

UNIVERSIDAD NACIONAL  
MAESTRÍA EN METROLOGÍA Y CALIDAD

DISEÑO DE UNA ALTERNATIVA PARA LA  
CALIBRACIÓN DE APLICACIONES  
MÓVILES QUE MIDEN NIVEL DE PRESIÓN  
SONORA

PROYECTO DE GRADUACIÓN PARA  
OPTAR AL GRADO DE MÁSTER EN  
METROLOGÍA Y CALIDAD CON ÉNFASIS  
EN SISTEMAS INTEGRADOS DE GESTIÓN

ESTUDIANTES:

EDUARDO ALFARO UREÑA

ERNESTO MONTERO SÁNCHEZ.

TUTORA: MAP. KARLA VETRANI CHAVARRÍA

HEREDIA, 2019

El presente trabajo final de graduación fue aceptado por la Comité de Gestión Académica (CGA) de la Maestría en Calidad y Metrología (MCM) de la Universidad Nacional, como requisito formal para optar por el grado de Magíster en Calidad y Metrología.

### **MIEMBROS DEL TRIBUNAL EXAMINADOR**

MSc. Marielos Alfaro Murillo  
Directora Escuela de Ciencias Ambientales

MAP. Karla Vetrani Chavarría  
Tutora de trabajo final de graduación

PhD. Ligia Bermúdez Hidalgo  
Miembro del Comité Asesor  
Lectora

MSc. Manfred Murrell Blanco  
Miembro del Comité Asesor  
Lector

Ernesto Montero Sánchez  
Sustentante

Eduardo Alfaro Ureña  
Sustentante

## Tabla de contenido

1.1	Descripción general del proyecto .....	14
1.2	Identificación de la institución.....	14
1.2.1	Misión y visión .....	15
1.2.2	Organigrama .....	16
1.3	Planteamiento del problema.....	19
1.4	Objetivos de la investigación.....	20
1.4.1	Objetivo general .....	20
1.4.2	Objetivos específicos .....	20
1.5	Alcances y limitaciones .....	21
1.5.1	Alcance .....	21
1.5.2	Limitaciones .....	21
2.1	Sistema de gestión de las mediciones .....	23
2.2	Dispositivos móviles y aplicaciones .....	26
2.3	Medición de ruido ambiental y ocupacional .....	28
2.3.1	Normativa en Costa Rica referente a la medición de ruido .....	29
3.1	Metodología para la definición del problema del proyecto .....	34
3.1.1	Enfoque y tipo de investigación .....	34
3.2	Metodología para la medición y respaldo cualitativo del proyecto .....	34
3.2.1	Revisión teórica .....	35
3.2.2	Diagnóstico de prototipo de cámara acústica .....	35
3.2.3	Descripción del equipo de medición .....	39
3.2.4	Descripción de la función medición .....	39
3.2.5	Evaluación del cumplimiento con la norma INTE-ISO 10012:2003 .....	43
3.3	Metodología para el análisis de resultados del proyecto .....	44
3.3.1	Resultados de la conformidad con la norma INTE-ISO 10012:2003.....	44
3.3.2	Validación de modelo metrológico para la calibración de aplicaciones móviles	45
3.4	Metodología para el diseño de la propuesta del proyecto.....	45
3.4.1	Cierre de brecha con la norma INTE-ISO 10012:2003 .....	45

3.4.2	Procedimiento para la caracterización de la cámara acústica.....	46
3.4.3	Procedimiento para la calibración de aplicaciones móviles .....	47
3.5	Metodología para la verificación de la propuesta del proyecto .....	47
3.5.1	Metodología para la verificación, aseguramiento, control y seguimiento de resultados .....	48
3.5.2	Análisis técnico .....	48
3.5.3	Análisis financiero.....	48
4.1	Prototipo de cámara acústica para realizar la calibración de aplicaciones móviles	52
4.1.1	Revisión bibliográfica de normas, manuales, fichas técnicas y reglamentos .	52
4.1.2	Evaluación de materiales para construir la cámara acústica.....	54
4.1.3	Análisis de las figuras volumétricas más aptas para el diseño de una cámara acústica	55
4.1.4	Análisis de dimensiones de la cámara acústica .....	57
4.1.5	Análisis de la espuma acústica .....	57
4.1.6	Control electrónico y amplificador de señal de audio .....	59
4.1.7	Cálculo de confinamiento acústico.....	62
4.1.8	Diseño final de la cámara acústica .....	63
4.2	Descripción del equipo de medición.....	65
4.2.1	Aseguramiento metrológico del equipo.....	65
4.3	Magnitudes de influencia identificadas .....	67
4.4	Descripción de la función de medición.....	67
4.5	Evaluación del cumplimiento del sistema de gestión de la calidad del Laboratorio de Metrología con la norma INTE-ISO 10012:2003.....	79
5.1	Cierre de brecha con la norma INTE-ISO 10012:2003 .....	83
5.2	Procedimiento para la caracterización de cámaras acústicas .....	84
5.2.1	Descripción general del procedimiento .....	85
5.2.2	Etapas del proceso de caracterización .....	85
5.2.3	Pruebas requeridas para la caracterización.....	87
5.2.4	Resultados de la caracterización.....	88
5.3	Procedimiento para la calibración de aplicaciones móviles para la medición de nivel de presión sonora .....	90

5.3.1	Descripción general del procedimiento .....	90
5.3.2	Etapas del proceso de calibración.....	91
5.3.3	Condiciones requeridas para la calibración .....	93
5.3.4	Resultados de la calibración .....	94
5.4	Validación del método .....	97
5.5	Análisis técnico de la propuesta.....	100
5.6	Análisis financiero .....	103
5.6.1	Materia prima .....	103
5.6.2	Análisis de costos .....	103
5.6.3	Análisis de ingresos .....	104
5.6.4	Flujo neto efectivo .....	104
6.1	Conclusiones .....	107
6.2	Recomendaciones .....	108
	Bibliografía.....	111

## Índice de tablas

Tabla 1. Fórmulas generales para el cálculo de incertidumbre típica según la distribución de probabilidad y el tipo de incertidumbre.....	42
Tabla 2. Plan de diseño de acciones requeridas para alcanzar la conformidad del Laboratorio de Metrología de Procame con la norma INTE-ISO 10012:2003 .....	46
Tabla 3. Aplicaciones móviles utilizadas para calibración en cámara acústica .....	47
Tabla 4. Descripción de normas, manuales, fichas técnicas y reglamentos aplicables al proceso de calibración .....	53
Tabla 5. Comparación de materiales para la construcción de la cámara acústica .....	54
Tabla 6. Comparación de las figuras volumétricas.....	56
Tabla 7. Elementos utilizados para dimensionar la cámara acústica.....	57
Tabla 8. Comparación de espumas acústicas.....	58
Tabla 9. Componentes utilizados para el control electrónico de la cámara acústica.....	60
Tabla 10. Cálculo de aislamiento acústico de la cámara acústica .....	62
Tabla 11. Resumen de especificaciones para el diseño final de la cámara acústica.....	63
Tabla 12. Error de indicación de equipo de medición patrón dosímetro de ruido con interfaz para PC .....	65
Tabla 13. Coeficientes de sensibilidad máximos permitidos por la norma INTE/IEC 61094-1:2017 para micrófonos de la clase LS2F .....	67
Tabla 14. Evaluación de los requisitos que contribuyen a la trazabilidad metrológica de los documentos ISO 1996-2:2009, decreto N° 32692-S, decreto N° 39428-S y decreto N° 10541-TSS .....	69
Tabla 15. Resumen cálculo de incertidumbres .....	77
Tabla 16. Presupuesto de incertidumbre en la caracterización de la cámara acústica a las diferentes señales de prueba .....	89
Tabla 17. Resultados de calibración de las aplicaciones móviles con el patrón de referencia a la señal de 94 dB a 250 Hz .....	94
Tabla 18. Resultados de calibración de las aplicaciones móviles con el patrón de referencia a la señal de 94 dB a 1000 Hz .....	95
Tabla 19. Resultados de calibración de las aplicaciones móviles con el patrón de referencia a la señal de 94 dB a 4000 Hz .....	95
Tabla 20. Resultados de calibración de las aplicaciones móviles con el patrón de referencia a la señal de 104 dB a 1000 Hz .....	96
Tabla 21. Criterios utilizados para la validación del método .....	97
Tabla 22. Resultados de la prueba de veracidad del método, evaluado a partir de los resultados de la calibración del dosímetro Extech 407355 con serie 130803499, utilizando dos métodos distintos.....	98
Tabla 23. Resultados de la prueba de veracidad entre metrólogos, repitiendo la calibración de la aplicación NIOSH versión 1.0.7.18 instalada en el celular Iphone SE, por dos investigadores .....	99

Tabla 24. Análisis técnico de la propuesta .....	101
Tabla 25. Materia prima requerida para la construcción de la cámara acústica .....	103
Tabla 26. Cálculo de flujo de caja para el proceso de trazabilidad metrológica para aplicaciones móviles que miden nivel de presión sonora.....	105
Tabla 27. Lista de chequeo según los requisitos de la norma INTE/ISO 10012:2003 para el proceso de calibración de aplicaciones móviles que miden nivel de presión sonora, en el laboratorio de metrología.....	117
Tabla 28. Resumen para el cálculo de la incertidumbre típica asociada a las características de la cámara acústica.....	132
Tabla 29. Resumen para el cálculo de la incertidumbre típica asociada a la calibración de aplicaciones móviles que miden nivel de presión sonora.....	141

## Índice de figuras

Figura 1: Ubicación del laboratorio en la organización matriz y sus relaciones .....	17
Figura 2: Estructura interna del laboratorio en la organización matriz y sus relaciones .....	18
Figura 3: Modelo de sistema de gestión de las mediciones.....	24
Figura 4: Estructura de la metodología empleada para el desarrollo de la investigación ...	33
Figura 5: Estructura del capítulo IV: Análisis de la situación actual .....	51
Figura 6: Propiedades de absorción por frecuencia del panel plano SonoFlat de Auralex ..	59
Figura 7. Imagen ilustrativa de Arduino UNO .....	61
Figura 8: Cámara acústica, modelo en 3D.....	64
Figura 9: Cámara acústica, con altavoz integrado.....	64
Figura 10: Error de indicación de equipo de medición patrón dosímetro de ruido con interfaz para PC .....	66
Figura 11. Diagrama de Ishikawa sobre los factores que afectan el proceso de medición para determinación del error de aplicaciones móviles que miden nivel de presión sonora .....	70
Figura 12. Estado de la conformidad del sistema de gestión de las mediciones del Laboratorio de Metrología de Procame, con la norma de referencia INTE-ISO 10012:2003 .....	80
Figura 13. Estructura del capítulo V: Alternativas de solución.....	83
Figura 14. Diagrama de flujo de la etapa de caracterización.....	86
Figura 15. Diagrama de flujo del proceso de calibración de aplicaciones móviles que miden nivel de presión sonora .....	92

## Índice de ecuaciones

Ecuación 1: Cálculo del coeficiente de confinamiento medio .....	37
Ecuación 2: Cálculo de la capacidad de reducción del sonido .....	38
Ecuación 3: Cálculo del nivel de potencia sonora interno de la cámara .....	38
Ecuación 4: Cálculo del error de indicación del instrumento bajo calibración .....	40
Ecuación 5: Cálculo de incertidumbre combinada .....	42
Ecuación 6: Cálculo de incertidumbre expandida .....	43
Ecuación 7: Cálculo del valor de cumplimiento global de los requisitos de la norma INTE/ISO 10012:2003 .....	44
Ecuación 8: Cálculo del error del instrumento bajo calibración (dB) .....	70
Ecuación 9: Cálculo de la incertidumbre por resolución del instrumento.....	72
Ecuación 10: Cálculo de la incertidumbre por resolución del termómetro .....	72
Ecuación 11: Cálculo de la incertidumbre por trazabilidad del termómetro .....	73
Ecuación 12: Cálculo de la incertidumbre por deriva del termómetro.....	73
Ecuación 13: Cálculo de la incertidumbre por resolución del barómetro .....	73
Ecuación 14: Cálculo de la incertidumbre por trazabilidad del barómetro .....	74
Ecuación 15: Cálculo de la incertidumbre por deriva del barómetro .....	74
Ecuación 16: Cálculo de la incertidumbre por resolución del instrumento patrón. ....	75
Ecuación 17: Cálculo de la incertidumbre por trazabilidad del instrumento patrón .....	75
Ecuación 18: Cálculo de la incertidumbre por deriva del instrumento patrón .....	75
Ecuación 19: Cálculo de la incertidumbre por falta de uniformidad en el medio de comparación.....	76
Ecuación 20: Cálculo de la incertidumbre por falta de estabilidad en el medio de comparación .....	76
Ecuación 21: Cálculo de la incertidumbre por falta de estabilidad en el medio de comparación .....	77
Ecuación 22: Cálculo de la incertidumbre típica del error .....	79
Ecuación 23: Cálculo de la incertidumbre expandida con probabilidad de cobertura del 95 % .....	79

## Acrónimos y siglas

Acrónimo o sigla	Significado
ANOVA	<i>analysis of variance</i> (análisis de la varianza)
ANSI	American National Standards Institute (Instituto Estadounidense de Estándares Nacionales)
ASTM	American Society for Testing and Materials (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales)
CRC	colones (de Costa Rica)
EN	errores normalizados
EMP	error máximo permitido
FNE	flujo neto efectivo
FUNDAUNA	Fundación para el Desarrollo Académico de la Universidad Nacional
IEC	International Electrotechnical Commission (Comisión Electrotécnica Internacional)
INTECO	Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica
ISO	International Standardization Organization (Organización Internacional de Estandarización)
LCD	<i>liquid cristal display</i> (pantalla de cristal líquido)
MDF	<i>medium density fiberboard</i> (tablero de fibra de densidad media)
NA	no aplica
NRC	<i>noise reduction coefficient</i> (coeficiente de reducción del ruido)
OMS	Organización Mundial de la Salud
OSMAN	Organización de Salud y Medio Ambiente de Andalucía
PROCAME	Programa de Estudios de Calidad, Ambiente y Metrología

SGC	sistema de gestión de la calidad
SI	Sistema Internacional de Unidad
UNA	Universidad Nacional

## Resumen ejecutivo

Alfaro, E. & Montero, E. (2018). *Diseño de una alternativa para la calibración de aplicaciones móviles que miden nivel de presión sonora*. (Tesis inédita de maestría). Universidad Nacional de Costa Rica, Heredia.

El objetivo de este proyecto de graduación fue proponer un modelo de gestión metrológica para aplicaciones móviles utilizadas en la medición de ruido ambiental u ocupacional específicamente en la determinación de los niveles de presión sonora, asegurando de esta manera la trazabilidad de los resultados. Esto es importante ya que permite contar con una relación de los resultados obtenidos mediante procedimientos de medición que se documentan, lo cual genera un respaldo. De este modo, el alcance del proyecto aplica como propuesta de implementación del servicio de calibración por parte del Laboratorio de Metrología de Procame, en el segundo semestre de 2018, contemplando el sistema de gestión de mediciones actual de este organismo.

Para tal efecto, se desarrolló un prototipo de cámara acústica, bajo el diagnóstico de aspectos como documentación aplicable, materiales para su construcción, figura volumétrica, dimensiones, espuma acústica, control electrónico, cálculo de confinamiento acústico y diseño final.

También se llevó a cabo un diagnóstico del proceso de caracterización de la cámara acústica y de calibración de la medición de presión sonora de las aplicaciones móviles, contemplando el equipo de medición, las magnitudes de influencia, la validación del método, la función de medición para el cálculo de error de indicación y la incertidumbre de la medición, y la brecha de conformidad del modelo metrológico propuesto con la norma INTE/ISO 10012 (Apéndice 1).

A partir de lo establecido, se logró desarrollar y validar la documentación requerida para el cierre de brecha con la norma INTE/ISO 10012, el prototipo de cámara acústica y el procedimiento para su caracterización, y el procedimiento de calibración de aplicaciones móviles para la medición de nivel de presión sonora.

Con el análisis técnico y financiero llevado a cabo, se concluyó que la solución plasmada en este proyecto es viable de ser implementada en el Laboratorio de Metrología de Procame,

constatando que este organismo contará con un servicio de calibración de presión sonora de dispositivos móviles con características de precisión y exactitud adecuadas y controlables, y bajo un modelo de gestión metrológica que puede incorporarse en su sistema de gestión.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

## **1.1 Descripción general del proyecto**

La Universidad Nacional de Costa Rica cuenta con el Laboratorio de Metrología del Programa de Estudios en Calidad, Ambiente y Metrología (Procame), el cual es un organismo de evaluación de la conformidad que brinda múltiples servicios, dentro de los cuales se encuentra la calibración de equipos de medición de diferentes magnitudes.

En línea con la innovación a nivel nacional en el campo de metrología, y con el aumento de la gama de servicios del Laboratorio de Metrología de Procame, se llevó este proyecto de investigación con el fin de desarrollar una propuesta de modelo de gestión metrológica para aplicaciones móviles utilizadas en la medición de ruido ambiental u ocupacional, específicamente en la determinación de los niveles de presión sonora.

Para alcanzar este objetivo, fue necesario el desarrollo de una serie de aspectos técnicos que garantizan la calidad de las mediciones de presión sonora de las aplicaciones móviles. Dentro de los principales, se contempla el diagnóstico y elaboración de un prototipo de cámara acústica, la descripción del modelo matemático asociado, la producción de procedimientos de caracterización y calibración, la validación de las instrucciones, y la evaluación de la brecha de conformidad del modelo metrológico con la norma INTE-ISO 10012:2003.

A su vez, se hizo una valoración financiera que permita definir la rentabilidad del servicio, abarcando aspectos asociados a materia prima, costos fijos, ingresos por percibir y análisis de flujo de caja.

Con base en lo anterior, el presente proyecto de investigación se enfoca en una caracterización objetiva y sistemática del modelo de gestión metrológica establecido, de forma tal que el Laboratorio de Metrología de Procame cuente con los suficientes insumos para valorar su integración dentro del sistema de gestión actual, y así proporcione a sus clientes un servicio de calibración de la presión sonora de dispositivos móviles, cuya principal característica sea la confiabilidad en las mediciones resultantes.

## **1.2 Identificación de la institución**

Procame es un programa de la Universidad Nacional dirigido al fomento y desarrollo de una cultura ambiental, salud ocupacional metrológica y de calidad en Costa Rica, en cooperación con otras entidades del mismo sector, brindando servicios confiables a instituciones y a empresas públicas y privadas (Procame, 2016, p. 4).

Se trata de un Laboratorio de Metrología, con amplia experiencia en servicios asociados a la consultoría metrológica, consultoría según normas INTE-ISO 9000:2015 y acreditación de organizaciones o dependencias de acuerdo con los requisitos de INTE-ISO/IEC 17025:2005 e INTE-ISO/IEC 17020:2012, consultoría en INTE-ISO 14000:2004 y consultoría en INTE-ISO 18000:2000, así como capacitación general y específica en metrología, gestión de la calidad, gestión ambiental y salud ocupacional (Procame, 2016, p. 4).

A su vez, Procame (2016) indica que se encuentra en capacidad de realizar diferentes servicios relacionados con el control estadístico de la calidad, costos de la calidad, programas de mejora continua y otros temas que resulten de interés para la organización.

Su sede se ubica en el tercer piso de la Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Campus Omar Dengo, Heredia, Costa Rica.

La decisión de realizar el estudio en el Laboratorio de Metrología de Procame se fundamentó en la capacidad metrológica que de este organismo de evaluación de la conformidad. Además, enfocado en el modelo metrológico para la calibración de la medición de presión sonora de las aplicaciones móviles, el laboratorio mencionado cuenta con componentes importantes para el logro de los objetivos planteados, como lo es el equipo de medición patrón y un sistema de gestión de la calidad basado en la norma INTE-ISO/IEC 17025:2005.

Finalmente, se tomaron en consideración las experiencias que se han tenido en la Universidad Nacional en cursos e investigaciones sobre ruido ambiental, donde las mediciones se realizaron con celulares.

### **1.2.1 Misión y visión**

La misión de Procame se presenta a continuación:

Contribuir al desarrollo dinámico e innovador de la metrología, la salud ocupacional y ambiente en Costa Rica, mediante servicios de alto nivel técnico y confiabilidad, basados en la mejora continua, la satisfacción de las necesidades, expectativas de los clientes, estudiantes y la estrecha colaboración con instituciones y entidades nacionales afines (Procame, 2016, p. 5).

De igual forma, la visión de Procame se cita en el párrafo siguiente:

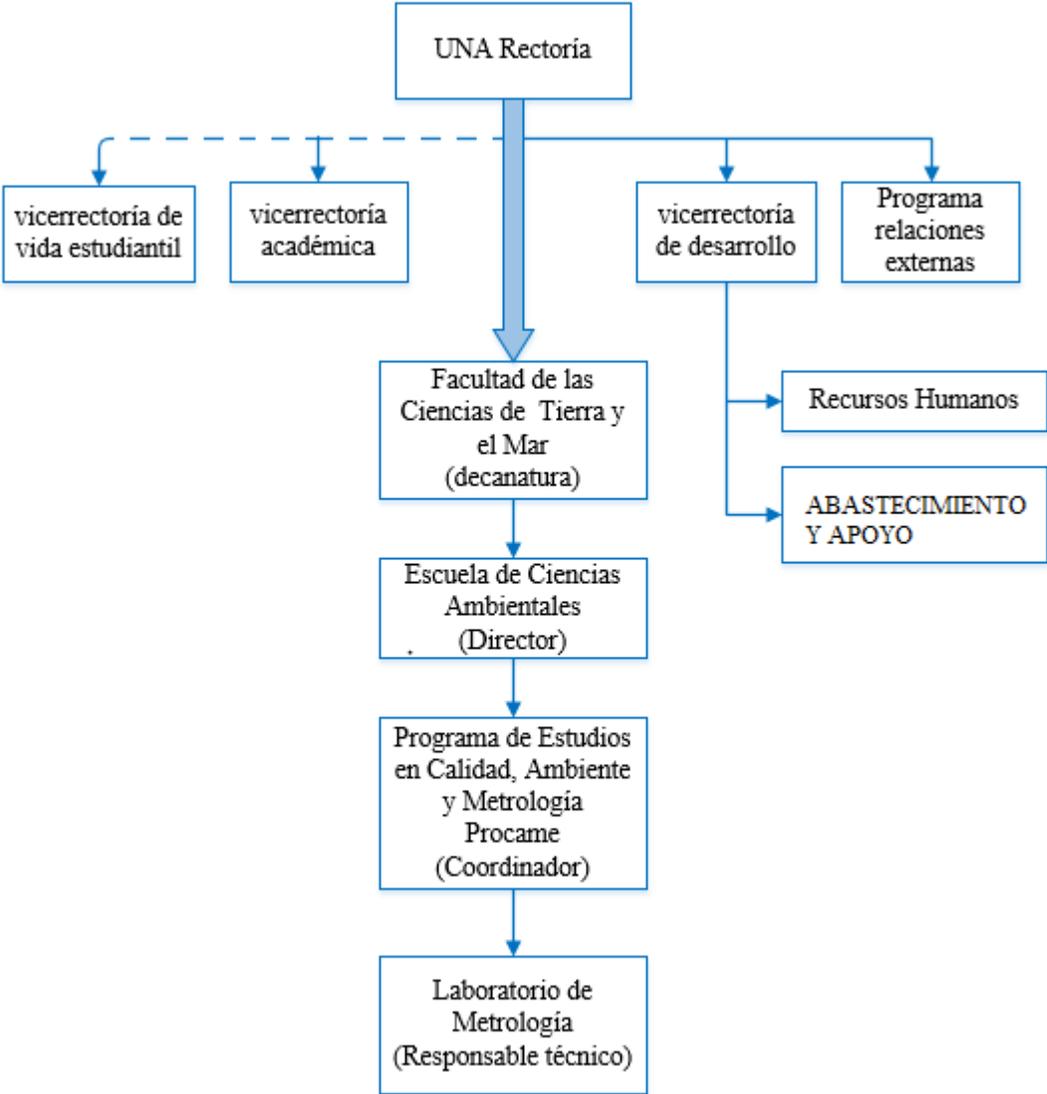
El Programa de Estudios en Calidad, Ambiente y Metrología –Procame– cuenta con un laboratorio de Metrología, Salud Ocupacional y un Programa de Educación Continua consolidado en el mercado nacional que apoya procesos de gestión integrada para el desarrollo sostenible (Procame, 2016, p. 5).

### **1.2.2 Organigrama**

La posición del Laboratorio de Metrología de Procame dentro de la Universidad Nacional se presenta a través de la Figura 1, así como sus relaciones con otros componentes de la organización. Al respecto, señala Procame (2016):

Las relaciones con los niveles superiores al Procame están dadas a través de la normativa institucional, fundamentalmente el Estatuto Orgánico de la UNA, la Convención Colectiva de Trabajo, el Reglamento de Contratación Laboral, el Reglamento para la Contratación Directa de Bienes y Servicios, las Normas para la Regulación de las Contrataciones Administrativas, el Reglamento del Sistema de Archivo Institucional, entre otras que definen las responsabilidades del personal clave de la organización que puede tener relación o influencia sobre las actividades de calibración del laboratorio, con el fin de identificar potenciales conflictos de intereses (p. 9).

El organigrama respectivo se presenta a continuación:



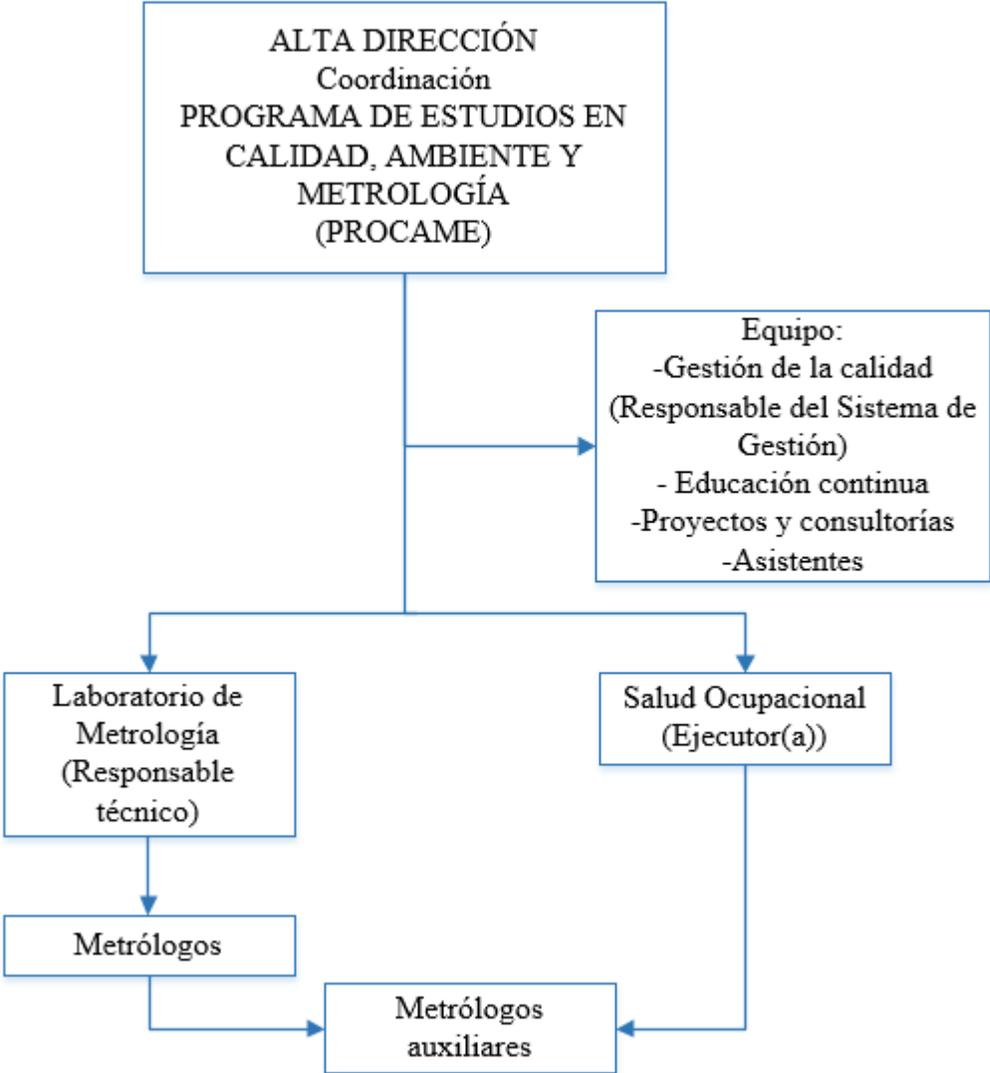
Línea de jerarquías y de comunicación

- > Relación indirecta
- ==> Relación directa
- .-> No relación

**Figura 1:** Ubicación del laboratorio en la organización matriz y sus relaciones

**Fuente:** Procame (2016).

La estructura organizativa y administrativa interna del laboratorio se muestran en la Figura 2 a continuación:



Línea de jerarquías y de comunicación

→ Relación directa

**Figura 2: Estructura interna del laboratorio en la organización matriz y sus relaciones**

**Fuente:** Procame (2016).

### 1.3 Planteamiento del problema

La rápida evolución de las tecnologías informáticas va de la mano con la universalización de su uso. Un caso actual son las aplicaciones móviles: programas informáticos que se instalan en los dispositivos conocidos como *smartphones* o teléfonos inteligentes, los cuales son herramientas que permiten a un usuario realizar diversas tareas (Fomboia, Pascual & Ferreira, 2012).

En la actualidad es posible encontrar aplicaciones diseñadas para la medición de nivel de presión sonora, en buscadores como Google Play y App Store, lo que permite a los usuarios de dispositivos móviles acceder a bajo costo a sistemas de medición para el control de los niveles de ruido en los sitios de trabajo, en sus hogares o en cualquier otro sitio donde se considere que se podría estar expuesto a condiciones adversas para la salud. Esto supone una alternativa a instrumentos como los sonómetros, que son de costo económico alto y no están al alcance de todos los posibles interesados.

Sin embargo, ¿qué nivel de confianza tienen los usuarios de estos servicios para aceptar los resultados que se obtienen de las aplicaciones? Para lograr esta confianza, es necesario asegurarse de que las mediciones que realizan las aplicaciones sean adecuadas según requisitos preestablecidos. Siguiendo esta línea de pensamiento lógico, el mercado requiere de instrumentación adecuada para la correcta calibración de aplicaciones instaladas en dispositivos móviles que puedan medir niveles de ruido, con el fin de brindar resultados certeros y trazables.

La situación actual presenta un panorama en el que no se cuenta con plataformas para la trazabilidad metrológica de dispositivos y aplicaciones móviles utilizadas para la medición de nivel de presión sonora, lo que ocasiona desconfianza en los resultados de estas mediciones y, por lo tanto, poca difusión en su uso.

