(t_c)^2 \cdot u(t_c)^2 + coef(p_c)^2 \cdot u(p_c)^2 + coef(h_c)^2 \cdot u(h_c)^2}$$

$$U_{95\%} = u_c \cdot k$$

## 6.8. Resultados de la verificación de la cámara audiométrica del Hospital Rafael Ángel Calderón Guardia

Cuadro 15: Resultados tabulados de la primera verificación de la cámara audiométrica del Hospital Rafael Ángel Calderón Guardia

Frecuencias (Hz)	Medición (dB HL)	Cumplimiento aéreo	Cumplimiento ósea	Cumplimiento Norma
31,5	36,7	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
40	32,8	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
50	28,9	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
63	24,7	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
80	21,6	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
100	33,7	NO CUMPLE	CUMPLE	NO CUMPLE
125	31,2	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
160	27,6	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
200	24,4	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
250	20,5	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
315	24,6	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
400	27,5	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
500	35,3	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
630	32,6	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
800	31,6	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
1000	37,5	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
1250	36,3	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
1600	38,8	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
2000	36,1	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
2500	35,5	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
3150	32,2	CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
4000	32,3	CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
5000	29,4	CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
6300	26,5	CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
8000	21,3	CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE

Cuadro 16: Resultados tabulados de la segunda verificación de la cámara audiométrica del Hospital Rafael Ángel Calderón Guardia

Frecuencias (Hz)	Medición (dB HL)	Cumplimiento aéreo	Cumplimiento ósea	Cumplimiento Norma
31,5	45	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
40	32,3	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
50	30,4	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
63	27,3	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
80	30,2	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
100	33,3	NO CUMPLE	CUMPLE	NO CUMPLE
125	31,1	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
160	28,4	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
200	33,2	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
250	38,5	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
315	31,8	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
400	31,7	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
500	36,8	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
630	36,8	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
800	39,9	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
1000	41,4	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
1250	38,5	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
1600	37	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
2000	33,1	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
2500	32,1	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
3150	31,7	CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
4000	26,2	CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
5000	22,9	CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
6300	22,5	CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
8000	18	CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE

## 7. Anexos

## 7.1. Información extraída de la norma ISO 8253-1

Cuadro 17: Tolerancias aéreas y óseas para el nivel de presión acústica dentro de la cámara audiométrica (ISO, 2010)

Frecuencia (Hz)	Límite aéreo (dB)	Límite ósea (dB)
31,5	56	63
40	52	56
50	47	49
63	42	44
80	38	39
100	33	35
125	28	28
160	23	21
200	20	15
250	19	13
315	18	11
400	18	9
500	18	8
630	18	8
800	20	7
1000	23	7
1250	25	7
1600	27	8
2000	30	8
2500	32	6
3150	34	4
4000	36	2
5000	35	4
6300	34	9
8000	33	15

Cuadro 18: Atenuación sonora promedio para los auriculares de uso común (ISO, 2010)

Frecuencia (Hz)	Atenuación sonora (dB)
31,5	0
40	0
50	0
63	1
80	1
100	2
125	3
160	4
200	5
250	5
315	5
400	6
500	7
630	9
800	11
1000	15
1250	18
1600	21
2000	26
2500	28
3150	31
4000	32
5000	29
6300	26
8000	24

## 7.2. Certificado de calibración del calibrador acústico Bruel & Kjaer Tipo 4226

**CERTIFICATE OF CALIBRATION**

No: CDK1902836

Page 1 of 9

**CALIBRATION OF**

Calibrator: Brüel & Kjær Type 4226

No: 3207225 Id: -

**CUSTOMER**

Universidad Nacional Costa Rica  
Fundacion para el Desarrollo Academico de la Universidad Nacional  
Centro Comercial Plaza Heredia, locales B01 y B02  
1735-3000 Heredia  
Costa rica

**CALIBRATION CONDITIONS**

Preconditioning: 4 hours at 23°C ± 3°C

Environment conditions: *See actual values in Environmental conditions sections.*

**SPECIFICATIONS**

The Calibrator Brüel & Kjær Type 4226 has been calibrated in accordance with the requirements as specified in IEC 60942:2003 Annex B - Microphone method. The accreditation assures the traceability to the international units system SI.

