



Desarrollo y Validación de un
Método de Medición de Absorción Sonora de
Materiales Industriales en Cámara Reverberante

Autor: Facundo F. Criscuolo

Director: Federico A. Serrano
Co-Directores: Liliana Álvarez y Javier G. Skabar

Tesis de Licenciatura en Ciencias Físicas

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad de Buenos Aires

19 de diciembre de 2024

Dedicado a mi mamá Maru y a mi abuela Normi.

Resumen

El presente trabajo establece una metodología que permite al Laboratorio de Acústica y Vibraciones del Instituto Nacional de Tecnología Industrial realizar ensayos de absorción sonora en cámara reverberante, contribuyendo así al ámbito metrológico nacional en la caracterización de materiales acústicos. Se desarrolló un método para la medición del coeficiente de absorción sonora α_s siguiendo la norma IRAM 4065:2019. Se verificaron las características geométricas de la cámara, determinándose un volumen de $(202,1 \pm 2,8) \text{ m}^3$, en conformidad con los 200 m^3 recomendados normativamente. Se rediseñó la configuración de difusores sonoros ampliando la superficie difusora total a $(33,14 \pm 0,06) \text{ m}^2$, lo cual disminuyó las dispersiones en los tiempos de reverberación medidos, mejorando así la difusividad del campo sonoro. Se evaluaron las fuentes de incertidumbre en la medición de α_s . En particular, se propuso un método para estimar la incertidumbre asociada al volumen de la cámara mediante un modelo que integra las variaciones en las medidas de volumen, basado en la triangulación de Delaunay. Por otro lado, se desarrolló un método de calibración para el tiempo de reverberación medido con el analizador de doble canal *Building Acoustics Analyzer* modelo 4417, a partir de la generación de rampas sintéticas de presión sonora en función del tiempo que se inyectan electrónicamente al analizador para determinar su incertidumbre. Se analizó el impacto de las condiciones ambientales sobre la medición de α_s mediante dos modelos (uno que considera estas condiciones y otro simplificado), mostrando que la principal fuente de incertidumbre proviene de los tiempos de reverberación, permitiendo utilizar el modelo simplificado en rangos de variación controlados. Finalmente, se estudió la repetibilidad y reproducibilidad del método. Para esto último y con el fin de poder garantizar que los resultados obtenidos son confiables, se realizó un proceso de validación mediante una comparación bilateral con el Laboratorio de Acústica y Luminotecnia de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, observándose una concordancia adecuada entre los resultados.

Agradecimientos

A Fede, Lili y Javi por el apoyo, la paciencia y por las largas horas de charlas de metrología, música y fútbol, entre otros tópicos diversos. Gracias por siempre haberme escuchado, aconsejado y por dedicarme tanto de su tiempo. Gracias Fede por haberme hecho sentir un *acústico* más desde el primer día.

A Rama, Alex y Dieguito del Laboratorio de Acústica y Vibraciones, por enseñarme desde cómo soldar y armar conectores hasta cómo usar una agujereadora de banco. Gracias también por los chistes, las travesuras y los 3D *rolls* con el *drone*, las risas no faltaron.

A *Los pibes del Morfi* con quienes compartí los almuerzos en el INTI durante los últimos dos años, y a toda la gente de Metroología Física que siempre estuvo dispuesta a darme una mano cuando lo necesité.

A la Universidad de Buenos Aires, por poner en mi camino a todos los docentes que aportaron, cada uno a su manera y en mayor o menor medida, a mi formación. Gracias en especial a Luz, la mejor de todas, no solo por su enorme dedicación para conmigo sino también por su gran calidez humana.

A mi familia, en especial a Normi que me banca desde que tengo memoria. Gracias Normi por haberme motivado tanto a estudiar, de todas las formas posibles. Que hoy me esté recibiendo es, en gran parte, gracias a vos.

A Nati por su apoyo incondicional, incluso cuando eso implica quedarme escribiendo como un loquito hasta las 3 de la mañana o estar 4 meses a 12000 km de distancia. Gracias por siempre sacar a relucir tu mayor virtud: tu desmesurado compañerismo. Sos, sobre todo, una gran compañera y una gran amiga.

A mis amigos, los *Espontáneos*, los *Bicampeones*, los que están siempre, sea para compartir nuestros logros, nuestras penas, para jugar un Catán o simplemente para tomar unos dulces. Gracias por ser los mejores amigos del mundo desde hace ya casi 12 años.

Por último, a las dos personas más importantes de mi vida, mi hermano Rami y mi mamá Maru. Gracias por acompañarme constantemente en todos mis proyectos, por más delirantes que sean. Son dos enormes motivadores, gracias por contagiarme siempre su buena energía, pasión y entusiasmo. Gracias a ustedes soy como soy, los amo con el alma, son la mejor familia que podría tener.

Índice general

Resumen	II
Agradecimientos	III
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Marco institucional	2
1.3. Estructura	2
2. Marco Teórico	4
2.1. Campos sonoros	4
2.2. Ruidos, tonos y octavas	7
2.3. Tiempo de reverberación	10
2.4. IRAM 4065:2019	11
2.4.1. Método del ruido interrumpido	12
2.4.2. Ecuación de Sabine	12
2.4.3. Término de atenuación	13
2.5. Modos normales de un recinto	15
2.5.1. Ecuación de ondas	15
2.5.2. Ecuación de Rayleigh	16
3. Aspectos metrológicos	17
3.1. Organización	18
3.2. Conceptos fundamentales	19
3.2.1. Caracterización de una medición	19
3.2.2. Calibración	21

3.2.3. Trazabilidad metrológica	22
3.2.4. Incertidumbre de medición	23
3.3. Balance de incertidumbres	24
3.3.1. Incertidumbres de tipo A	24
3.3.2. Incertidumbres de tipo B	25
3.3.3. Incertidumbre combinada	26
3.3.4. Teorema central del límite	27
3.3.5. Ejemplo: volumen de una muestra	27
3.4. Comparación de resultados	29
4. Caracterización y diseño del dispositivo	31
4.1. Cámara de transmisión	31
4.1.1. Building Acoustics Analyzer	33
4.2. Cámara reverberante	35
4.2.1. Plano y modelado 3D	36
4.2.2. Posiciones de micrófonos, parlantes y muestra	38
4.2.3. Áreas máximas de absorción sonora	40
4.2.4. Modos propios	41
4.2.5. Difusividad del campo sonoro	42
4.3. Instructivo de medición	48
5. Estimación de incertidumbres	51
5.1. Análisis de modelos de medición	51
5.1.1. Modelo simplificado (MS)	51
5.1.2. Modelo completo (MC)	53
5.2. Incertidumbre en V_1	57
5.2.1. Escalado de la diagonal mayor	57
5.2.2. Variación de las posiciones de los vértices	58
5.3. Incertidumbre en TR	62
5.3.1. Procedimiento de calibración de TR	62
5.3.2. Linealidad en tiempo y en tensión	63
5.3.3. Calibración de TR	65
5.4. Comparación de balances de incertidumbres	69

6. Resultados	73
6.1. Condiciones ambientales	73
6.2. Muestras ensayadas	78
6.3. Repetibilidad	79
7. Validación	82
7.1. Protocolo	82
7.1.1. Método de medición	82
7.1.2. Muestra de ensayo	83
7.1.3. Valores a reportar	83
7.1.4. Resultados	84
7.1.5. Cronograma	84
7.2. Resultados del INTI y medición de comprobación	85
7.3. Resultados del LAL	86
7.4. Comparación de resultados	87
7.5. Errores normalizados	88
8. Conclusiones	90
A. Coeficientes de sensibilidad (MS)	93
B. Coeficientes de sensibilidad (MC)	95
C. Estimación de incertidumbre en V_1	96
D. Balance de incertidumbres (MS)	97
E. Balance de incertidumbres (MC)	98
Bibliografía	99

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

La caracterización acústica de materiales fonoabsorbentes se realiza bajo lineamientos normativos en recintos de características específicas conocidos como “cámaras reverberantes”. Las mismas consisten en salas de aproximadamente 200 m^3 aisladas del ruido exterior, con superficies internas de alta reflectividad. Estas cualidades permiten garantizar que el tiempo que transcurre desde el cese de la emisión de un sonido hasta que el mismo decae a una determinada intensidad, definido como tiempo de reverberación, sea muy largo en un rango amplio de frecuencias. El correcto diseño de este tipo de recintos permite que el campo acústico sea lo suficientemente difuso, garantizando la incidencia aleatoria de las ondas sonoras en su interior [1].

Un adecuado tiempo de reverberación asegura una buena inteligibilidad del habla en auditorios, salas de conferencias y aulas, así como una óptima apreciación de la música en teatros y salas de conciertos. La correcta estimación del tiempo de reverberación resulta esencial para el confort acústico y la funcionalidad de los espacios interiores. Controlar este parámetro por medio de materiales absorbentes resulta un aspecto fundamental en ensayos de acústica arquitectónica.