Es verdad que existen instrumentos para la calibración de sonómetros, los cuales funcionan acoplando el micrófono del sonómetro a un calibrador que posee una cavidad para el acople, y en ella se emite un nivel de presión sonora a una frecuencia específica que sea de interés para la calibración. Sin embargo, tomando en cuenta que los dispositivos móviles no cumplen las características constructivas según lo establecido en la norma INTE/IEC 61672:2015 Sonómetros: Especificaciones, y que estos cuentan con un micrófono que está integrado internamente en sus componentes electrónicos, se imposibilita acoplar este micrófono a la cavidad del calibrador.

La imposibilidad de utilizar los instrumentos de referencia existentes hace necesario el desarrollo de algún dispositivo para calibración que se adapte a las características físicas de los dispositivos móviles y, a partir de estos, desarrollar un método de calibración que permita brindar trazabilidad metrológica

a las mediciones que se realizan con estos dispositivos, y que incorpore los factores de influencia adicionales que podrían afectar los resultados de las mediciones realizadas.

## **1.4 Objetivos de la investigación**

### **1.4.1 Objetivo general**

Proponer un modelo de gestión metrológica para aplicaciones móviles utilizadas en la medición de ruido ambiental u ocupacional, específicamente en la determinación de los niveles de presión sonora, asegurando de esta manera la trazabilidad de los resultados.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- a) Diagnosticar la función de medición requerida para el error de indicación y la incertidumbre en la calibración de los niveles de presión sonora de todas las aplicaciones móviles en la medición de ruido ambiental y ocupacional para el establecimiento de las condiciones de confiabilidad de las aplicaciones.
- b) Crear un sistema de gestión metrológica con base en la norma INTE-ISO 10012:2003 y los criterios asociados a la medición de niveles de presión sonora para su implementación en el laboratorio de Metrología de Procame.
- c) Analizar técnica y financieramente la propuesta, teniendo en cuenta la relación costo-beneficio que implicará la implementación del sistema de control metrológico.

## **1.5 Alcances y limitaciones**

### **1.5.1 Alcance**

El alcance de este proyecto comprende la propuesta de un modelo metrológico para la calibración de la medición de presión sonora de aplicaciones móviles por parte del Laboratorio de Metrología de Procame, contemplando el sistema de gestión de mediciones actual de este organismo con base en la norma INTE-ISO 10012:2003.

### **1.5.2 Limitaciones**

- Las aplicaciones móviles para la medición del sonido no siempre pueden ser instaladas en todos los dispositivos móviles.
- Por sus dimensiones, el prototipo excluye los dispositivos móviles como las tabletas.
- La medición de sonido mediante el uso de aplicaciones móviles presenta lecturas instantáneas, las cuales dificultan la selección de los datos requeridos en el proceso de calibración.
- Únicamente se utilizaron los siguientes dispositivos móviles: Iphone 4, Samsung S7 y Huawei P9, por lo que se desconoce el efecto que tengan diferentes modelos de micrófonos dentro del proceso de calibración.

# CAPÍTULO II

## MARCO TEÓRICO

## **2.1 Sistema de gestión de las mediciones**

Se puede definir un sistema de gestión como una forma de trabajar, que, mediante una organización, garantiza satisfacer las necesidades de un proceso o cliente, bajo una planificación y un esquema de eficiencia y eficacia (Yáñez, 2008). Los sistemas de gestión son una herramienta con la cual se busca el cumplimiento de los objetivos planteados de una manera integral, considerando la normativa aplicable, los equipos e instrumentos adecuados, la instrucción del personal; con un sistema de organización bien planificado.

En el campo de la metrología se requiere un sistema de gestión de las mediciones para minimizar el riesgo de producir resultados incorrectos que puedan afectar el producto final. El organismo que brinda los parámetros para un sistema de gestión en metrología es la Organización Internacional de Estandarización (ISO), en la norma internacional Sistemas de Gestión de las Mediciones - Requisitos para los Procesos de Medición y los Equipos de Medición ISO 10012.

Un sistema de gestión de las mediciones se define como el conjunto de elementos necesarios para la confirmación metrológica y el control de los procesos de medición, soporte, capacitación, asignación de los recursos, auditorías y mejora continua (Vásquez, Muñoz & Suárez, 2006).

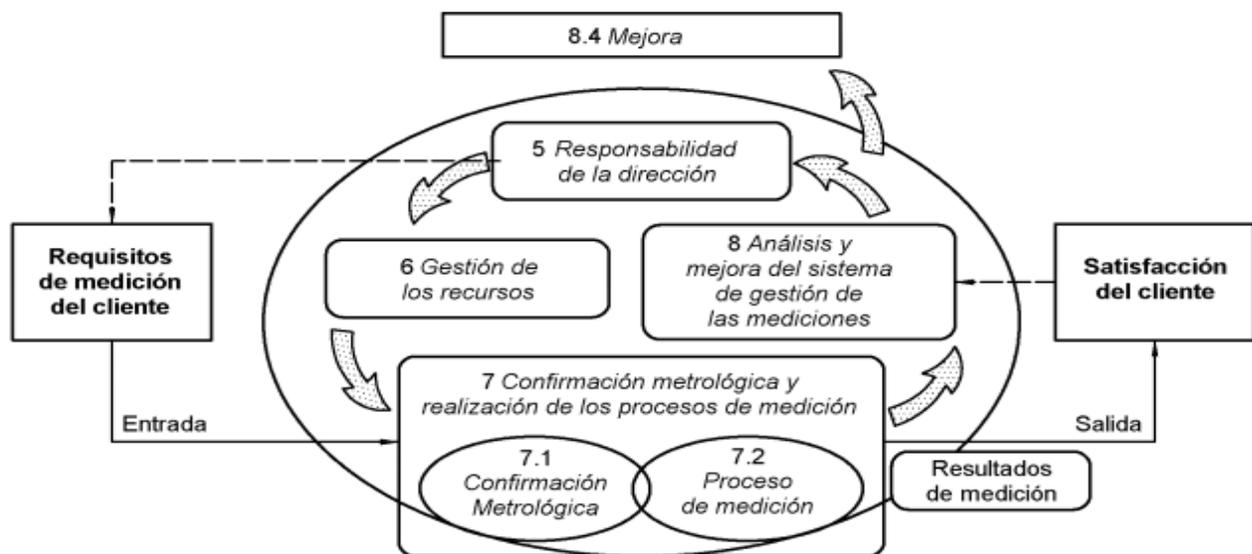
La norma internacional ISO 9000 en uno de sus principios de gestión establece un enfoque basado en procesos. Los procesos de medición deberían considerarse como procesos específicos cuyo objetivo es apoyar la calidad de los productos elaborados por la organización. En la Figura 1 se muestra un modelo de gestión de las mediciones, donde se detallan con claridad los pasos para aplicar el modelo. Un sistema de gestión basado en procesos surge a raíz de la necesidad de las empresas por integrar las actividades de distintas áreas o departamentos en aras de identificar la interrelación de los procesos y de definir las responsabilidades, lo cual permite que en cada proceso se logre la eficacia.

Se entiende como “enfoque basado en procesos” a un conjunto de actividades que se relacionan e interactúan entre sí, y de esta forma logran transformar elementos de entrada en resultados, lo cual hace posible que las organizaciones que siguen esta metodología de trabajo puedan lograr perfeccionar funciones y actividades de sus colaboradores, y de esta forma mejorar en competitividad.

La gestión por procesos es una excelente herramienta para la concreción de las estrategias y el desarrollo de la mejora continua con un enfoque holístico y sistémico de la organización. Por esta razón es importante que las organizaciones consideren implementar este tipo de enfoque desde el

momento en que se plantean sus objetivos estratégicos, puesto que esta gestión debe ser transversal a la organización y no utilizarse únicamente para el mejoramiento de los procesos ya existentes, por lo cual se tiene un enfoque sistémico compuesto por diversos elementos interrelacionados, cada uno claves para la armonía del sistema. Cuando un solo proceso falla, se ve reflejado en todo el sistema.

Uno de los beneficios más importante para las organizaciones es que las conduce hacia la mejora continua, para permitir su adaptación frente a los cambios tanto internos como externos; de igual forma, permite detectar errores o defectos evitando la acumulación de costos innecesarios (Hernández Palma, Martínez Sierra & Cardona Arbeláez, 2015).



**Figura 3: Modelo de sistema de gestión de las mediciones**

**Fuente:** INTE-ISO 10012:2003.

Los puntos destacados como 5, 6, 7 y 8 dentro de la figura 3 equivalen a la numeración de los capítulos dentro de la norma ISO 10012, los cuales son la parte principal del documento. El orden de acción debe ser en siguiente:

- Responsabilidad de la dirección.
- Gestión de los recursos.
- Confirmación metrológica.
- Análisis y mejora del Sistema de Gestión de las Mediciones.

A pesar de que la secuencia de acción está ya definida, para entender qué significa realizar una gestión de las mediciones se debe entender el concepto de confirmación metrológica, dado que este es su principal objetivo.

La confirmación metrológica es el conjunto de operaciones requeridas para asegurarse de que el equipo de medición es conforme a los requisitos correspondientes a su uso previsto (INTE-ISO 10012, 2003). Este aseguramiento mencionado por la norma comprende todos los aspectos necesarios para calibrar los equipos, además, cualquier ajuste o reparación. La confirmación metrológica debe ser un proceso documentado y demostrado, e indicar el alcance para el que se define.

Surge de esta manera la necesidad de tener previamente definidos los requerimientos del proceso. Aspectos como cuál es el error máximo permitido, los límites de las mediciones, la incertidumbre permitida, la resolución requerida por los equipos para cubrir estos aspectos, las condiciones ambientales del sitio donde se realiza la medición, las habilidades del operador, entre otros, deben ser considerados antes de comenzar el proceso de medición. Sin dejar de lado las normativas específicas para el proceso.

Medir un fenómeno físico como el sonido requiere trazabilidad metrológica; este es el resultado de una medida, por lo cual puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y su respectiva documentación (Centro Español de Metrología, 2012). De esta manera, cada resultado de la medición puede ser comparado con un patrón y, así, obtener una incertidumbre de medida.

Adicionalmente a la confirmación metrológica, según ISO 10012, la gestión de mediciones debe abarcar la responsabilidad de la dirección, la gestión de los recursos y la mejora del sistema.

En lo referente al capítulo sobre la responsabilidad de la dirección, define cómo establecer, documentar y mantener el sistema de gestión de las mediciones y mejorar continuamente su eficiencia (INTE-ISO 10012, 2003). La dirección es el órgano que vela por mantener el enfoque del proceso, que se cumplan los requisitos metrológicos y del cliente. Además, es quien define y establece los objetivos del proyecto, revisa y modifica el sistema de gestión de las mediciones y brinda los recursos necesarios para llevar a cabo todo el proceso.

Sobre la gestión de los recursos, la norma menciona que los recursos para la gestión de las mediciones no se refieren únicamente a los equipos requeridos para medir, sino que también incluye el recurso humano y la información. Es función de la dirección asignar las responsabilidades al personal y garantizar su formación para que sea competente en el puesto que desempeña.

La dirección debe validar el procedimiento para que el personal lo siga: si se requiere de software y equipo de seguridad, debe proveerlos. El equipo de medición y el ambiente donde se realicen las mediciones deben documentarse. En caso de que se requiera un ambiente controlado, la dirección deberá encargarse del acondicionamiento del lugar.

Finalmente, en lo referente a las mejoras del sistema de gestión, es fundamental dar seguimiento al proceso, incluir la constante revisión de las técnicas de toma y procesamiento de datos. La documentación debe ser llevada rigurosamente y anotar cualquier anomalía en el proceso. Las auditorías son una herramienta para el seguimiento de la gestión de las mediciones.

La dirección es la encargada de identificar las posibilidades de mejoramiento de sistema de gestión y aplicar acciones correctivas y preventivas cuando se requieran.

Los autores Vásquez, Muñoz y Suárez (2006) comentan los principales problemas que enfrenta el sistema de gestión de las mediciones. Se refieren a que las mayores falencias vienen del factor humano: el desconocimiento por parte del personal y la falta de capacitación generan fallos prevenibles en la medición. Otro punto que considerar es la falta de políticas en materia metrológica por parte de la dirección, así como la no garantía de los mejores equipos para realizar el proceso.

Los equipos que se puedan adquirir y los materiales de los que se dispone son un factor importante que considerar a la hora de definir los objetivos y el alcance de las mediciones.

## **2.2 Dispositivos móviles y aplicaciones**

Pasar del teléfono fijo al celular significó un gran avance en la tecnología, no solo en las telecomunicaciones sino en diversas áreas. Un teléfono celular, más que efectuar llamadas, permite realizar diferentes tareas que, de lo contrario, requerirían equipo especializado. Un valor agregado que le permitió a la telefonía móvil una alta penetración en el mercado y un grado de aceptación alto por parte de los usuarios es el poder ofrecer servicios alternos a los canales de voz (Gasca, Camargo & Medina, 2014). El acceso a un dispositivo móvil es cada vez más fácil; no solo celulares, también tabletas y computadoras personales. En cambio, un sonómetro es un dispositivo especializado y en algunos casos, por su costo, es de difícil acceso.

Las tareas que el dispositivo móvil realiza se llevan a cabo con aplicaciones móviles. Enríquez y Casas (2013) comentan lo siguiente:

Las aplicaciones móviles son aquellas que fueron desarrolladas para ejecutarse en dispositivos móviles. El término “móvil” se refiere a poder acceder a los datos, las aplicaciones y los

dispositivos desde cualquier lugar. Para desarrollar software de este tipo se debe tener en cuenta ciertas restricciones que tiene el hardware de estos dispositivos, como por ejemplo que son de dimensiones reducidas, tienen bajo poder de cómputo, escasa capacidad de almacenamiento, ancho de banda limitado, etc.

El rendimiento de la aplicación va íntimamente ligado con las características del dispositivo móvil. Delia, Galdámez, Thomas y Pesado (2013) comentan lo siguiente: “Estos dispositivos tienen características físicas distintivas, entre las cuales se destacan su tamaño, peso, tamaño de pantalla, su mecanismo de ingreso de datos y su capacidad de expansión. Además, los aspectos técnicos, incluyendo el poder de procesamiento, espacio de memoria, autonomía de batería, sistema operativo, entre otros, tienen un rol esencial”.

Para el caso de la medición de ruido, la construcción del micrófono y sus características son los principales factores que afectan el resultado de la medición. La misma aplicación instalada en teléfonos diferentes arroja diferentes resultados según la calidad del micrófono. También hay que considerar que las condiciones ambientales afectan de manera diferente a un dispositivo y a otro.

Las variaciones de temperatura en el sonómetro originan cambios en la sensibilidad del micrófono, lo que se traduce en variaciones en su indicación (Mondaray, Alfonso, Yebra & Lorenzo, 2005). Se debe controlar la temperatura dentro de la cámara y, de ser posible, llevarla al rango establecido por la norma o por las especificaciones del fabricante para la calibración.

Se debe considerar si las aplicaciones y dispositivos son afectados en gran medida por los cambios en las condiciones ambientales, y si es ese el caso, definir la corrección necesaria por temperatura y humedad.

Existen tres tipos de aplicaciones: las aplicaciones web, diseñadas para ser ejecutadas en un navegador y requieren el acceso a internet; las aplicaciones nativas, diseñadas para una plataforma específica y pueden interactuar con otras funciones del equipo, por lo que para ellas no es indispensable el uso de internet; y las aplicaciones híbridas, que combinan los dos tipos anteriores (Delia, Galdámez, Thomas & Pesado, 2013).

Tener en cuenta el tipo de aplicación que mide el nivel de ruido ayuda a definir de mejor manera el sistema de gestión de las mediciones. Una aplicación que requiera el uso de internet, por ejemplo, añade una variable extra al depender de la velocidad de la conexión. También sucede que, como un teléfono u otro dispositivo no se dedica exclusivamente a la medición de sonido, puede ejecutar otras aplicaciones en segundo plano que afecten al rendimiento del equipo.

Las aplicaciones están disponibles para todo el público, ya sea que el usuario sea entendido en la materia o no. Según San Mauro, González y Collado (2014), uno de los aspectos a comentar es que, incluso a pesar de la variabilidad y fiabilidad de los contenidos, la utilización que se les dé por parte del usuario puede ser nefasta, teniendo en cuenta que no tiene por qué conocer el significado de cierta terminología o textos introducidos de libros o estudios científicos. Entonces, por más que las aplicaciones para medir ruido son similares entre ellas, las posibles diferencias de software pueden entorpecer e inducir al error al personal encargado de la calibración, provocando fallos y sesgos en el resultado final.

### **2.3 Medición de ruido ambiental y ocupacional**

La Organización Mundial de la Salud (OMS) en sus *Guías para el ruido urbano* hace mención sobre la problemática ambiental que se presenta en el mundo entero con relación al ruido que se genera por las diferentes actividades del ser humano, ya sea de esparcimiento, trabajo u otros.

Según datos de la OMS, más de 43 millones de personas entre 12 y 35 años padecen una pérdida auditiva discapacitante debido a diferentes causas (OMS, 2015). Pero no solo la pérdida de la capacidad auditiva es un efecto del ruido ambiental y ocupacional, sino que el riesgo de accidentes laborales, el estrés y problemas que afectan a las mujeres embarazadas se incrementan cuando hay una alza en el ruido (OSHA, 2005).

En datos aportados por la Organización de Salud y Medio Ambiente de Andalucía (OSMAN), el 80% del ruido en ambientes urbanos se debe al tráfico, otro 10% a la industria y el restante 10% a otras fuentes (OSMAN, 2018). Para realizar una medición de ruido, se debe tener claro cuál es la fuente del sonido que se quiere medir. Cuando los equipos de una organización, por ejemplo, generadores, sistemas de aire acondicionado, compresores, equipos de audio, entre otros— están apagados, lo que se mide es el ruido de fondo o ambiental. El sonido producido por los equipos es ruido ocupacional. La medición de este último requiere que el ruido de fondo esté en valores más bajos de lo habitual; esto conlleva a que la hora de la toma de datos sea un factor que considerar. Tener claro cuál es la fuente con mayor contribución de ruido es un paso fundamental para la elaboración de un programa de mitigación de ruido.

El autor Nāf (2013) brinda una guía para el análisis y gestión del ruido industrial donde define un sistema de cinco etapas:

-Análisis de las condiciones de trabajo.

-Selección de la estrategia de medición.

-Plan de mediciones.

-Tratamiento de la incertidumbre.

-Informe de la medición.

No obstante, esto es solo una guía, y debe ser modificada acorde con la legislación existente en cada región.

Según la OSMAN (2018), una persona expuesta a más de 55 dB comienza a notar efectos adversos en la salud. El tiempo de exposición a valores superiores de sonido está limitado por la legislación de cada país. A partir de los 55 dB se vuelve obligatorio el uso de protección auditiva.

Por otro lado, no se ha establecido un límite para el control del ruido ambiental si se compara con la mayoría de fuentes de contaminación que existen y que son de efectos fácilmente identificables para la población.

De igual forma, la OMS en sus *Guías para el ruido urbano* considera que los efectos del ruido y sus consecuencias de largo plazo sobre la salud se están generalizando, por lo cual es esencial tomar acciones para limitar y controlar la exposición al ruido ambiental. Esas acciones deben estar respaldadas por una adecuada evaluación científica de los datos disponibles sobre los efectos del ruido, en particular la relación dosis-respuesta. Esa relación constituye la base del proceso de evaluación y gestión de riesgos.

Muchos países legislan sobre el ruido urbano del tránsito de aviones y autos, maquinaria de construcción y plantas industriales a través de normas de emisión y reglamentos para las propiedades acústicas de los edificios. Pero pocos países tienen reglamentos para el ruido urbano del vecindario, probablemente debido a la falta de métodos para definirlo y medirlo y la dificultad de controlarlo.

Es imperioso ejercer un control sobre el tema del ruido, y una de las formas más adecuadas para determinar sus consecuencias a la población es su adecuada medición. Costa Rica cuenta con leyes y reglamentos que regulan actividades referentes al tema.

### **2.3.1 Normativa en Costa Rica referente a la medición de ruido**

El Reglamento para el Control y la Contaminación por Ruido N° 39428 (2016), cuyo objetivo es la protección de la salud de las personas y la protección del ambiente contra el ruido, define “ruido” como sonido indeseable o perturbante que afecte psicológica o físicamente al ser humano.

Adicionalmente el reglamento N°39428 establece como ente regulador e inspector de las mediciones de ruido al Ministerio de Salud, así como el único encargado de realizar las mediciones legales en materia de sonido. Se concluye que las mediciones que cualquier otro ente realice, aunque fueran con equipo especializado, no tendrán validez legal; sin embargo, no se descarta su posibilidad de usarse como sistema de control interno.

El decreto 28718-S Reglamento para el Control y la Contaminación por Ruido (2000) menciona que el instrumento oficial para la medición de ruido es el sonómetro; no hace mención alguna sobre aplicaciones móviles para el control de ruido, pero establece lo siguiente:

“Artículo 17. - **Equipo:** Todo equipo para el control de la contaminación por ruidos deberá reunir los requisitos establecidos por la norma de la American National Standards Institute (ANSI), "Specification for Sound Level Meters", SI-4-1971, o su última revisión”.

ANSI S1.4 (1971) establece las frecuencias de calibración y da las tolerancias de los instrumentos. Sin embargo, esta norma es para sonómetros y los dispositivos móviles como teléfonos celulares o tabletas podría no tener los requerimientos de hardware o software para una medición fiable de sonido.

Adicionalmente el decreto 32692-S Procedimientos para la Medición de Ruido indica que el equipo medidor debe contar con su certificado de calibración vigente y, además, tener el manual de usuario. El informe de calibración es parte fundamental del informe técnico que debe presentarse ante la autoridad correspondiente a la hora de reportar una medición de ruido. Dicho decreto también indica los procedimientos para el cálculo de nivel de presión sonora y los apartados que debe contener un informe técnico legal.

CAPÍTULO III  
MARCO METODOLÓGICO

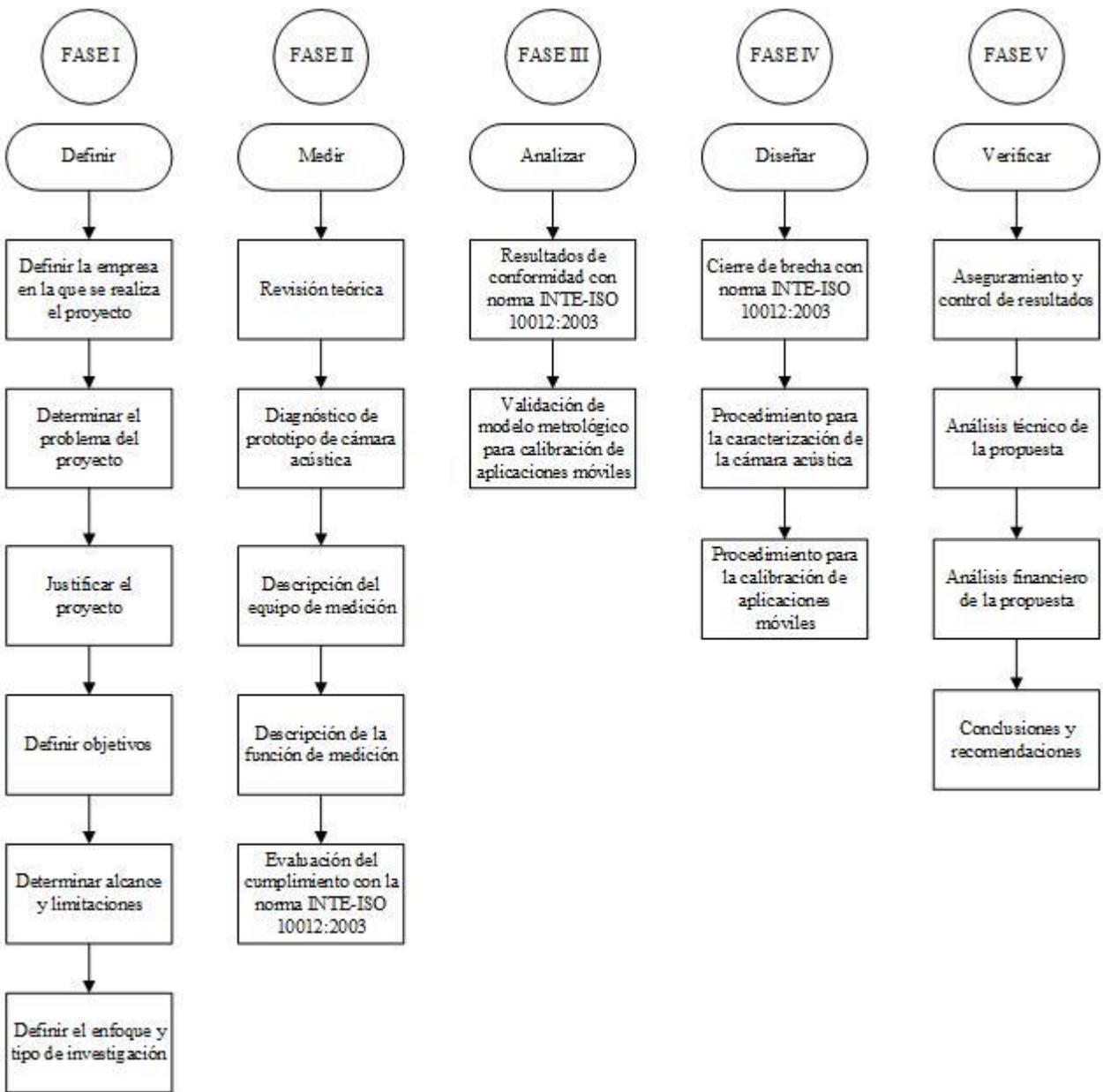
Este proyecto se basó en dos métodos de investigación: el deductivo y el sintético. Con el método deductivo se parte del conocimiento de fenómenos generales para aplicar a casos particulares. Para este trabajo se tiene la información referente a metrología en acústica, la cual se adaptó a la medición de sonido con dispositivos móviles. Señala Bernal (2010) que el método deductivo implica tomar conclusiones generales sobre un objeto de estudio para obtener explicaciones particulares, iniciando con análisis de postulados, teoremas, leyes, etcétera, de comprobada validez para aplicarlos a soluciones o hechos particulares.

Con el método sintético, el cual “integra los componentes dispersos de un objeto de estudio para estudiarlos en su totalidad” (Bernal, 2010, p. 60), se utiliza la información recolectada para crear una unidad. En el caso de este proyecto, se utilizó dicho método para comprender la relación de las partes de un sistema de gestión de las mediciones y establecer la relación de todas las partes como una unidad, al igual que el análisis costo-beneficio.

En lo referente al tipo de investigación, el trabajo se trató tanto de una investigación exploratoria como experimental. Se refiere a investigación exploratoria porque se innova en el tema de metrología en aplicaciones móviles. Además, es investigación experimental ya que se requiere realizar diferentes tipos de pruebas para cumplir con los objetivos.

El enfoque que se utilizó fue el cuantitativo y descriptivo, necesario para realizar una caracterización de los modelos matemáticos para la medición de nivel de presión sonora, de la conformidad del sistema de gestión de las mediciones con base en la norma INTE-ISO 10012:2003, y del conjunto de requerimientos técnicos y financieros asociados a la propuesta.

Con el preámbulo anterior, se procede a detallar en los siguientes apartados los aspectos específicos que definen la metodología empleada para la investigación. Para ello, se establecieron cinco fases del proceso, y en busca de una mejor comprensión fueron plasmadas en la figura que se muestra a continuación:



**Figura 4: Estructura de la metodología empleada para el desarrollo de la investigación**

**Fuente:** Elaboración propia.

### **3.1 Metodología para la definición del problema del proyecto**

Este apartado comprende la primera fase mostrada en la figura 4, mediante la cual se busca definir los aspectos que fueron vinculantes en el establecimiento del problema, como lo son la empresa en que se realizó el proyecto, el problema, la justificación, los objetivos, los alcances y las limitaciones. Estos elementos se describieron ampliamente en el capítulo I de esta investigación.

El enfoque y tipo de investigación empleados se definen en los apartados que se presentan a continuación.

#### **3.1.1 Enfoque y tipo de investigación**

La descomposición de la naturaleza del estudio permitió definir el enfoque y tipo de investigación del proyecto. Señalan Chinchilla, Guerra y Corrales (2017) que “un enfoque cuantitativo recaba, sobre todo, datos, cifras, cantidades, valores numéricos que respalden la prueba de hipótesis” (p. 27). Debido a que el proyecto buscó en todo momento caracterizar de forma numérica el modelo de gestión metrológica para aplicaciones móviles empleado en la medición de ruido ambiental y ocupacional, se constató que el estudio presenta un enfoque cuantitativo y descriptivo.

En cuanto al tipo de investigación, Hernández, Fernández y Baptista (2014) explican el propósito de los estudios de carácter descriptivo: “Con frecuencia, la meta del investigador consiste en describir fenómenos, situaciones, contextos y sucesos; esto es, detallar cómo son y se manifiestan. Con los estudios descriptivos se busca especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis” (p. 92).

Con base en lo desarrollado anteriormente, el tipo de investigación al que se ajusta este proyecto corresponde al descriptivo, pues abarcó la descripción del modelo de gestión metrológica para aplicaciones móviles empleado en este proyecto, como propuesta para su implementación como servicio de calibración del Laboratorio de Metrología de Procame.

### **3.2 Metodología para la medición y respaldo cualitativo del proyecto**

Este apartado comprende la segunda fase mostrada en la figura 4, mediante la cual se establece la forma de medir el problema y presentar su caracterización. Se presenta en los puntos que se muestran a continuación.

### **3.2.1 Revisión teórica**

La revisión teórica que se realizó para esta investigación abarca el capítulo II del proyecto, el cual corresponde al marco teórico. De acuerdo con Hernández et al. (2014), un marco teórico consiste en el desarrollo de la perspectiva teórica, lo cual es un producto o proceso que “implica exponer y analizar las teorías, las conceptualizaciones, las investigaciones previas y los antecedentes en general que se consideren válidos para encuadrar el estudio” (p. 60). Este es de gran utilidad para el proceso de investigación, ya que permite ahondar en el conocimiento existente y disponible vinculado con el planteamiento del problema (Hernández et al., 2014, p. 60), lo cual conlleva disponer de bases suficientes para tratar el problema en sí.

A su vez, el proceso de revisión teórica comprendió la diseminación de aspectos fundamentales de sistemas de gestión de las mediciones y la metrología en variables de acústica, requeridos para el análisis de los resultados. Para ello, se utilizaron normas que establecen las especificaciones para sonómetros (INTE/IEC 61672:2015), para especificaciones de micrófonos (INTE/IEC 61094:2017) y la medición de ruido (ISO 1996-2:2017). Estas normas se revisaron con el fin de establecer los parámetros a tener en cuenta para el diseño del procedimiento de calibración y la cámara acústica, además de los parámetros necesarios de controlar durante los procesos de medición.