**PROCEDURE**

The measurements have been performed with the assistance of Brüel & Kjær Calibrator Calibration System 3630 by using procedure B&K proc 4226-4180 (Full).

**RESULTS**

Calibration Mode: **Calibration as received.**

The reported expanded uncertainty is based on the standard uncertainty multiplied by a coverage factor  $k = 2$  providing a level of confidence of approximately 95 %. The uncertainty evaluation has been carried out in accordance with EA-4/02 from elements originating from the standards, calibration method, effect of environmental conditions and any short time contribution from the device under calibration.

Date of calibration: 2019-04-10

Date of issue: 2019-04-10



Bo Nielsen  
Calibration Technician



Morten Høngård Hansen  
Approved Signatory

**1. Calibration Note**

n/a

**2. Summary**

4.1. Visual inspection	Passed
4.2. Environmental conditions	Passed
4.3. Results - Frequency 114 dB	Passed
4.4. Results - Level 94 dB	Passed
4.5. Results - Level 104 dB	Passed
4.6. Results - Level 114 dB	Passed
4.7. Results - Level accuracy with Inverse A-weighting	Passed
4.8. Results - Distortion 114 dB	Passed
4.9. Results - Level 94 dB External Generator	Passed
4.10. Results - Level 104 dB External Generator	Passed
4.11. Results - Level 114 dB External Generator	Passed

The sound calibrator has been shown to conform to the manufacturer specifications, and may also meet the class 1 requirements for periodic testing described in Annex B of IEC 60942:2003.

**3. Instruments**

	<b>Instrument</b>	<b>Inventory No.</b>
Preamplifier	Brüel & Kjær, Type 2673	122673029
Analyzer	Brüel & Kjær, Type 3560-C	123560024
Microphone	Brüel & Kjær, Type 4180	124180007

**4. Measurements**

**4.1. Visual inspection**

The unit is visually inspected to check the suitability for calibration (section B.2).

Routine Passed

**4.2. Environmental conditions**

Actual environmental conditions (section B.3.2.1).

	Expected	Accept - Limit	Accept + Limit	Measured
				[Deg / kPa / % RH]
Air temperature	23.00	-3.00	3.00	22.50
Air pressure	100.00	-20.00	5.00	101.77
Relative humidity	50.00	-25.00	20.00	44.00

**4.3. Results - Frequency 114 dB**

Measured values of the Actual Frequency(ies).

# marked rows are principal measurements, i.e. the average of three measurements.

	Expected	Measured	Accept - Limit	Accept + Limit	Deviation	Uncertainty
	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
31.623 Hz (31.5 Hz) #	31.62	31.63	-0.32	0.32	0.01	0.01
63.096 Hz (63 Hz)	63.10	63.13	-0.63	0.63	0.03	0.01
125.89 Hz (125 Hz)	125.89	125.89	-1.26	1.26	0.00	0.03
251.19 Hz (250 Hz)	251.19	251.28	-2.51	2.51	0.09	0.05
501.19 Hz (500 Hz)	501.19	502.56	-5.01	5.01	1.37	0.10
1000 Hz (1000 Hz) #	1000.00	1005.12	-10.00	10.00	5.12	0.20
1995.3 Hz (2000 Hz)	1995.30	1978.83	-19.95	19.95	-16.47	0.40
3981.1 Hz (4000 Hz)	3981.10	3957.66	-39.81	39.81	-23.44	0.80
7943.3 Hz (8000 Hz)	7943.30	7915.33	-79.43	79.43	-27.97	1.59
12589 Hz (12500 Hz) #	12589.00	12664.50	-125.89	125.89	75.50	2.52
15849 Hz (16000 Hz) #	15849.00	15830.70	-158.49	158.49	-18.30	3.17

**4.4. Results - Level 94 dB**

Measured values of the Sound Pressure Level at all available frequencies, reported at Reference Environmental Conditions. (section B.3.4.4.1, section B.3.4.4.3 and section B.3.5).

# marked measurements are replicated twice, at the Principal Sound Pressure Level at the Principal, Maximum and Minimum frequencies (section B.3.4.4.2) and at 12,5 kHz at the manufactures recommendation.