Una de las principales aplicaciones de una cámara reverberante es la medición del coeficiente de absorción sonora de materiales. Desde hace algunos años, se incrementó la demanda del servicio de ensayo de coeficiente de absorción sonora a nivel nacional. Las principales solicitudes llegan al laboratorio desde sectores de la industria tales como: automotriz, construcción, desarrolladores y fabricantes de productos textiles o paneles acústicos, que generalmente buscan caracterizar cielorrasos y paneles de aproximadamente 1 m^2 de superficie.

Con el fin de dar respuesta a las necesidades planteadas por estos rubros, surgió una propuesta de trabajo que aborda el desarrollo de un método para la medición del coeficiente de absorción sonora de materiales industriales empleando la cámara reverberante del Laboratorio de Acústica y Vibraciones del Instituto Nacional de

Tecnología Industrial (INTI). El trabajo se llevó a cabo bajo los lineamientos establecidos por la norma IRAM 4065:2019 “Medición de la absorción sonora en una cámara reverberante” (equivalente a la norma internacional ISO 354:2003) [2], siendo sus resultados de gran utilidad para la implementación de un nuevo servicio de ensayo, que tendrá impacto directo en la industria nacional Argentina.

1.2. Marco institucional

El INTI es el referente técnico en metrología y responsable del aseguramiento de la calidad de las mediciones a nivel nacional. El centro de INTI Metrología Física es el encargado de desarrollar, diseminar y mantener los patrones nacionales de las magnitudes físicas, con métodos validados y revisados periódicamente por pares internacionales de otros institutos nacionales de metrología. Para ello el centro cuenta con laboratorios donde se realizan los patrones nacionales de las magnitudes del Sistema Internacional de unidades (SI).

El Laboratorio de Acústica y Vibraciones del INTI brinda trazabilidad a usuarios de mediciones, ensayos y calibraciones provenientes de innumerables sectores de la industria, salud e higiene y seguridad ocupacional. El laboratorio también efectúa trabajos de investigación aplicada, orientados principalmente al estudio e implementación de métodos ingenieriles de medición, y asistencia técnica para la mejora de la calidad acústica de los productos y de las condiciones del hábitat en el plano laboral y social. Para los ensayos en laboratorio, cuenta con instalaciones normalizadas que permiten abarcar diversas caracterizaciones, entre ellas de electrodomésticos, protectores auditivos, sistemas constructivos y absorbentes sonoros.

1.3. Estructura

En el capítulo 2 se introduce el marco teórico sobre el cual se desarrolla el trabajo. Se presentan conceptos fundamentales para la acústica arquitectónica y, sobre todo, para estudiar los fenómenos que ocurren dentro de una cámara reverberante.

En el capítulo 3 se introducen conceptos y terminología específicos del ámbito de la metrología, tomando como referencia la Guía para la Expresión de Incertidumbres de Medición (GUM) y el Vocabulario Internacional de Metrología (VIM).

En el capítulo 4 se presenta el dispositivo experimental empleado para llevar a cabo ensayos de absorción sonora. Se caracteriza la geometría de la cámara reverberante del Laboratorio de Acústica y Vibraciones del INTI verificando el cumplimiento de las condiciones establecidas por la norma IRAM 4065:2019.

En el capítulo 5 se desarrollan los modelos de medición junto con sus respectivos balances de incertidumbres. Se analizan dos casos: un modelo simplificado y

otro completo, dependiendo de si se considera o no respectivamente el cambio en las condiciones ambientales a lo largo del ensayo.

En el capítulo 6 se comparan las curvas de absorción sonora de 3 tipos de materiales de lana de vidrio distintos. También se analiza la repetibilidad del método y la influencia de las condiciones ambientales en el cálculo del coeficiente de absorción sonora.

En el capítulo 7, a modo de validación del método de medición desarrollado, se lleva a cabo una comparación con el Laboratorio de Acústica y Luminotecnia (LAL) de la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC) de la Provincia de Buenos Aires.

En el capítulo 8 se presentan las conclusiones del trabajo.

Capítulo 2

Marco Teórico

La acústica arquitectónica es la rama de la acústica que estudia y trata el comportamiento del sonido confinado en espacios cerrados. Tanto el diseño arquitectónico de una habitación como los objetos que la integran influencian el comportamiento de las ondas sonoras que se propagan dentro de la misma. Los fenómenos de reflexión y absorción se combinan en el interior de los recintos para dar lugar a ondas estacionarias y ecos en frecuencias específicas.

Propiamente estos ecos son llamados “reverberaciones”, siendo el tiempo de reverberación un parámetro de suma importancia en la acústica de salas que permite adecuar la sonoridad de distintos tipos de espacios acorde a usos específicos. En ello, la industria de materiales fonoabsorbentes toma una importancia preponderante, para lo cual resulta de interés realizar una caracterización apropiada de cada producto.

Dichas caracterizaciones se llevan a cabo bajo lineamientos normativos en recintos denominados “cámaras reverberantes”, donde se incide de manera aleatoria con ruido filtrado en un rango amplio de frecuencias sobre una muestra de material. En la práctica se busca que las ondas sonoras se propaguen dentro de la cámara sin direcciones privilegiadas y que no se induzcan ecos flotantes (*flutter echos*), de modo que el campo sonoro sea homogéneo y el nivel de presión sonora no dependa de la posición.

A continuación se definen los parámetros y conceptos que resultan necesarios para estudiar los fenómenos que ocurren dentro de una cámara reverberante, objeto principal de estudio en este trabajo.

2.1. Campos sonoros

Una onda es una perturbación que se propaga y que transporta energía pero no materia. Para que haya propagación, el medio tiene que ser extenso o tener muchas partes móviles, junto con un mecanismo restitutivo que tienda a regresarlas a su

posición de equilibrio [3]. En el aire, dichas partes móviles son las moléculas de N₂ y O₂ (principalmente) que lo componen.

Las ondas de sonido son perturbaciones mecánicas que se propagan en forma de ondas de presión a través de un medio, como el aire, debido a la compresión y rarefacción de sus moléculas. Estas variaciones en la presión son detectadas por nuestro aparato auditivo, donde el oído externo capta las ondas de presión y las canaliza hacia el tímpano, haciéndolo vibrar. Las vibraciones se transmiten desde el oído medio hasta el oído interno, donde la cóclea convierte estas señales mecánicas en impulsos eléctricos que el cerebro interpreta como sonidos. La sensibilidad de nuestro oído es tal que puede detectar pequeñas fluctuaciones de presión, del orden de 20×10^{-6} Pa, que corresponde al umbral de audición a 1000 Hz [4].

Los campos sonoros representan la distribución espacial del nivel de presión sonora, el cual determina la intensidad de un dado sonido. Comúnmente el nivel de presión sonora (SPL por su sigla en inglés) se mide en decibelios (dB), una escala logarítmica que sitúa en 0 dB el umbral de audición humana a 1000 Hz (2.1) [5].

$$\text{SPL} = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right) \text{ dB} \quad (2.1)$$

En la ecuación (2.1), p es el valor cuadrático medio (RMS) de presión mientras que $p_0 = 20 \times 10^{-6}$ Pa es la presión de referencia. Análogamente, se define el nivel de intensidad sonora (SIL) también en dB (2.2).

$$\text{SIL} = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) \text{ dB} \quad (2.2)$$

En la ecuación (2.2), I es la intensidad sonora (medida en W/m²) y $I_0 = 10^{-12}$ W/m² la intensidad de referencia.

Para una fuente sonora que emite energía al aire libre, de modo que las ondas de sonido no se topan con ninguna superficie, se dice que la propagación se produce en condiciones de “campo libre”.

$$\text{SPL} = 120 \text{ dB} + 10 \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right) \text{ dB} + 10 \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi r^2} \right) \text{ dB} \quad (2.3)$$

En la ecuación (2.3), Q es el factor de directividad, existiendo solamente el sonido directo generado por la propia fuente cuya intensidad decae con el cuadrado de la distancia. La intensidad es función de la distancia a la fuente (r) tal que $I(r) = P/4\pi r^2$ donde P es la potencia sonora de la fuente y $P_0 = 10^{-12}$ W la potencia sonora de referencia. En condiciones de campo libre, un observador percibirá solamente el sonido directo emitido por dicha fuente.

En cambio, si la fuente está confinada en una habitación cerrada, las ondas sonoras generadas podrán arribar a un observador en el interior del recinto tanto por un

camino directo como a través de las múltiples reflexiones originadas en los contornos (fig. 2.1) [6].