También se revisaron manuales de calibradores acústicos con el fin de establecer los elementos necesarios para el diseño de los circuitos eléctricos de la cámara acústica, y por último, pero no menos importante, procedimientos internacionales para la calibración de sonómetros y normas de estimación de incertidumbre (INTE/ISO/IEC 98-3: 2017), con el fin de desarrollar el procedimiento de calibración.

### **3.2.2 Diagnóstico de prototipo de cámara acústica**

Como ya se ha expuesto en este proyecto, actualmente los equipos utilizados para calibrar instrumentos de medición de presión sonora no se adaptan geoméricamente a los dispositivos móviles. Para resolver este problema, se diagnosticaron los requerimientos para construir una cámara acústica que sea el medio de comparación de los patrones y el instrumento bajo calibración, y que también permita generar señales acústicas específicas.

El proceso de diagnóstico del prototipo de cámara acústica se desarrolló en dos etapas: la primera consistió en la especificación de las características metrológicas del equipo, las cuales corresponden a propiedades identificables que pueden influir en los resultados de la medición (INTE-ISO 10012:2003). Para tal efecto, se abarcó la descripción de las propiedades técnicas del prototipo de cámara acústica que permitieran alcanzar un nivel de aislamiento óptimo. La segunda etapa consistió

en la comprobación de la eficacia del prototipo de cámara acústica en alcanzar el nivel de aislamiento requerido.

Estas etapas se describen en los apartados que se muestran a continuación:

### **3.2.2.1 Especificación de características metrológicas del prototipo de cámara acústica**

Esta caracterización se llevó a través de las siguientes actividades:

- a) Revisión bibliográfica de normas, manuales, fichas técnicas y reglamentos u otra documentación pertinente para el diseño.
- b) Desarrollo de una tabla comparativa para el análisis y selección de los materiales requeridos para la construcción de la cámara acústica.
- c) Desarrollo de una tabla comparativa para análisis de figuras volumétricas más aptas para el diseño de la cámara acústica.
- d) Análisis de dimensiones de la cámara, con base en el tamaño de los elementos que deben incorporarse dentro del equipo para llevar a cabo el proceso de calibración, tales como un sonómetro o dosímetro, celulares inteligentes, entre otros equipos que permitan la instalación de aplicaciones móviles de sonido.
- e) Diseño del prototipo de cámara acústica empleando el programa de dibujo en 3D SolidWorks.
- f) Selección de componentes para el control electrónico de la cámara acústica, con base en los siguientes aspectos:
  - **Altavoz:** Mediante un equipo generador de frecuencias, se realizaron pruebas al altavoz con el fin de determinar su capacidad para reproducir las frecuencias previamente seleccionadas; como complemento se utilizó un osciloscopio, el cual es un equipo especial para poder visualizar la respuesta de salida del altavoz.
  - **Generador de frecuencias:** Para este punto se buscó un generador de frecuencias que fuera estable a la hora de producir estas ondas. Además, se consideraron aspectos como accesibilidad en precio y facilidad de uso a la hora de realizar la etapa de implementación.
- g) Especificación del nivel de aislamiento interno de la cámara acústica, fundamentado a partir de la norma ISO 1996-2:2009 (p. 17), la cual señala que, de no existir diferencias menores a 10 dB entre el nivel de nivel de presión sonora interno y externo de la cámara acústica, no es necesario realizar correcciones por influencia del ruido externo.

### 3.2.2.2 Comprobación de características metrológicas del prototipo de cámara acústica

Para comprobar el cumplimiento de la cámara acústica con esta especificación, se siguió la recomendación establecida por Sánchez (2010) para el diseño de confinamiento acústico, cuyo procedimiento se sintetiza a continuación:

- a) Con el fin de identificar el nivel necesario de confinamiento para la cámara acústica, se inició caracterizando el nivel de presión sonora del local de calibración. Esto se realizó midiendo con un sonómetro el nivel de presión sonora del local y registrando 15 mediciones con 15 s de separación entre una y otra. Este proceso se repitió 4 veces durante un día y se utilizó el nivel medido más alto.
- b) Identificación de materiales requeridos para crear confinamiento de la fuente sonora mediante cámara acústica.
- c) Determinación del área interna de la cámara acústica.
- d) Identificación de coeficientes de absorción para los materiales. Descripción de lo que es el coeficiente de absorción.
- e) Cálculo de coeficiente de confinamiento medio, el cual se obtuvo aplicando la siguiente fórmula:

$$CCM = \frac{S \cdot \alpha}{S}$$

#### **Ecuación 1: Cálculo del coeficiente de confinamiento medio**

**Fuente:** Sánchez (2010).

Donde:

CCM: coeficiente de confinamiento medio.

S: área cubierta por el material de confinamiento (m<sup>2</sup>).

$\alpha$ : coeficiente medio de absorción.

- f) Cálculo de la capacidad de reducción del sonido bajo las condiciones de la cámara acústica, a través de la siguiente fórmula:

$$R = \frac{\alpha * S}{1 - \alpha}$$

**Ecuación 2: Cálculo de la capacidad de reducción del sonido**

**Fuente:** Sánchez (2010).

Donde:

R: capacidad de reducción del sonido.

S: área cubierta por el material de confinamiento (m<sup>2</sup>).

$\alpha$ : coeficiente medio de absorción.

- g) Selección del factor de directividad (Q) entre los valores 1 a 4. Según Procame (s.f.) y Sánchez (2010), se asigna un factor de directividad con valor 1 cuando se presenta una radiación sonora omnidireccional o que puede venir de cualquier dirección o punto del confinamiento, sin superficie reflectante, lo cual aplica para la cámara acústica diagnosticada.
- h) Identificación de la distancia máxima entre fuentes de sonido más cercanas.
- i) Cálculo del nivel de potencia sonora interno de la cámara, mediante la siguiente expresión matemática:

$$Lw = Lp - 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

**Ecuación 3: Cálculo del nivel de potencia sonora interno de la cámara**

**Fuente:** Sánchez (2010).

Donde:

Lw: nivel de potencia sonora final (dB).

$L_p$ : nivel de presión sonora en el recinto (dB).

$Q$ : factor de directividad, igual a 1 considerando que el sonido puede provenir de cualquier dirección.

$r$ : distancia a la fuente de ruido en metros. Se considera que 2 m es la distancia de la fuente de sonido más cercana de las mesas de trabajo del laboratorio (m).

$R$ : capacidad de reducción del sonido.

- j) Comparación entre el nivel de potencia sonora externo e interno a la cámara acústica, con el fin de comprobar que no existe afectación del ambiente en las condiciones de la cámara.

### **3.2.3 Descripción del equipo de medición**

Para seleccionar el equipo de medición patrón para ejecutar la calibración, se consideraron aspectos como su relación de exactitud con la incertidumbre esperada en la calibración de aplicaciones móviles que miden el nivel de presión sonora y sus características físicas.

La relación de exactitud de la prueba se definió en 1:4 de la incertidumbre expandida del instrumento patrón y de la incertidumbre esperada en el proceso de calibración de aplicaciones móviles. Esto se definió fundamentado en los requerimientos de procedimientos de calibración recomendados por NCSL (2007).

También se analizó su historial de calibración con el fin de constatar que el instrumento patrón es capaz de mantener sus características metrológicas en el tiempo, además de calcular la mayor deriva que tuvo el instrumento para cuantificarla en la medición. Con ello, se generó una tabla y un gráfico en donde se establecen los resultados de la calibración con su incertidumbre expandida, y un modelo estadístico para verificar que no han existido cambios estadísticamente significativos en el tiempo.

### **3.2.4 Descripción de la función medición**

De acuerdo con el VIM (2012), la función de medición consiste en una “función de magnitudes cuyo valor es un valor medido de la magnitud de salida en el modelo de medición, cuando se calcula mediante los valores conocidos de las magnitudes de entrada en el modelo de medición” (p. 41).

El mesurando que se pretende cuantificar es el error de medida, y este, por definición, se obtiene por la diferencia entre el valor medido de la magnitud y el valor de referencia (VIM, 2012, p. 32).

Para evaluar el error de medida del instrumento bajo calibración se utilizó la siguiente fórmula:

$$E_i = I_{cal} - I_{pat}$$

#### **Ecuación 4: Cálculo del error de indicación del instrumento bajo calibración**

**Fuente:** VIM (2012).

Donde:

$E_i$ = error en la indicación del instrumento bajo calibración.

$I_{cal}$ = indicación corregida del instrumento bajo calibración.

$I_{pat}$ = indicación del patrón.

Basado en la función de medición, se desarrolló un método para calibrar que permite el cálculo del error de indicación y la incertidumbre de medida del nivel de presión sonora para los dispositivos móviles.

Para evaluar la función de medición, tanto el error como la incertidumbre, se siguió lo establecido en *Guía para la expresión de la incertidumbre de medida* (GUM), elaborada por el Centro Español de Metrología (2008), la cual establece los lineamientos para la evaluación de la incertidumbre por medio de la Ley de Propagación de la Incertidumbre.

Con la función de medición más elemental, fue necesario determinar las magnitudes de influencia en la indicación tanto del patrón como del instrumento sometido a calibración, y de qué manera influyen en la indicación, por ejemplo: por medio de la identificación de factores de corrección por magnitudes de influencia. La identificación de magnitudes de influencia y de sus posibles factores de corrección se realizó por medio de revisión bibliográfica, y con entrevistas a expertos en medición de la magnitud acústica. Cuando se identificaron estos factores, se completó el modelo matemático con las magnitudes y con dichos factores.

Una vez definida la función de medición para la calibración de nivel de presión sonora, se identificaron los factores que ocasionan incertidumbre en la medición; esto se realizó para cada factor de la medición. Para asegurar una identificación adecuada se realizó un diagrama de Ishikawa, donde se ramifican todos los factores identificados en el modelo matemático y sus aportes a la incertidumbre.

Para realizar el diagrama de Ishikawa, se siguió este proceso:

- A partir del error de medición se dibujan 2 líneas, de las que una corresponde a la indicación del calibrando y otra a la indicación del patrón.
- A partir de cada rama, partieron nuevas ramas que son los factores que influyen en la medición para cada factor.
- En estas ramas de influencia se ramificaron los factores de incertidumbre que van a intervenir en la medición.
- Este proceso se realizó hasta que se consideró que se identificaron todos los factores.
- Los aportes identificados de incertidumbre son los puntos finales de las ramas, los cuales no se ramifican en otros factores.

Una vez identificados todos los factores que afectan en la incertidumbre, se asignaron la incertidumbre tipo A e incertidumbre tipo B. Para asignar el tipo de incertidumbre se siguió el criterio de que el A es debido a evaluaciones estadísticas (cuando hay repetición de mediciones), y el B es debido a información disponible previamente por otro tipo de fuentes de información como certificados de calibración, especificaciones de los equipos, referencias bibliográficas, entre otros.

Además, fue necesario asignarle una distribución de probabilidad a cada factor. Para asignar la distribución de probabilidad fue necesario evaluar el posible comportamiento del aporte de incertidumbre de cada factor; además se consultó con expertos y personas con experiencia en la evaluación de incertidumbre de la medición. Cada factor fue clasificado básicamente en distribución: rectangular, triangular o normal.

A partir de la identificación y asignación de distribuciones de probabilidad a los factores de incertidumbre, se asignaron divisores para la reducción de los factores. Esto se realizó de la siguiente manera:

La tabla 1 muestra los criterios de estimación de la varianza para las distintas fuentes de incertidumbre, donde se describe, de acuerdo al tipo de incertidumbre y de la distribución de probabilidad, cómo se estima la varianza.

**Tabla 1. Fórmulas generales para el cálculo de incertidumbre típica según la distribución de probabilidad y el tipo de incertidumbre**

Tipo de incertidumbre	Distribución	Divisor	Estimación de la varianza
Tipo A	Normal	$\sqrt{n}$	$\frac{s}{\sqrt{n}}$
Tipo B	Normal	$k$	$\frac{a}{k}$
Tipo B	Rectangular	$\sqrt{12}$ ó $\sqrt{3}$	$\frac{d}{\sqrt{12}}$ ó $\frac{a}{\sqrt{3}}$
Tipo B	Triangular	$\sqrt{6}$	$\frac{a}{\sqrt{6}}$

**Fuente:** Elaboración propia a partir de INTE/ISO/IEC Guía 98-3:2017.

Donde:

$n$ : número de repeticiones.

$s$ : dispersión de las mediciones.

$k$ : factor de cobertura.

$a$  y  $d$ : valor de la magnitud.

Aplicando la ley de propagación de la incertidumbre, se combinaron todos los aportes de incertidumbre para obtener la incertidumbre típica combinada. Es importante considerar dentro del modelo los posibles coeficientes de sensibilidad para cada aporte, en caso de que existan magnitudes de influencia que no son de interés, pero que influyen en la medición (por ejemplo: posibles afectaciones de las condiciones ambientales que no están en unidades de nivel de presión sonora, pero tienen afectaciones en el resultado de medida). Para este proceso se utilizó la expresión matemática recomendada en la norma INTE/ISO/IEC Guía 98-3:2017 *Guía para la expresión de la incertidumbre de medida*, la cual es la siguiente:

$$u(E_i) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (u(x_i))^2}$$

#### **Ecuación 5: Cálculo de incertidumbre combinada**

**Fuente:** INTE/ISO/IEC Guía 98-3:2017.

Se asume que el resultado de expresión anterior tiene un comportamiento normal, por lo que se procedió a multiplicarlo por un factor de cobertura  $k = 2$ , para obtener una probabilidad de cobertura de aproximadamente 95,45 %. El resultado de este proceso es la incertidumbre expandida de medida.

$$U(E_i) = u(E_i) * k$$

### **Ecuación 6: Cálculo de incertidumbre expandida**

**Fuente:** INTE/ISO/IEC Guía 98-3:2017 *Guía para la expresión de la incertidumbre de medida.*

### **3.2.5 Evaluación del cumplimiento con la norma INTE-ISO 10012:2003**

Con base en lo establecido en los requisitos de la norma INTE-ISO 10012:2003, se procedió a realizar una síntesis de cada apartado de la norma, mencionando su idea principal y diferentes propósitos.

Con ello, se realizó una lista de chequeo para determinar cuál es la brecha de conformidad del modelo metrológico desarrollado para la calibración de la presión sonora de aplicaciones móviles. Es importante mencionar que hay requisitos que son obligatorios, los cuales se identifican debido a que expresan el verbo “debe” (en presente), mientras que otros consisten en recomendaciones, las cuales se identifican con “debería” (en condicional).

A partir de esta lista de chequeo se realizó una revisión de todos los requisitos identificados y se determinó cuales sí son aplicables al SGC del laboratorio. En la lista de chequeo se incluyó información como apartado de la norma, síntesis del requisito, estado de conformidad y observaciones. Cuando se cumplió un requisito, se identificó con el número 1 y cuando no hubo cumplimiento, se marcó con el número 0.

A partir de esta lista de chequeo, se determinaron los requisitos aplicables para el sistema de gestión de las mediciones del proceso de calibración de dispositivos móviles para medir el nivel de presión sonora en el Laboratorio de Metrología de Procame. A partir de estos requisitos se realizó una evaluación del sistema de gestión de las mediciones, con las siguientes actividades:

- **Investigación preliminar:** Esta investigación permitió conocer los criterios aplicables al Laboratorio de Metrología de Procame, y el proceso de calibración específico. También permitió conformar otros criterios de auditoría sobre la gestión de las mediciones.

- **Revisión de la documentación:** Permitió evaluar el grado de conformidad de la documentación de la organización referente al sistema de gestión de las mediciones con respecto a la norma INTE/ISO 10012:2003, además de conocer los requisitos del propio sistema que se deben cumplirse en la evaluación. Con los resultados, se conformaron todos los criterios de evaluación.
- **Recolección de evidencia:** Se reunieron pruebas mediante entrevistas, examinación de documentos, listas de chequeo y observación actividades dentro del laboratorio, con el fin de establecer la brecha de conformidad.

### 3.3 Metodología para el análisis de resultados del proyecto

Este apartado comprende la tercera fase mostrada en la figura 4, y abarca los aspectos relativos a la forma o metodología en que se realizó el análisis de la propuesta de modelo metrológico para el Laboratorio de Metrología de Procame. Se establecen en los apartados que se presentan a continuación.

#### 3.3.1 Resultados de la conformidad con la norma INTE-ISO 10012:2003

La propuesta de mejora, basada en el análisis de la brecha de conformidad con la norma, se determinó a partir de la siguiente metodología:

- **Hallazgos de la evaluación:** A partir de la evaluación de la evidencia con respecto a los criterios de evaluación se determinaron los aspectos en los cuales el sistema de gestión de las mediciones no es conforme con los criterios evaluación.
- **Análisis de los hallazgos de la evaluación:** Para obtener el valor de cumplimiento global de los requisitos, se aplicó la sumatoria de los puntos obtenidos y se dividió entre el número de requisitos de cada apartado; multiplicando por cien para así obtener el porcentaje de cumplimiento de los requisitos de cada apartado de la norma:

$$\frac{\text{Puntos obtenidos}}{\text{Total de requisitos}} * 100$$

**Ecuación 7: Cálculo del valor de cumplimiento global de los requisitos de la norma INTE/ISO 10012:2003**

**Fuente:** Elaboración propia.

- **Presentación de los hallazgos de la evaluación:** Los datos obtenidos se organizaron y presentaron a través de una tabla y un gráfico estadísticos, de forma tal que fuera posible establecer con claridad la brecha de conformidad del modelo metrológico propuesto con la norma INTE-ISO 10012:2003.

### **3.3.2 Validación de modelo metrológico para la calibración de aplicaciones móviles**

Para la validación se consideraron algunos criterios expuestos de la Guía ECA-MC-PO01-G01 *Guía para la validación de métodos del Ente Costarricense de Acreditación*, la cual establece algunos criterios de validación de métodos de medición y mediante la cual se consideró que los parámetros mínimos para la validación del método son precisión y veracidad.

Este proceso se realizó mediante el software Microsoft Excel y se comprobó que el método de medición propuesto es apto para el uso.

### **3.4 Metodología para el diseño de la propuesta del proyecto**

Este apartado comprende la cuarta fase mostrada en la figura 4, mediante la cual se espera definir los aspectos referentes al diseño necesario para poder cumplir con la implementación del proyecto.

#### **3.4.1 Cierre de brecha con la norma INTE-ISO 10012:2003**

El plan de diseño de las acciones requeridas para cerrar la brecha de conformidad del modelo metrológico con la norma INTE-ISO 10012:2003 se ejecutó siguiendo lo indicado en la tabla 2, que se muestra a continuación:

**Tabla 2.** Plan de diseño de acciones requeridas para alcanzar la conformidad del Laboratorio de Metrología de Procame con la norma INTE-ISO 10012:2003

<b>Acción</b>	<b>Responde a la pregunta:</b>
Identificar el estado futuro de conformidad al que se desea llegar.	¿Dónde deberíamos llegar y en qué periodo?
Determinar las acciones requeridas para alcanzar el estado deseado.	¿Qué debemos hacer para llegar?
Determinar los planes requeridos para alcanzar el estado deseado.	¿Cómo llegamos a la meta en el periodo establecido?

**Fuente:** Ruiz (2012).

La determinación de cómo lograr el cierre de la brecha consiste en establecer las acciones implementadas con el fin de alcanzar la conformidad del modelo metrológico con lo establecido en la norma INTE-ISO 10012:2003.

Para tal fin, se aportan acciones que se ejecutan con el desarrollo de este proyecto, las cuales permitieron contar con todos los aspectos de la norma definidos documentalmente, con el fin de que se valore su implementación eficazmente dentro del sistema de gestión del Laboratorio de Metrología de Procame.

Tales acciones se definieron con base en la experiencia y conocimientos adquiridos en la Maestría en Metrología y Calidad cursada, así como el conocimiento y análisis de la norma INTE-ISO 10012:2003, y según el criterio técnico del personal del Laboratorio de Metrología de Procame involucrado en las mediciones de acústica.

### **3.4.2 Procedimiento para la caracterización de la cámara acústica**

Para realizar este procedimiento, se buscó bibliografía de procesos de caracterización de medios, donde se tuviera que evaluar la capacidad de un medio para mantener un valor de magnitud en un periodo de tiempo (estabilidad), así como posibles cambios por la colocación de los instrumentos en el espacio dentro del medio (uniformidad). Esto se evaluó con el fin de conocer las posibles variaciones que pueden existir al interior de la cámara, y cuantificar estas variaciones a la hora de realizar mediciones con la cámara.

### 3.4.3 Procedimiento para la calibración de aplicaciones móviles

Este se realizó con base en la metodología de calibración de sonómetros utilizada por el Instituto de Salud Pública de Chile. Considerando que los patrones descritos en el método no se adaptaban físicamente a los dispositivos móviles, se procedió a utilizar medios de comparación (la cámara acústica) y un sonómetro con una exactitud mejor que la esperada del celular.

Para realizar la calibración correspondiente se utilizaron aplicaciones móviles cuyas mediciones de ruido ambiental pudieran ser comparadas con los resultados del patrón utilizado en el proceso.

En la siguiente tabla se muestran estas con sus respectivas características.

**Tabla 3.** Aplicaciones móviles utilizadas para calibración en cámara acústica

Nombre de la aplicación	Desarrollador	Versión	Sistema operativo	Teléfono
Sonómetro	Seong Eon King	2.8	IOS	Iphone SE
Niosh SLM	Micsup	1.0.718	IOS	Iphone SE
Decibel X PRO	Sajust	6.4.0 [3380]	IOS	Iphone SE
Sound Meter HQ	Just4fun Mobil Sp	2.0	Android	Samsung S7 / Huawei P9
Decibel X	SkyPaw Co.ltd	V4	Android	Samsung S7 / Huawei P9

**Fuente:** Elaboración propia de los investigadores.

### 3.5 Metodología para la verificación de la propuesta del proyecto

Este apartado comprende la quinta fase mostrada en la figura 4. Con esta etapa, se definieron los elementos requeridos para verificar que la propuesta plasmada alcance los objetivos planteados. Esta metodología se detalla a continuación.

### **3.5.1 Metodología para la verificación, aseguramiento, control y seguimiento de resultados**

Este apartado comprende la quinta fase mostrada en la figura 4, mediante la cual se busca definir la parte metodológica que respalda la verificación, aseguramiento, control y seguimiento de resultados, como complemento de la propuesta de implementación del proyecto.

Con esto se definieron los recursos y procesos necesarios para la adecuada gestión, mantenimiento y mejora continua del sistema de gestión de las mediciones.

### **3.5.2 Análisis técnico**

Se estableció en el análisis cuáles fueron las herramientas adecuadas para asegurar la calidad del proceso de calibración de dispositivos móviles para la medición del nivel de presión sonora. De igual manera, se definieron las condiciones que debió cumplir el espacio físico donde se ejecuten las calibraciones. Dicha definición fue posible por medio de expertos e interacción de los investigadores.

Por medio de una matriz se identificaron todos los procesos necesarios para mantener el sistema de gestión de las mediciones, así como el mantenimiento de los equipos, gestión del recurso humano, control de las condiciones ambientales, confirmación metrológica, entre otros. Con la experimentación con los procesos implementados, se definieron los tiempos requeridos para ejecutar los servicios, y el personal necesario para la cumplir las actividades.

### **3.5.3 Análisis financiero**

Basado en la información recabada en el análisis técnico, se determinaron todos los costos asociados al proyecto, tanto los fijos como variables. Para esta estimación se consideraron los costos de la materia prima para la construcción de la cámara acústica, los costos administrativos (como mercadeo y servicios), renovación de equipo de oficina, equipo de medición, costos del personal, entre otros.

Con sustento en el análisis de mercado, se estimó cuáles serían los posibles ingresos por servicio de calibración de dispositivos móviles para medir presión sonora, además de otros posibles ingresos como para la ejecución del proyecto como fuentes de financiamiento, donaciones, capital propio, venta de servicios y otros que se identifiquen.

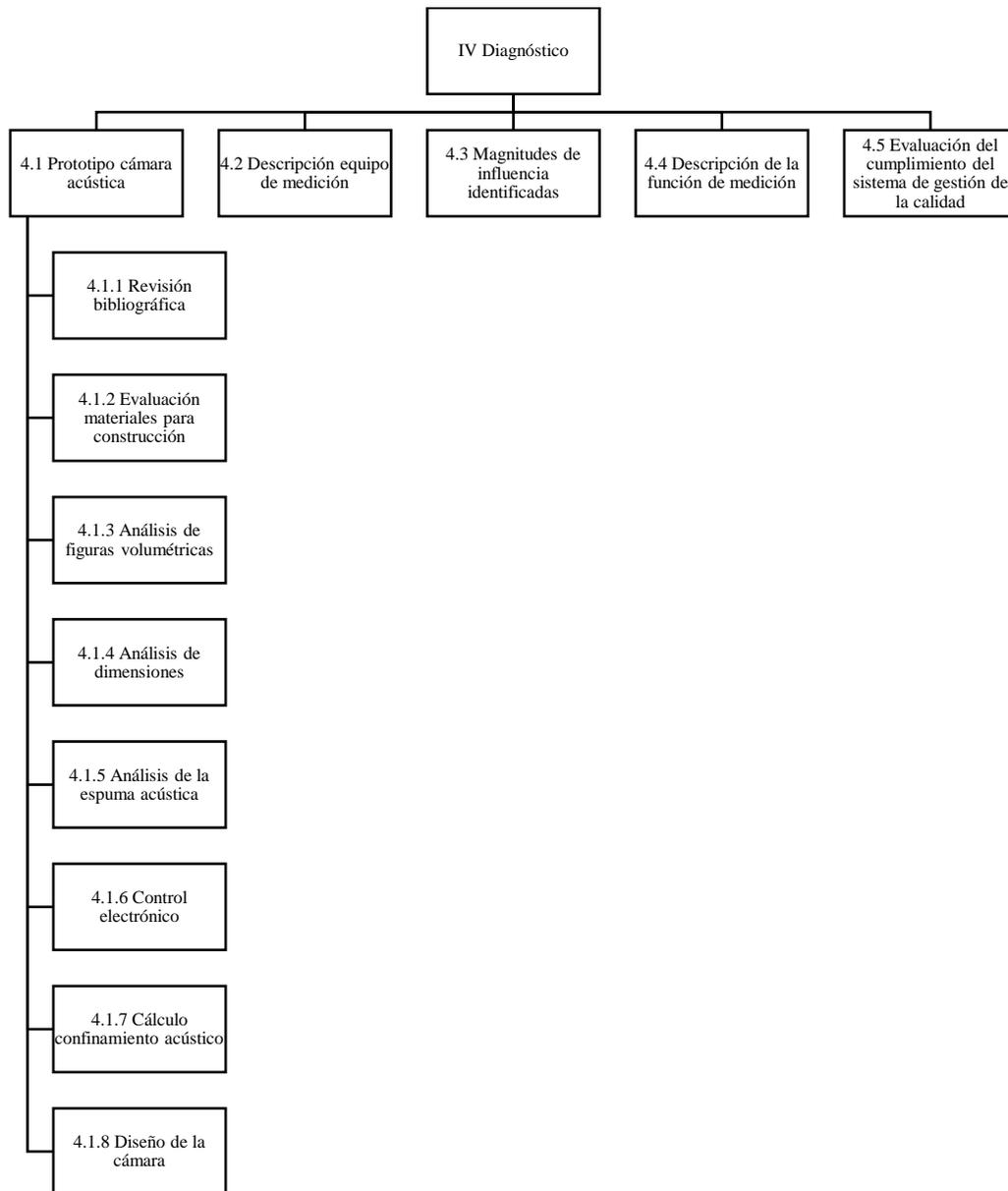
Teniendo en cuenta los ingresos y egresos, se realizó una proyección del flujo neto efectivo (FNE) a 5 años, donde año a año se estimaron los ingresos y se le restaron todos los egresos.

Si el resultado del FNE es positivo ( $FNE > 0$ ), entonces el proyecto genera ganancias y es financieramente viable. Si por el contrario, es negativo ( $FNE < 0$ ), entonces el proyecto genera pérdidas y no es financieramente viable. En caso de que el FNE sea igual a 0 ( $FNE = 0$ ), entonces el proyecto no genera ni pérdidas ni ganancias.

CAPÍTULO IV  
ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL

En este capítulo se aborda la parte de análisis de la situación actual enfatizando en lo referente a medir y analizar, por lo cual se obtiene información sobre necesidades, expectativas y satisfacción que se plantearon en los objetivos del proyecto. Con esto se obtienen conclusiones, que sirven como información de entrada en el proceso de revisión y mejora a futuro.

El siguiente diagrama ofrece una síntesis de lo que se aborda en este capítulo, de forma muy puntual.



**Figura 5: Estructura del capítulo IV: Análisis de la situación actual**

**Fuente:** Elaboración propia.

#### **4.1 Prototipo de cámara acústica para realizar la calibración de aplicaciones móviles**

Una calibración adecuada de aplicaciones móviles va de la mano con la utilización de una cámara acústica la cual se diseñó e implementó, para lograr mantener condiciones adecuadas de aislamiento del sonido, que no alteran las mediciones requeridas para la calibración.

##### **4.1.1 Revisión bibliográfica de normas, manuales, fichas técnicas y reglamentos**

Para a lograr reproducir una cámara acústica que cumpla con lo requerido para la calibración de las aplicaciones móviles, se tendrá una revisión de documentos importantes con información referente al tema y que pueda servir de referencia para su diseño.

**Tabla 4.** Descripción de normas, manuales, fichas técnicas y reglamentos aplicables al proceso de calibración

<b>Tipo de documento</b>	<b>Identificación</b>	<b>Descripción general</b>	<b>Criterios importantes</b>
<b>Normas</b>	ISO 3740: 2000 Determinación de los niveles de potencia acústica de las fuentes de ruido.	Incluye una guía de normas internacionales en el campo de la acústica; presenta una guía para la elección de normas.	Se establecieron los márgenes de interés en cuanto a frecuencias para la determinación de los niveles ponderados A 63 Hz a 4000 Hz para las bandas de octava y 5° Hz a 6300 Hz para las bandas de tercio de octava.
	ANSI S1.4 Especificación para la medición del sonido	Norma para la calibración de sonómetros; brinda las frecuencias de calibración y los errores permitidos.	Se establece que la frecuencia de calibración es 1000 Hz; con este valor se evalúan las espumas acústicas.
<b>Manuales</b>	<i>Manual calibrador acústico QC-10 y QC-20</i>	Manual de calibración del equipo. Brinda el método de calibración	Procedimiento de operación, efectos de la altitud, correcciones del micrófono
	<i>Manual calibrador de nivel sonoro GR 1986 Omnical</i>	Manual de calibración del equipo. Brinda el método de calibración.	Correcciones del micrófono, revisión general
	<i>Manual técnico P3 Ductal</i>	Incluye el método de manipulación del P3 Ductal.	Características técnicas de los conductos P3ductal, atenuación acústica
	<i>Manual de acústica (Handbook of Acoustics)</i>	Contiene la teoría sobre ingeniería en acústica y propagación del sonido.	Reverberación, resonancia, absorción del sonido, octavas de banda
<b>Reglamentos</b>	N° 39428-S Reglamento para el Control de la Contaminación por Ruido	Establece las normas que deben cumplir los equipos para medición de ruido en Costa Rica.	Límites de niveles de sonido en decibeles A (dB A)
<b>Ficha técnica</b>	Vidrio laminado IT-039 VILAX (Extralum, 2013)	Presenta las propiedades acústicas del vidrio laminado.	Se obtuvieron propiedades para realizar el diseño.
	Paneles para absorción del sonido (SonoFlat Panels)	Presenta las propiedades de la espuma acústica.	Coefficiente de reducción del sonido (NRC)
<b>Informe de prueba</b>	Paneles para absorción del sonido SonoFlat	Método de prueba estándar de ASTM para absorción de sonido y coeficientes de absorción de sonido.	Se observaron los resultados de la prueba para la confiabilidad del panel según lo esperado.