Sound Pressure Levels are stated in absolute terms.

Stated tolerances as defined by Manufacturer.

	Expected	Measured	Normalised	Accept - Limit	Accept + Limit	Deviation	Uncertainty
	[dB SPL]	[dB SPL]	[dB SPL]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
31.623 Hz (31.5 Hz) #	94.00	94.07	94.07	-0.35	0.35	0.07	0.11
63.096 Hz (63 Hz)	94.00	94.08	94.08	-0.35	0.35	0.08	0.10
125.89 Hz (125 Hz)	94.00	94.06	94.06	-0.35	0.35	0.06	0.10
251.19 Hz (250 Hz)	94.00	94.06	94.06	-0.30	0.30	0.06	0.09
501.19 Hz (500 Hz)	94.00	94.06	94.06	-0.30	0.30	0.06	0.09
1000 Hz (1000 Hz) #	94.00	94.05	94.05	-0.20	0.20	0.05	0.10
1995.3 Hz (2000 Hz)	94.00	94.05	94.05	-0.35	0.35	0.05	0.10
3981.1 Hz (4000 Hz)	94.00	93.99	93.99	-0.35	0.35	-0.01	0.10
7943.3 Hz (8000 Hz)	94.00	93.91	93.91	-0.45	0.45	-0.09	0.11
12589 Hz (12500 Hz) #	94.00	94.10	94.10	-0.70	0.70	0.10	0.12
15849 Hz (16000 Hz) #	94.00	94.08	94.08	-0.70	0.70	0.08	0.12

**4.5. Results - Level 104 dB**

Measured values of the Sound Pressure Level at all available frequencies, reported at Reference Environmental Conditions. (section B.3.4.4.1, section B.3.4.4.3 and section B.3.5).

# marked measurements are replicated twice, at the Principal, Maximum and Minimum frequencies (section B.3.4.4.2) and at 12,5 kHz at the manufactures recommendation.

Sound Pressure Levels are stated in absolute terms.

Stated tolerances as defined by Manufacturer.

	Expected	Measured	Normalised	Accept - Limit	Accept + Limit	Deviation	Uncertainty
	[dB SPL]	[dB SPL]	[dB SPL]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
31.623 Hz (31.5 Hz) #	104.00	104.06	104.06	-0.45	0.45	0.06	0.11
63.096 Hz (63 Hz)	104.00	104.07	104.07	-0.45	0.45	0.07	0.10
125.89 Hz (125 Hz)	104.00	104.06	104.06	-0.45	0.45	0.06	0.10
251.19 Hz (250 Hz)	104.00	104.06	104.06	-0.40	0.40	0.06	0.09
501.19 Hz (500 Hz)	104.00	104.05	104.05	-0.40	0.40	0.05	0.09
1000 Hz (1000 Hz) #	104.00	104.04	104.04	-0.30	0.30	0.04	0.10
1995.3 Hz (2000 Hz)	104.00	104.06	104.06	-0.45	0.45	0.06	0.10
3981.1 Hz (4000 Hz)	104.00	103.96	103.96	-0.45	0.45	-0.04	0.10
7943.3 Hz (8000 Hz)	104.00	103.87	103.87	-0.55	0.55	-0.13	0.11
12589 Hz (12500 Hz) #	104.00	103.97	103.97	-0.90	0.90	-0.03	0.12
15849 Hz (16000 Hz) #	104.00	103.74	103.74	-0.90	0.90	-0.26	0.12

**4.6. Results - Level 114 dB**

Measured values of the Sound Pressure Level at all available frequencies, reported at Reference Environmental Conditions. (section B.3.4.4.1, section B.3.4.4.3 and section B.3.5).

# marked measurements are replicated twice, at the Principal, Maximum and Minimum frequencies (section B.3.4.4.2) and at 12,5 kHz at the manufactures recommendation.

Sound Pressure Levels are stated in absolute terms.

Stated tolerances as defined by Manufacturer.