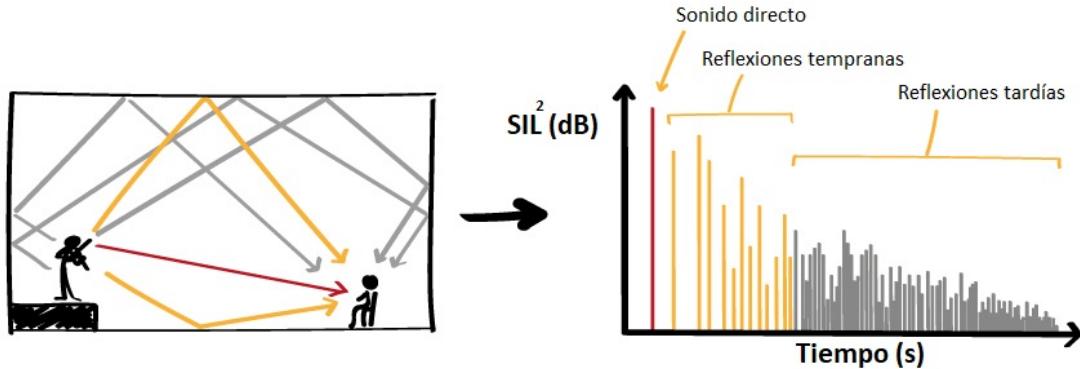


Fig. 2.1: trayectorias posibles para ondas sonoras emitidas en una habitación cerrada: en rojo sonido directo, en amarillo reflexiones tempranas y en gris reflexiones tardías (izquierda). SIL² registrado por el observador en función del tiempo para el sonido directo y sus reflexiones (derecha).

En la figura 2.1, estas reflexiones se atenúan a medida que el sonido continúa reflejándose, llegando al observador de manera diferida en forma de reflexiones tempranas y tardías. El campo conformado es llamado “reverberante”, donde el nivel de presión sonora en cada punto depende del volumen del recinto, de las posiciones de la fuente y del observador y de las propiedades acústicas de las superficies reflejantes, que pueden absorber a las ondas sonoras en mayor o menor medida (2.4).

$$\text{SPL} = 120 \text{ dB} + 10 \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right) \text{ dB} + 10 \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \text{ dB} \quad (2.4)$$

En la ecuación (2.4), R es la constante del recinto, que depende tanto del área de las superficies internas como de la absorción sonora de las mismas. La absorción se define como “el comportamiento de un material acústico en presencia de energía sonora, por el cual parte de la misma se transforma en otro tipo de energía, usualmente calor” [7].

El campo reverberante, a través del valor de R, depende de la relación entre la energía incidente (emitida por la fuente) y la energía absorbida (por las superficies del recinto y los objetos dentro del mismo) en cada una de las reflexiones. Esta relación se expresa por medio de un coeficiente llamado “coeficiente de absorción sonora” (α_s), el cual varía con la frecuencia de la onda emitida (2.5).

$$\alpha_s = \frac{E_{\text{abs}}}{E_{\text{inc}}} \quad (2.5)$$

En la ecuación (2.5), E_{inc} es la energía emitida y E_{abs} es la energía absorbida, con lo cual α_s tomará un valor comprendido entre 0 y 1 (en la sección 2.4.2 se verá que en la práctica no siempre esto ocurre).

El caso particular donde la intensidad sonora se vuelve idéntica en cualquier posición del cuarto se denomina “campo difuso”, tratándose por igual las reflexiones tempranas y tardías. Este tipo de campo es el que se busca generar en las cámaras reverberantes, donde mediante diversos métodos se logra aumentar la difusión del mismo.

2.2. Ruidos, tonos y octavas

Aquello considerado como “ruido” depende inevitablemente de la percepción de un dado receptor [8]. Normalmente se considera al ruido como algo molesto, sin embargo el ruido del motor de un auto es música para el mecánico que analiza su calidad de funcionamiento. La acústica deja este carácter subjetivo de lado, ya que si definiéramos al ruido como “sonido no deseado” no contaríamos con una herramienta muy valiosa.

Un tono puro es cualquier onda sonora de forma senoidal con frecuencia, fase y amplitud constantes en el tiempo. Los mismos son comúnmente usados para realizar ensayos conocidos como “audiometrías” donde se caracteriza el umbral de audición de un sujeto a distintas frecuencias.

Los tonos puros constituyen componentes que, combinados a distintas frecuencias, configuran formas llamadas “tonos complejos”, o “acordes” en el ámbito de la música. Otro concepto de uso común para la acústica y la música es el de “octava”, el cual define el intervalo (o banda) que separa dos sonidos cuyas frecuencias tienen una relación de dos a uno. En acústica arquitectónica se emplean subdivisiones de estos intervalos conocidos como tercios de octava, típicamente en el rango de 100 Hz a 5000 Hz.

Generalmente los tonos puros se emplean en ensayos de electroacústica y para la calibración de equipos electrónicos. No se acostumbra usar tonos puros para realizar ensayos de acústica arquitectónica, ya que no resultan fáciles de manejar ni son representativos de los sonidos que componen la vida cotidiana. En cambio, se prefiere generar ruido dentro de un determinado ancho de banda centrado a una frecuencia particular. Un tono puro de 1000 Hz aplicado a un recinto y captado por un micrófono mostrará que la información obtenida es extremadamente dependiente de la posición del par micrófono/altavoz, en cambio una octava de ruido centrada en 1000 Hz será mucho más estable en relación a su posición [7].

Originalmente la norma IRAM 4081:1977, hoy en día reemplazada por la IEC 61260-1:2014, establecía las características de los filtros de banda a utilizar en análisis de sonidos y vibraciones definiendo las frecuencias centrales para cada banda y sus anchos. La frecuencia media de cada banda se puede obtener en función de un número entero n que identifica la banda, para bandas de octava (2.6) y de tercio de octava (2.7) [9] [10].

$$f_n = 10^{\frac{3 \cdot n}{10}} \quad (2.6)$$

$$f_n^{\left(\frac{1}{3}\right)} = 10^{\frac{3 \cdot n}{30}} \quad (2.7)$$

Históricamente las frecuencias calculadas matemáticamente se redondeaban para identificar la banda de frecuencia, por ejemplo $f_9 = 501, 187\dots$ Hz ≈ 500 Hz, sobre todo ya que estas diferencias por redondeo resultan imperceptibles para el oído humano. Actualmente, la norma IEC 61260-1:2014 establece usar las frecuencias exactas para hacer cálculos, pero como los equipos más viejos emplean estas frecuencias redondeadas, sobre las cuales aplican los filtros de banda, para este trabajo se empleó la norma IRAM 4081:1977. Según esta última, las frecuencias de corte superior f_{sn} e inferior f_{in} para estos filtros se calculan a partir de f_n para bandas de octava (2.8) y de tercio de octava (2.9), siendo el ancho de la banda $f_{sn} - f_{in}$.

$$f_{sn,in} = 2^{\pm\frac{1}{2}} \cdot f_n \quad (2.8)$$

$$f_{sn,in}^{\left(\frac{1}{3}\right)} = 2^{\pm\frac{1}{6}} \cdot f_n^{\left(\frac{1}{3}\right)} \quad (2.9)$$

Correspondiendo en la ecuación (2.8) y en la ecuación (2.9) el signo + a las frecuencias de corte superior f_{sn} y $f_{sn}^{\left(\frac{1}{3}\right)}$ y el signo – a las de corte inferior f_{in} y $f_{in}^{\left(\frac{1}{3}\right)}$.

La tabla 2.1 muestra las frecuencias redondeadas empleadas en este trabajo, indicando si las mismas son frecuencias centrales de bandas de octava o de tercio de octava.

Dichos filtros de banda se aplican sobre distintos tipos de ruido, típicamente en acústica se emplea ruido blanco o rosa como herramienta de trabajo. El ruido blanco (o aleatorio) es aquel que mantiene constante su presión sonora en función de la frecuencia, presentando una distribución de energía uniforme en el espectro de frecuencias, mientras que el ruido rosa disminuye su presión sonora en 3 dB por cada octava (fig. 2.2).

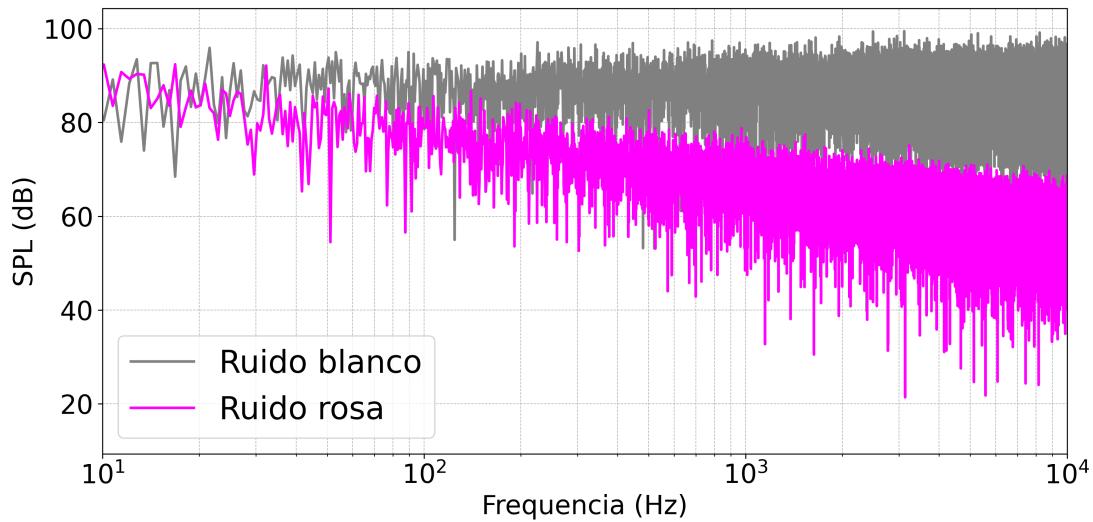


Fig. 2.2: presión sonora en función de la frecuencia para espectros de ruido blanco (en gris) y rosa (en rosa). Ambos ruidos abarcan todo el espectro audible de frecuencias.