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.1.2 Evaluación de materiales para construir la cámara acústica

Basándose en la información de cada material, como sus fichas técnicas, y en aspectos que se logran observar a simple vista, se generó una tabla comparativa de las características más importantes y, a su vez, se colocó una evaluación de estos puntos para determinar cuál es más adecuado para la construcción.

Para tal efecto, se empleó una escala ordinal de puntuaciones, que se desglosa así:

- 1: malo,
- 2: deficiente,
- 3: regular,
- 4: bueno, y
- 5: excelente.

A partir de la calificación realizada, se construyó una tabla comparativa con los resultados, con el fin de elegir el material más adecuado para la construcción de la cámara acústica. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

**Tabla 5.** Comparación de materiales para la construcción de la cámara acústica

Aspecto evaluado	Material		
	Vidrio laminado IT-39 Vilax	P3 Ductal	Lámina Fibrolit 8 mm
Facilidad de manipulación y corte	3	4	2
Aislamiento de ruido	5	5	5
Disponibilidad del material	5	5	5
Precio	4	4	5
Resistencia y peso	4	3	3
Respaldo técnico y uniformidad	5	5	5
Certificación	5	5	5
Transparencia	5	1	1
<b>Promedio</b>	<b>4,3</b>	<b>3,8</b>	<b>3,0</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

La facilidad de manipulación y corte se refiere a que el material pueda ser cortado con herramientas de fácil acceso, como una sierra, y que a su vez las uniones se puedan realizar con procesos básicos en un taller mecánico. Si el material cumple con esto se le da una nota alta, pero si requiere un proceso especializado se le asigna una calificación baja.

El aislamiento de ruido se refiere a que el material esté diseñado para reducir la transmisión de sonido.

La disponibilidad de material contempla que se pueda adquirir en el menor tiempo posible, sin retrasos en el pedido y con existencias del producto en Costa Rica. El material que requiera ser preordenado con varios días de anticipación tendrá una nota menor.

Para la calificación del precio, se asigna mayor nota al material con menor costo económico en el mercado nacional.

La resistencia y el peso asignan un mayor puntaje al material con una mejor relación resistencia/peso. El material más resistente y liviano se considera con mejor calificación que el material pesado y frágil.

El “respaldo técnico y uniformidad” se refiere a que el material tenga las mismas propiedades por toda su estructura; los materiales que cambien su grosor en algunas zonas reciben un bajo puntaje. Es preferible que la uniformidad esté respaldada por estudios.

La certificación toma en cuenta que las propiedades acústicas del material estén certificadas. También que esta sea proporcionada por el distribuidor. El material que incumpla con este criterio recibe bajo puntaje.

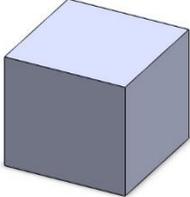
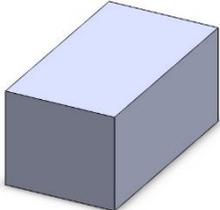
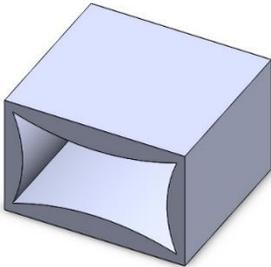
La transparencia se refiere a que se pueda ver el interior de la cámara sin que se deba realizar una abertura en el material, esto para observar la pantalla del dispositivo móvil. Si el material es opaco se califica con menos puntos.

Con base en el análisis anterior, se selecciona el vidrio laminado IT-39 Vilax, por sus características superiores a los demás materiales.

#### **4.1.3 Análisis de las figuras volumétricas más aptas para el diseño de una cámara acústica**

Para lograr calibraciones adecuadas dentro de la cámara acústica que se construya, se debe tomar en cuenta la forma de esta. En la tabla 6 se tienen identificados aspectos de importancia para tomar una decisión acertada del diseño según lo que se requiera.

**Tabla 6.** Comparación de las figuras volumétricas

Tipo de cámara	Imagen para descripción general	Fortalezas	Debilidades
<b>Cámara cúbica</b>		Fácil construcción, con diferentes tipos de materiales.	Refleja el sonido hacia un punto.
<b>Cámara prismática</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Las reflexiones no se concentran en un punto.</li> <li>- Fácil construcción, con diferentes tipos de materiales.</li> <li>- Maximización de la absorción de las ondas reflejadas en las paredes.</li> </ul>	No se detectan debilidades.
<b>Cámara con paredes convexas</b>		Dispersa las ondas incidentes.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Difícil construcción si no se cuenta con equipos especializados y si se requiere trabajar con materiales rígidos.</li> <li>- Por la contribución del material absorbente por su forma, pueden encarecer el diseño.</li> </ul>

**Fuente:** Elaboración propia.

Teniendo en cuenta estas comparaciones en cuanto a sus fortalezas y sus debilidades, se selecciona una figura volumétrica tipo rectangular (cámara prismática), como la más apta para el proyecto.

#### 4.1.4 Análisis de dimensiones de la cámara acústica

Una vez definida la forma para la construcción de la cámara acústica, se toman en cuenta los elementos que se necesitan para realizar las pruebas, de forma que se pueda obtener un producto que cumpla con lo requerido para la calibración de las aplicaciones móviles.

**Tabla 7.** Elementos utilizados para dimensionar la cámara acústica

Elemento	Dimensiones (cm)		
	Largo	Ancho	Altura
Altavoz	13	7	5,5
Espuma acústica	30	20	5
Teléfono Samsung S7	15,09	7,26	0,77
Teléfono Huawei P9	14,5	7,09	0,695
Teléfono iPhone SE	12,38	5,86	0,76

**Fuente:** Elaboración propia.

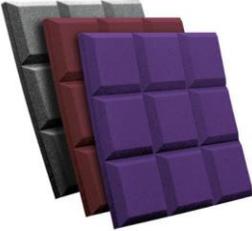
Según estos elementos, el tamaño requerido para la cámara es 31 cm de largo x 20,5 cm de ancho y 10,5 cm de altura, garantizando una capacidad acorde para colocar los móviles más comunes del mercado.

#### 4.1.5 Análisis de la espuma acústica

Con base en manuales y fichas técnicas de diferentes tipos de espuma acústica, se pueden determinar con claridad sus principales características para determinar cuál es la más apta para la construcción del prototipo de cámara planteado en este proyecto. Se utilizan como referencia para la selección: su respuesta en frecuencia, la disponibilidad en el mercado y la calidad según especificaciones.

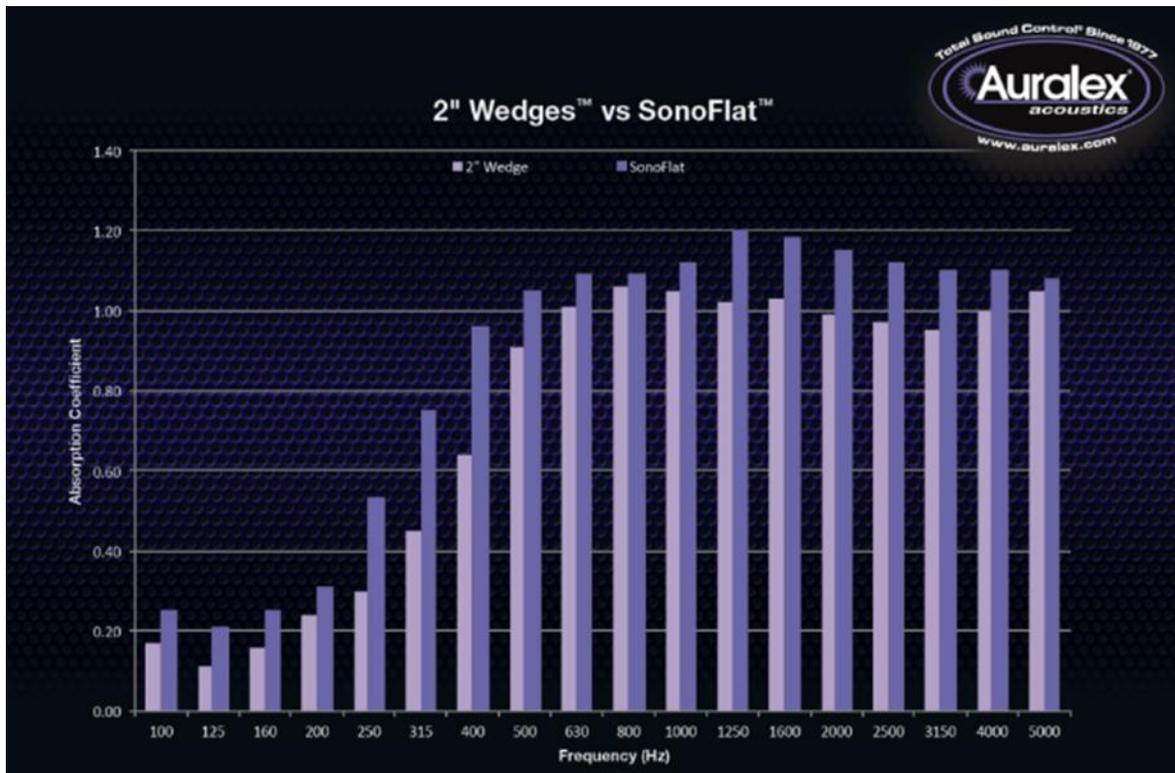
A continuación, se presenta una tabla con el análisis comparativo de los principales tipos de espuma disponibles en el mercado:

**Tabla 8.** Comparación de espumas acústicas

Tipo de espuma	Imagen para descripción general	Fortalezas	Debilidades
Panel plano		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Gran absorción en media y altas frecuencias.</li> <li>-Fácil instalación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-En bajas frecuencias tiene la menor absorción.</li> <li>-No dispersa el sonido.</li> </ul>
Panel con canales		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Su forma mejora la calidad del audio.</li> <li>-Diseño elegante para la decoración.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-A pesar de tener mejores propiedades acústicas que un panel plano, trabaja en las mismas frecuencias y es más costoso.</li> <li>-Diseñado para salas de grabación.</li> </ul>
Panel con cuña anecoica		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Presenta una mejor absorción en frecuencias bajas que las otras espumas.</li> <li>-Diseñado para la dispersión del sonido.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Alto precio de venta.</li> <li>-Diseñado para salas de grabación.</li> </ul>

**Fuente:** Elaboración propia.

Al calibrar a una frecuencia de 1000 Hz, considerada como frecuencia media, los tres tipos de espumas son adecuados considerando sus características acústicas, por lo que el criterio de selección pasa a ser el precio del producto. Debido a lo anterior, se selecciona el panel plano SonoFlat de Auralex, el cual presenta propiedades de absorción por frecuencia como se muestra en la figura 7.



**Figura 6: Propiedades de absorción por frecuencia del panel plano SonoFlat de Auralex**

**Fuente:** Auralex (2018).

#### 4.1.6 Control electrónico y amplificador de señal de audio

##### 4.1.6.1 Control electrónico

Para realizar la calibración, se debe tener un equipo capaz de reproducir las frecuencias necesarias para la caracterización de la cámara acústica que se implementó, así como la calibración de las aplicaciones móviles que se determinaron como más aptas.

El sistema de control brinda los modos de funcionamiento del equipo con el cual se trabaja; de esta forma se obtuvo un control de las diferentes variables y en muchos casos se visualizaron estos cambios, para poder tomar decisiones a la hora de trabajar.

Los componentes del sistema de control empleado son: un hardware Arduino UNO, un software libre el cual se encuentra en la página web de Arduino y un *display* (pantalla LCD DFRobot DRF0009). Dichos componentes se describen en la tabla 9.

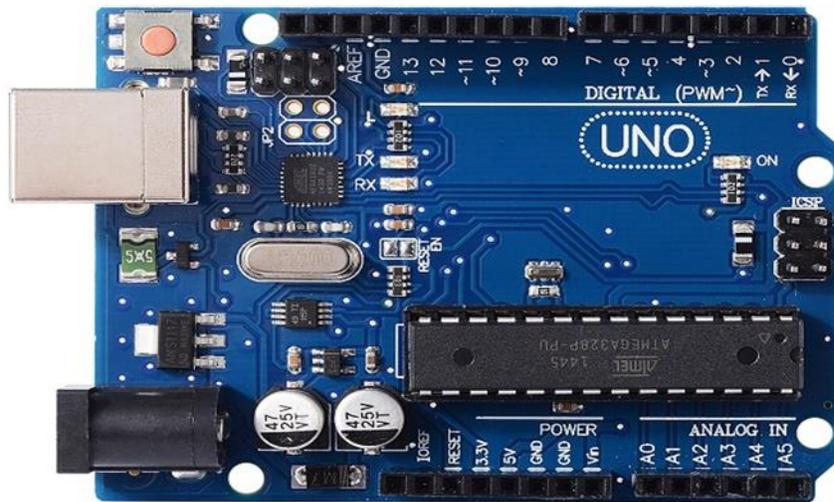
**Tabla 9.** Componentes utilizados para el control electrónico de la cámara acústica

Componente	Nombre	Características
Hardware	Arduino Nano	<ul style="list-style-type: none"><li>- Microcontrolador ATmega328 con cargador de inicio preprogramado.</li><li>- Tensión de entrada (recomendada): +7 a + 12 V.</li><li>- Tensión de entrada (límites): +6 a + 20 V.</li><li>- 14 pines GPIO (de los que 6 ofrecen salida PWM).</li><li>- 6 pines de entrada analógica.</li><li>- Corriente DC por pin de E/S: 40 mA.</li><li>- Memoria Flash de 32 KB (2 KB para cargador de inicio).</li><li>- SRAM de 2 KB.</li><li>- EEPROM de 1 KB.</li><li>- Admite comunicación serie IC.</li><li>- Frecuencia de reloj: 16 MHz.</li><li>- Dimensiones: 0,73" x 1,7".</li></ul>
Software	Libre para Arduino	<ul style="list-style-type: none"><li>- Gratuito</li><li>- Multiplataforma.</li><li>- Código abierto y extensible.</li><li>- Entorno de programación simple y claro.</li><li>- Código extensible con librerías C++.</li></ul>
Display	DFRobot DFR0009 LCD	<ul style="list-style-type: none"><li>- Compatible con Arduino.</li><li>- Interfaz con menú para selección del modo.</li><li>- Teclado con cinco teclas para el cambio de variables.</li><li>- Pantalla LCD</li></ul>

**Fuente:** Elaboración propia.

Para el diseño se trabajó con un Arduino UNO, el cual cuenta con los elementos más importantes para la implementación, como lo es un generador de frecuencia que se programa de tal forma que permite

obtener frecuencias desde los 100 Hz hasta los 4 KHz. En la siguiente figura 8 se muestra cómo es físicamente este dispositivo.



**Figura 7. Imagen ilustrativa de Arduino UNO**

**Fuente:** Prometec (s.f.).

Además, la pantalla seleccionada DFRobot DFR0009 LCD cuenta con características que se adaptan muy bien a trabajos donde se requiere versatilidad de los componentes que se utilizan. Este tipo de *display* proporciona una interfaz fácil de usar que permite al usuario navegar por el menú de forma versátil.

#### **4.1.6.2 Amplificador de señal de audio**

Este dispositivo provee al diseño una interfaz para lograr obtener señales de potencia, voltaje e intensidad de etapas anteriores y amplificarlas de forma tal que se puedan obtener los datos necesarios sin perder características importantes de las mismas.

Los amplificadores o etapas de potencia son los equipos encargados de hacer trabajar a las cajas acústicas.

Cuando una señal de audio ha sido mezclada, ecualizada y procesada para obtener un nivel estándar de línea, es enviada al amplificador que se encarga de incrementar la potencia de la señal hasta obtener el nivel de sonido deseado de los altavoces, idealmente, sin variar la forma de onda de la señal original (Avacab Audiovisuales S.L., 2013).

Habiendo cumplido las etapas anteriores, se acopla un altavoz que pueda reproducir frecuencias, las cuales se generan por medio del software instalado en el dispositivo Arduino UNO: este presenta entre sus características que es capaz de reproducir frecuencias bajas y altas en el rango de 100 Hz hasta los 4 kHz, que cumple con el rango para el diseño propuesto.

#### 4.1.7 Cálculo de confinamiento acústico

Con el fin de comprobar si el aislamiento acústico que se tenga en la cámara acústica puede cumplir con lo establecido por la norma ISO 1996-2:2009 (la cual indica que, en caso de que el nivel de presión sonora sea de 10 dB o mayor por debajo del nivel de presión sonora medido, no es necesario realizar correcciones al valor medido por influencia de otras fuentes), se realizó el cálculo de aislamiento acústico, contemplando los siguientes datos.

**Tabla 10.** Cálculo de aislamiento acústico de la cámara acústica

Variable	Valor	Observaciones
*Área (m <sup>2</sup> )	0,22	Tomando como dimensiones, 0,3 m de largo, 0,2 m de ancho y 0,1 m de alto.
Coefficiente de confinamiento medio	0,6464	Esto utilizando como materiales vidrio y espuma acústica.
Capacidad de reducción del sonido	0,402	Valor resultante según fórmula matemática que se muestra en la metodología.
Factor de directividad	1	Considerando que las fuentes de sonido pueden provenir de cualquier dirección.
Nivel de presión sonora externo a la cámara (dB)	60,0	Máximo valor medido en el laboratorio
Distancia de la fuente (m)	2	Fuente de sonido más cercana a las mesas de trabajo.
Nivel de presión sonora interno a la cámara (dB)	50,0	Nivel de presión en el interior de la cámara utilizando materiales aislantes a un nivel exterior de 60 dB.

**Fuente:** Elaboración propia.

Con base en los datos anteriores, el nivel de presión sonora interno de la cámara se calculó mediante la ecuación 3 de esta investigación.

Como se puede apreciar en la tabla 10, utilizando espuma acústica y vidrio hubo una reducción de 10 dB entre el nivel de presión sonora externo e interno de la cámara. Esto cumple con lo requerido por la norma ISO 1996-2:2009.

Es necesario tomar en cuenta que, en caso de que varíen los materiales de construcción de la cámara acústica o varíen sus dimensiones, será necesario volver a calcular el nivel de presión acústica, ya que cambiarían algunos parámetros dentro de la expresión matemática.

Esta diferencia entre el nivel de presión sonora externo e interno podría ser inclusive mayor si se considera que el nivel de presión más bajo que se pretende probar es de 94 dB.

#### 4.1.8 Diseño final de la cámara acústica

A partir de las especificaciones plasmadas en los puntos anteriores, se establece el diseño final de la cámara acústica.

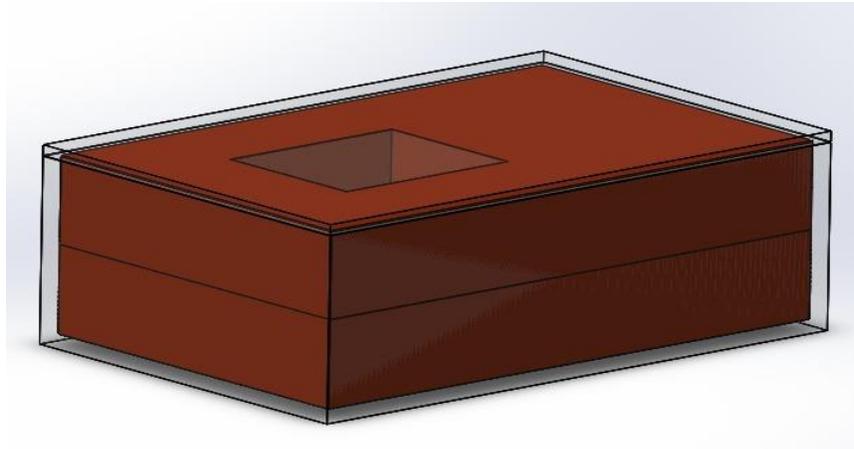
Para enfatizar los aspectos técnicos que condujeron a alcanzar este diseño final, se presenta la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** a continuación:

**Tabla 11.** Resumen de especificaciones para el diseño final de la cámara acústica

<b>Elemento de la cámara acústica</b>	<b>Observaciones</b>
<b>Material para su construcción</b>	Vidrio laminado IT-39 Vilax.
<b>Figura volumétrica</b>	Tipo rectangular.
<b>Dimensiones</b>	31 cm de largo, 20,5 cm de ancho y 10,5 cm de altura.
<b>Espuma acústica</b>	Panel plano SonoFlat de Auralex.
<b>Control electrónico</b>	Hardware: Arduino Nano Software: Libre Arduino Display: LCD compatible con Arduino.
<b>Amplificador de señal de audio</b>	Altavoz para reproducción de frecuencias de 100 Hz hasta 4000 Hz.

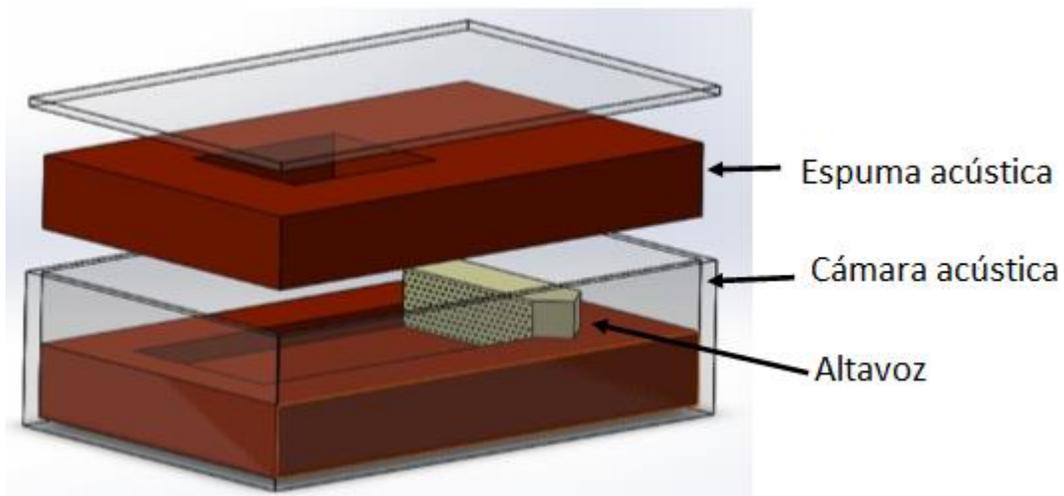
**Fuente:** Elaboración propia.

Con base en las especificaciones presentadas previamente, se obtiene el producto final del diseño como se observa en un plano en 3D.



**Figura 8: Cámara acústica, modelo en 3D**

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 9: Cámara acústica, con altavoz integrado**

**Fuente:** Elaboración propia.

A partir de las imágenes anteriores y el diagnóstico presentado para la cámara acústica, se determina que la cámara requerida para la ejecución del servicio de calibración en aplicaciones móviles se construye con vidrio laminado VLAX, es del tipo prismático, con dimensiones, 31 cm de largo, 20,5

cm de ancho y 10,5 de alto, y utiliza una espuma acústica SonoFlat de la marca Auralex, con control electrónico y altavoz compatible con hardware y software Arduino capaces de reproducir frecuencias de 100 Hz hasta 4000 Hz.

Los planos para la construcción se muestran en el Apéndice 4.

## 4.2 Descripción del equipo de medición

Para el desarrollo de la calibración, se utilizó como equipo patrón un dosímetro de ruido con interfaz para PC. Sus especificaciones técnicas fueron extraídas del manual del equipo (Extech Instruments, 2017, p. 10). Dentro de sus principales características se destacan:

- Marca: Extech Instruments
- Modelo: 407355
- Serie: 130803151
- Resolución: 0,1 dB
- Exactitud:  $\pm 1,0$  dB
- Norma aplicable: Alta precisión de  $\pm 1$ dB cumple con estándares de clase 2 (INTE/IEC 61672-1:2015).

### 4.2.1 Aseguramiento metrológico del equipo

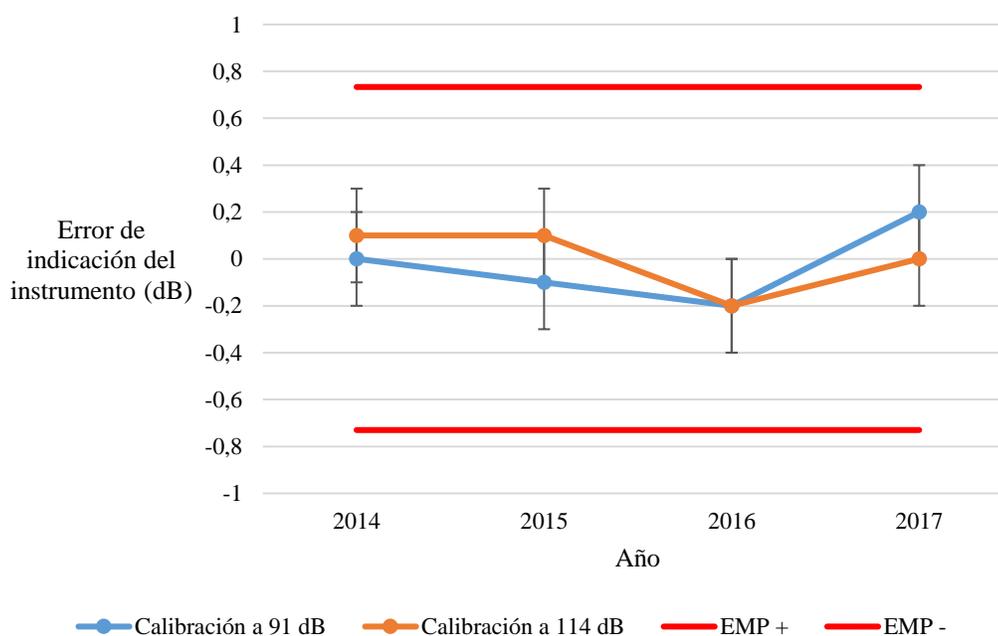
Como parte de la comprobación metrológica, se registró el comportamiento a través del tiempo del error de indicación del equipo y su incertidumbre expandida. Para tal efecto, se analizaron los certificados de calibración del equipo, y se construyó la siguiente tabla:

**Tabla 12.** Error de indicación de equipo de medición patrón dosímetro de ruido con interfaz para PC

Punto de calibración (dB)	Calibración a 91 dB		Calibración a 114 dB	
	Error de indicación (dB)	Incertidumbre (dB)	Error de indicación (dB)	Incertidumbre (dB)
2014	0	0,2	0,1	0,2
2015	-0,1	0,23	0,1	0,23
2016	-0,2	0,2	-0,2	0,2
2017	0,2	0,2	0	0,2

**Fuente:** Certificados de calibración de Laboratorio de Metrología de Procame: 010-2014 S; 006-2015 S; 009-2016 Vi; 002-2017 Vi.

A partir de los datos anteriores, se elaboró el siguiente gráfico lineal, a través del cual se observa que el equipo patrón se encontró en todo momento dentro del error máximo permisible (EMP), el cual se estableció mediante una relación 1:3 de la incertidumbre expandida del proceso de calibración de la medición de presión sonora de las aplicaciones móviles. Por lo tanto, el EMP es tres veces menor a la incertidumbre usual resultante del proceso de calibración. Este gráfico se presenta a continuación:



**Figura 10: Error de indicación de equipo de medición patrón dosímetro de ruido con interfaz para PC**

**Fuente:** Elaboración propia.

Considerando toda la información anterior, se establece que el equipo de medición utilizado como patrón para la calibración de las aplicaciones móviles es apto para incorporarlo dentro del modelo metrológico planteado.

### 4.3 Magnitudes de influencia identificadas

Debido a que no se conocen los coeficientes de sensibilidad de los instrumentos que se están utilizando, se utilizó el coeficiente máximo permitido por la norma INTE/IEC 61094-1:2017, la cual establece los siguientes coeficientes de sensibilidad a las condiciones ambientales:

**Tabla 13.** Coeficientes de sensibilidad máximos permitidos por la norma INTE/IEC 61094-1:2017 para micrófonos de la clase LS2F

Característica	Valor
Coeficiente de presión estática	0,05 dB/kPa
Coeficiente de temperatura	0,035 dB/°C
Coeficiente de humedad relativa	0,0004 dB/%

**Fuente:** Elaboración propia a partir de INTE/IEC 61094-1:2017.

Estos valores se evaluaron dentro del cálculo de incertidumbre debido a las variaciones ambientales durante el proceso de calibración. Para el instrumento patrón se tomó el coeficiente igual al de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, mientras que para los dispositivos móviles se consideró el doble de este valor.

### 4.4 Descripción de la función de medición

El modelo matemático se abarcará en forma de evaluación del error, por lo que tanto el resultado del sesgo de medición como el de la incertidumbre de medida serán en función del error.

Con el fin de considerar las variables que influyen en las mediciones, se revisaron reglamentos y normas relacionadas con mediciones acústicas y control de ruido y se determinaron las variables que podrían tener contribución para la trazabilidad metrológica. Los documentos que se revisaron son la norma ISO 1996-2:2009 “Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental Parte 2: Determinación de los niveles de ruido ambiental”, el decreto N° 32692-S Procedimiento para la medición de ruido, reglamento N° 39428-S Reglamento para el control de la contaminación por ruido, y el decreto N° 10541-TSS Reglamento para el control de ruidos y vibraciones. Los resultados se presentan a continuación.