	Expected	Measured	Normalised	Accept - Limit	Accept + Limit	Deviation	Uncertainty
	[dBSPL]	[dBSPL]	[dBSPL]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
31.623 Hz (31.5 Hz) #	114.00	114.04	114.04	-0.45	0.45	0.04	0.11
63.096 Hz (63 Hz)	114.00	114.05	114.05	-0.45	0.45	0.05	0.10
125.89 Hz (125 Hz)	114.00	114.04	114.04	-0.45	0.45	0.04	0.10
251.19 Hz (250 Hz)	114.00	114.04	114.04	-0.40	0.40	0.04	0.09
501.19 Hz (500 Hz)	114.00	114.04	114.04	-0.40	0.40	0.04	0.09
1000 Hz (1000 Hz) #	114.00	114.03	114.03	-0.30	0.30	0.03	0.10
1995.3 Hz (2000 Hz)	114.00	114.04	114.04	-0.45	0.45	0.04	0.10
3981.1 Hz (4000 Hz)	114.00	113.93	113.93	-0.45	0.45	-0.07	0.10
7943.3 Hz (8000 Hz)	114.00	113.85	113.85	-0.55	0.55	-0.15	0.11
12589 Hz (12500 Hz) #	114.00	113.95	113.95	-0.90	0.90	-0.05	0.12
15849 Hz (16000 Hz) #	114.00	113.67	113.67	-0.90	0.90	-0.33	0.12

**4.7. Results - Level accuracy with Inverse A-weighting**

Measured values of the Sound Pressure Level, reported at Reference Environmental Conditions.

# marked rows is the average of three measurements.

	Expected	Measured	Normalised	Accept - Limit	Accept + Limit	Deviation	Uncertainty
	[dBSPL]	[dBSPL]	[dBSPL]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
31.623 Hz (31.5 Hz) #	133.40	133.53	133.53	-0.35	0.35	0.13	0.11
63.096 Hz (63 Hz)	120.20	120.26	120.26	-0.35	0.35	0.06	0.10
125.89 Hz (125 Hz)	110.10	110.17	110.17	-0.35	0.35	0.07	0.10
251.19 Hz (250 Hz)	102.60	102.69	102.69	-0.30	0.30	0.09	0.09
501.19 Hz (500 Hz)	97.20	97.28	97.28	-0.30	0.30	0.08	0.09
1000 Hz (1000 Hz) #	94.00	94.04	94.04	-0.20	0.20	0.04	0.10
1995.3 Hz (2000 Hz)	92.80	92.86	92.86	-0.35	0.35	0.06	0.10
3981.1 Hz (4000 Hz)	93.00	93.05	93.05	-0.35	0.35	0.05	0.10
7943.3 Hz (8000 Hz)	95.10	94.98	94.98	-0.45	0.45	-0.12	0.11
12589 Hz (12500 Hz) #	98.30	98.38	98.38	-0.70	0.70	0.08	0.12
15849 Hz (16000 Hz) #	100.60	100.59	100.59	-0.70	0.70	-0.01	0.12

**4.8. Results - Distortion 114 dB**

Distortion is measured as Total distortion (section B.3.6).  
 Stated tolerances as defined by Manufacturer..

# marked rows is the average of three measurements.

	Expected	Measured	Max	Deviation	Uncertainty
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
31.623 Hz (31.5 Hz) #	0.00	0.58	3.00	0.58	0.30
63.096 Hz (63 Hz)	0.00	0.31	3.00	0.31	0.30
125.89 Hz (125 Hz)	0.00	0.15	3.00	0.15	0.30
251.19 Hz (250 Hz)	0.00	0.08	2.00	0.08	0.30
501.19 Hz (500 Hz)	0.00	0.13	2.00	0.13	0.30
1000 Hz (1000 Hz) #	0.00	0.14	2.00	0.14	0.30
1995.3 Hz (2000 Hz)	0.00	0.42	3.00	0.42	0.30
3981.1 Hz (4000 Hz)	0.00	2.29	3.00	2.29	0.30
7943.3 Hz (8000 Hz)	0.00	0.60	3.00	0.60	0.30
12589 Hz (12500 Hz) #	0.00	0.12	3.00	0.12	0.30
15849 Hz (16000 Hz) #	0.00	0.07	3.00	0.07	0.30

**4.9. Results - Level 94 dB External Generator**

Measured values of the Sound Pressure Level(s) at selected Generator frequencies.

No tolerances are used to eliminate possible errors from internal (4226) reference microphone frequency response.