Banda (n)	Frecuencia media (Hz)	Octava	Tercio de octava
20	100		x
21	125	x	x
22	160		x
23	200		x
24	250	x	x
25	315		x
26	400		x
27	500	x	x
28	630		x
29	800		x
30	1000	x	x
31	1250		x
32	1600		x
33	2000	x	x
34	2500		x
35	3150		x
36	4000	x	x
37	5000		x

Tabla 2.1: frecuencias centrales empleadas para bandas de octava y de tercio de octava, correspondientes a $20 \leq n \leq 37$, con n el número entero que identifica cada banda. Con x se indica si la frecuencia corresponde a una frecuencia central de banda de octava y/o de tercio de octava.

La relación dada por el ruido rosa en la figura 2.2 garantiza que la energía de todas las bandas de octava sea igual, dado que el espaciado entre octavas se da cada vez a un mayor intervalo con el aumento de la frecuencia. Emplear ruido rosa resulta fundamental en ensayos acústicos, ya que al inyectar a un recinto ruido filtrado en bandas de octava o tercios de octava se garantiza que la energía acústica en cada banda sea igual.

2.3. Tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación (TR) es un parámetro fundamental en la acústica arquitectónica, ya que influye directamente en la calidad sonora de cada espacio. Este tiempo expresa la duración que tarda en disminuir el sonido en 60 dB después de que la fuente sonora haya cesado. Un adecuado tiempo de reverberación asegura una buena inteligibilidad del habla en auditorios, salas de conferencias y aulas, así como una óptima apreciación de la música en teatros y salas de conciertos. En el ámbito de la construcción, considerar el tiempo de reverberación permite diseñar espacios con materiales y geometrías que optimicen la reflexión y absorción del sonido, creando ambientes acústicos agradables y funcionales.

Físicamente, un tiempo de reverberación demasiado largo implica que las reflexiones del sonido permanecen activas por un tiempo considerable después de que la fuente ha cesado. Esto provoca que las ondas reflejadas interfieran con nuevas señales auditivas, creando una superposición de sonidos que termina enmascarando la información deseada. En espacios donde se requiere buena inteligibilidad, como auditorios o aulas, si el tiempo de reverberación excede ciertos límites (generalmente, valores mayores a 1,5 s ó 2 s para el habla), las palabras comienzan a volverse indistintas, ya que los ecos de sonidos previos aún persisten cuando se emiten nuevas palabras. Si el tiempo de reverberación es demasiado largo, el sonido se percibe retumbante, afectando tanto la comprensión del habla como la apreciación musical, donde los detalles y matices pueden perderse. Un tiempo de reverberación más corto permite que el sonido desaparezca más rápidamente, mejorando la claridad y definición de la señal sonora en el espacio [4].

Como muchas veces el ruido de fondo de la sala puede ser lo suficientemente alto como para enmascarar parte de la señal sonora de interés, en la práctica es común medir caídas de 30 dB ó 20 dB y extrapolar la curva hasta 60 dB para obtener el tiempo de reverberación. Cuando se mide una caída de 30 dB se dice que se mide TR_{30} mientras que para una caída de 20 dB se denomina TR_{20} (fig. 2.3) [11].

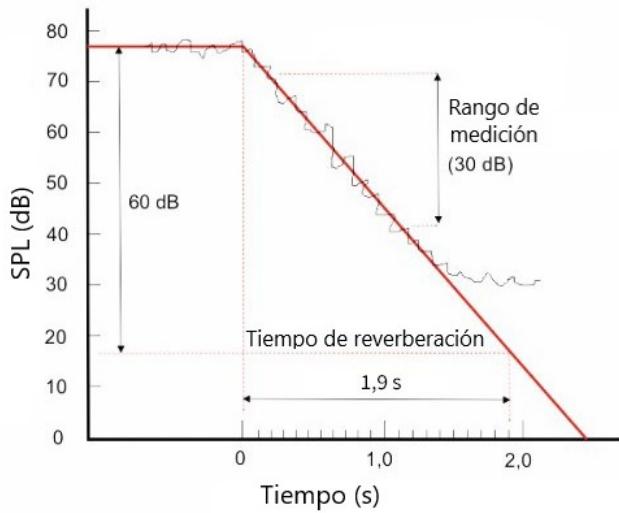


Fig. 2.3: presión sonora en función del tiempo registrada por un micrófono para una señal emitida en un recinto. Durante la emisión la presión sonora es aproximadamente constante, ante el cese de la emisión la presión sonora comienza a disminuir en el tiempo. Como la diferencia entre la máxima presión y el ruido de fondo es mucho menor a 60 dB se mide en un rango de 30 dB y se extrapola la curva, permitiendo obtener $TR_{30} = 1,9$ s.

En la figura 2.3 se observa cómo si se hubiera querido medir directamente una caída de 60 dB hubiese resultado imposible, ya que la señal se estabilizó alrededor de los 30 dB debido al ruido de fondo registrado por el micrófono. Resulta entonces conveniente medir una caída de 30 dB y extrapolar la curva hasta 60 dB para obtener el tiempo de reverberación, manera en la cual operan los sistemas de adquisición usados en este tipo de aplicaciones.

2.4. IRAM 4065:2019

Los Institutos Nacionales de Metroología (INM), como el INTI en Argentina, desempeñan un papel crucial en la implementación y el mantenimiento de las normas de medición a nivel nacional e internacional. Su trabajo bajo normas se organiza en varios niveles y áreas, asegurando la coherencia, trazabilidad y calidad de las mediciones en distintos sectores de la sociedad. El Instituto Argentino de Normalización y Certificación (originalmente Instituto de Racionalización Argentino de Materiales: IRAM) es el instituto encargado de la normalización y certificación en Argentina. El mismo es miembro representante de la Organización Internacional de Normalización (*International Organization for Standardization: ISO*) y de la Comisión Electrotécnica Internacional (*International Electrotechnical Commission: IEC*) en Argentina, encargándose de modificar y adaptar normas internacionales al país. La norma IRAM 4065:2019 es una adopción modificada de la ISO 354:2003 llamada “Medición de la absorción sonora en una cámara reverberante”, en la cual se establece el marco normativo necesario para llevar a cabo ensayos de absorción sonora de materiales en cámara reverberante [2] [12].

En la norma IRAM 4065:2019 se describen dos métodos de medición de las curvas de caída de nivel sonoro: el método del ruido interrumpido y el método de la respuesta impulsiva integrada. La curva de caída obtenida con el método del ruido interrumpi-

do resulta de un proceso estadístico, dado que se emplea ruido aleatorio, por lo que es necesario promediar varias curvas de caída variando las posiciones de micrófono y altavoz para lograr una repetibilidad adecuada. En contraste, en el método de la respuesta al impulso la respuesta obtenida es única y no está sujeta a desviaciones estadísticas. Si bien hoy en día el método de la respuesta impulsiva está más aceptado que el del ruido interrumpido, ya que las mediciones se realizan rápidamente y demostró ser altamente repetible, este requiere equipos sofisticados para generar y medir el impulso sonoro [13]. Dado que el laboratorio ya cuenta con las instalaciones y el equipamiento necesarios para llevar a cabo el método de ruido interrumpido, se optó por trabajar con este para desarrollar ensayos de absorción sonora.

2.4.1. Método del ruido interrumpido

El principio del método del ruido interrumpido consiste en excitar la cámara con ruido de banda limitada (o banda ancha) empleando un altavoz y registrar las curvas de caída de nivel con un micrófono para rangos de frecuencia de un tercio de octava como mínimo. De esta manera se obtiene un valor de tiempo de reverberación para cada banda limitada de frecuencias centrada en un tercio de octava, para lo cual la norma requiere promediar varias mediciones tomadas en una posición micrófono/altavoz, con objeto de reducir la incertidumbre de la medición causada por desviaciones estadísticas [2].