**Tabla 14.** Evaluación de los requisitos que contribuyen a la trazabilidad metrológica de los documentos ISO 1996-2:2009, decreto N° 32692-S, decreto N° 39428-S y decreto N° 10541-TSS

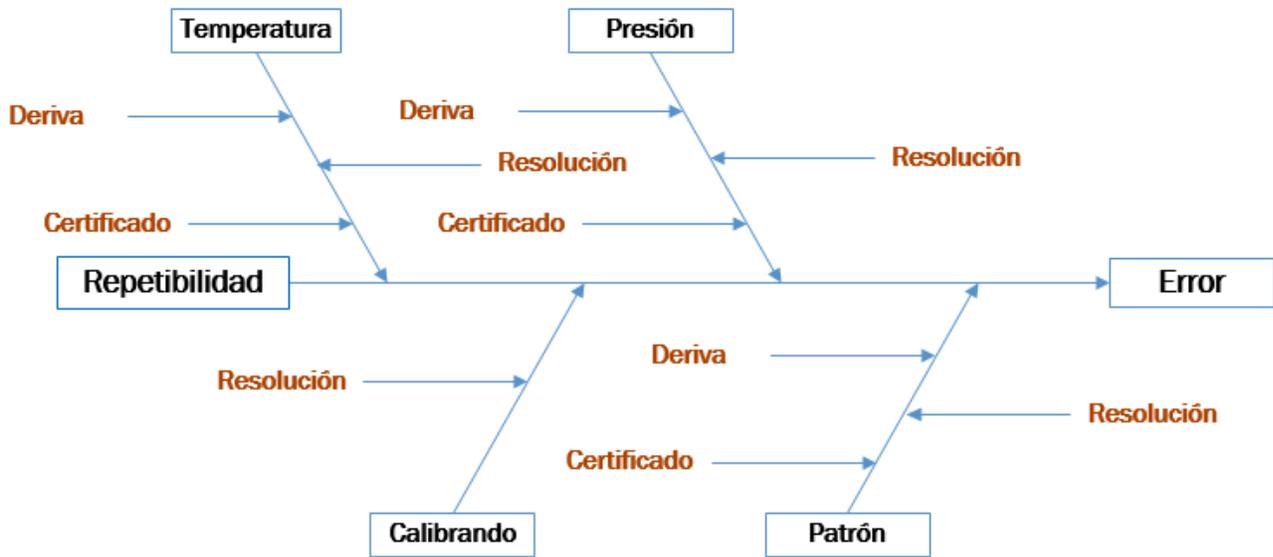
Documento de referencia	Requisito relacionado con trazabilidad
<b>ISO 1996-2:2009</b>	<p>En la evaluación de incertidumbre se debe incluir al menos el componente debido a la instrumentación, a condiciones de funcionamiento (como la repetibilidad) y a las condiciones meteorológicas. Expandir con un factor de <math>k=2</math>, para una probabilidad de 95 %.</p> <p>La variación temporal en la emisión de ruido en una planta se debe determinar a partir de valores tomados durante 5 min y 10 min.</p> <p>Los niveles de presión sonora máximos se deben determinar con al menos 5 mediciones de las condiciones de funcionamiento.</p> <p>Para facilitar los resultados, es conveniente realizar las mediciones en condiciones meteorológicas escogidas, para que los resultados sean reproducibles.</p> <p>Las mediciones se realizan en el filtro de ponderación A, a niveles de bandas de octava que pueden incluir 63 Hz, 125 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz u 8000 Hz.</p> <p>En caso de que el nivel de presión sonora residual sea de 10 dB o mayor por debajo del nivel medido, no se realizarán correcciones al valor medido.</p> <p>En caso de que el nivel de presión sonora residual sea de 3 dB o inferior por debajo del nivel medido, se debe corregir el valor medido.</p>
<b>Decreto N° 32692-S</b>	Cada medición se realiza cada 15 s.
<b>Decreto N° 38428-S</b>	Se considera que no contiene variables que influyan en el control metrológico de las mediciones.
<b>Decreto N° 10541-TSS</b>	Se considera que no contiene variables que influyan en el control metrológico de las mediciones.

**Fuente:** Elaboración propia.

La evaluación denota que para las mediciones es necesario considerar el aporte que realizan las condiciones ambientales en el resultado, además de los aportes del instrumento y a condiciones como la repetibilidad. Además, se identifican otros elementos de importancia para el desarrollo del proyecto,

como el tiempo necesario para determinar variación temporal en un medio, las frecuencias de referencia y cuándo hay que aplicar o no correcciones por ruido residual.

A partir de esta información se realizó un diagrama de Ishikawa con los factores a considerar en el modelo matemático del error. Este se presenta a continuación:



**Figura 11. Diagrama de Ishikawa sobre los factores que afectan el proceso de medición para determinación del error de aplicaciones móviles que miden nivel de presión sonora**

**Fuente:** Elaboración propia.

La función de medición para el cálculo del error es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 E_{IBC} = & \left( (\overline{I_{IBP}} + \delta_{dIBP}) + (CT_{IBP} * (T_{Cal} - T_{Ref}) + \delta_{dTer} + \delta_{trazTer} + \delta_{derTer}) \right. \\
 & \left. + (CP_{IBP} * (P_{Cal} - P_{Ref}) + \delta_{dBar} + \delta_{trazBar} + \delta_{derBar}) \right) \\
 & - \left( (\overline{I_{PAT}} + \delta_{dPAT} + \delta_{trazPAT} + \delta_{derPAT} + \delta_{fUni} + \delta_{fEst}) \right. \\
 & \left. + (CT_{PAT} * (T_{Cal} - T_{Ref}) + \delta_{dTer} + \delta_{trazTer} + \delta_{derTer}) \right. \\
 & \left. + (CP_{PAT} * (P_{Cal} - P_{Ref}) + \delta_{dBar} + \delta_{trazBar} + \delta_{derBar}) \right) + \delta_s
 \end{aligned}$$

**Ecuación 8: Cálculo del error del instrumento bajo calibración (dB)**

Donde:

$E_{IBC}$  = error del instrumento bajo calibración (dB).

$\overline{I_{IBP}}$  = promedio de indicaciones del instrumento bajo prueba (dB).

$\delta_{dIBP}$  = corrección por resolución del instrumento bajo prueba, con esperanza matemática de cero (dB).

$CT_{IBP}$  = coeficiente por cambio de temperatura del instrumento bajo prueba (dB/°C).

$T_{Cal}$  = temperatura durante la calibración (°C).

$T_{Ref}$  = temperatura de referencia; normalmente 20 °C (°C).

$\delta_{dTer}$  = corrección por resolución del termómetro, con esperanza matemática de cero (°C).

$\delta_{trazTer}$  = corrección por trazabilidad del termómetro, con esperanza matemática de cero (°C).

$\delta_{derTer}$  = corrección por deriva del termómetro, con esperanza matemática de cero (°C).

$CP_{IBP}$  = coeficiente por cambio de presión del instrumento bajo prueba (dB/hPa).

$P_{Cal}$  = presión durante la calibración (hPa).

$P_{Ref}$  = presión de referencia; normalmente 1 013 (hPa).

$\delta_{dBar}$  = corrección por resolución del barómetro con esperanza matemática de cero (hPa).

$\delta_{trazBar}$  = corrección por trazabilidad del barómetro, con esperanza matemática de cero (hPa).

$\delta_{derBar}$  = corrección por deriva del barómetro, con esperanza matemática de cero (hPa).

$\overline{I_{PAT}}$  = promedio corregido de indicaciones del patrón (dB).

$\delta_{dPAT}$  = corrección por resolución del instrumento patrón, con esperanza matemática de cero (dB).

$\delta_{trazPAT}$  = corrección por trazabilidad del patrón, con esperanza matemática de cero (dB).

$\delta_{derPAT}$  = corrección por deriva del patrón, con esperanza matemática de cero (dB).

$\delta_{fUni}$  = corrección por falta de uniformidad en el medio de comparación, con esperanza matemática de cero (dB).

$\delta_{fEst}$  = corrección por falta de estabilidad en el medio de comparación, con esperanza matemática de cero (dB).

$CT_{PAT}$  = coeficiente por cambio de temperatura del instrumento patrón (dB/°C).

$CP_{PAT}$  = coeficiente por cambio de presión del instrumento patrón (dB/hPa).

$\delta_s$  = corrección por falta de repetibilidad del sistema de medición, se considera una esperanza matemática de cero (dB).

Las correcciones con esperanza matemática de cero se van a considerar para el cálculo de incertidumbre.

Para el cálculo de la incertidumbre se van a considerar los siguientes aportes.

$$u_{dIBP} = \frac{d_{IBP}}{\sqrt{12}}$$

### **Ecuación 9: Cálculo de la incertidumbre por resolución del instrumento**

**Fuente:** Elaboración propia basada en INTE/ISO/IEC Guía 98-3:2017.

Donde:

$u_{dIBP}$  = incertidumbre por resolución del instrumento bajo prueba. Se considera una distribución rectangular (dB).

$d_{IBP}$  = resolución del instrumento bajo prueba

$$u_{dT_{er}} = \frac{d_{T_{er}}}{\sqrt{12}}$$

### **Ecuación 10: Cálculo de la incertidumbre por resolución del termómetro**

**Fuente:** Elaboración propia basada en INTE/ISO/IEC Guía 98-3:2017.

Donde:

$u_{dT_{er}}$  = incertidumbre por resolución del termómetro. Se considera una distribución rectangular (°C).

$d_{T_{er}}$  = resolución del termómetro

$$u_{trazTer} = \frac{Traz_{Ter}}{k}$$

**Ecuación 11: Cálculo de la incertidumbre por trazabilidad del termómetro**

**Fuente:** Elaboración propia basada en INTE/ISO/IEC Guía 98-3:2017.

Donde:

$u_{trazTer}$  = incertidumbre por trazabilidad del termómetro. Se considera una distribución normal. Se tomará el valor de U como la incertidumbre expandida reportada en el certificado de calibración del instrumento (°C).

$Traz_{Ter}$  = incertidumbre de la calibración del termómetro

$k$  = factor de cobertura de la incertidumbre de la calibración del termómetro

$$u_{derTer} = \frac{der_{Ter}}{\sqrt{3}}$$

**Ecuación 12: Cálculo de la incertidumbre por deriva del termómetro**

**Fuente:** Elaboración propia basada en INTE/ISO/IEC Guía 98-3:2017.

Donde:

$u_{derTer}$  = incertidumbre por deriva del termómetro, considerando una distribución rectangular. El valor de deriva se puede calcular de históricos de calibraciones o de bibliografía (°C).

$der_{Ter}$  = deriva del termómetro

$$u_{dBar} = \frac{d_{Bar}}{\sqrt{12}}$$

**Ecuación 13: Cálculo de la incertidumbre por resolución del barómetro**

**Fuente:** Elaboración propia basada en INTE/ISO/IEC Guía 98-3:2017.

Donde:

$u_{dBar}$  = incertidumbre por resolución del barómetro. Se considera una distribución rectangular (hPa).

$d_{Bar}$  = resolución del barómetro

$$u_{trazBar} = \frac{Traz_{Bar}}{k}$$

#### **Ecuación 14: Cálculo de la incertidumbre por trazabilidad del barómetro**

**Fuente:** Elaboración propia basada en INTE/ISO/IEC Guía 98-3:2017.

Donde:

$u_{trazBar}$  = incertidumbre por trazabilidad del barómetro. Se considera una distribución normal. Se tomará el valor de U como la incertidumbre expandida reportada en el certificado de calibración del instrumento (hPa).

$Traz_{Bar}$  = incertidumbre de la calibración del barómetro

$k$  = factor de cobertura de la incertidumbre de la calibración del barómetro

$$u_{derBar} = \frac{der_{Bar}}{\sqrt{3}}$$

#### **Ecuación 15: Cálculo de la incertidumbre por deriva del barómetro**

**Fuente:** Elaboración propia basada en INTE/ISO/IEC Guía 98-3:2017.

Donde:

$u_{derBar}$  = incertidumbre por deriva del barómetro, considerando una distribución rectangular. El valor de deriva se puede calcular de históricos de calibraciones o de bibliografía (hPa).

$der_{Bar}$  = deriva del barómetro

$$u_{dPAT} = \frac{d_{PAT}}{\sqrt{12}}$$

**Ecuación 16: Cálculo de la incertidumbre por resolución del instrumento patrón.**

**Fuente:** Elaboración propia basada en INTE/ISO/IEC Guía 98-3:2017.

Donde:

$u_{dPAT}$  = incertidumbre por resolución del instrumento patrón. Se considera una distribución rectangular (dB).

$d_{PAT}$  = resolución del patrón

$$u_{trazPAT} = \frac{U_{PAT}}{k}$$

**Ecuación 17: Cálculo de la incertidumbre por trazabilidad del instrumento patrón**

**Fuente:** Elaboración propia basada en INTE/ISO/IEC Guía 98-3:2017.

Donde:

$u_{trazPAT}$  = incertidumbre por trazabilidad del instrumento patrón. Se considera una distribución normal. Se tomará el valor de U como la incertidumbre expandida reportada en el certificado de calibración del instrumento (dB).

$U_{PAT}$  = incertidumbre de la calibración del instrumento patrón

$k$  = factor de cobertura de la incertidumbre de la calibración del instrumento patrón

$$u_{derPAT} = \frac{der_{PAT}}{\sqrt{3}}$$

**Ecuación 18: Cálculo de la incertidumbre por deriva del instrumento patrón**

**Fuente:** Elaboración propia basada en INTE/ISO/IEC Guía 98-3:2017.

Donde:

$u_{derPAT}$  = incertidumbre por deriva del instrumento patrón, considerando una distribución rectangular. El valor de deriva se puede calcular de históricos de calibraciones o de bibliografía (dB).

$der_{PAT}$  = deriva del patrón

$$u_{fUni} = \frac{f_{Uni}}{\sqrt{12}}$$

**Ecuación 19: Cálculo de la incertidumbre por falta de uniformidad en el medio de comparación**

**Fuente:** Elaboración propia basada en INTE/ISO/IEC Guía 98-3:2017.

Donde:

$u_{fUni}$  = incertidumbre por falta de uniformidad en el medio de comparación, considerando una distribución rectangular (dB).

$f_{Uni}$  = uniformidad de la cámara acústica, obtenida de la caracterización de la cámara.

$$u_{fEst} = \frac{f_{Est}}{\sqrt{12}}$$

**Ecuación 20: Cálculo de la incertidumbre por falta de estabilidad en el medio de comparación**

**Fuente:** Elaboración propia basada en INTE/ISO/IEC Guía 98-3:2017.

Donde:

$u_{fEst}$  = incertidumbre por falta de estabilidad en el medio de comparación, considerando una distribución rectangular (dB).

$f_{Uni}$  = estabilidad de la cámara acústica, obtenida de la caracterización de la cámara.

$$u_s = s$$

**Ecuación 21: Cálculo de la incertidumbre por falta de estabilidad en el medio de comparación**

**Fuente:** Elaboración propia basada en INTE/ISO/IEC Guía 98-3:2017.

Donde:

$u_s$  = incertidumbre por falta de repetibilidad del sistema de medición. Se considera una distribución normal, donde  $s$  es la desviación típica de la determinación del error (dB).

Con base en lo anterior, se crea la siguiente tabla con el resumen de las ecuaciones requeridas para el cálculo de la incertidumbre.

**Tabla 15.** Resumen cálculo de incertidumbres

<b>Aporte</b>	<b>Distribución</b>	<b>Coficiente de sensibilidad (Cs)</b>	<b>Incertidumbre típica (u)</b>
$u_{dIBP}$	Rectangular	1	$\frac{d_{IBP}}{\sqrt{12}}$
$u_{dTer}$	Rectangular	$CT_{IBP}$	$\frac{d_{ter}}{\sqrt{12}}$
$u_{trazTer}$	Normal	$CT_{IBP}$	$\frac{traz_{ter}}{k}$
$u_{derTer}$	Rectangular	$CT_{IBP}$	$\frac{der_{ter}}{\sqrt{3}}$
$u_{dBar}$	Rectangular	$CP_{IBP}$	$\frac{d_{bar}}{\sqrt{12}}$
$u_{trazBar}$	Normal	$CP_{IBP}$	$\frac{traz_{bar}}{k}$
$u_{derBar}$	Rectangular	$CP_{IBP}$	$\frac{der_{bar}}{\sqrt{3}}$
$u_{dPAT}$	Rectangular	-1	$\frac{d_{PAT}}{\sqrt{12}}$

<b>Aporte</b>	<b>Distribución</b>	<b>Coefficiente de sensibilidad (Cs)</b>	<b>Incertidumbre típica (u)</b>
$u_{trazPAT}$	Normal	-1	$\frac{Traz_{PAT}}{k}$
$u_{derPAT}$	Rectangular	-1	$\frac{der_{PAT}}{\sqrt{3}}$
$u_{dT_{er}}$	Rectangular	$-CT_{PAT}$	$\frac{d_{ter}}{\sqrt{12}}$
$u_{trazTer}$	Normal	$-CT_{PAT}$	$\frac{traz_{ter}}{k}$
$u_{derTer}$	Rectangular	$-CT_{PAT}$	$\frac{der_{ter}}{\sqrt{3}}$
$u_{dBar}$	Rectangular	$-CP_{PAT}$	$\frac{d_{bar}}{\sqrt{12}}$
$u_{trazBar}$	Normal	$-CP_{PAT}$	$\frac{traz_{bar}}{k}$
$u_{derBar}$	Rectangular	$-CP_{PAT}$	$\frac{der_{bar}}{\sqrt{3}}$
$u_{fUni}$	Rectangular	-1	$\frac{f_{Uni}}{\sqrt{12}}$
$u_{fEst}$	Rectangular	-1	$\frac{f_{Est}}{\sqrt{12}}$
$u_s$	Normal	-1	s
Incertidumbre típica combinada			$u(E_{IBP}) = \sqrt{\sum_i^n Cs^2 u^2}$
Incertidumbre expandida			$U(E_{IBP}) = u(E_{IBP}) * k$

**Fuente:** Elaboración propia basada en INTE/ISO/IEC Guía 98-3:2017.

La fórmula desarrollada para el cálculo de la incertidumbre típica del error será:

$$u(E_{IBP}) = \sqrt{\begin{aligned} & \left(\frac{\text{resolución IBP}}{\sqrt{12}}\right)^2 + (CT_{IBP})^2 \left(\frac{\text{resolución term}}{\sqrt{12}}\right)^2 + (CT_{IBP})^2 \left(\frac{U_{term}}{k}\right)^2 \\ & + (CT_{IBP})^2 \left(\frac{\text{deriva term}}{\sqrt{3}}\right)^2 + (CP_{IBP})^2 \left(\frac{\text{resolución bar}}{\sqrt{12}}\right)^2 \\ & + (CP_{IBP})^2 \left(\frac{U_{bar}}{k}\right)^2 + (CP_{IBP})^2 \left(\frac{\text{deriva bar}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \\ & (-1)^2 \left(\frac{\text{resolución patrón}}{\sqrt{12}}\right)^2 + (-1)^2 \left(\frac{U_{patron}}{k}\right)^2 + (-1)^2 \left(\frac{\text{deriva patrón}}{\sqrt{3}}\right)^2 \\ & (-CT_{PAT})^2 \left(\frac{\text{resolución term}}{\sqrt{12}}\right)^2 + (-CT_{PAT})^2 \left(\frac{U_{term}}{k}\right)^2 + (-CT_{PAT})^2 \left(\frac{\text{deriva term}}{\sqrt{3}}\right)^2 \\ & + (-CP_{PAT})^2 \left(\frac{\text{resolución bar}}{\sqrt{12}}\right)^2 + (-CP_{PAT})^2 \left(\frac{U_{bar}}{k}\right)^2 \\ & + (-CP_{PAT})^2 \left(\frac{\text{deriva bar}}{\sqrt{3}}\right)^2 + (-1)^2 \left(\frac{\text{estabilidad}}{\sqrt{12}}\right)^2 + (-1)^2 \left(\frac{\text{uniformidad}}{\sqrt{12}}\right)^2 \\ & + (-1)^2 (s)^2 \end{aligned}}$$

### Ecuación 22: Cálculo de la incertidumbre típica del error

**Fuente:** Elaboración propia basada en INTE/ISO/IEC Guía 98-3:2017.

Una vez que se calcule la incertidumbre típica combinada, se calculará la incertidumbre expandida con una probabilidad de cobertura de aproximadamente 95 %.

$$U(E_{IBP}) = u(E_{IBP}) * k$$

### Ecuación 23: Cálculo de la incertidumbre expandida con probabilidad de cobertura del 95 %

**Fuente:** Elaboración propia basada en INTE/ISO/IEC Guía 98-3:2017

Se utilizó un valor de k igual a 2.

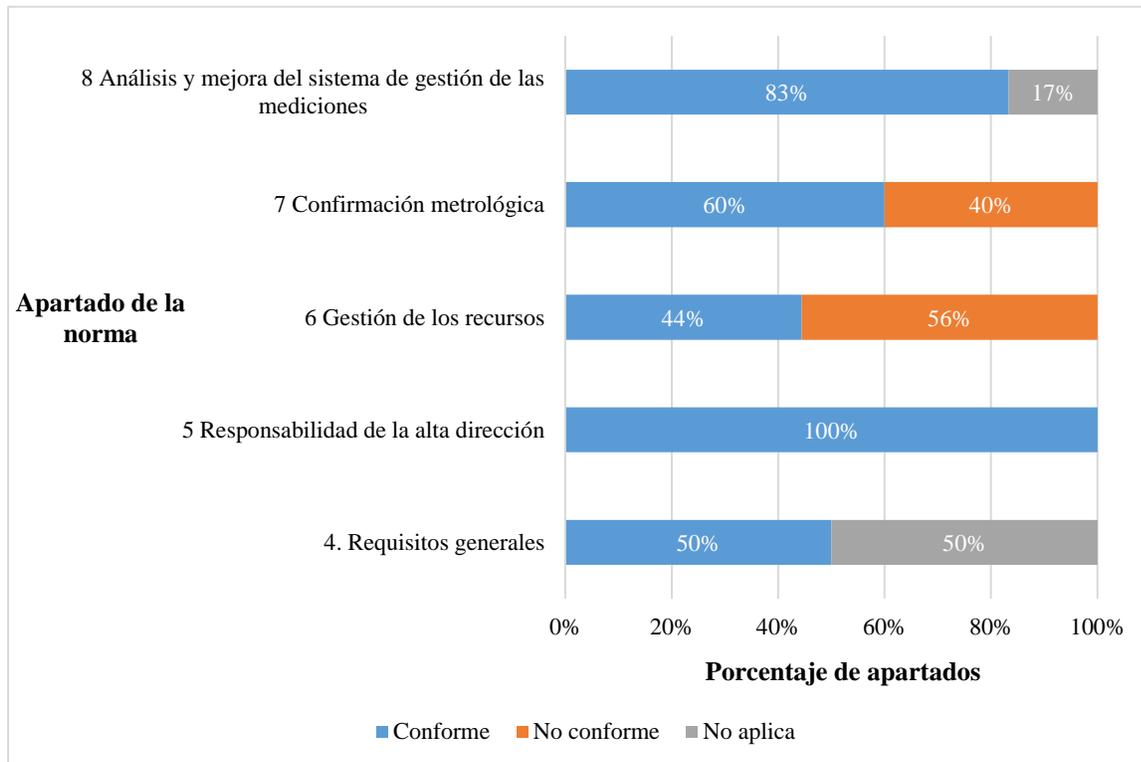
El cálculo de error y de incertidumbre expandida se realizó en cada punto de prueba elegido.

## 4.5 Evaluación del cumplimiento del sistema de gestión de la calidad del Laboratorio de Metrología con la norma INTE-ISO 10012:2003

Para conocer los elementos facilitadores de un sistema de gestión de las mediciones que asegure la trazabilidad metrológica de los dispositivos, se evaluó el sistema de gestión de la calidad con respecto a la norma INTE-ISO 10012:2003. Hay que tener presente que, al tener el laboratorio implementado

un sistema de gestión de calidad basado en la norma INTE-ISO/IEC 17025:2005, mucha de la documentación necesaria para cumplir con el sistema de gestión de las mediciones ya se encuentra desarrollada, ya que la norma INTE-ISO 10012:2003 y la norma INTE-ISO/IEC 17025:2005 comparten gran parte de los requisitos.

Inicialmente se aplicó una lista de chequeo (ver Apéndice 1) con los requisitos de la norma INTE-ISO 10012:2003, que arrojaron los siguientes resultados.



**Figura 12. Estado de la conformidad del sistema de gestión de las mediciones del Laboratorio de Metrología de Procame, con la norma de referencia INTE-ISO 10012:2003**

**Fuente:** Elaboración propia.

Como se observa en la figura anterior, se encontraron porcentajes bajos de cumplimiento en el apartado 6 y el apartado 7, que se refieren a gestión de los recursos y a confirmación metrológica.

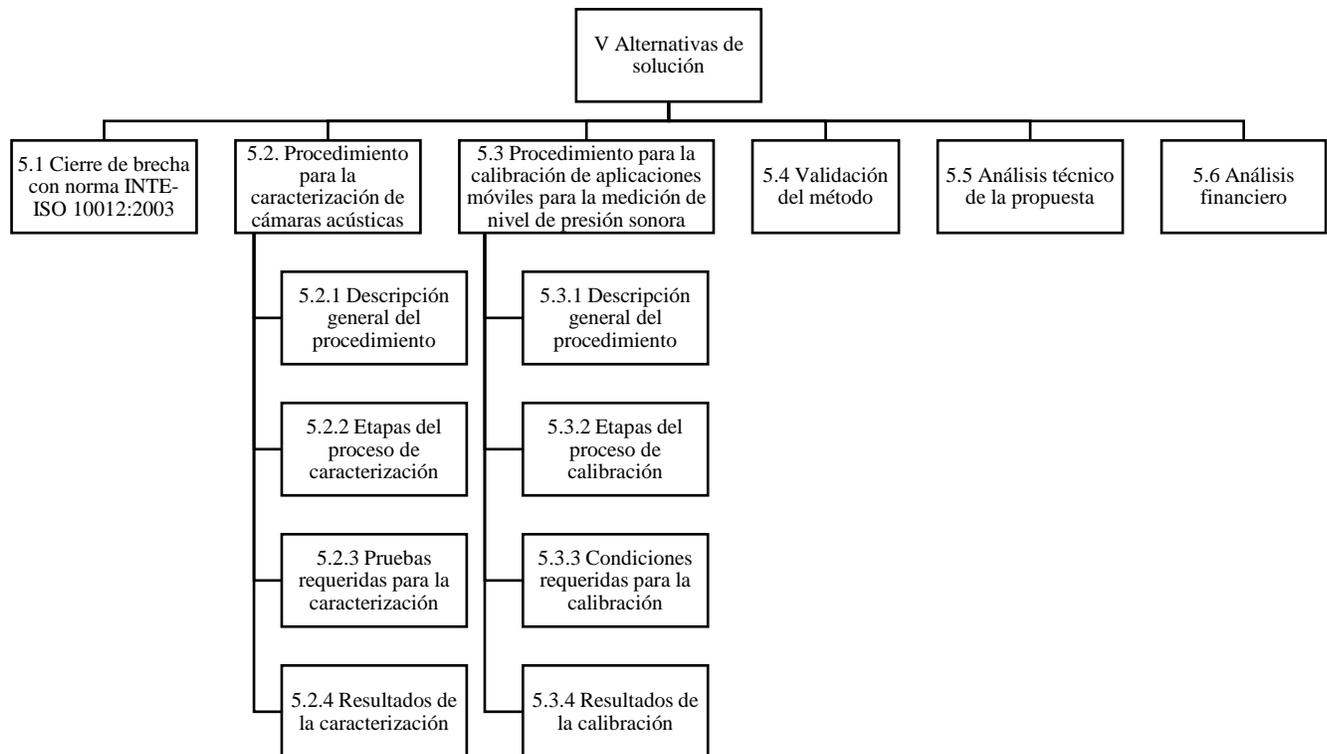
Este porcentaje de cumplimiento se debe principalmente a que no se cuenta con todo el equipamiento necesario para el desarrollo del proceso de medición, por lo que no hay un aseguramiento de los recursos. Además, al no haberse desarrollado los procedimientos y registros necesarios para el proceso de calibración, no es posible asegurar que los procesos sean válidos y que los registros utilizados sean

aptos para su uso, lo que pone en duda la veracidad de los resultados. Además, tampoco es factible asegurar la trazabilidad al Sistema Internacional (SI), al no contar con todo el equipamiento necesario.

Cabe destacar que los apartados de generalidades (apartado 4), responsabilidades de la dirección (apartado 5) y análisis y mejora del Sistema de Gestión de las Mediciones (apartado 8) tienen porcentajes de cumplimiento altos, ya que son requisitos que no obedecen propiamente al proceso de medición y que comparte con la norma INTE-ISO/IEC 17025:2005.

**CAPÍTULO V**  
**ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN**

En este capítulo se establece la propuesta de mejora y su fase de implementación, en el proceso DMAIC corresponde a las etapas de Implementar y Controlar, por lo cual es de suma importancia para el proyecto puesto que va a aportar información trascendental para lograr la propuesta de mejora y que la implementación del proyecto tenga una estabilidad y permanencia que se califiquen como exitosas.



**Figura 13. Estructura del capítulo V: Alternativas de solución**

**Fuente:** Elaboración propia.

### 5.1 Cierre de brecha con la norma INTE-ISO 10012:2003

Basada en los resultados del cumplimiento con la norma INTE-ISO 10012:2003 de calibración de aplicaciones móviles para medir la presión sonora, se desarrolló documentación relacionada con los requisitos que se incumplen, entre la que se encuentra:

- Procedimiento para la calibración de aplicaciones móviles. Típicas para la medición de nivel de presión sonora.
- Registro y hoja de cálculo para la calibración de aplicaciones móviles que midan presión sonora.
- Validación de hoja de cálculo para la calibración de aplicaciones móviles que midan presión sonora.
- Validación del procedimiento de medición para calibrar aplicaciones móviles que midan presión sonora.
- Procedimiento para la caracterización acústica de medios.
- Registro y hoja de cálculo para la caracterización acústica de medios.
- Validación de hoja de cálculo para la caracterización acústica de medios.
- Validación del procedimiento de medición para la caracterización acústica de medios.

Para estas pruebas se cuenta con una cámara acústica diseñada para poder controlar las variables que afecten las mediciones a la hora de calibrar y caracterizar. (Ver apartado de diagnóstico).

## **5.2 Procedimiento para la caracterización de cámaras acústicas**

Con el fin de evaluar las características de la cámara acústica que pueden influir en el resultado de las mediciones que se realicen con ella, se desarrolló un procedimiento para la caracterización acústica de la cámara.

Se decidió realizar un procedimiento de caracterización, y no uno de calibración, debido a que la cámara es el medio que genera las señales de prueba y no se tomarán estas señales como referencia de medio de trazabilidad, ni en el procesamiento de los datos. La indicación de referencia y el medio para generar trazabilidad es el sonómetro patrón.

Esto no quiere decir que la señal que genera la cámara, y las características de su diseño, no puedan influir en los procesos de medición que se realicen; por el contrario, si no se toman en cuenta aspectos como la colocación espacial de los instrumentos o la calidad constante de la señal emitida pueden inducir a errores de medida de gran magnitud.