# marked rows is the average of three measurements.

	Expected	Measured	Normalised	Deviation	Uncertainty
	[dB SPL]	[dB SPL]	[dB SPL]	[dB]	[dB]
31.623 Hz (31.5 Hz) #	94.00	94.06	94.06	0.06	0.11
63.096 Hz (63 Hz)	94.00	94.08	94.08	0.08	0.10
125.89 Hz (125 Hz)	94.00	94.06	94.06	0.06	0.10
251.19 Hz (250 Hz)	94.00	94.06	94.06	0.06	0.09
501.19 Hz (500 Hz)	94.00	94.06	94.06	0.06	0.09
1000 Hz (1000 Hz) #	94.00	94.05	94.05	0.05	0.10
1995.3 Hz (2000 Hz)	94.00	93.99	93.99	-0.01	0.10
3981.1 Hz (4000 Hz)	94.00	93.90	93.90	-0.10	0.10
7943.3 Hz (8000 Hz)	94.00	93.65	93.65	-0.35	0.11
12589 Hz (12500 Hz) #	94.00	93.66	93.66	-0.34	0.12
15849 Hz (16000 Hz) #	94.00	93.82	93.82	-0.18	0.12

**4.10. Results - Level 104 dB External Generator**

Measured values of the Sound Pressure Level(s) at selected Generator frequencies.  
No tolerances are used to eliminate possible errors from internal (4226) reference microphone frequency response.  
# marked rows is the average of three measurements.

	Expected	Measured	Normalised	Deviation	Uncertainty
	[dB SPL]	[dB SPL]	[dB SPL]	[dB]	[dB]
31.623 Hz (31.5 Hz) #	104.00	104.06	104.06	0.06	0.11
63.096 Hz (63 Hz)	104.00	104.07	104.07	0.07	0.10
125.89 Hz (125 Hz)	104.00	104.06	104.06	0.06	0.10
251.19 Hz (250 Hz)	104.00	104.06	104.06	0.06	0.09
501.19 Hz (500 Hz)	104.00	104.06	104.06	0.06	0.09
1000 Hz (1000 Hz) #	104.00	104.04	104.04	0.04	0.10
1995.3 Hz (2000 Hz)	104.00	103.99	103.99	-0.01	0.10
3981.1 Hz (4000 Hz)	104.00	103.86	103.86	-0.14	0.10
7943.3 Hz (8000 Hz)	104.00	103.61	103.61	-0.39	0.11
12589 Hz (12500 Hz) #	104.00	103.57	103.57	-0.43	0.12
15849 Hz (16000 Hz) #	104.00	103.54	103.54	-0.46	0.12

**4.11. Results - Level 114 dB External Generator**

Measured values of the Sound Pressure Level(s) at selected Generator frequencies.  
No tolerances are used to eliminate possible errors from internal (4226) reference microphone frequency response.  
# marked rows is the average of three measurements.

	Expected	Measured	Normalised	Deviation	Uncertainty
	[dB SPL]	[dB SPL]	[dB SPL]	[dB]	[dB]
31.623 Hz (31.5 Hz) #	114.00	114.04	114.04	0.04	0.11
63.096 Hz (63 Hz)	114.00	114.05	114.05	0.05	0.10
125.89 Hz (125 Hz)	114.00	114.04	114.04	0.04	0.10
251.19 Hz (250 Hz)	114.00	114.04	114.04	0.04	0.09
501.19 Hz (500 Hz)	114.00	114.04	114.04	0.04	0.09
1000 Hz (1000 Hz) #	114.00	114.03	114.03	0.03	0.10
1995.3 Hz (2000 Hz)	114.00	113.98	113.98	-0.02	0.10
3981.1 Hz (4000 Hz)	114.00	113.84	113.84	-0.16	0.10
7943.3 Hz (8000 Hz)	114.00	113.58	113.58	-0.42	0.11
12589 Hz (12500 Hz) #	114.00	113.55	113.55	-0.45	0.12
15849 Hz (16000 Hz) #	114.00	113.48	113.48	-0.52	0.12