2.4.2. Ecuación de Sabine

Para el cálculo del coeficiente de absorción sonora la norma IRAM 4065:2019 propone hacer uso de la ecuación de Sabine, calculando las áreas equivalentes de absorción sonora del recinto donde se lleve a cabo el ensayo (A_i) con y sin la muestra, empleando los tiempos de reverberación medidos para un determinado rango de frecuencias (2.10) [14].

$$A_i = \frac{55,3 \cdot V_i}{TR_i \cdot c_i} - 4V_i \cdot m_i \quad (2.10)$$

En la ecuación (2.10) los subíndices 1 y 2 distinguen entre la cámara reverberante sin y con la muestra respectivamente, siendo V el volumen de aire disponible en la cámara en m^3 , c la velocidad del sonido en el aire en m/s , TR el tiempo de reverberación en s y $m = \frac{\alpha}{10 \text{ dB} \cdot \log(e)}$ el coeficiente de atenuación atmosférica, con α el coeficiente de atenuación sonora.

Es importante destacar que, para absorbentes planos, la diferencia de volumen $V_1 - V_2$ será despreciable. Sin embargo, en el caso de arreglos de objetos o absorbentes volumétricos, esta diferencia comienza a ser significativa. Si bien en este trabajo se miden absorbentes planos, se consideró el caso general $V_2 \neq V_1$ a fines de analizar el modelo completo.

La norma IRAM 4056:2019 define a V_1 como “el volumen de la cámara reverberante vacía”. En este trabajo se optó por considerar en el cálculo de V_1 a todos los elementos que reducen el volumen de la cámara, resultando V_1 en el volumen “efectivo” de aire a través del cual se puede propagar el sonido.

Finalmente, el coeficiente de absorción sonora α_s resulta del cociente entre la diferencia de las áreas equivalentes de absorción sonora calculadas en la ecuación (2.10) y la superficie geométrica de la muestra denotada por S (para absorbentes planos), conocida como ecuación de Sabine (2.11).

$$\alpha_s = \frac{A_2 - A_1}{S} \quad (2.11)$$

A diferencia de lo que ocurre al expresar α_s como un cociente energético según (2.5), donde no tiene sentido físico un valor de $\alpha_s > 1$, al determinar α_s en la práctica la expresión (2.11) permite obtener valores de $\alpha_s > 1$. Esto se debe a las dificultades que surgen al medir la superficie geométrica de la muestra S , subestimándola en muchos casos frente al área real de absorción sonora de la muestra. Cuando la muestra está constituida por un arreglo contiguo de paneles las ondas sonoras pueden filtrarse por los intersticios que quedan entre ellos, aumentando el área que efectivamente absorbe sonido. También en el cálculo de S para absorbentes planos se asume que las caras de la muestra son planas, cuando en realidad pueden contener irregularidades o deformaciones que aumentan el área geométrica efectiva.

La norma ISO 11654:1997 define un coeficiente de absorción sonora “práctico” α_p para el uso específico de absorbentes sonoros en edificios, el cual trunca los valores de α_s calculados en 1, solucionando esta ambigüedad. De todos modos en este trabajo se emplea α_s acorde a la norma IRAM 4065:2019, que está más que aceptado en la industria a pesar de la aparente contradicción de que tome valores superiores a la unidad [15].

2.4.3. Término de atenuación

El segundo término en el cálculo de las áreas equivalentes de absorción sonora A_1 y A_2 de la ecuación (2.10) constituye un término de atenuación. Este expresa, en función del volumen disponible y del coeficiente de atenuación sonora, la atenuación que experimenta una onda de sonido al propagarse en un dado medio. La norma fija un volumen máximo de 500 m^3 para la construcción de cámaras reverberantes donde se lleven a cabo estos ensayos, ya que a altas frecuencias la absorción sonora en el aire se vuelve muy relevante, cobrando mucho peso el término de atenuación.

La absorción del sonido a través de la atmósfera se debe principalmente a la conductividad térmica y a la relajación molecular del oxígeno y el nitrógeno al disipar su energía vibracional, rotacional y translacional. La conductividad térmica contribuye a la pérdida de energía al transferir calor entre las moléculas, mientras que la relajación molecular implica la conversión de energía acústica en energía interna molecular,

particularmente durante las colisiones entre moléculas. Además, la absorción depende de factores como la frecuencia del sonido, la temperatura, la humedad y la presión atmosférica [1].

La norma ISO 9613-1:1993 hace uso de un modelo físico que toma como variables las condiciones ambientales (temperatura, humedad relativa y presión atmosférica) para determinar el coeficiente de atenuación sonora α a partir del cálculo de las frecuencias de relajación del N₂ y el O₂ [16].

La expresión para α (en general, sin los subíndices) resulta de la ecuación (2.12).

$$\alpha = p_s \frac{20}{\ln 10} \frac{F^2}{p_{s0}} \left\{ 1,84 \times 10^{-11} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1/2} + \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-5/2} \left[0,01275 \frac{e^{-2239,1/T}}{F_{r,O} + F^2/F_{r,O}} + 0,1068 \frac{e^{-3352/T}}{F_{r,N} + F^2/F_{r,N}} \right] \right\} \frac{\text{dB}}{\text{m}} \quad (2.12)$$

Donde en la ecuación (2.12), f es la frecuencia acústica en Hz, p_s la presión atmosférica en atm, p_{s0} la presión atmosférica de referencia (1 atm), T la temperatura en K, T_0 la temperatura de referencia (293,15 K), $F = f/p_s$, $F_{r,O} = f_{r,O}/p_s$, $F_{r,N} = f_{r,N}/p_s$, $f_{r,O}$ la frecuencia de relajación del oxígeno molecular y $f_{r,N}$ la del nitrógeno.

$F_{r,O}$ y $F_{r,N}$ se calculan según las ecuaciones (2.13) y (2.14).

$$F_{r,O} = \frac{1}{p_{s0}} \left(24 + 4,04 \times 10^4 h \frac{0,02 + h}{0,391 + h} \right) \frac{\text{Hz}}{\text{atm}} \quad (2.13)$$

$$F_{r,N} = \frac{1}{p_{s0}} \left(\frac{T_0}{T} \right)^{1/2} \left(9 + 280h \times \exp \left\{ -4,17 \left[\left(\frac{T_0}{T} \right)^{1/3} - 1 \right] \right\} \right) \frac{\text{Hz}}{\text{atm}} \quad (2.14)$$

En las ecuaciones (2.13) y (2.14), h es la concentración del vapor de agua calculada a partir de la humedad relativa hr (2.15).

$$h = p_{s0} \left(\frac{hr}{p_s} \right) \left(\frac{p_{sat}}{p_{s0}} \right) \% \quad (2.15)$$

La expresión (2.15) involucra a la presión de vapor saturada p_{sat} (2.16).

$$p_{sat} = p_{s0} \times 10^{-6,8346(T_{01}/T)^{1,261} + 4,6151} \quad (2.16)$$

Siendo en la ecuación (2.16) $T_{01} = 273,16$ K.

Nótese de la ecuación (2.10), que si las mediciones de A₁ y de A₂ se llevan a cabo en las mismas condiciones atmosféricas (igual temperatura, humedad relativa y presión), y si V₁ ≈ V₂ (como es el caso de absorbentes planos), de la resta en la ecuación (2.11) se cancelan entre sí los términos 4V_i m_i, siendo innecesario calcularlo explícitamente para obtener α_s . Sin embargo, si las condiciones atmosféricas entre las mediciones de una misma frecuencia a cámara vacía y cámara llena varían, o si V₁ ≫ V₂ (como ocurre para absorbentes volumétricos) este término sí cobra importancia.

2.5. Modos normales de un recinto

La combinación de ondas incidentes y reflejadas en una sala da lugar a interferencias constructivas y destructivas o, lo que es lo mismo, a la aparición de las denominadas ondas estacionarias o “modos propios” (resonancias) de la sala. Cada modo propio está asociado a una frecuencia, igualmente denominada “propia”, y está caracterizado por un nivel de presión sonora que varía en función de la posición.

En una cámara reverberante se busca que ningún punto en el espacio sea un nodo o antinodo de presión, de modo que no haya posiciones privilegiadas para las cuales un micrófono detecte niveles máximos o mínimos de presión sonora. Al tratarse de recintos tridimensionales, esto solo ocurrirá si las ondas estacionarias inducidas en las 3 direcciones interfieren constructiva o destructivamente. Para ello, las cámaras se construyen con una particular geometría donde ningún par de paredes resulta paralelo entre sí, dificultando que se solapen los nodos o antinodos [17].

El estudio analítico de los modos propios se realiza mediante la denominada “acústica ondulatoria”, la cual hace posible conocer el comportamiento del sonido en un recinto cualquiera. Los valores de las frecuencias propias asociadas a los diferentes modos propios dependen de la geometría y de las dimensiones del recinto y, en general, su determinación resulta muy compleja. Únicamente cuando se trata de recintos de forma de prisma rectangular con superficies totalmente reflectantes se vuelve posible calcularlos de una forma muy sencilla, mediante la denominada fórmula de Rayleigh que se puede deducir a partir de la ecuación de ondas [18].

2.5.1. Ecuación de ondas

La ecuación lineal de ondas se puede emplear para describir la propagación de una onda de presión en un fluido compresible (como el aire) en equilibrio termodinámico, relacionando entre sí las derivadas parciales espaciales de la presión p (2.17) [19].