Tomando en cuenta esto, se decidió evaluar las características temporales de la señal, de manera que sea posible determinar si en procesos de medición de varios minutos la señal es capaz de reproducirse

a lo largo del tiempo o tiene pérdidas significativas. Además, se decidió evaluar la uniformidad de la señal dentro de la cámara acústica, comprobando los posibles efectos que tiene el cambio de posición de los instrumentos dentro del espacio de trabajo de la cámara acústica.

Hay que tener presente que estos elementos implican variabilidad de los datos, y al no ser viable predecir su comportamiento, se toman como valores que aportan incertidumbre en las mediciones que se realizan en la cámara, mas no es posible corregir estos efectos (su esperanza matemática es igual a 0).

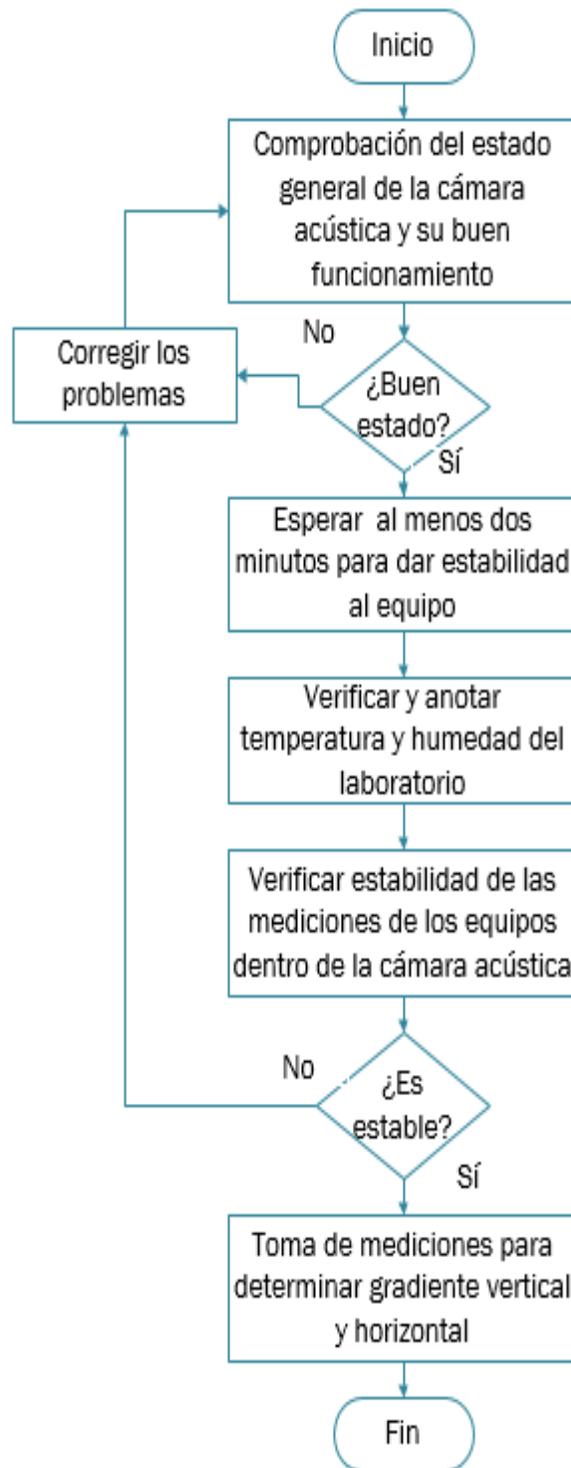
### **5.2.1 Descripción general del procedimiento**

Dentro del procedimiento se consideraron los siguientes apartados:

- Alcance: Describe la aplicación que tiene el procedimiento.
- Términos y definiciones: Enlista las definiciones necesarias para la comprensión e interpretación del procedimiento.
- Condiciones y preparación para la caracterización: Indica las condiciones que se deben cumplir para aplicar el procedimiento de una manera adecuada.
- Equipo y materiales utilizados: Señala los equipos necesarios que el usuario del procedimiento debe poseer para la aplicación de este.
- Descripción de la caracterización: Describe paso a paso el proceso de medición y toma de datos que se debe realizar para proceder a analizarlos.
- Resultados: Expone el procesamiento matemático de los resultados de las mediciones. Incluye la determinación de los parámetros bajo prueba y la determinación de la incertidumbre asociada.
- Referencias: Muestra los documentos en los cuales toma sustento técnico el procedimiento desarrollado.

### **5.2.2 Etapas del proceso de caracterización**

Las etapas del proceso de caracterización de la cámara en síntesis se muestran a través del diagrama de flujo en la figura 14:



**Figura 14. Diagrama de flujo de la etapa de caracterización**

**Fuente:** Elaboración propia.

Dentro de los aspectos a destacar, en el apartado de condiciones y preparación para la caracterización se indica que las condiciones ambientales no pueden situarse en más de 0,5 °C y 5 % de HR; esto se consideró así ya que con esta variación no se verían afectadas las indicaciones de los sonómetros. Considerando que la aplicación del procedimiento implica la toma de datos constante durante periodos extendidos, variaciones significativas en las condiciones ambientales podrían implicar que se tengan que corregir los resultados a condiciones de referencia para poder asegurar la comparabilidad durante todo el periodo de caracterización, asegurando que los cambios se deben propiamente a las condiciones de la cámara y no a la variación de las condiciones ambientales.

### **5.2.3 Pruebas requeridas para la caracterización**

En el proceso de caracterización y resultados se incluyeron las siguientes pruebas:

- Estabilidad: En esta prueba se determina la capacidad que tiene la cámara para reproducir un sonido durante periodos de tiempo especificados, de manera que en caso de que existan pérdidas o ganancias de nivel de presión sonora en la cámara, se puede considerar este efecto en los procesos de medición. Se eligió un lapso de 10 min, ya que se considera que cubre los tiempos de medición que se prevén realizar en la cámara.
- Gradiente horizontal: En vista de que en la cámara se van a realizar los procesos de medición con 2 instrumentos, es necesario evaluar que en ambas posiciones se emita el mismo nivel de presión sonora. Por lo tanto, el fin de esta prueba es evaluar el efecto que posee sobre las mediciones el cambio de posición de los instrumentos, por lo que consta de un periodo de medición y luego el intercambio de posiciones para volver a medir. Se acorta el tiempo de medición con respecto a la prueba de estabilidad, ya que se enfoca en los cambios en el espacio y no en el tiempo, y por la cantidad de datos a generar se considera que es representativo.
- Gradiente vertical: Pretende evaluar el efecto que se produce cuando, por características físicas propias de los instrumentos, no es posible asegurar una misma distancia con respecto a la fuente de emisión sonora. En esta prueba se aleja 1 de los 2 sonómetros de la fuente de emisión, de manera que se pueden determinar las posibles variaciones de este efecto. Se consideró que 1 cm de distancia es suficiente, ya que en la mayoría de los casos la separación entre ambos micrófonos sería aproximadamente 1 cm.

Los efectos debido a la diferencia intrínseca entre las indicaciones de ambos sonómetros y la diferencia entre el nivel de presión acústica entre las posiciones de medición se consideran en los cálculos para restar estos efectos.

#### **5.2.4 Resultados de la caracterización**

Con la caracterización de la cámara acústica se logró determinar el presupuesto de incertidumbre a las diferentes señales de prueba y poder garantizar que se cuenta con medio adecuado para realizar las calibraciones de las aplicaciones móviles. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 16.

**Tabla 16. Presupuesto de incertidumbre en la caracterización de la cámara acústica a las diferentes señales de prueba**

Aportes		94 dB, 250 Hz		94 dB, 1000 Hz		94 dB, 4000 Hz		104 dB, 1000 Hz	
		Incertidumbre típica (dB)	Presupuesto (%)						
Resolución sonómetro 1	finita	0,0	2,5	0,0	7,2	0,0	3,8	0,0	6,1
Resolución sonómetro 2	finita	0,0	2,5	0,0	7,2	0,0	3,8	0,0	6,1
Falta de estabilidad de la cámara acústica		0,0	2,5	0,0	7,2	0,1	11,4	0,1	18,4
Falta de uniformidad vertical de la cámara acústica		0,8	69,5	0,2	42,3	0,6	81,0	0,3	69,4
Falta de uniformidad horizontal de la cámara acústica		0,3	22,9	0,1	36,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Incertidumbre combinada	típica	0,8	100,0	0,2	100,0	0,6	100,0	0,3	100,0
Incertidumbre expandida (K=2, 95 %)		1,7 dB		0,5 dB		1,2 dB		0,7 dB	

**Fuente:** Elaboración propia.

De la caracterización de la cámara contenida en la tabla 16 se extrae que, en todos los casos, los mayores aportes relativos de incertidumbre se deben al gradiente vertical y el gradiente horizontal (uniformidad espacial de la señal al interior de la cámara), por lo que es vital la correcta colocación de los instrumentos.

También es importante decir que la estabilidad (reproducibilidad de la señal en un periodo de tiempo determinado) tiene un aporte relativo muy bajo: en la señal de 104 dB a 1000 Hz fue donde tuvo un mayor aporte a la incertidumbre con 11,4 %. Esto quiere decir que la cámara es capaz de reproducir y mantener una señal de prueba sin variación durante largos periodos (esta prueba se realizó durante 10 min, tomando datos cada 30 s).

De los datos de incertidumbre expandida en las diferentes señales de prueba, es notorio que la cámara tiene mejores características en las señales a 1000 Hz. Si se comparan las señales de 94 dB a las tres frecuencias generadas, en las señales a 125 Hz y 4000 Hz la incertidumbre es incluso tres veces mayor que la señal a 1000 Hz, a pesar de que se le generó el mismo nivel de presión sonora.

### **5.3 Procedimiento para la calibración de aplicaciones móviles para la medición de nivel de presión sonora**

A pesar de que, por las características físicas de los dispositivos móviles, el procedimiento normalizado para sonómetros no se puede aplicar, se desarrolló un procedimiento basado en el que utiliza el Instituto de Salud Pública de Chile para la calibración de sonómetros. Además, se tomaron en cuenta para la medición los factores de influencia identificados en la etapa de diagnóstico.

#### **5.3.1 Descripción general del procedimiento**

El procedimiento se divide en:

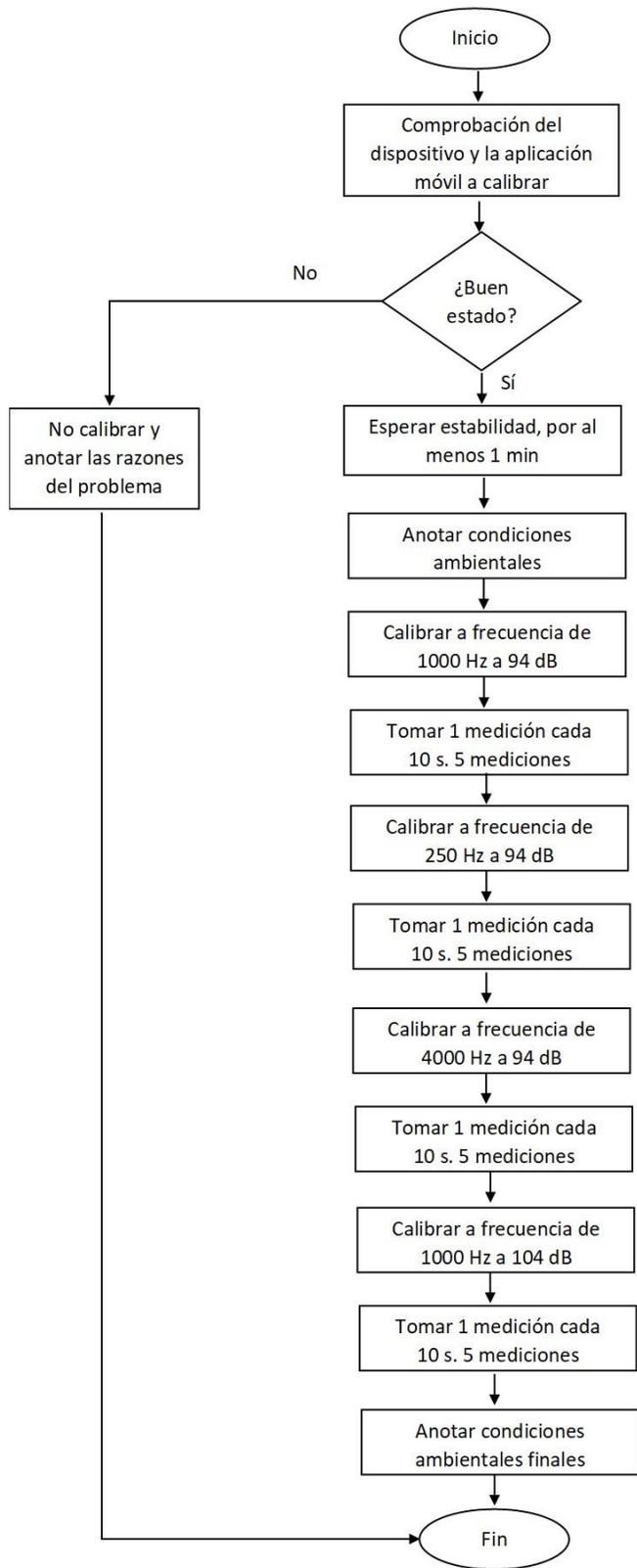
- Alcance: Describe la aplicación que tiene el procedimiento.
- Términos y definiciones: Enlista las definiciones necesarias para la comprensión e interpretación del procedimiento.
- Condiciones y preparación para la caracterización: Indica las condiciones que se deben cumplir para aplicar el procedimiento de una manera adecuada.
- Equipo y materiales utilizados: Señala los equipos necesarios que el usuario del procedimiento debe poseer para la aplicación de este.

- Descripción de la calibración: Describe paso a paso el proceso de medición y toma de datos que se debe realizar para proceder a analizarlos.
- Resultados: Este apartado expone el procesamiento matemático de los resultados de las mediciones. Incluye la determinación de los parámetros bajo prueba y la determinación de la incertidumbre asociada.
- Referencias: Muestra los documentos en los cuales toma sustento técnico el procedimiento desarrollado.

Se siguió esta estructura ya que concuerda con el procedimiento para la gestión documental del Laboratorio de Metrología para el desarrollo de procedimientos de calibración.

### **5.3.2 Etapas del proceso de calibración**

Para mostrar las principales etapas del proceso de calibración, en síntesis, se desarrolló el diagrama de flujo como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 15. Diagrama de flujo del proceso de calibración de aplicaciones móviles que miden nivel de presión sonora**

**Fuente:** Elaboración propia.

### 5.3.3 Condiciones requeridas para la calibración

El proceso de calibración involucra los siguientes factores:

- Repetibilidad del instrumento: Se contempla en el procedimiento la realización de 5 mediciones por punto de medición comprobado. Se consideraron 5 mediciones debido a que es el número de repeticiones más extendido en los procesos de medición, por considerar que refleja el uso normal de esta clase de instrumentos y al ser estadísticamente representativo para el análisis de datos. Al elevarse el número de repeticiones aumenta la exactitud de la medición, aunque también se eleva el costo del proceso. Si se realizan pocas mediciones, la dispersión puede ser mayor.
- Influencia de las condiciones ambientales: Si bien se conoce que magnitudes como la presión y la temperatura influyen en la medición del nivel de presión sonora, no se encontraron especificaciones de los fabricantes sobre tales coeficientes para micrófonos que se utilizan en celulares, lo que impide realizar la corrección de estas variables en el dispositivo bajo prueba. El efecto de variación de las condiciones ambientales se evaluó en la incertidumbre, tomando coeficientes máximos permitidos por la norma INTE/IEC 61094-1:2017 (ver apartado 4.3).

En los sonómetros que se van a utilizar como referencia sí se conocen los coeficientes de presión y temperatura, por lo que se puede estimar la influencia al cambio de las condiciones ambientales.

- Cámara acústica: En la calibración de sonómetros se utilizan calibradores de sonómetros, los cuales permiten el acople del micrófono del sonómetro al calibrador, creando un sello que aísla el instrumento de la señal generada.

Al no ser posible el acople del calibrador a los dispositivos móviles, se desarrolló una cámara que permite generar señales acústicas específicas. Esta cámara está aislada acústicamente, por lo que el ruido externo no va a tener efecto sobre la señal que genere internamente el instrumento.

Este instrumento es solo un medio de comparación entre el sonómetro patrón y el dispositivo bajo calibración, por lo que no requiere trazabilidad metrológica. Sin embargo, al no poder asegurar las mismas condiciones dentro del instrumento, se debe caracterizar en estabilidad y uniformidad.

### 5.3.4 Resultados de la calibración

Una vez desarrollado el método de calibración, se compararon los resultados de las calibraciones de las aplicaciones móviles contra un dosímetro calibrado marca Extech modelo 407355 y certificado de calibración 002-2017 Vi. Las indicaciones del dosímetro patrón fueron corregidas según el certificado de calibración, siendo el error de indicación 0 dB con una incertidumbre expandida asociada de 0,2 dB con probabilidad de cobertura de 95 %. Se presentan los resultados según punto de calibración y frecuencia, iniciando con la señal de 94 dB a 250 Hz:

**Tabla 17.** Resultados de calibración de las aplicaciones móviles con el patrón de referencia a la señal de 94 dB a 250 Hz

Número de dispositivo	Dispositivo	Error de indicación (dB)	Incertidumbre (k=2) [dB]	Error normalizado (EN)
1	Dosímetro patrón	0,0	0,2	Referencia
2	Iphone, NIOSH	-0,9	1,7	0,53
3	Iphone, Sonómetro	1,7	1,7	0,97
4	Samsung S7, Sound Analyzer	-0,7	1,7	0,41
5	Iphone SE, Decibel X	-0,8	1,7	1,33
6	Samsung S7, Decibel X	3,2	1,7	1,86
7	Huawei P9, Decibel X	5,6	1,8	3,06
8	Samsung S7, Sound Meter HQ	2,0	1,8	1,08
9	Huawei P9, Sound Meter HQ	0,1	1,8	0,05

**Fuente:** Elaboración propia.

De la tabla anterior se puede afirmar que, de las ocho aplicaciones móviles evaluadas, seis son estadísticamente similares a los resultados del patrón para la señal de 94 dB a 250 Hz.

Ahora, se procede a presentar los resultados para la señal de 94 dB a 1000 Hz:

**Tabla 18.** Resultados de calibración de las aplicaciones móviles con el patrón de referencia a la señal de 94 dB a 1000 Hz

Número de dispositivo	Dispositivo	Error de indicación (dB)	Incertidumbre (k=2) [dB]	Error normalizado (EN)
1	Dosímetro patrón	0,0	0,2	Referencia
2	Iphone, NIOSH	0,1	0,6	0,16
3	Iphone, Sonómetro	-8,6	0,6	13,63
4	Samsung S7, Sound Analyzer	-1,0	0,6	1,60
5	Iphone SE, Decibel X	-3,5	0,6	0,48
6	Samsung S7, Decibel X	0,2	0,6	0,32
7	Huawei P9, Decibel X	0,6	0,8	0,71
8	Samsung S7, Sound Meter HQ	0,4	0,8	0,45
9	Huawei P9, Sound Meter HQ	-0,9	0,8	1,06

**Fuente:** Elaboración propia.

De la tabla anterior se puede afirmar que, de las ocho aplicaciones móviles evaluadas, cinco son estadísticamente similares a los resultados del patrón para la señal de 94 dB a 1000 Hz.

Ahora, se procede a presentar los resultados para la señal de 94 dB a 4000 Hz:

**Tabla 19.** Resultados de calibración de las aplicaciones móviles con el patrón de referencia a la señal de 94 dB a 4000 Hz

Número de dispositivo	Dispositivo	Error de indicación (dB)	Incertidumbre (k=2) [dB]	Error normalizado (EN)
1	Dosímetro patrón	0,0	0,2	Referencia
2	Iphone, NIOSH	-2,0	1,3	1,52
3	Iphone, Sonómetro	-8,6	1,3	6,81
4	Samsung S7, Sound Analyzer	-5,0	1,2	3,98
5	Iphone SE, Decibel X	-6,5	1,3	1,52
6	Samsung S7, Decibel X	-1,4	1,2	1,13
7	Huawei P9, Decibel X	-1,1	1,4	0,80
8	Samsung S7, Sound Meter HQ	-39,6	2,2	17,79
9	Huawei P9, Sound Meter HQ	-40,5	2,2	18,72

**Fuente:** Elaboración propia.

A la señal de 94 dB a 4000 Hz, solo la aplicación Decibel X instalada en el teléfono Huawei P9 fue estadísticamente similar a los resultados de medida del patrón a la misma señal, y en parte esto se debió a los valores de incertidumbre que estuvieron asociadas al proceso.

Por último, se presentan los resultados para la señal de 104 dB a 1000 Hz

**Tabla 20.** Resultados de calibración de las aplicaciones móviles con el patrón de referencia a la señal de 104 dB a 1000 Hz

Número de dispositivo	Dispositivo	Error de indicación (dB)	Incertidumbre (k=2) [dB]	Error normalizado (EN)
1	Dosímetro patrón	0,0	0,2	Referencia
2	Iphone, NIOSH	0,4	0,8	0,46
3	Iphone, Sonómetro	-18,9	0,8	23,70
4	Samsung S7, Sound Analyzer	-8,1	0,8	10,17
5	Iphone SE, Decibel X	-0,3	0,8	0,53
6	Samsung S7, Decibel X	0,3	0,8	0,42
7	Huawei P9, Decibel X	-2,5	1,0	2,55
8	Samsung S7, Sound Meter HQ	-0,9	1,0	0,94
9	Huawei P9, Sound Meter HQ	-2,8	1,0	2,88

**Fuente:** Elaboración propia.

En la señal de 104 dB a 1000 Hz, cuatro de las ocho aplicaciones evaluadas fueron estadísticamente similares a los resultados de medida del patrón a la misma señal.

Es notable que, en la frecuencia de 4000 Hz, la respuesta de los dispositivos móviles tiene el desempeño más bajo. Esto también se repite en la caracterización de la cámara acústica, ya que con esta señal se obtuvo la segunda incertidumbre más alta.

Sonidos a estas frecuencias son poco frecuentes en la vida cotidiana, ya que son tonos agudos. Sería necesario evaluar la posible aplicación que se les va a dar a los celulares para caracterizar el espectro de frecuencias que se pretenden medir, con miras a evitar este tipo de sonidos.

Donde se obtuvo mejor respuesta por parte de los dispositivos e incluso en la caracterización de la cámara fue en los tonos medios (señales a 1000 Hz). En estos la mayoría de las aplicaciones obtuvieron resultados estadísticamente similares al patrón y se obtuvo la menor incertidumbre de medición. Esto puede estar relacionado a que en estas frecuencias la respuesta de los micrófonos

tiende a ser plana y optimizada, mientras que en otras frecuencias tienden a existir gradientes en la respuesta del micrófono (Sujatha, 2010).

De igual manera se hace evidente que los resultados no solamente van a depender del dispositivo móvil que se utilice, ya que al comparar la misma aplicación en dispositivos diferentes se obtuvieron resultados distintos, y diferentes aplicaciones instaladas en el mismo celular van a responder de manera distinta.

Si bien en muchos casos los resultados no fueron comparables con el patrón, al realizar una calibración se conocería el error de la indicación de las aplicaciones, por lo que estos resultados se pueden corregir. De igual manera, dentro del presupuesto de incertidumbre para todos los casos el aporte debido a la falta de repetibilidad del proceso fue minúsculo (menor al 10 % de la incertidumbre), por lo que estas correcciones serían muy confiables, al variar este promedio muy poco. Vale indicar que el mayor aporte fue la falta de uniformidad de la cámara acústica, con un aporte de incluso 80 %.

#### 5.4 Validación del método

Para comprobar que el método de calibración es apto para el uso previsto, se validó el procedimiento. Dentro de los parámetros contemplados en la validación se definió lo siguiente:

**Tabla 21.** Criterios utilizados para la validación del método

Parámetro	Mecanismo de evaluación	Criterio de aceptación
Veracidad del método	Se compararon los resultados de la calibración de un sonómetro, el cual había sido calibrado por el Laboratorio de Metrología de Procame por medio de un método normalizado, y luego los investigadores lo calibraron mediante el procedimiento desarrollado.	Parámetro de desempeño es el error normalizado, el cual debe ser menor o igual a 1. $EN \leq 1$ .
Precisión	Se evalúa la precisión entre los investigadores por medio de la repetición de una calibración del mismo objeto bajo prueba.	Parámetro de desempeño es el error normalizado, el cual debe ser menor o igual a 1. $EN \leq 1$ .
Condiciones de ejecución	Se cumple con el procedimiento de calibración de referencia.	Cumplimiento con el 100 % de las condiciones establecidas en el procedimiento de calibración.

**Fuente:** Elaboración propia.

La repetibilidad se evaluó repitiendo una señal de prueba de 94 dB a 1000 Hz (señal de referencia según INTE/ISO 61672-1:2015) con la aplicación NIOSH versión 1.0.7.18, instalada en el celular Iphone SE. Luego se evaluó el porcentaje de desviación de los errores obtenidos por ambos investigadores en las mediciones.

Al evaluar la veracidad del método, se compararon los resultados obtenidos para el dosímetro marca Extech modelo 407355 con número de serie 130803499, el cual fue emitido por el Laboratorio de Metrología de Procame, utilizando el procedimiento normalizado. Luego se calibró el dosímetro con el procedimiento desarrollado y se compararon los resultados.

**Tabla 22.** Resultados de la prueba de veracidad del método, evaluado a partir de los resultados de la calibración del dosímetro Extech 407355 con serie 130803499, utilizando dos métodos distintos

Puntos comprobados	Calibración por procedimiento propuesto		Calibración por Laboratorio de Metrología		Error normalizado (EN)
	Error de indicación	Incertidumbre expandida k = 2	Error de indicación	Incertidumbre expandida k = 2	
94 dB, 250 Hz	-0,02	1,7	0,3	0,2	0,19
94 dB, 1000 Hz	0,3	0,5	-0,1	0,2	0,08
94 dB, 4000 Hz	-0,9	1,2	0,0	0,2	0,74
104 dB, 1000 Hz	0,2	0,7	-0,1	0,2	0,41

**Fuente:** Elaboración propia.

Como se observa, para todas las señales de prueba el estadístico de error normalizado fue menor a 1, lo que significa que no existe diferencia significativa entre los resultados obtenidos por el Laboratorio de Metrología y por los investigadores.

En la prueba de precisión entre metrólogos, se repitió una calibración de la aplicación NIOSH versión 1.0.7.18 instalada en el celular Iphone SE. Luego se calibró el dosímetro con el procedimiento desarrollado y se compararon los resultados.

**Tabla 23.** Resultados de la prueba de veracidad entre metrólogos, repitiendo la calibración de la aplicación NIOSH versión 1.0.7.18 instalada en el celular Iphone SE, por dos investigadores

Puntos comprobados	Investigador 1		Investigador 2		Error normalizado (EN)
	Error de indicación	Incertidumbre expandida k = 2	Error de indicación	Incertidumbre expandida k = 2	Error normalizado
dB	dB	dB	dB	dB	
94 dB, 250 Hz	0,0	0,2	0,0	0,1	0,00
94 dB, 1000 Hz	0,2	0,5	0,1	0,5	0,14
94 dB, 4000 Hz	0,3	0,5	0,3	0,5	0,00
104 dB, 1000 Hz	0,4	0,5	0,6	0,5	0,28

**Fuente:** Elaboración propia.

Considerando que, para todas las señales de prueba evaluadas, el resultado del error normalizado es menor a 1, esta prueba se cataloga como satisfactoria.

Durante el proceso de validación, se verificó que se cumpliera con el 100 % de las condiciones especificadas en el procedimiento de calibración, por lo que se considera el cumplimiento como satisfactorio.

Dado que el método es satisfactorio para todos los parámetros de validación evaluados, se considera la validación satisfactoria y, por lo tanto, el método es apto para su uso previsto.

### **5.5 Análisis técnico de la propuesta**

Para determinar la viabilidad del proyecto, se realizó un estudio técnico y un estudio financiero. Con esto se tuvieron claros los recursos necesarios para llevar a cabo el proyecto sin ningún tipo de inconveniente.

**Tabla 24.** Análisis técnico de la propuesta

<b>Requisito</b>	<b>Documentación</b>	<b>Personal</b>	<b>Recursos</b>	<b>Costo</b>
Gestión	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Manual de calidad MC-01</li> <li>- Procedimiento de revisión de solicitudes, ofertas y contratos PGC-02</li> <li>- Procedimiento de revisiones por la dirección PG-08</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta dirección</li> <li>- Persona responsable del sistema de gestión</li> <li>- Personal general del laboratorio</li> </ul>	Con los que cuenta Procame actualmente.	Sin costo adicional.
Recurso humano	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Procedimiento personal PT-01</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Persona responsable técnica</li> <li>- Personas especialistas y/o metrólogos</li> </ul>	Con los que cuenta Procame actualmente.	Sin costo adicional.
Recursos de información	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Procedimiento para la elaboración y control de documentos PGC-01</li> <li>- Procedimiento para la utilización de recursos informáticos PT-04</li> <li>- Procedimiento para el control de los registros PG-01</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Persona responsable del sistema de gestión</li> <li>- Persona responsable técnica</li> </ul>	Con los que cuenta Procame actualmente.	Sin costo adicional.
Recursos, suministros y servicios	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Procedimiento para compra de servicios y suministros PGC-03</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Persona responsable técnica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Computadora</li> <li>- Baterías</li> <li>- Servicios de calibración, mantenimiento y/o ajuste de patrones</li> </ul>	500 000 CRC por año, aproximadamente.
Condiciones ambientales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Procedimiento para instalaciones y condiciones ambientales PT-02</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Persona responsable técnica</li> <li>- Personas especialistas y/o metrólogos</li> </ul>	Con los que cuenta Procame actualmente.	Sin costo adicional.
Equipo de medición	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Procedimiento de mantenimiento y equipos de medición PT-05</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Persona responsable técnica</li> <li>- Personas especialistas y/o metrólogos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 2 sonómetros</li> <li>- 1 termohigrómetro</li> </ul>	Sin costo adicional, pues PROCAME cuenta con estos equipos.