**DANAK**

*DANAK is the national accreditation body in Denmark in compliance with EU regulation No. 765/2008. DANAK participates in the multilateral agreements for testing and calibration under European co-operation for Accreditation (EA) and under International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) based on peerevaluation. Accredited test reports and calibration certificates issued by laboratories accredited by DANAK are recognized cross border by members of EA and ILAC equal to test reports and calibration certificates issued by these members' accredited laboratories.*

*The use of the accreditation mark on test reports and calibration certificates or reference to accreditation, documents that the service is provided as an accredited service under the company's DANAK accreditation.*

### 7.3. Certificado de calibración del sonómetro Larson Davis Modelo 824

# Certificate of Calibration and Conformance

Certificate Number 2019-208146

Instrument Model 824, Serial Number A4456, was calibrated on 2 May 2019. The instrument meets factory specifications per Procedure D0001.8046, IEC 61672-1:2002 Class 1; IEC 60651-2001, 60804-2000 and ANSI S1.4-1983 Type 1 1/3, 1/1 Oct. Filters; S1.11-1986 Type 1C; IEC61260-am1-2001 Class 1 .

**Instrument found to be in calibration as received: YES**

**Date Calibrated: 2 May 2019**

**Calibration due: 2 May 2020**

## Calibration Standards Used

MANUFACTURER	MODEL	SERIAL NUMBER	INTERVAL	CAL. DUE	TRACEABILITY NO.
Larson Davis	LDSigGn/2209	0662/0114	12 Months	7 Dec 2019	2018-207567

Reference Standards are traceable to the National Institute of Standards and Technology (NIST)

## Calibration Environmental Conditions

Temperature: 24 ° Centigrade

Relative Humidity: 22 %

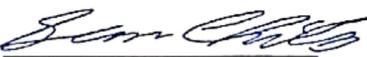
## Affirmations

This Certificate attests that this instrument has been calibrated under the stated conditions with Measurement and Test Equipment (M&TE) Standards traceable to the U.S. National Institute of Standards and Technology (NIST). All of the Measurement Standards have been calibrated to their manufacturers' specified accuracy / uncertainty. Evidence of traceability and accuracy is on file at Provo Engineering & Manufacturing Center. An acceptable accuracy ratio between the Standard(s) and the item calibrated has been maintained. This instrument meets or exceeds the manufacturer's published specification unless noted.

The collective uncertainty of the Measurement Standard used does not exceed 25% of the applicable tolerance for each characteristic calibrated unless otherwise noted.

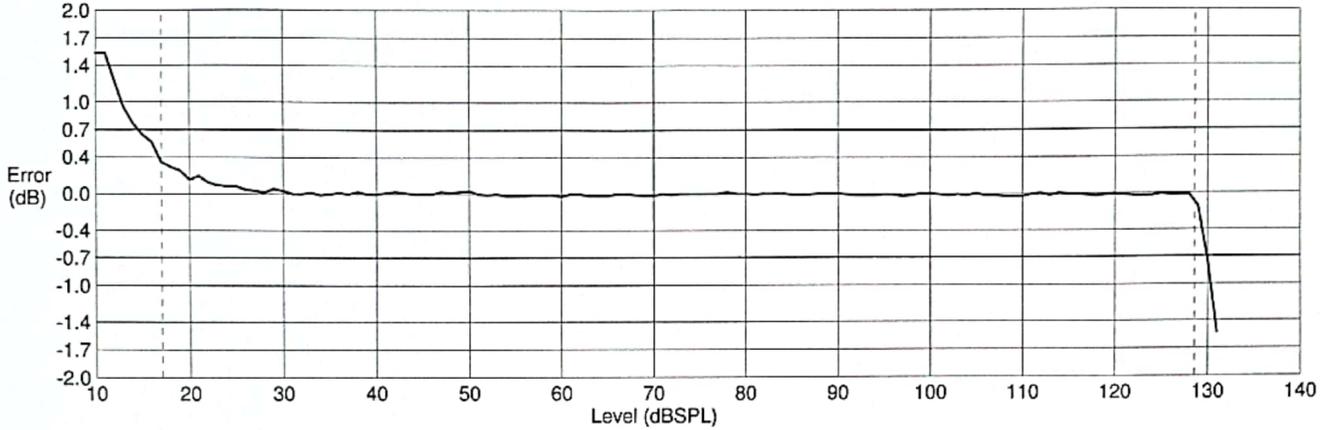
The results documented in this certificate relate only to the item(s) calibrated or tested. A one year calibration is recommended, however calibration interval assignment and adjustment are the responsibility of the end user. This certificate may not be reproduced, except in full, without the written approval of the issuer.