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.17)$$

En la ecuación (2.17), c es la velocidad de sonido en el aire.

La ecuación de ondas permite describir a p como un campo de presión en todos los puntos del espacio. Si el dominio es rectangular el operador nabla ∇ se escribirá en coordenadas cartesianas, resultando posible describir su longitud, ancho y altura según L_x , L_y y L_z respectivamente, tomando una de las esquinas del prisma como origen del sistema de referencia y alineando sus ejes para que se extiendan a lo largo de los bordes. Además, los contornos del dominio deben ser rígidos, imponiendo que la componente normal de la velocidad de las partículas sea nula en los límites, anulando las derivadas parciales espaciales de la perturbación de presión.

Debido a la geometría, hay frecuencias especiales en las que las ondas que rebotan en las paredes se superponen de manera que producen ondas estacionarias. Cada vibración en estado estacionario del aire en la habitación puede ser representada por una combinación lineal de modos especiales. Esta combinación se conoce como superposición modal y en acústica arquitectónica se usa para calcular la respuesta en frecuencia de una habitación.

Una propiedad de los modos es que las propiedades espaciales y temporales de la onda están factorizadas, lo que significa que la perturbación de presión es el producto de una función que depende solo de las coordenadas espaciales y una función que depende solo del tiempo (2.18).

$$p(x, y, z, t) = S(x, y, z)T(t) \quad (2.18)$$

De la separación de variables, la ecuación (2.18) lleva a la ecuación de Helmholtz para la parte espacial $S(x, y, z)$ (2.19).

$$\nabla^2 S = -k^2 S \quad (2.19)$$

Siendo la ecuación (2.19) un problema de autovalores cuya solución para S resulta de resolverlo teniendo en cuenta las condiciones de contorno del recinto (2.20).

$$S(x, y, z) = \cos\left(\frac{n_x \pi}{L_x} x\right) \cos\left(\frac{n_y \pi}{L_y} y\right) \cos\left(\frac{n_z \pi}{L_z} z\right) \quad (2.20)$$

En la ecuación (2.20), n_x , n_y y n_z son los números de modos, 3 números enteros que operan como etiquetas para identificar cada uno de los modos espaciales de la forma n_x , n_y , n_z .

2.5.2. Ecuación de Rayleigh

Para cada elección de números de modos se obtiene una parte espacial S y una frecuencia de resonancia f (2.21).

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \quad (2.21)$$

Si bien la parte espacial de la ecuación (2.21) queda descrita por los números de modos, la parte temporal depende directamente de la frecuencia de resonancia, la cual puede ser análoga para distintas formas de S . Esto genera una degeneración en T , que tiene como solución una onda armónica asociada a la frecuencia de resonancia de cada modo (2.22).

$$T(t) = \cos(2\pi f_{n_x, n_y, n_z} t) \quad (2.22)$$

Se ve en la ecuación (2.22) que, dependiendo de las dimensiones y de la elección de los números de modos, varias partes espaciales S se pueden corresponder con la misma parte temporal T .

Capítulo 3

Aspectos metrológicos

En este capítulo se introducen conceptos y terminología específicos del ámbito de la metrología, “la ciencia de las mediciones y sus aplicaciones” [20]. Como referencia para su escritura se tomaron en cuenta dos documentos clave, editados por el Comité Conjunto de Guías en Metrología (JCGM): la Guía para la Expresión de Incertidumbres de Medición (GUM) y el Vocabulario Internacional de Metrología (VIM) [21].

La GUM establece los criterios generales para evaluar y expresar las incertidumbres de una medición, mientras que el VIM sienta las bases de un lenguaje y una terminología en común para que los metrólogos puedan comunicarse entre sí. Ambos documentos son mundialmente reconocidos y aceptados, y se encuentran publicados con libre acceso en la página web del Buró Internacional de Pesos y Medidas (BIPM), el máximo organismo encargado de establecer y garantizar a nivel internacional la uniformidad de las mediciones [22].

La metrología se apoya fuertemente en un conjunto de normas, tanto nacionales como internacionales, que aseguran la coherencia y trazabilidad de las mediciones alrededor del mundo. Estas normas son desarrolladas por organizaciones internacionales, como la Organización Internacional de Normalización (ISO) y la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML), y son adaptadas a nivel local por organismos nacionales como el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) y el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM) en Argentina. En muchos casos la adopción de estas normas es voluntaria, a diferencia de otras reglamentaciones que, por cuestiones legales, resultan obligatorias. Cuando las normas se adoptan, garantizan que los resultados de medición sean comparables y confiables, facilitando el comercio internacional, la innovación tecnológica y la protección del consumidor. A nivel internacional, el Buró Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) coordina el mantenimiento del Sistema Internacional de Unidades (SI).

3.1. Organización

El BIPM tiene el mandato de sentar las bases de un sistema de medidas único y coherente en todo el mundo, con trazabilidad al Sistema Internacional de Unidades (SI). En la actualidad lo componen 36 estados asociados y 64 estados miembros, entre los cuales se encuentra Argentina. Algunos de estos estados conforman Organizaciones Regionales de Metrología (RMOs), las cuales colaboran con el BIPM a través del Comité Conjunto de las Organizaciones Regionales de Metrología y el BIPM (JCRB). Las RMOs facilitan la cooperación y la armonización de las actividades metroológicas en sus respectivas regiones y coordinan con el BIPM a través del JCRB para asegurar la coherencia global en las mediciones.

Actualmente son 6 las RMOs que integran el JCRB (fig. 3.1) [23]:

- el Sistema Intraafricano de Metrología (AFRIMETS),
- el Programa de Metrología de Asia-Pacífico (APMP),
- la Organización Euroasiática de Metrología (COOMET),
- la Asociación Europea de Institutos Nacionales de Metrología (EURAMET),
- la Asociación del Golfo para la Metrología (GULFMET) y
- el Sistema Interamericano de Metrología (SIM), al cual pertenece el INTI.



Fig. 3.1: RMOs que integran actualmente el JCRB junto con el BIPM.

Los organismos especializados en desarrollar la metrología en los países o estados que conforman las RMOs son los Institutos Nacionales de Metrología (INM). En la República Argentina esta función la cumple el INTI, siendo por ley el máximo órgano técnico en el campo de la metrología. El INTI es responsable de establecer y mantener los patrones de las unidades de medida, conforme al SI, y difundir su exactitud. Así mismo ofrece servicios metrológicos como calibración de instrumentos y patrones, certificación, desarrollo y asistencia técnica. Todas estas tareas, contribuyen a asegurar la calidad de las mediciones en distintos ámbitos tales como equidad en el comercio, salud, medio ambiente, etc.

3.2. Conceptos fundamentales

En metrología, es común encontrar términos que pueden resultar un tanto ambiguos. “Exactitud” y “precisión”, “calibración” y “ajuste”, o “error” e “incertidumbre” son solo algunos ejemplos de conceptos que en algunos ámbitos se usan de forma indistinta, pero que en metrología tienen definiciones claras acordadas a nivel internacional, a fin de asegurar la buena comunicación en dicho ámbito. A fin de promover el correcto uso de la terminología y dado que este trabajo ha sido desarrollado en un INM, se toman como referencia documentos normativos como el VIM y la GUM, que proporcionan definiciones y directrices claras sobre terminología y prácticas metrológicas.

3.2.1. Caracterización de una medición

La representación gráfica de un tiro al blanco es comúnmente usada en laboratorios de enseñanza para exemplificar la diferencia entre exactitud y precisión. Formalmente el VIM incorpora el término de “veracidad”, componiéndose la exactitud a partir de la veracidad y la precisión (fig. 3.2).

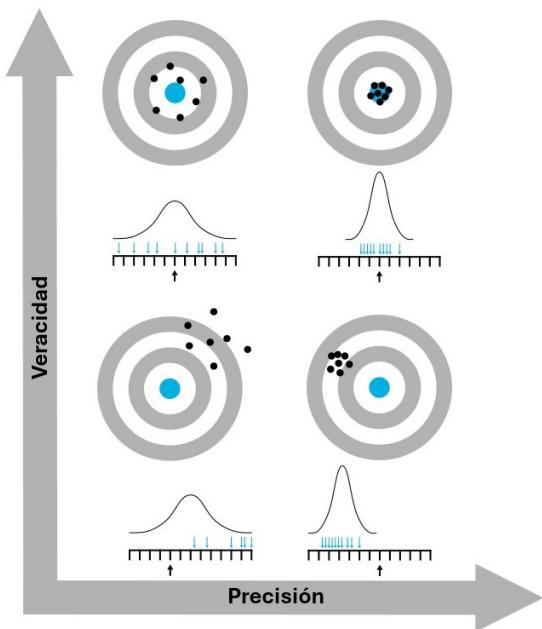


Fig. 3.2: representación gráfica de la relación entre veracidad, precisión y exactitud. Los diagramas de tiro al blanco muestran cómo los puntos de medición pueden ser precisos pero no veraces (parte inferior derecha), veraces pero no precisos (parte superior izquierda), ni precisos ni veraces (parte inferior izquierda), o ambos, precisos y veraces (parte superior derecha).