- 1 barómetro
- 1 cronómetro

Requisito	Documentación	Personal	Recursos	Costo
Confirmación metrológica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ficha técnica de equipo de medición</li> <li>- Registros de calibraciones ajustes y mantenimiento</li> <li>- Validación hoja de cálculo y procedimiento de calibración de dispositivos móviles.</li> <li>- Validación hoja de cálculo y procedimiento de caracterización de cámara acústica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Persona responsable técnica</li> <li>- Personas especialistas y/o metrólogos</li> </ul>	Con los que cuenta Procame actualmente.	Sin costo adicional.
Proceso de medición	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Procedimiento para la caracterización de cámaras acústicas</li> <li>- Procedimiento para la calibración de aplicaciones móviles que miden nivel de presión sonora</li> <li>- Procedimiento para aseguramiento de la calidad de las mediciones.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Persona responsable técnica</li> <li>- Personas especialistas y/o metrólogos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cámara acústica</li> <li>- Equipo de medición</li> <li>- Computadora</li> </ul>	Costo de cámara acústica: 168 940 CRC
Mejora continua	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Procedimiento de auditorías internas y/o externas PGC-07</li> <li>- Procedimiento para satisfacción del cliente</li> <li>- Procedimiento de trabajos no conformes, acciones correctivas y preventivas del SGC PGC-05</li> <li>- Procedimiento mejora PGC-07</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Persona responsable del sistema de gestión</li> <li>- Persona responsable técnica</li> <li>- Personas especialistas y/o metrólogos</li> </ul>	Con los que cuenta Procame actualmente.	Costo administrativo: 1 972 079 CRC 22 % de los ingresos se reparten: 12 % Fundación para el Desarrollo Académico de la Universidad Nacional (FUNDAUNA) y 10 % en aspectos administrativos que incluyen servicios básicos y mercadeo.

**Fuente:** Elaboración propia.

## 5.6 Análisis financiero

### 5.6.1 Materia prima

La materia prima que se utilizó para el desarrollo del proyecto únicamente se refiere a la construcción de la cámara acústica. El detalle se presenta a continuación.

**Tabla 25.** Materia prima requerida para la construcción de la cámara acústica

Descripción	Cantidad	Precio unitario (CRC)	Precio total (CRC)
Microcontrolador Arduino Uno	1	6 300	6 300
Amplificador para Arduino	1	11 000	11 000
Display LCD	1	8 500	8 500
Cables de conexión (wire jumper macho-macho)	1	1 372	1 372
Cables de conexión (wire jumper macho-macho)	1	1 372	1 372
Cables de conexión (wire jumper macho-macho)	1	1 372	1 372
Resistencia variable (TRIMPE )	4	115	460
Capacitor electrolítico	5	286	1 530
Capacitor poliéster metalizado (cerámico)	1	230	230
Material MDF	1	6 000	6 000
Altavoz	1	15000	15000
Servicio de corte láser, para MDF	1	2 500	2 500
Adaptador universal 20 voltios 90 watts	1	29 499	29 499
Material de absorción de ruido( SonoFlat 22)	2	10 000	20 000
Spray adhesivo (AXFTSPRAY)	1	13 805	13 805
Vidrio laminado VLAX	1	50 000	50 000
<b>TOTAL</b>			<b>168 940</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

### 5.6.2 Análisis de costos

Para el análisis de costos se va a considerar la etapa de investigación y realizar una proyección a 5 años para conocer si es rentable a este plazo.

Para el desarrollo de este proyecto se van a necesitar 2 personas que trabajen paralelamente 5 h a la semana en investigación y desarrollo. Se considera un salario de 76 000 CRC al mes, de acuerdo con la escala salarial de un técnico del Laboratorio de Metrología de la Universidad Nacional.

Luego de que se desarrolle el proyecto se considera que solo son necesarias dos personas para cubrir el mantenimiento y la prestación de servicios con la misma jornada, y van a percibir un salario de 76000 CRC al mes.

A partir de los ingresos, se va a considerar un costo de 22 % de los ingresos, de los cuales 12 % corresponden al aporte que se le da a la Fundación para el Desarrollo Académico de la Universidad Nacional (FUNDAUNA) y el restante 10 % a aspectos administrativos como servicios básicos y mercadeo.

Para desarrollar la cámara acústica se considera el costo de la materia prima y el salario de las personas a cargo del desarrollo. Si bien en materia prima se consideró un gasto de 168 940 CRC, se incluye un costo de 300 000 CRC en caso de que sea necesario cambiar algunos materiales o ajustar el diseño.

### **5.6.3 Análisis de ingresos**

Durante la etapa de desarrollo y en las que se enmarca esta propuesta, no se van a tener ingresos del proyecto; sin embargo, se proyectan posibles ingresos luego de concluida esta etapa.

Como ingresos se van a considerar los posibles servicios que se brinden producto del desarrollo del proyecto. Por servicio se van a cobrar 20 000 CRC. Se realiza una proyección de 20 servicios al mes considerando la posibilidad de realizar mapas acústicos a nivel municipal con dispositivos móviles. Además, se considera un aumento en el precio de la calibración de 10 % anual, para satisfacer elementos como la depreciación y otros.

### **5.6.4 Flujo neto efectivo**

Basado en la información del proceso, se realizó un análisis de flujo neto efectivo a un plazo de 5 años.

Considerando los costos, se estima una inversión de:

**Tabla 26.** Cálculo de flujo de caja para el proceso de trazabilidad metrológica para aplicaciones móviles que miden nivel de presión sonora

<b>RUBRO</b>	<b>INVERSIÓN</b>	<b>AÑO 1</b>	<b>AÑO 2</b>	<b>AÑO 3</b>	<b>AÑO 4</b>	<b>AÑO 5</b>
Ingresos (+) (CRC)	0	2 654 760	5 487 878	8 160 684	10 705 238	13 147 192
Costo de producción (-)(CRC)	2 124 000	1 896 960	1 969 920	2 042 880	2 115 840	2 188 800
Utilidad marginal (CRC)	-2 124 000	757 800	3 517 958	6 117 804	8 589 398	10 958 392
Costos administrativos (-)(CRC)	0	398 214	823 182	1 224 103	1 605 786	1 972 079
Costos de ventas (-)(CRC)	0	132 738	274 394	408 034	535 262	657 360
Utilidad (CRC)	-2 124 000	226 848	2 420 383	4 485 667	6 448 350	8 328 954
Depreciación (+)(CRC)	21 240	18 970	19 699	20 429	21 158	21 888
Flujo neto efectivo (FNE) (CRC)	-2 145 240	207 878	2 400 684	4 465 238	6 427 192	8 307 066

**Fuente:** Elaboración propia

CAPÍTULO VI  
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 6.1 Conclusiones

- A partir de los principales hallazgos y su análisis, se concluye que el presente proyecto alcanza el objetivo general de la investigación, ya que se estableció una propuesta de modelo de gestión metrológica para aplicaciones móviles utilizadas en la medición de ruido ambiental u ocupacional, específicamente en la determinación de los niveles de presión sonora. Con ello, se asegura la trazabilidad de los resultados, mediante la ejecución de acciones sistemáticas y controladas.
- A partir del diagnóstico del modelo de cálculo requerido para la calibración de la presión sonora de las aplicaciones móviles, se pudo evidenciar que la cámara acústica es el componente que contribuye con mayor magnitud a la incertidumbre de la medición, representando, para todas las señales y frecuencias de medición, entre el 69 % y 93 % del presupuesto de incertidumbre, debido específicamente a la falta de uniformidad vertical y horizontal de la cámara acústica.
- Se creó un sistema de gestión metrológica con base en la norma INTE-ISO 10012:2003, aplicable a la medición de niveles de presión sonora. Es viable su implementación en el laboratorio de Metrología de Procame, ya que el sistema de gestión actual de este organismo funge como base para incorporar documentación técnica elaborada a partir de este proyecto de investigación; además, la cámara acústica diseñada permite la calibración de aplicaciones móviles utilizando el dosímetro de ruido patrón del laboratorio, y el diseño del proceso de medición permite cuantificar la incertidumbre adecuadamente.
- Se demostró que la medición de presión sonora de las aplicaciones móviles presenta una alta precisión a señales fijas de frecuencia, por lo que, al utilizar los resultados de una calibración, las correcciones que se realicen a la medición de los equipos son confiables.
- El modelo de gestión metrológica propuesto es técnicamente viable. El laboratorio de Metrología de Procame cuenta con recurso humano competente para ejecutar la calibración de aplicaciones móviles; además, dicho ente opera con infraestructura y equipo de medición con características apropiadas para el modelo, y en conjunto con la cámara acústica y documentación técnica elaboradas en este proyecto, conforma un sistema con capacidad técnica para brindar resultados confiables.

- La implementación asociada a la elaboración de la cámara acústica, y los respectivos procedimientos de caracterización, calibración y validación, son componentes esenciales para el correcto funcionamiento del modelo de gestión metrológica propuesto, y permiten llevar a cabo de forma objetiva y sistemática el servicio de calibración de la presión sonora de aplicaciones móviles.
- La viabilidad comercial de la propuesta se fundamenta en un análisis de costos e ingresos, para una proyección a 5 años de funcionamiento. En el año contemplado de inversión el flujo neto efectivo fue negativo, sin embargo, en ninguno de los 5 años de operación proyectados se presentaron flujos de efectivo negativos, cerrando con un superávit acumulado al final del año 5 superior a 8,3 millones CRC, lo cual se considera altamente favorable.
- Las aplicaciones móviles que miden el nivel de presión sonora representan una gran oportunidad para los usuarios al ofrecer mediciones rápidas a bajo costo.
- Con la implementación de esta propuesta, el Laboratorio de Metrología de Procame contará con un servicio de calibración de la presión sonora de dispositivos móviles, con características de precisión y exactitud adecuadas y controlables, y bajo un modelo de gestión metrológica que puede incorporarse en su sistema de gestión. Además, los clientes de este organismo de evaluación de la conformidad podrán disponer de un servicio confiable y apegado a un presupuesto accesible.

## **6.2 Recomendaciones**

- Es necesario realizar la misma determinación a las aplicaciones instaladas en el mismo teléfono, para verificar si los comportamientos se mantienen a través del tiempo o si varían.
- Es necesario mejorar el diseño de la cámara acústica para disminuir los cambios de la señal en el espacio interno de la cámara. Esto significó en el proceso de calibración hasta el 80 % de la incertidumbre, por lo que, disminuyendo esto, se puede disminuir la incertidumbre de manera significativa.
- Se recomienda probar la misma aplicación móvil en diferentes ejemplares del mismo modelo de dispositivo móvil, con el fin de establecer si existen diferencias significativas en los resultados obtenidos.

- Con base en los resultados obtenidos, se podría desarrollar una aplicación que tenga un desempeño óptimo en todas las señales de prueba, con el fin de que sea posible utilizarla en cualquier situación con un nivel de exactitud adecuado para el uso previsto.

# BIBLIOGRAFÍA

## Bibliografía

- Alvarado, H. y Batadero, C. (2008). Significado del teorema central del límite en textos universitarios de Probabilidad y Estadística. *Estudios Pedagógicos XXXIV N2*, Santiago: Universidad Austral de Chile.
- Amazon (2018). Amplifiers. Recuperado de <https://www.amazon.com/DROK-Amplifier-Bluetooth-Headphone-Protective/dp/B074FR4B7H>
- American National Standards Institute - ANSI (1971). *SI.4. Specification for sound level meters*. Estados Unidos.
- Arduino (s.f.). Arduino Products. Recuperado de [www.arduino.cc/en/Main/Products](http://www.arduino.cc/en/Main/Products)
- Arduino.cl (s.f.). ¿Qué es Arduino? Recuperado de <http://arduino.cl/que-es-arduino/>
- Asamblea Legislativa de Costa Rica (2002). Ley No. 8279. Sistema Nacional para la Calidad. *La Gaceta* No. 96, 21 de mayo de 2002. Costa Rica.
- Auralex (2018). Auralex acustics. Recuperado de <https://www.auralex.com/product/>
- Avacab Audiovisuales S.L. (2013). Etapas de potencia (Básico I). Recuperado de <http://avacablog.avacab-online.com/etapas-de-potencia-basico-i/>
- Cabrera, J. (2010). *Acústica y fundamentos del sonido*. Bogotá: Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). Recuperado de [https://www.arauacustica.com/files/publicaciones\\_relacionados/pdf\\_esp\\_377.pdf](https://www.arauacustica.com/files/publicaciones_relacionados/pdf_esp_377.pdf)
- Centro Español de Metrología (2012). *Vocabulario Internacional de Metrología: Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados*. Madrid.
- Cerdeño, E. (2013). Evolución y revolución en la telefonía. *Trébol*, 65, 17-29. Madrid: MAPFRE.
- Chinchilla, A., Guerra, G. & Corrales, F. (2017). *Guía trabajos finales de graduación, tesinas y tesis en ciencias sociales*. Costa Rica: Universidad Hispanoamericana.
- Composán (2017). *Manual de aislamiento acústico*. Recuperado desde: [ftp://ftp.cype.net/documentaciontecnica/composan/composan\\_acustica.pdf](ftp://ftp.cype.net/documentaciontecnica/composan/composan_acustica.pdf).

- Cuello, J. & Vittone, J. (2013). *Diseñando apps para móviles*. Disponible en [https://www.academia.edu/29279363/Dise%C3%B1ando\\_apps\\_para\\_m%C3%B3viles](https://www.academia.edu/29279363/Dise%C3%B1ando_apps_para_m%C3%B3viles)
- Enríquez, J. y Hernando, S. (2013). Usabilidad en aplicaciones móviles. *Revista de Informes Científicos-Técnicos (ICT-UNPA)*. Argentina: Universidad Nacional de la Patagonia Austral. Recuperado desde [ict.unpa.edu.ar/journal/index.php/ICTUNPA/article/view/ICT-UNPA-62-2013](http://ict.unpa.edu.ar/journal/index.php/ICTUNPA/article/view/ICT-UNPA-62-2013)
- Everest, F. (2001). *The Master Handbook of Acoustics*. 4ª ed. México D.F.: McGraw-Hill.
- Extech Instruments (s.f.). *Manual de usuario. Dosímetro de ruido con interfaz para PC. Modelo 407355*. Estados Unidos.
- Fombona, J., Pascual, M. & Ferreira, M. (2012). Realidad aumentada, una evolución de las aplicaciones de los dispositivos móviles. *Píxel-Bit. Revista de Medios y Educación*, 41(1), 97-210. Universidad de Sevilla.
- Gitman, L. & Zutter, C. (2012). *Principios de Administración Financiera*. México: Pearson Educación.
- Hernández, H., Martínez, D. y Cardona, D. (2015). Enfoque Basado en Procesos como estrategia de dirección para las empresas de transformación. *Saber, Ciencia y Libertad*. Cartagena, Colombia: Universidad Libre.
- Hernández, S., Fernández, C. & Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación*. 6ª edición. México D.F.: McGraw-Hill.
- Instituto de Salud Pública de Chile (ISPCH) (2013). IT 512.03-005 *Instructivo calibración de sonómetros*. Chile.
- INTE-ISO 10012:2003. Sistema de gestión de las mediciones. Requisitos para los procesos de medición y los equipos de medición. Costa Rica: INTECO
- INTE-ISO Guía 98-3. (2008). *Incertidumbre de medida - Parte 3: Guía para la expresión de la incertidumbre de medida*. Costa Rica: INTECO.
- INTE-ISO 1996-2 (2009). *Acústica. Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental Parte 2: Determinación de los niveles de ruido ambiental*. Costa Rica: INTECO.

- INTE/IEC 61094-1:2017. *Micrófonos de medida. Parte 1: Especificaciones para los micrófonos patrones de laboratorio*. Costa Rica: INTECO.
- INTE/IEC 61672-1:2015. *Sonómetros. Especificaciones*. Costa Rica: INTECO.
- Jaramillo, A. (2007). *Acústica: La ciencia del sonido*. Medellín: Fondo Editorial ITM.
- Ministerio de Planificación (2014). *Plan nacional de desarrollo 2015-2018*. Costa Rica: Autor.
- Montejano, R. (2017). *Materiales acústicos*. Recuperado desde <https://analfatecnicos.net/archivos/28.MaterialesAcusticos.pdf>
- Moser, M. & Barros, J. (2009). *Ingeniería acústica: Teoría y aplicaciones*. 2<sup>a</sup> ed. Nueva York: Springer.
- National Conference of Standards Laboratories (NCSL) (2007). *Calibration Procedures Requirements*. Estados Unidos: NCSL International.
- Organización Internacional de Metrología Legal (2013). *Vocabulario internacional de términos en metrología legal (VIML)*. París, Francia.
- Orozco, G. (2017). *Elaboración de un sistema de gestión de las mediciones conforme a la norma INTE-ISO 10012:2003 para el muestreo, análisis y cálculo del contenido de gases disueltos en fluidos dieléctricos realizados por un laboratorio de ensayo*. (Tesis de Licenciatura). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Pérez, H. y Monge, A. (2011). *Propuesta sobre la mejora y optimización del confort acústico de las salas de espera del Hospital San Juan de Dios*. (Tesis de licenciatura). Universidad de Costa Rica.
- Peuckert, J.; Mangelsdorf, A. & Lopes de Souza, T. (2014). Infraestructura de la calidad e innovación. En Gonçalves, J., Göthner K.C. & Rovira, S. (editores): *Midiendo el impacto de la infraestructura de la calidad en América Latina: experiencias, alcances y limitaciones*. Santiago de Chile: CEPAL.

- Piedrahita, Y. & Fajardo, F. (2012). Construcción de una cámara anecoica para la caracterización de la pérdida de transmisión sonora. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 34(4). São Paulo: Sociedade Brasileira de Física.
- Poder Ejecutivo (2016). Alcance digital N°9 Decreto N°39428-S Reglamento para el control de la contaminación por ruido. Diario Oficial La Gaceta.
- Presidencia de la República de Costa Rica (2000). Decreto 28718-S. Reglamento para el control y la contaminación por ruido. Recuperado de [http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm\\_texto\\_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=45468&nValor3=91433&strTipM=TC](http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=45468&nValor3=91433&strTipM=TC)
- Presidencia de la República de Costa Rica (2005). Decreto 32692-S. Procedimientos para la medición de ruido. *La Gaceta* 201, 19-10-2005. Recuperado de <http://www.imprenal.go.cr>
- Programa de Estudios en Calidad, Ambiente y Metrología (Procame) (s.f.). *R-9 Diseño de confinamiento acústico*. Heredia, Universidad Nacional.
- Programa de Estudios en Calidad, Ambiente y Metrología (Procame) (2016). *MC-01 Manual de calidad*. Heredia, Universidad Nacional.
- Procuraduría General de la República (2018). *Sistema Costarricense de Información Jurídica*. Recuperado de: [http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm\\_texto\\_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=45468&nValor3=91433&strTipM=TC](http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=45468&nValor3=91433&strTipM=TC)
- Ramos, A. (2009). *Medidas de ruido*. Universidad de Granada. Recuperado desde [http://www.ugr.es/~ramosr/CAMINOS/conceptos\\_ruido.pdf](http://www.ugr.es/~ramosr/CAMINOS/conceptos_ruido.pdf)
- Rodríguez (2006, 16 de julio). Ruido en la Gran Área Metropolitana creció un 40%. *La Nación*. Recuperado desde <https://www.nacion.com/ciencia/salud/ruido-en-la-gran-area-metropolitana-crecio-un40/BZF2A2DDQBEFDAURESYEJCFETM/story/>
- Ruiz, X. (2012). *Guía Análisis de Brechas*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Salinas, M. (2006). Ruido laboral - Efecto del ruido en las UCI Neonatales. *Revista Ciencia y Tecnología*, 20.

- Sánchez, A. (2010). *Modelo de aislamiento y acondicionamiento acústico para tres de los sectores que presentan diferentes niveles de ruido en las aulas de clase del CED José Asunción Silva*. (Tesis inédita de Ingeniería). Universidad de San Buenaventura, Bogotá, Colombia.
- Sauma, P. (2015). Bienestar. *Plan nacional de ciencia, tecnología e innovación*, 58-60.
- Sujatha, C. (2010). *Vibration and Acoustics: Measurement and Signal Analysis*. Acoustic transducers. Recuperado de: <https://www.accessengineeringlibrary.com.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/browse/vibration-and-acoustics-measurement-and-signal-analysis/c9780070148789ch12?s.num=16&start=10&q=acoustic#c9780070148789ch12lev1sec01>
- Universidad Estatal a Distancia (2016). *Guía para la presentación del informe escrito del trabajo final de graduación (TFG)*. Costa Rica: Autor.

# APÉNDICES

**Apéndice 1. Evaluación del sistema de gestión de la calidad del Laboratorio de Metrología contra la norma INTE-ISO 10012:2003.**

**Tabla 27.** Lista de chequeo según los requisitos de la norma INTE/ISO 10012:2003 para el proceso de calibración de aplicaciones móviles que miden nivel de presión sonora, en el laboratorio de metrología

<b>Apartado</b>	<b>Requisito</b>	<b>Cumplimiento (1=cumple, 0=no cumple, NA=no aplica)</b>	<b>Observaciones</b>
<b>4 Generales</b>	La organización debe establecer el alcance del sistema de gestión de las mediciones.	1	Se establece el alcance para el proceso de calibración de aplicaciones móviles para la medición de nivel de presión sonora.
	Se realizan los cambios de acuerdo al sistema de gestión de las mediciones.	NA	Se considera que no aplica, ya que se va a proponer la implementación para el sistema de gestión de las mediciones.
<b>5 Responsabilidad de la alta dirección</b>	Se debe definir la función metrológica, y asegurarse de que se disponen de los recursos necesarios.	1	NA
	Se determinan los requisitos metrológicos del cliente.	1	Este apartado depende del cliente, y se tomará en cuenta en cada servicio.
	Se cumple con los requisitos metrológicos del cliente.	1	Para esto, previo a los servicios se analiza si el laboratorio puede cumplir los requisitos.

	Puede demostrar cumplimiento de los requisitos del cliente.	1	Para esto se analizan previamente los requisitos del cliente, y se le informa sobre posibles desviaciones.
	Se definen objetivos de calidad.	1	Existen objetivos de calidad definidos.
	Se realizan revisiones sistemáticas del sistema a intervalos planificados.	1	Se realiza una revisión por la dirección al año según el PGC-08.
<b>6 Gestión de los recursos</b>	Se definen y documentan las responsabilidades para todo el personal.	1	Existe un manual de puestos donde se documentan todas las responsabilidades.
	Se debe asegurar que todo el personal demuestre aptitud para efectuar las tareas que se le asignen. Además se debe asegurar la formación y su eficacia, así como el impacto de sus actividades dentro del sistema de gestión.	1	Para esto se realizan evaluaciones del personal y calibraciones supervisadas.
	Los procedimientos se documentan en la extensión necesaria y se validan para asegurar su adecuada aplicación. Los cambios deben ser autorizados.	0	No se cuenta con un procedimiento para el proceso de calibración de aplicaciones móviles.

	El software utilizado en los procesos de medición y en los cálculos se debe documentar y validar.	0	No se cuenta con un software para el proceso de calibración de aplicaciones móviles.
	Se mantienen los registros con la información necesaria para el funcionamiento del sistema de gestión de las mediciones.	0	No se han desarrollado todos los registros necesarios para el proceso de medición.
	Se identifican los procedimientos técnicos y el equipo utilizado en el proceso de medición.	0	No se han identificado todos los equipos necesarios para el proceso de medición.
	Todos los equipos para satisfacer el sistema de gestión de las mediciones deben estar disponibles, y con un estado de calibración válido.	0	No se cuenta con todos los equipos necesarios para el proceso de medición.
	Se deben documentar las condiciones ambientales requeridas para el funcionamiento eficaz de los procesos de medición.	1	Existen registros de las condiciones ambientales del laboratorio.

	Se deben documentar los requisitos para productos y servicios externos para el sistema de gestión de las mediciones.	1	Se cuenta con un procedimiento de compras para este fin.
<b>7 Confirmación metrológica</b>	La confirmación metrológica debe ser diseñada para asegurar el cumplimiento de las especificaciones del proceso de medición. Se debe identificar el estado del equipo.	1	Existe un procedimiento para asegurar el cumplimiento de los requerimientos: PT-05.
	Los intervalos de confirmación metrológica deben ser determinados, revisarse y ajustarse.	1	Existe el procedimiento PT-08 donde se determinan los intervalos de calibración y se registran los datos de deriva; de ser necesario, se ajusta.
	Los dispositivos de ajuste de los equipos deben sellarse en caso de que afecten el resultado.	1	NA
	Los registros de confirmación metrológica deben estar fechados y ser aprobados por una persona autorizada.	1	Se verifica el estado de confirmación, se identifica el equipo. El responsable aprueba los procesos de verificación.
	Los requisitos del proceso deben determinarse.	1	Se determinan de acuerdo al cliente.

	El proceso debe diseñarse para impedir resultados erróneos y la rápida detección de deficiencias.	1	Para esto existe un procedimiento para la detección de trabajos no conformes, además de procesos de aseguramiento de la calidad de las mediciones.
	Se debe controlar que el proceso se lleve a cabo con equipo confirmado, procedimientos validados, disponibilidad de recursos de información y personal competente.	0	No se cuenta con todo el equipo necesario. Al no existir procedimiento, no se encuentra validado.
	Se debe mantener registros de los procesos de medición.	0	No se ha desarrollado el registro para el proceso de medición.
	Se debe estimar la incertidumbre de cada proceso de medición.	0	Al no existir procedimiento, no se estima la incertidumbre del proceso.
	Se debe asegurar que todos los procesos sean trazables al Sistema Internacional (SI).	0	Al no contar con el equipo necesario ni el procedimiento, no se puede asegurar la trazabilidad al SI.
<b>8 Análisis y mejora del sistema de gestión de las mediciones</b>	Se debe utilizar la auditoría y el seguimiento para asegurar la adecuación del sistema de gestión de las mediciones.	NA	Al no estar implementado el proceso, no se puede realizar auditoría. Sin embargo, se tiene establecida la programación para auditorías.

	<p>Se debe asegurar la detección de no conformidades y la toma de acciones. Además se debe establecer la corrección apropiada de acuerdo a la magnitud.</p>	1	<p>Existe un procedimiento para la detección y tratamiento de no conformidades.</p>
	<p>Cualquier proceso de medición que se sepa o se sospeche que genera resultados incorrectos, debe ser identificado adecuadamente. Se deben tomar las acciones correctivas necesarias.</p>	1	<p>Existe un procedimiento para la detección y tratamiento de trabajos no conformes.</p>
	<p>Cuando un equipo no sea apto para el uso, debe identificarse como tal. Se deberán identificar las posibles consecuencias y volverlo a confirmar metrológicamente.</p>	1	<p>El laboratorio cuenta con un procedimiento para verificar el estado de los equipos y para asegurar su aptitud para el uso.</p>
	<p>Cuando un elemento del sistema de gestión de las mediciones no cumpla con los requisitos especificados, debe actuarse para identificar la causa y eliminar la desviación. Se debe verificar la eficacia.</p>	1	<p>El laboratorio cuenta con un procedimiento para el tratamiento y el seguimiento de las no conformidades y las acciones preventivas.</p>

	Se deben tomar acciones para eliminar posibles causas de no conformidades potenciales. Las acciones deben ser adecuadas para el posible efecto.	1	El laboratorio cuenta con un procedimiento para el tratamiento y el seguimiento de las no conformidades y las acciones preventivas.
--	---	---	---

## **Apéndice 2. Procedimiento para la caracterización de cámaras acústicas**

1. **Alcance:** Este procedimiento aplica para la caracterización de cámaras que generan señales especificadas de nivel de presión sonora a frecuencias específicas.

2. **Términos y definiciones:** Son de aplicación los términos y definiciones que se incluyen a continuación:

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

**Dispositivo móvil:** Aparatos electrónicos que se clasifican según su pantalla como computadoras portátiles, tabletas, teléfonos móviles, videoconsolas o reproductores de video. Para este procedimiento son de interés los teléfonos móviles.

**Estabilidad acústica:** Diferencia temporal en la generación de una señal acústica en una posición específica en el interior de una cámara acústica, luego de configurar la indicación a la señal de prueba, en un tiempo dado.

**Uniformidad:** Diferencia espacial de la generación de una señal acústica entre dos puntos del espacio de trabajo en el interior de una cámara acústica, luego de configurar la indicación a la señal de prueba, en un tiempo dado. La uniformidad se compone del gradiente vertical y el gradiente horizontal.

**Espacio de trabajo:** Área de la cámara que se utiliza para colocar los instrumentos y realizar las mediciones.

### **3. Condiciones y preparación para la caracterización:**

La calibración se realiza en las instalaciones del Laboratorio de Metrología.

El recinto donde se realiza la caracterización debe ser capaz de mantener las condiciones ambientales en el intervalo comprendido de 18 °C a 24 °C y de 35 % a 60 % de humedad relativa.

Para asegurar que las condiciones ambientales no van a tener afectación en las indicaciones de los instrumentos de medición, la temperatura no podrá variar en 0,5 °C y la humedad relativa no podrá variar en más de 5 % durante el proceso de medición.

Los patrones elegidos deben ser adecuados para el nivel de incertidumbre esperado. En el laboratorio no deben existir vibraciones, fuentes de calor u otra condición que se considere que puede afectar la calidad de los resultados.

#### **4. Equipos y materiales utilizados**

**Cámara acústica:** Medio que permite generar señales acústicas a un nivel de presión sonora determinado y con una frecuencia determinada. Este medio permite aislar acústicamente el interior de manera que las mediciones que se realicen no se vean afectadas significativamente por el ruido externo. Las señales acústicas mínimas a probar son 94 dB, 104 dB y 114 dB y 250 Hz, 1000 Hz y 4000 Hz.

#### **5. Instrumentos para la medición de condiciones ambientales**

Se utilizarán instrumentos para la medición de temperatura ambiental con una incertidumbre expandida no mayor que 1 °C, presión atmosférica con una incertidumbre expandida no mayor que 100 Pa y humedad relativa con una incertidumbre expandida no mayor 5 %.

**Sonómetro:** Instrumento de medición utilizado para determinar el nivel de presión sonora. Para la caracterización se debe disponer de dos sonómetros, y deberán poseer un intervalo de medida adecuado para las señales a probar. No es necesario que los sonómetros se encuentren calibrados.

**Accesorios:** De ser necesario se utilizarán pinceles, brochas o paños de algodón para la limpieza de los instrumentos, así como otros materiales que se consideren necesarios.

#### **6. Descripción de la caracterización**

##### **6.1 Comprobaciones previas**

Se comprobará que la cámara funcione correctamente y no tenga daños físicos visibles. Se debe verificar que el dispositivo genera todas las señales de prueba. Los sonómetros utilizados para realizar

las mediciones deberán mostrar las indicaciones sin ambigüedades, y las funciones esenciales para la medición deberán funcionar. En caso de que estas condiciones no se cumplan, no se podrá realizar la caracterización y se anotarán las razones para esto en el registro de caracterización.

## **5.1 Proceso de caracterización**

Se encenderán todos los instrumentos que se vayan a utilizar en la caracterización, al menos 1 minuto antes de iniciar el proceso de medición.

Se anotan la temperatura y la humedad relativa en el registro de caracterización.

### **5.1.1 Determinación de la estabilidad**

Se inicia colocando 2 sonómetros en la cámara acústica, en la posición donde normalmente se colocarían los instrumentos y el patrón. Se procura que los dos sonómetros se encuentren a la misma distancia de la fuente sonora. Una vez colocados, se debe cerrar la cámara.

Para esta prueba el sonómetro 1 estará en la posición A, y el sonómetro 2 estará en la posición B.