"As received" data is the same as shipped data.  
Tested with PRM902 S/N 5293

Signed:   
Technician: Sean Childs

**Sound Level Meter Model: 824 Serial Number: A4456**  
**Log Linearity, Differential Linearity and Range Data**

This Type 1 Sound Level Meter (including attached PRM902 preamplifier and ADP005 18 pF input adapter) was calibrated with a reference 1kHz sine wave at a level of 114.0 dB SPL. The instrument's Log Linearity A-weighted fast response was then electrically tested using a 1kHz sine wave from 11.0 dB SPL to 131.0 dB SPL in 1.0 dB increments.



Levl dB SPL	Meas dB SPL	Uncert +/- dB	Err dB	Levl dB SPL	Meas dB SPL	Uncert +/- dB	Err dB	Levl dB SPL	Meas dB SPL	Uncert +/- dB	Err dB	Levl dB SPL	Meas dB SPL	Uncert +/- dB	Err dB
11.0	12.5	0.27	1.5	42.0	42.0	0.11	0.0	73.0	73.0	0.11	0.0	104.0	104.0	0.11	0.0
12.0	13.2	0.27	1.2	43.0	43.0	0.11	0.0	74.0	74.0	0.11	0.0	105.0	105.0	0.11	0.0
13.0	13.9	0.27	0.9	44.0	44.0	0.11	0.0	75.0	75.0	0.11	0.0	106.0	106.0	0.11	0.0
14.0	14.8	0.27	0.8	45.0	45.0	0.11	0.0	76.0	76.0	0.11	0.0	107.0	107.0	0.11	0.0
15.0	15.6	0.27	0.6	46.0	46.0	0.11	0.0	77.0	77.0	0.13	0.0	108.0	108.0	0.11	0.0
16.0	16.6	0.27	0.6	47.0	47.0	0.11	0.0	78.0	78.0	0.13	0.0	109.0	109.0	0.11	0.0
17.0	17.3	0.27	0.3	48.0	48.0	0.11	0.0	79.0	79.0	0.12	0.0	110.0	110.0	0.11	0.0
18.0	18.3	0.26	0.3	49.0	49.0	0.11	0.0	80.0	80.0	0.12	0.0	111.0	111.0	0.11	0.0
19.0	19.2	0.26	0.3	50.0	50.0	0.11	0.0	81.0	81.0	0.12	0.0	112.0	112.0	0.11	0.0
20.0	20.1	0.26	0.2	51.0	51.0	0.11	0.0	82.0	82.0	0.12	0.0	113.0	113.0	0.11	0.0
21.0	21.1	0.26	0.2	52.0	52.0	0.11	0.0	83.0	83.0	0.12	0.0	114.0	114.0	0.11	0.0
22.0	22.1	0.26	0.1	53.0	53.0	0.11	0.0	84.0	84.0	0.12	0.0	115.0	115.0	0.11	0.0
23.0	23.1	0.26	0.0	54.0	54.0	0.11	0.0	85.0	85.0	0.11	0.0	116.0	116.0	0.11	0.0
24.0	24.1	0.16	0.0	55.0	55.0	0.11	0.0	86.0	86.0	0.11	0.0	117.0	117.0	0.11	0.0
25.0	25.1	0.16	0.0	56.0	56.0	0.11	0.0	87.0	87.0	0.11	0.0	118.0	118.0	0.11	0.0
26.0	26.0	0.16	0.0	57.0	57.0	0.11	0.0	88.0	88.0	0.11	0.0	119.0	119.0	0.11	0.0
27.0	27.0	0.16	0.0	58.0	58.0	0.11	0.0	89.0	89.0	0.11	0.0	120.0	120.0	0.11	0.0
28.0	28.0	0.16	0.0	59.0	59.0	0.11	0.0	90.0	90.0	0.11	0.0	121.0	121.0	0.11	0.0
29.0	29.0	0.16	0.0	60.0	60.0	0.11	0.0	91.0	91.0	0.11	0.0	122.0	122.0	0.11	0.0
30.0	30.0	0.16	0.0	61.0	61.0	0.11	0.0	92.0	92.0	0.11	0.0	123.0	123.0	0.11	0.0
31.0	31.0	0.16	0.0	62.0	62.0	0.11	0.0	93.0	93.0	0.11	0.0	124.0	124.0	0.11	0.0
32.0	32.0	0.16	0.0	63.0	63.0	0.11	0.0	94.0	94.0	0.11	0.0	125.0	125.0	0.11	0.0
33.0	33.0	0.16	0.0	64.0	64.0	0.11	0.0	95.0	95.0	0.11	0.0	126.0	126.0	0.11	0.0
34.0	34.0	0.15	0.0	65.0	65.0	0.11	0.0	96.0	96.0	0.11	0.0	127.0	127.0	0.11	0.0
35.0	35.0	0.15	0.0	66.0	66.0	0.11	0.0	97.0	97.0	0.11	0.0	128.0	128.0	0.11	0.0
36.0	36.0	0.15	0.0	67.0	67.0	0.11	0.0	98.0	98.0	0.11	0.0	129.0	128.8	0.11	-0.2
37.0	37.0	0.15	0.0	68.0	68.0	0.11	0.0	99.0	99.0	0.11	0.0	130.0	129.3	0.11	-0.7
38.0	38.0	0.15	0.0	69.0	69.0	0.11	0.0	100.0	100.0	0.11	0.0	131.0	129.5	0.11	-1.5
39.0	39.0	0.15	0.0	70.0	70.0	0.11	0.0	101.0	101.0	0.11	0.0				
40.0	40.0	0.11	0.0	71.0	71.0	0.11	0.0	102.0	102.0	0.11	0.0				
41.0	41.0	0.11	0.0	72.0	72.0	0.11	0.0	103.0	103.0	0.11	0.0				