Estos conceptos surgen a partir de la imposibilidad de conocer el valor verdadero de la magnitud que se desea medir (mensurando) a través de un proceso de medición, siendo la exactitud la proximidad entre el valor medido y el valor verdadero. El valor medido constituye un conjunto de valores de una magnitud atribuidos a un mensurando, y se expresa generalmente como un valor medido único y una incertidumbre de medida.

La veracidad se refiere al grado de concordancia entre el valor promedio de un gran número de mediciones repetidas y el valor verdadero o, en la práctica, valor de referencia. La misma está inversamente relacionada con el error sistemático, pero no está relacionada con el error aleatorio. En la figura 3.2, esta se representa en el eje vertical, donde las mediciones con alta veracidad tienen valores medios que se acercan al centro del objetivo, que simboliza el valor de referencia.

La precisión describe la proximidad entre los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto bajo condiciones especificadas. La precisión se evalúa en términos de dispersión o variabilidad de los valores de medición y no implica necesariamente veracidad ni exactitud. En la figura 3.2, esto se muestra en el eje horizontal. Las mediciones precisas producen puntos de datos estrechamente agrupados, independientemente de su proximidad al valor de referencia.

La exactitud es un término que engloba tanto la veracidad como la precisión. Una medición exacta es aquella que es tanto veraz como precisa. En la figura 3.2, la exactitud se observa en la esquina superior derecha, donde los puntos de datos están agrupados cerca del centro del objetivo.

Por otro lado, al momento de comparar resultados de mediciones de un mismo mensurando surgen dos conceptos fundamentales para establecer su grado de concordancia: “repetibilidad” y “reproducibilidad”.

La repetibilidad evalúa la consistencia de los resultados obtenidos bajo las mismas condiciones de medida dentro de un corto período de tiempo (relativo a que en ese lapso no varíen las condiciones de medida). Por otro lado, la reproducibilidad evalúa la variabilidad de los resultados cuando las mediciones de un mismo mensurando se realizan bajo condiciones diferentes. Algunas de estas condiciones variables comprenden el procedimiento de medida, el operador, el instrumento de medida, las condiciones ambientales y el lugar donde se llevan a cabo las mediciones.

3.2.2. Calibración

La calibración es el proceso mediante el cual se comparan, bajo condiciones específicas, los valores de una magnitud indicados por un instrumento o sistema de medición, y los valores de esa magnitud medidos por patrones. Como resultado de la realización de una calibración se obtiene un error sobre los resultados medidos junto con su incertidumbre. Comúnmente se confunde el concepto de calibración con el de “ajuste”, el cual se refiere al conjunto de operaciones realizadas sobre el sistema para que éste proporcione indicaciones prescritas, como por ejemplo el ajuste de cero, de *offset* o de la ganancia. Después de su ajuste, generalmente un sistema de medición debe ser calibrado nuevamente.

Un patrón es una medida materializada, instrumento de medición, material de referencia o sistema de medición destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad o uno o más valores de una magnitud para servir de referencia. Los patrones son fundamentales en la metrología, ya que proporcionan los puntos de referencia necesarios para la calibración y la trazabilidad metrológica.

En metrología el término “error” no implica necesariamente una equivocación, sino que se refiere a una desviación que puede ser cuantificada y, cuando representa un error sistemático, corregida. La calibración de un instrumento de medición permite determinar el error sistemático respecto a un valor de referencia proporcionado por el patrón. Para compensar dicho error sistemático en los instrumentos de medición se aplica una corrección, que es igual al error obtenido en la calibración con signo opuesto. La corrección es el valor añadido algebraicamente al resultado de una medición para compensar un error sistemático. La corrección permite mejorar la exactitud de las mediciones al tener en cuenta y compensar las desviaciones sistemáticas conocidas, producto de realizar una calibración.

3.2.3. Trazabilidad metrológica

La trazabilidad metrológica es la propiedad de un resultado de medición que permite relacionarlo con referencias establecidas, generalmente patrones nacionales o internacionales, a través de una cadena ininterrumpida y documentada de comparaciones al SI con incertidumbres establecidas. La trazabilidad metrológica tiene en cuenta la jerarquía y la exactitud de los patrones, por lo que está estrechamente relacionada con la confiabilidad de las mediciones y es la que garantiza que los resultados de medición sean comparables entre sí, independientemente de dónde y cuándo se hayan realizado. En otras palabras, la trazabilidad metrológica permite la aceptación de los resultados a nivel universal (fig. 3.3).

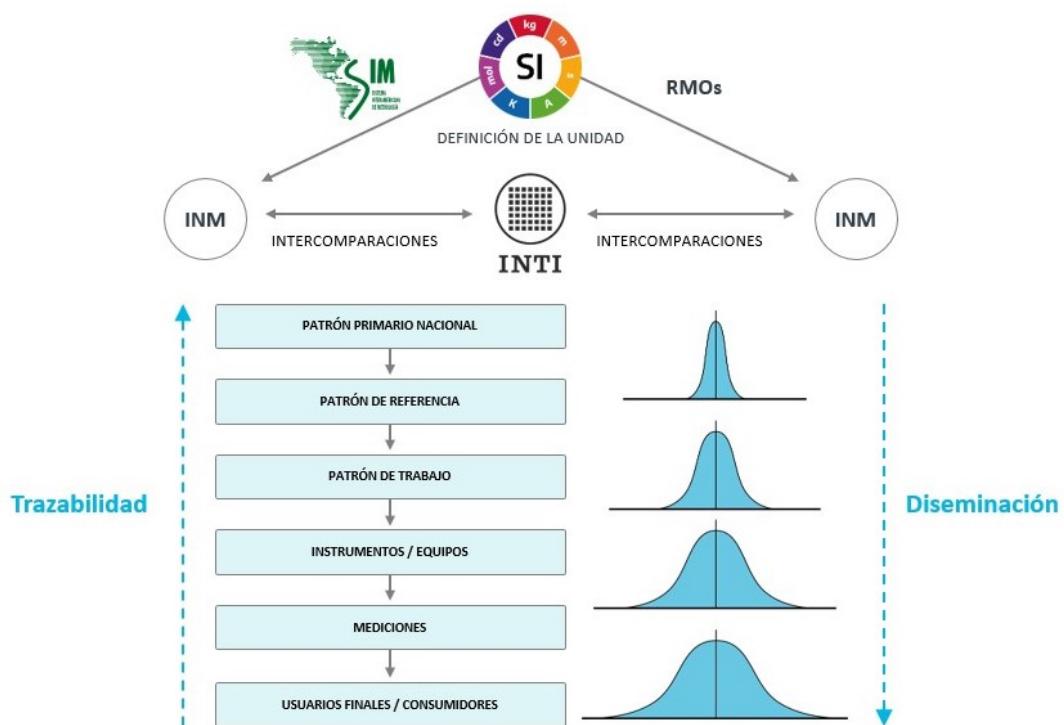


Fig. 3.3: esquema general de la trazabilidad metrológica.

En la figura 3.3 se muestra un esquema general de la trazabilidad metrológica y su relación con la incertidumbre de medición y con la diseminación de la unidad de medida correspondiente. Cuanto menor es la incertidumbre de un patrón o instrumento mayor es su jerarquía metrológica. Las calibraciones se realizan siguiendo procedimientos para los cuales cada laboratorio demuestra competencia técnica. Si bien los laboratorios de calibración deben proporcionar mediciones trazables a patrones nacionales, esto no asegura que la incertidumbre sea la adecuada para el uso previsto.

3.2.4. Incertidumbre de medición

Con el paso de los años el enfoque en el tratamiento de las incertidumbres de medición ha cambiado radicalmente. La evolución en el tratamiento de la incertidumbre de medida, desde el enfoque “del error” (algunas veces llamado “tradicional” o “sobre el valor verdadero”) hacia el enfoque “de la incertidumbre”, ha obligado a reconsiderar ciertos conceptos que figuraban en las primeras ediciones del VIM. El objetivo de la medición en el enfoque “del error” es obtener una estimación del valor verdadero tan próxima como sea posible a ese valor verdadero único. La desviación respecto al valor verdadero está constituida por errores sistemáticos y aleatorios, admitiéndose que siempre es posible distinguir entre sí estos dos tipos de errores, y que deben tratarse de manera diferente. No existe una regla que indique cómo combinarlos en un error total que caracterice el resultado de medida dado, obteniéndose únicamente un valor estimado. En general, solo es posible estimar un límite superior del valor absoluto del error total denominado, en forma un tanto inapropiada, “incertidumbre”.