Se configura la señal de prueba en la cámara acústica y se espera un minuto para que todos los instrumentos alcancen la estabilidad con la señal acústica.

Se anotan las indicaciones de los 2 sonómetros en el registro de caracterización al menos cada 30 s en un periodo no menor a 10 min, de manera que se obtengan al menos 20 mediciones de cada sonómetro.

### **5.1.2 Determinación del gradiente horizontal**

Seguidamente se intercambia la posición de los sonómetros de manera que el sonómetro 1 estará en la posición B y el sonómetro 2 estará en la posición A.

Se espera un tiempo de 1 min para que estabilice la señal. Luego se registran las indicaciones de los dos sonómetros cada 30 s por un periodo de al menos 5 min, de manera que se obtengan al menos 10 datos de cada sonómetro.

### **5.1.3 Determinación del gradiente vertical**

Para evaluar el gradiente vertical se dejará el sonómetro 2 (en la posición A) en la posición de referencia; el sonómetro 1 (en la posición B) se aleja 1 cm de la fuente de sonido.

Estando los 2 sonómetros a diferente distancia con respecto a la fuente de sonido se registran las indicaciones de ambos sonómetros al menos cada 30 s durante un periodo no menor a 5 min, de manera que se obtengan al menos 10 datos de cada sonómetro.

## **6. Resultados**

Para los resultados se cuantificarán las características temporales y espaciales de la cámara acústica, que pueden influir en su uso.

### **6.1 Determinación de la estabilidad**

Para evaluar la estabilidad de la cámara acústica, se determinará la mayor diferencia entre las indicaciones de cada sonómetro.

$$\Delta S_1 = I_{Max} - I_{min}$$

$$\Delta S_2 = I_{Max} - I_{min}$$

$$Est = \Delta S_{Max}$$

Donde:

$\Delta S_1$  = diferencia de indicaciones para el sonómetro 1 (dB).

$\Delta S_2$  = diferencia de indicaciones para el sonómetro 2 (dB).

$I_{Max}$  = indicación mayor para el sonómetro evaluado (dB).

$I_{min}$  = indicación menor para el sonómetro evaluado (dB)

$Est$  = valor de estabilidad (dB).

$\Delta S_{Max}$  = diferencia de indicaciones máxima entre el sonómetro 1 y el sonómetro 2 (dB).

### **6.2 Determinación de la uniformidad**

#### **6.2.1 Gradiente horizontal**

Para esta determinación se utiliza el promedio de indicaciones del sonómetro 1 y el sonómetro 2 en la prueba de estabilidad (posición original), y el promedio de indicaciones del sonómetro 1 y el sonómetro 2 en la prueba de gradiente horizontal (posiciones intercambiadas).

Para evaluar el gradiente horizontal se determina si existe diferencia entre la posición A (posición a la izquierda de la cámara) y la posición B (posición a la derecha de la cámara) de la siguiente manera:

$$\Delta H_{AB} = \frac{S_{1A} + S_{2A} - S_{1B} - S_{2B}}{2}$$

Donde:

$\Delta H_{AB}$  = diferencia de nivel de presión sonora entre la posición A y la posición B (dB).

$S_{1A}$  = indicación promedio del sonómetro 1 en la posición A (dB).

$S_{2A}$  = indicación promedio del sonómetro 2 en la posición A (dB).

$S_{1B}$  = indicación promedio del sonómetro 1 en la posición B (dB).

$S_{2B}$  = indicación promedio del sonómetro 2 en la posición B (dB).

En caso de que  $\Delta H_{AB}$  sea positivo, se afirma que la posición A tiene un nivel de presión sonora mayor que la posición B; y si  $\Delta H_{AB}$  es negativa, se interpreta que la posición B tiene un nivel de presión sonora mayor que la posición A.

Debido a esto, se compensa el nivel de presión sonora del sonómetro 1 en la posición A con el valor de  $\Delta H_{AB}$ .

$$I_{S1A} = S_{1A} + \Delta H_{AB}$$

Donde:

$I_{S1A}$  = indicación corregida del sonómetro 1 (dB).

$\Delta H_{AB}$  = diferencia de nivel de presión sonora entre la posición A y la posición B.

$S_{1A}$  = indicación promedio del sonómetro 1 en la posición A (dB).

Luego se calcula la diferencia intrínseca entre las indicaciones de ambos sonómetros de la siguiente manera:

$$\Delta S_{12} = I_{S1A} - S_{2B}$$

Donde:

$\Delta S_{12}$  = diferencia intrínseca entre las indicaciones del sonómetro 1 y el sonómetro 2 (dB).

$I_{S1A}$  = indicación corregida del sonómetro 1 (dB).

$S_{2B}$  = indicación promedio del sonómetro 2 en la posición B (dB).

### 6.2.2 Gradiente espacial

Para el cálculo del gradiente espacial se utilizan los datos de las mediciones realizadas para la prueba de gradiente vertical de ambos sonómetros.

Se calcula el gradiente espacial de la siguiente manera:

$$\Delta H_{EspAB} = S_{V2A} - S_{V1B} + \Delta S_{12}$$

$\Delta H_{EspAB}$  = gradiente espacial de la cámara acústica (dB).

$S_{V2A}$  = indicación promedio del sonómetro 2 en la posición A durante la prueba de gradiente vertical (dB).

$S_{V1B}$  = indicación promedio del sonómetro 1 en la posición B durante la prueba de gradiente vertical (dB).

$\Delta S_{12}$  = diferencia intrínseca entre las indicaciones del sonómetro 1 y el sonómetro 2 (dB).

Debido a que este valor contiene las diferencias verticales y corrige las diferencias horizontales, a partir de este se puede obtener el valor de gradiente vertical.

### 6.2.3 Gradiente vertical

Para obtener el gradiente vertical se utiliza la siguiente expresión:

$$\Delta V = \Delta H_{EspAB} - \Delta H_{AB}$$

$\Delta V$  = gradiente vertical de la cámara (dB).

$\Delta H_{EspAB}$  = gradiente espacial de la cámara acústica (dB).

$\Delta H_{AB}$  = diferencia de nivel de presión sonora entre la posición A y la posición B (dB).

### 6.3 Cálculo de la incertidumbre:

El cálculo de la incertidumbre de medida se realizará de acuerdo a lo establecido en la norma Guía INTE/ISO/IEC 98-3:2017 Incertidumbre de medida - Parte 3: Guía para la expresión de la incertidumbre de medida.

Los componentes de incertidumbre que se expresan a continuación se asocian a todo el proceso de caracterización de la cámara para cada señal de prueba.

Incertidumbre típica debida a la resolución del sonómetro 1: Se expresa en términos de dB bajo la hipótesis de distribución rectangular.

$$u_{S1} = \frac{\text{resolución } S_1}{\sqrt{12}}$$

Incertidumbre típica debida a la resolución del sonómetro 2: Se expresa en términos de dB bajo la hipótesis de distribución rectangular.

$$u_{S2} = \frac{\text{resolución } S_2}{\sqrt{12}}$$

Incertidumbre típica debida a la estabilidad de la cámara acústica: Se expresa en términos de dB bajo la hipótesis de distribución rectangular.

$$u_{est} = \frac{\Delta S_{Max}}{\sqrt{12}}$$

Donde:

$\Delta S_{Max}$  = diferencia de indicaciones máxima entre el sonómetro 1 y el sonómetro 2 (dB).

Incertidumbre típica debida al gradiente vertical: Se expresa en términos de dB bajo la hipótesis de distribución rectangular.

$$u_{\Delta V} = \frac{\Delta V}{\sqrt{12}}$$

Donde:

$\Delta V$  = gradiente vertical de la cámara acústica (dB).

Incertidumbre típica debida al gradiente horizontal: Se expresa en términos de dB bajo la hipótesis de distribución rectangular.

$$u_{\Delta H_{AB}} = \frac{\Delta H_{AB}}{\sqrt{12}}$$

Donde:

$\Delta H_{AB}$  = diferencia de nivel de presión sonora entre la posición A y la posición B (dB).

**Tabla 28.** Resumen para el cálculo de la incertidumbre típica asociada a las características de la cámara acústica

Aporte	Distribución	Coficiente de sensibilidad (Cs)	Incertidumbre típica (u)
$u_{S1}$	Rectangular	1	$\frac{\text{resolución } S1}{\sqrt{12}}$
$u_{S2}$	Rectangular	1	$\frac{\text{resolución } S1}{\sqrt{12}}$
$u_{est}$	Rectangular	1	$\frac{\Delta S_{Max}}{\sqrt{12}}$
$u_{\Delta V}$	Rectangular	1	$\frac{\Delta V}{\sqrt{12}}$
$u_{\Delta H_{AB}}$	Rectangular	1	$\frac{\Delta H_{AB}}{\sqrt{12}}$
Incertidumbre típica combinada		$u(E_{IBP}) = \sqrt{\sum_i^n C_s^2 u^2}$	

De manera que la incertidumbre típica combinada se calculará de la siguiente manera:

$$u(CAcu) = \sqrt{\left(\frac{\text{resolución } S1}{\sqrt{12}}\right)^2 + \left(\frac{\text{resolución } S2}{\sqrt{12}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S_{Max}}{\sqrt{12}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V}{\sqrt{12}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H_{AB}}{\sqrt{12}}\right)^2}$$

**Referencias:**

- Centro Español de Metrología (2012). *Vocabulario Internacional de Metrología: Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados*. Madrid.

- Centro Nacional de Metrología (2012). *Guía técnica de trazabilidad metrológica e incertidumbre de medida en caracterización térmica de baños y hornos de temperatura controlada*. México.
- INTE/ISO/IEC Guía 98-3:2017 (2017). Incertidumbre de medida - Parte 3: Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM).

### **Apéndice 3. Procedimiento para la calibración de aplicaciones móviles que miden nivel de presión sonora**

1. **Alcance:** Este procedimiento es de aplicación para la calibración de aplicaciones móviles que miden nivel de presión sonora con resoluciones de 0,1 dB o peor, las cuales estarán instaladas en teléfonos móviles.
2. **Términos y definiciones:** Son de aplicación los términos y definiciones que se incluyen en el vocabulario internacional de metrología, además de otros términos que se indican a continuación:
3. **Calibración:** Operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación.
4. **Incertidumbre de medida:** Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza.
5. **Corrección:** Compensación de un efecto sistemático estimado.
6. **Patrón de medida:** Realización de la definición de una magnitud dada, con un valor determinado y una incertidumbre de medida asociada, tomada como referencia.
7. **Aplicación móvil:** Software desarrollado para un dispositivo móvil. Es el análogo de un programa para computadora.
8. **Dispositivo móvil:** Aparato electrónico que se clasifica, según su pantalla, como computadora portátil, tableta, teléfono móvil, videoconsola o reproductor de video. Para este procedimiento son de interés los teléfonos móviles.

#### **Condiciones y preparación para la calibración**

La calibración se realiza en las instalaciones del laboratorio de metrología.

El laboratorio 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.

Los patrones elegidos deben ser adecuados para el nivel de incertidumbre esperado y deben estar calibrados. En el laboratorio no deben existir vibraciones, fuentes de calor u otra condición que se considere que puede afectar la calidad de los resultados.

### **Equipos y materiales utilizados**

- 1. Cámara acústica:** Medio que permite generar señales acústicas a un nivel de presión sonora determinado y con una frecuencia determinada. Este medio permite aislar acústicamente el interior de manera que las mediciones que se realicen no se vean afectadas significativamente por el ruido externo. Las señales acústicas mínimas a probar son 94 dB, 104 dB y 114 dB y 250 Hz, 1000 Hz y 4000 Hz.
- 2. Instrumentos para la medición de condiciones ambientales:** Se utilizarán instrumentos para la medición de temperatura ambiental con una incertidumbre expandida no mayor que 1 °C, presión atmosférica con una incertidumbre expandida no mayor que 100 Pa y humedad relativa con una incertidumbre expandida no mayor a 5 %.
- 3. Sonómetro patrón:** Instrumento de medición de referencia utilizado para determinar el nivel de presión sonora.
- 4. Accesorios:** De ser necesario se utilizarán pinceles, brochas o paños de algodón para limpiar el dispositivo, así como otros materiales que se consideren necesarios.

### **Descripción de la calibración**

#### **1. Comprobaciones previas**

Se comprobará que el dispositivo y la aplicación funcionen de manera normal. En caso de que el dispositivo tenga pantalla táctil, se verificará que esta funciona y permite ejecutar la aplicación con normalidad. De igual manera, si el dispositivo se controla con botones, se

verificará que estos permitan ejecutar la aplicación de manera normal. En caso de que el dispositivo no ejecute la aplicación bajo prueba con normalidad y que esto impida realizar las mediciones, no se realizará la calibración y se anotarán las razones para esto en el registro de calibración.

## 2. Proceso de calibración

Se encenderán todos los instrumentos que se vayan a utilizar en la calibración, al menos 1 minuto antes de iniciar el proceso de calibración.

Se anotan la temperatura, la humedad relativa y la presión atmosférica al inicio.

### i. Indicación a la frecuencia de comprobación de la calibración

Para realizar esta prueba se debe tomar la indicación del dispositivo a la frecuencia de 1000 Hz.

Se introduce el dispositivo móvil con la aplicación para la medición de nivel de presión sonora ejecutándose y el sonómetro patrón en la cámara acústica. Se configura la cámara para que genere 94 dB, y se realizan 5 lecturas esperando un tiempo de estabilización entre las mediciones de 10 s para obtener un promedio. Luego se repite el mismo proceso a 104 dB y 114 dB.

$$E_{IBC} = (\overline{I_{IBP}}) - \left( \overline{I_{PAT}} + \left( CT_{PAT} * (T_{Cal} - T_{Ref}) \right) + \left( CP_{PAT} * (P_{Cal} - P_{Ref}) \right) \right)$$

Donde:

$E_{IBC}$  = error del instrumento bajo calibración (dB).

$\overline{I_{IBP}}$  = promedio de indicaciones del instrumento bajo prueba (dB).

$\overline{I_{PAT}}$  = promedio corregido de indicaciones del patrón (dB).

$CT_{PAT}$  = coeficiente por cambio de temperatura del instrumento patrón (dB/°C).

$T_{Cal}$  = temperatura durante la calibración (°C).

$T_{Ref}$  = temperatura de referencia, normalmente 20 °C (°C).

$CP_{PAT}$  = coeficiente por cambio de presión del instrumento patrón (dB/hPa).

$CP_{IBP}$  = coeficiente por cambio de presión del instrumento bajo prueba (dB/hPa).

$P_{Cal}$  = presión durante la calibración (hPa).

$P_{Ref}$  = presión de referencia, normalmente 1 013 (hPa).

## ii. Ponderación frecuencial con señales acústicas

Para realizar esta prueba se debe tomar la indicación del dispositivo al nivel de presión sonora de 94 dB. Para cada una de las frecuencias ensayadas se debe utilizar el mismo nivel de referencia.

Introducir el dispositivo móvil con la aplicación para la medición de nivel de presión sonora ejecutándose y el sonómetro patrón en la cámara acústica. Se configura la cámara para que genere 250 Hz, y se realizan 5 lecturas esperando un tiempo de estabilización entre las mediciones de 10 s para obtener un promedio. Luego se repite el mismo proceso a las frecuencias de 1000 Hz y 4000 Hz.

Se anotan las condiciones finales de temperatura, presión y humedad relativa.

## 3. Resultados

### a. Determinación del error de indicación:

#### i. Indicación a la frecuencia de comprobación de la calibración:

Para el cálculo del error en la prueba de indicación a la frecuencia de comprobación se utiliza el siguiente modelo matemático:

$$E_{IBC} = (\overline{I_{IBP}}) - \left( \overline{I_{PAT}} + \left( CT_{PAT} * (T_{Cal} - T_{Ref}) \right) + \left( CP_{PAT} * (P_{Cal} - P_{Ref}) \right) \right)$$

Donde:

$E_{IBC}$  = error del instrumento bajo calibración (dB).

$\overline{I_{IBP}}$  = promedio de indicaciones del instrumento bajo prueba (dB).

$\overline{I_{PAT}}$  = promedio corregido de indicaciones del patrón (dB).

$CT_{PAT}$  = coeficiente por cambio de temperatura del instrumento patrón (dB/°C).

$T_{Cal}$  = temperatura durante la calibración (°C).

$T_{Ref}$  = temperatura de referencia, normalmente 20 °C (°C).

$CP_{PAT}$  = coeficiente por cambio de presión del instrumento patrón (dB/hPa).

$CP_{IBP}$  = coeficiente por cambio de presión del instrumento bajo prueba (dB/hPa).

$P_{Cal}$  = presión durante la calibración (hPa).

$P_{Ref}$  = presión de referencia, normalmente 1 013 (hPa).

## ii. Ponderación frecuencial con señales acústicas

Para el cálculo del error en la prueba de ponderación frecuencial con señales acústicas se utiliza el siguiente modelo matemático:

$$E_{IBC} = (\overline{I_{IBP}}) - \left( \overline{I_{PAT}} + \left( CT_{PAT} * (T_{Cal} - T_{Ref}) \right) + \left( CP_{PAT} * (P_{Cal} - P_{Ref}) \right) \right)$$

Donde:

$E_{IBC}$  = error del instrumento bajo calibración (dB).

$\overline{I_{IBP}}$  = promedio de indicaciones del instrumento bajo prueba (dB).

$\overline{I_{PAT}}$  = promedio corregido de indicaciones del patrón (dB).

$CT_{PAT}$  = coeficiente por cambio de temperatura del instrumento patrón (dB/°C).

$T_{Cal}$  = temperatura durante la calibración (°C).

$T_{Ref}$  = temperatura de referencia, normalmente 20 °C (°C).

$CP_{PAT}$  = coeficiente por cambio de presión del instrumento patrón (dB/hPa).

$CP_{IBP}$  = coeficiente por cambio de presión del instrumento bajo prueba (dB/hPa).

$P_{Cal}$  = presión durante la calibración (hPa).

$P_{Ref}$  = presión de referencia, normalmente 1 013 (hPa).

## b. Cálculo de la incertidumbre

El cálculo de la incertidumbre de medida se realizará de acuerdo a lo establecido en la norma INTE/ISO/IEC Guía 98-3:2017 Incertidumbre de medida - Parte 3: Guía para la expresión de la incertidumbre de medida.

Los componentes de incertidumbre expuestos a continuación son aplicables a la prueba de indicación a la frecuencia de comprobación y a la prueba de ponderación frecuencial con señales acústicas, mencionadas en el procedimiento de calibración.

Incertidumbre asociada a la resolución del dispositivo bajo prueba: Se expresa en términos de dB bajo la hipótesis de distribución rectangular.

$$u_{dIBP} = \frac{\text{resolución IBP}}{\sqrt{12}}$$

Incertidumbre debida a la repetitividad: Se expresa en términos de dB bajo la hipótesis de distribución normal y se considera la desviación típica entre los datos de medición.

$$u_r = s$$

Incertidumbre típica debida a la calibración del sonómetro patrón: Depende de la frecuencia y del nivel de presión sonora generado (dB).

$$u_{trazPAT} = \frac{U}{k}$$

Incertidumbre típica por la resolución del instrumento patrón: Se considera una distribución rectangular (dB).

$$u_{dPAT} = \frac{\text{resolución PAT}}{\sqrt{12}}$$

Incertidumbre típica por deriva del instrumento patrón, considerando una distribución rectangular: El valor de deriva se puede calcular de históricos de calibraciones o de bibliografía (dB).

$$u_{derPAT} = \frac{\text{deriva PAT}}{\sqrt{3}}$$

Incertidumbre típica por resolución del termómetro: Se considera una distribución rectangular (°C).

$$u_{dTer} = \frac{\text{resolución term}}{\sqrt{12}}$$

Incertidumbre típica por trazabilidad del termómetro: Se considera una distribución normal. Se tomará el valor de U como la incertidumbre expandida reportada en el certificado de calibración del instrumento (°C).

$$u_{trazTer} = \frac{U_{term}}{k}$$

Incertidumbre típica por deriva del termómetro, considerando una distribución rectangular: El valor de deriva se puede calcular de históricos de calibraciones o de bibliografía (°C).

$$u_{derTer} = \frac{\text{deriva term}}{\sqrt{3}}$$

Incertidumbre típica por resolución del barómetro: Se considera una distribución rectangular (hPa).

$$u_{dBar} = \frac{\text{resolución bar}}{\sqrt{12}}$$

Incertidumbre típica por trazabilidad del barómetro: Se considera una distribución normal. Se tomará el valor de U como la incertidumbre expandida reportada en el certificado de calibración del instrumento (hPa).

$$u_{trazBar} = \frac{U_{bar}}{k}$$

Incertidumbre típica por deriva del barómetro, considerando una distribución rectangular: El valor de deriva se puede calcular de históricos de calibraciones o de bibliografía (hPa).

$$u_{derBar} = \frac{deriva\ bar}{\sqrt{3}}$$

Incertidumbre típica por falta de uniformidad y estabilidad en la cámara acústica, considerando una distribución normal: Este dato se obtiene de la incertidumbre típica combinada reportada en la caracterización de la cámara (dB).

$$u_{fEstUni} = u_{Car}$$

**Tabla 29.** Resumen para el cálculo de la incertidumbre típica asociada a la calibración de aplicaciones móviles que miden nivel de presión sonora

Aporte	Distribución	Coficiente de sensibilidad (Cs)	Incertidumbre típica (u)
$u_{dIBP}$	Rectangular	1	$\frac{resolución\ IBP}{\sqrt{12}}$
$u_{dPAT}$	Rectangular	-1	$\frac{resolución\ patrón}{\sqrt{12}}$
$u_{trazPAT}$	Normal	-1	$\frac{U_{patron}}{k}$
$u_{derPAT}$	Rectangular	-1	$\frac{deriva\ patrón}{\sqrt{3}}$
$u_{dTer}$	Rectangular	$-CT_{PAT}$	$\frac{resolución\ term}{\sqrt{12}}$
$u_{trazTer}$	Normal	$-CT_{PAT}$	$\frac{U_{term}}{k}$
$u_{derTer}$	Rectangular	$-CT_{PAT}$	$\frac{deriva\ term}{\sqrt{3}}$
$u_{dBar}$	Rectangular	$-CP_{PAT}$	$\frac{resolución\ bar}{\sqrt{12}}$
$u_{trazBar}$	Normal	$-CP_{PAT}$	$\frac{U_{bar}}{k}$
$u_{derBar}$	Rectangular	$-CP_{PAT}$	$\frac{deriva\ bar}{\sqrt{3}}$
$u_{fEstUni}$	Normal	-1	$u_{Car}$
$u_s$	Normal	-1	$s$

Incertidumbre típica combinada	$u(E_{IBP}) = \sqrt{\sum_i^n C_S^2 u^2}$
Incertidumbre expandida	$U(E_{IBP}) = u(E_{IBP}) * k$

De manera que la incertidumbre típica combinada se calculará de la siguiente manera:

$$u(E_{IBP}) = \sqrt{\begin{aligned} & (-1)^2(s)^2 + \left(\frac{\text{resolución IBP}}{\sqrt{12}}\right)^2 \\ & (-1)^2 \left(\frac{\text{resolución patrón}}{\sqrt{12}}\right)^2 + (-1)^2 \left(\frac{U_{patron}}{k}\right)^2 + (-1)^2 \left(\frac{\text{deriva patrón}}{\sqrt{3}}\right)^2 \\ & (-CT_{PAT})^2 \left(\frac{\text{resolución term}}{\sqrt{12}}\right)^2 + (-CT_{PAT})^2 \left(\frac{U_{term}}{k}\right)^2 + (-CT_{PAT})^2 \left(\frac{\text{deriva term}}{\sqrt{3}}\right)^2 \\ & + (-CP_{PAT})^2 \left(\frac{\text{resolución bar}}{\sqrt{12}}\right)^2 + (-CP_{PAT})^2 \left(\frac{U_{bar}}{k}\right)^2 \\ & + (-CP_{PAT})^2 \left(\frac{\text{deriva bar}}{\sqrt{3}}\right)^2 + (-1)^2(u_{Car})^2 \end{aligned}}$$

Una vez que se calcule la incertidumbre típica combinada, se calculará la incertidumbre expandida con una probabilidad de cobertura de aproximadamente 95 %.

$$U(E_{IBP}) = u(E_{IBP}) * k$$

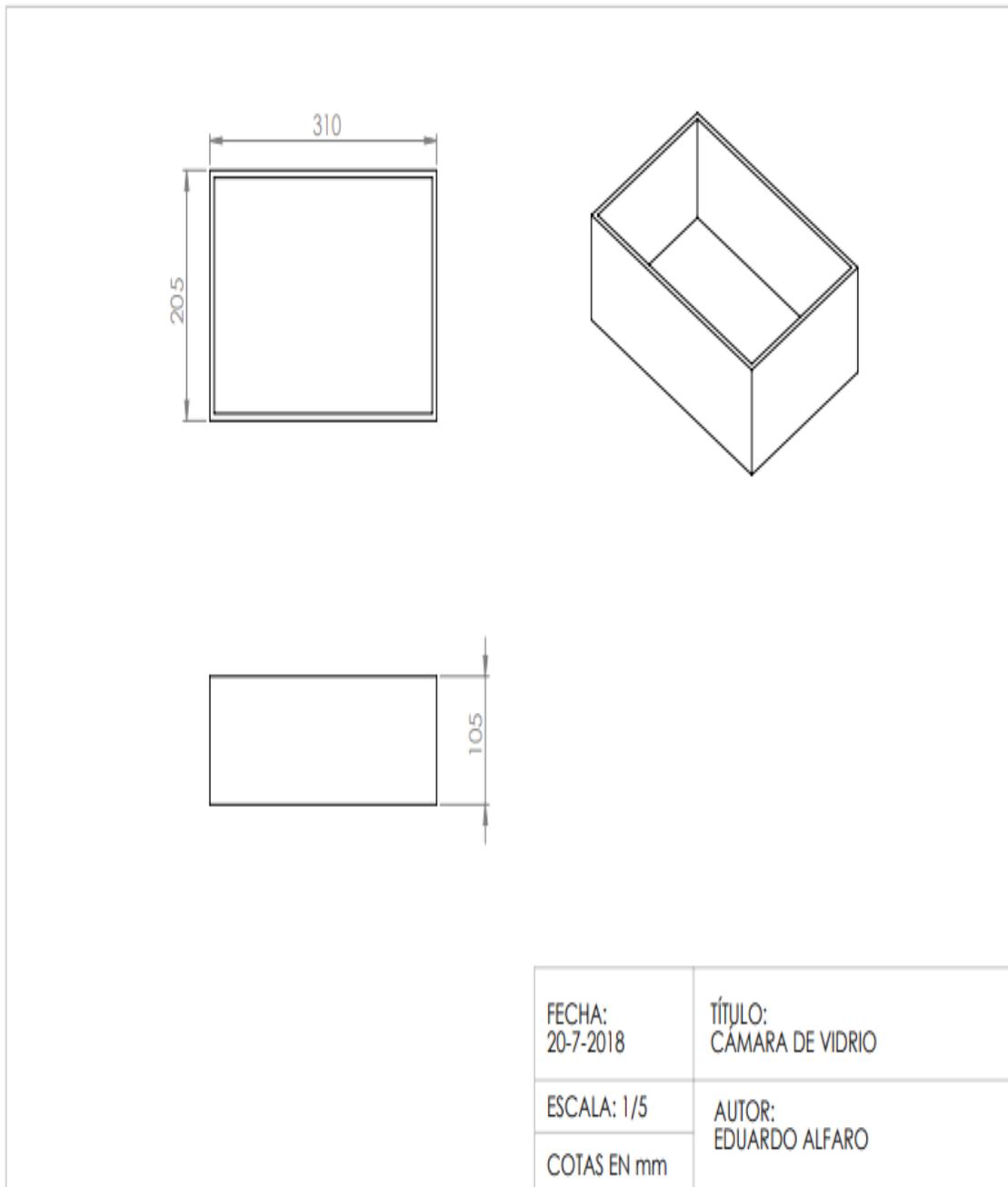
Se utilizará un valor de k igual a 2.

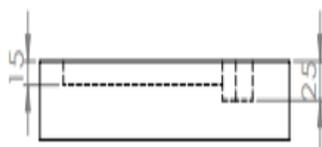
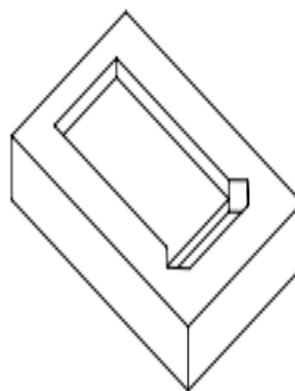
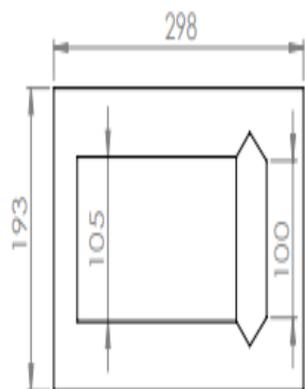
## Referencias

- Centro Español de Metrología (2012). *Vocabulario Internacional de Metrología: Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados*. Madrid.
- Fombona, J., Pascual, M. & Ferreira, M. (2012). Realidad aumentada, una evolución de las aplicaciones de los dispositivos móviles. *Píxel-Bit. Revista de Medios y Educación*, 41(1), 97-210.
- INTE/ISO/IEC Guía 98-3:2017 (2017). *Incertidumbre de medida - Parte 3: Guía para la expresión de la incertidumbre de medida*.

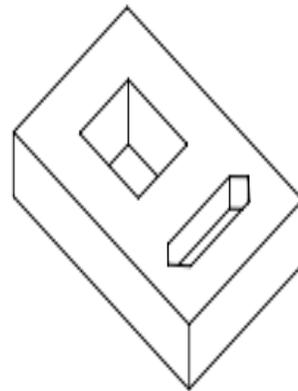
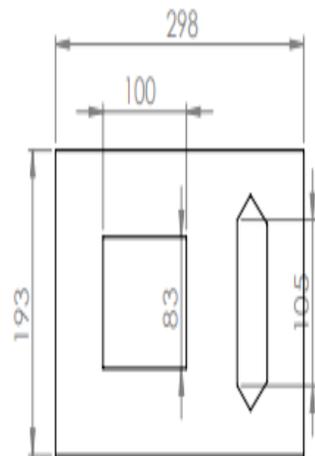
- Instituto de Salud Pública de Chile (2013). IT 512.03-005 Instructivo calibración de sonómetros. Chile.

#### Apéndice 4. Planos para la construcción de la cámara acústica





FECHA: 20-7-2018	TÍTULO: ESPUMA INFERIOR
ESCALA: 1/5	AUTOR: EDUARDO ALFARO
COTAS EN mm	



FECHA: 20-7-2018	TÍTULO: ESPUMA SUPERIOR
ESCALA: 1/5	AUTOR: EDUARDO ALFARO
COTAS EN mm	

**Apéndice 5. Imágenes del proceso de caracterización y calibración**