Uncertainties are given as expanded uncertainty at ~95% confidence interval (k = 2).

Plotted per typical sensitivity of a 2541 microphone; 44.5 mV/Pa & 17.1 pF.

Overload occurs at 128.7 dB SPL.

Primary indicator range: 111.6 dB (lower limit: 17.0 dB SPL to upper limit: 128.6 dB SPL).

Dynamic range: 120.5 dB (noise floor: 8.1 dB SPL to upper limit: 128.6 dB SPL).

This instrument is in compliance with IEC 60651 (2001-10) 7.9 and 7.10, ANSI S1.4-1983 3.2, IEC 61672-1 (2002-05) 5.5 class 1 and IEC 60804 (2001-10) 9.2.1 for Type 1 sound level meters when used with a Larson Davis Type 1 microphone.

#### **7.4. Carta de finalización y cumplimiento emitida por PROCAME**



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COSTA RICA  
ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES  
PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD AMBIENTE Y METROLOGÍA



26 de octubre, 2022  
UNA-PROCAME-OFIC-074-2022

**Señores**  
**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

Estimados

La presente es para indicar que el estudiante David Villalobos Garita cédula 4-0246-0391 desarrolló su Trabajo Final de Graduación (TFG) denominado “Desarrollo y mejora de procedimientos de calibración para cámaras audiométricas y calibradores acústicos” en el Laboratorio de Metrología de la Universidad Nacional. El estudiante cumplió a cabalidad con todos los objetivos propuestos para su TFG mostrando un desempeño incluso mayor al esperado.

Agradezco de antemano la atención y quedo a disposición para cualquier consulta

Firmado por ERNESTO JOSE MONTERO SANCHEZ (FIRMA)  
PERSONA FISICA, CPF-04-0219-0931.  
Fecha declarada: 26/10/2022 11:00 AM  
Lugar: Heredia, Costa Rica Contacto: ernesto.montero.sanchez@una.cr

Mag. Ernesto Montero Sánchez  
Responsable Técnico-Laboratorio de Metrología, PROCAME  
Académico  
Coordinador de Carrera Ingeniería en Gestión Ambiental  
Escuela de Ciencias Ambientales  
Universidad Nacional de Costa Rica  
Cc: Archivo