Los términos error e incertidumbre no son equivalentes, sino que se refieren a conceptos muy distintos, por lo que no deben confundirse. La principal diferencia entre estos dos términos es que el error es la diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia establecido, en tanto que la incertidumbre de medición hace referencia a una cierta dispersión de los valores atribuidos a un mensurando. La incertidumbre del resultado de una medición refleja la falta de conocimiento exacto del valor del mensurando. El resultado de una medición, aún después de la corrección por efectos sistemáticos reconocidos, no es más que una estimación del valor verdadero del mensurando, debido a que tal resultado es afectado por incertidumbres provenientes de efectos aleatorios y de correcciones imperfectas de aquellos efectos sistemáticos [21].

El objetivo de las mediciones en el enfoque “de la incertidumbre” no es determinar el mejor valor verdadero posible, sino que supone más bien que la información obtenida de la medición permite únicamente atribuir al mensurando un intervalo de valores razonables, suponiendo que la medición se ha efectuado correctamente. Puede reducirse la extensión del intervalo incorporando información relevante adicional. Sin embargo, ni la medición más refinada permite reducir el intervalo a un único valor, a causa de la cantidad finita de detalles que intervienen en la definición del mensurando.

La incertidumbre de la definición del mensurando (incertidumbre intrínseca) impone un límite inferior a toda incertidumbre de medida. En la GUM, la incertidumbre intrínseca se supone despreciable respecto a otras componentes de la incertidumbre de medida. Por otra parte, además de la incertidumbre de medición de un resultado se hace necesario establecer la probabilidad de que el valor, en esencia único, se encuentre dentro de un intervalo de valores medidos con un cierto nivel de confianza, basándose en la información obtenida en las mediciones.

Con el cambio de paradigma en relación a ambos enfoques, el concepto de error verdadero cambió su significado sustancialmente. Según el enfoque en torno al concep-

to de error, el valor verdadero de la magnitud se consideraba único y, en la práctica, imposible de conocer en la descripción de la medición. El enfoque en torno al concepto de incertidumbre consiste en reconocer que, debido a la cantidad de detalles incompletos inherentes a la definición de una magnitud, no existe un único valor verdadero compatible con la definición, sino más bien un conjunto de valores verdaderos compatibles con ella. Sin embargo, este conjunto de valores es, en principio, imposible de conocer en la práctica [20].

3.3. Balance de incertidumbres

La GUM divide a las componentes de la incertidumbre de medida en dos categorías, de tipo A y de tipo B, según se estimen por métodos estadísticos o por otros métodos basados en la decisión científica. Cada modelo de medición puede tener múltiples magnitudes de entrada involucradas, para cada una de las cuales las incertidumbres de tipo A y de tipo B se combinan en la incertidumbre combinada total. En metrología, el desarrollo de un balance de incertidumbres permite analizar la influencia de la medición de cada magnitud de entrada (o fuente), cuantificando la contribución de cada tipo de incertidumbre sobre la incertidumbre combinada total que se obtiene aplicando la ley de propagación de incertidumbres. La aplicación de esta ley establece que las incertidumbres de las magnitudes de entrada se evalúen a partir de lo que se denomina incertidumbre típica o estándar, simbolizada con la letra u minúscula. Una vez determinada la incertidumbre estándar combinada, para informar el resultado se suele utilizar un múltiplo de ella, que corresponde a la denominada incertidumbre expandida, simbolizada con la letra U mayúscula.

3.3.1. Incertidumbres de tipo A

De acuerdo a la GUM, la evaluación de la incertidumbre de tipo A se utiliza a partir de un análisis estadístico cuando se realizan n observaciones independientes entre sí de una magnitud q bajo las mismas condiciones de medida. En la mayor parte de los casos, la mejor estimación posible de la esperanza matemática μ_q de esta magnitud resulta la media aritmética \bar{q} de las n observaciones (3.1).

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (3.1)$$

Los valores de las observaciones individuales q_k en la ecuación presentan un cierto grado de dispersión, la cual se caracteriza por su varianza experimental $s^2(q_k)$ (3.2).

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad (3.2)$$

A partir de las ecuaciones (3.1) y (3.2) se define la mejor estimación de la varianza de la media $s^2(\bar{q})$ (3.3).

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad (3.3)$$

Tomando la raíz cuadrada de la ecuación (3.3) se define la desviación típica experimental de la media $s(\bar{q})$. Esta también se denomina “incertidumbre típica” o “estándar” de tipo A, y generalmente se denota como u_A . En resumen, siempre que se estime una magnitud como la media de una serie de n mediciones (siendo n lo suficientemente grande como para que la media proporcione una estimación confiable) se le podrá asignar a dicho valor medio una incertidumbre de tipo A que resulte de su desviación estándar experimental.

3.3.2. Incertidumbres de tipo B

En cambio, si la estimación de una magnitud no se obtiene a partir de observaciones repetidas, la incertidumbre típica se establece mediante decisión científica, basada en resultados de mediciones anteriores, especificaciones del fabricante o datos suministrados por certificados de calibración, entre otros. En base a esta información se asumen y asignan distribuciones de probabilidad para la magnitud medida. De acuerdo a la GUM, estas incertidumbres típicas se denominan de tipo B (u_B), y resulta útil combinarlas en suma cuadrática para obtener la incertidumbre estándar combinada de tipo B u_{cB} (3.4).

$$u_{cB} = \sqrt{u_{B_{\text{res}}}^2 + u_{B_{\text{cal}}}^2 + \dots} \quad (3.4)$$

En la ecuación (3.4) se suman explícitamente una incertidumbre estándar de tipo B debida a la resolución del instrumento empleado para medir la magnitud con otra debida a la calibración de ese mismo instrumento. Si bien podría haber términos adicionales, en este trabajo la mayoría de las incertidumbres de tipo B que se emplean son de resolución (3.5) y de calibración (3.6).

$$u_{B_{\text{res}}} = \frac{\text{res}/2}{k} \quad (3.5)$$

$$u_{B_{\text{cal}}} = \frac{U_{B_{\text{cal}}}}{k} \quad (3.6)$$

Donde en las ecuaciones (3.5) y (3.6), k es el factor de cobertura, $\text{res}/2$ es la mitad de la resolución del instrumento de medición empleado y $U_{B_{\text{cal}}}$ es la incertidumbre expandida informada en su certificado de calibración.

El factor de cobertura es un número (normalmente entre 1 y 3) que se utiliza para calcular la incertidumbre expandida de una medición, multiplicándolo por la incertidumbre estándar. Este factor depende tanto de la naturaleza de la distribución

del conjunto de valores medidos como del nivel de confianza con el cual se espera encontrar el valor medido dentro de un rango de valores establecido. En la mayoría de los certificados de calibración, la incertidumbre expandida informada es calculada multiplicando la incertidumbre estándar combinada por un factor de cobertura $k = 2$, que corresponde a un nivel de confianza aproximado del 95 % bajo distribución normal [24]. Por su parte, la contribución debida a la resolución del instrumento suele asociarse a una distribución de tipo rectangular simétrica de rango igual a la resolución del instrumento, con un factor de cobertura $k = \sqrt{3}$, y un nivel de confianza del 100 %.

La incertidumbre expandida es aquella que define un intervalo en torno al resultado de una medición, y en la que se espera encontrar una fracción de la distribución de valores (que depende justamente del nivel de confianza expresado por k) que podrían ser atribuidos razonablemente al mensurando. Resulta conveniente expresar el resultado de una medición en la forma $Y = y \pm U$, lo que se interpreta como que la mejor estimación del valor atribuible al mensurando Y es y , pudiendo esperarse que en el intervalo que va de $y - U$ a $y + U$ esté comprendida gran parte de los valores.

3.3.3. Incertidumbre combinada

Para cada una de las magnitudes medidas, las incertidumbres de tipo A y de tipo B se combinan en la incertidumbre combinada total (u_c) como la raíz de la suma cuadrática de ambas (3.7).

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_{CB}^2} \quad (3.7)$$

En la incertidumbre asociada a la determinación de un mensurando $Y = f(X_i)$, f no expresa tanto una ley física sino el proceso de medida, dado por un modelo matemático. Este modelo debe contener todas sus magnitudes X_i independientes e idénticamente distribuidas, resultando la incertidumbre combinada total asociada a y de la ley de propagación de incertidumbres (3.8).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial X_i} \right]_{x_i}^2 u_i^2(x_i) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u_i^2(x_i) \quad (3.8)$$

En la ecuación (3.8), basada en la aproximación a primer orden en serie de Taylor del modelo $Y = f(X_i)$, c_i son los coeficientes de sensibilidad que indican el peso que supone cada una de las distintas magnitudes de entrada en la magnitud de salida, representada por la función de medición.

Al producto entre la incertidumbre de cada magnitud $u_i(x_i)$ y el valor del coeficiente de sensibilidad c_i evaluado en los valores medidos se le da el nombre de “valor del factor”. De los valores de cada factor se puede evaluar la contribución porcentual con respecto a la incertidumbre combinada, tomando la suma algebraica de todos los valores como el 100 %.

3.3.4. Teorema central del límite

El teorema central del límite asegura que, bajo ciertas condiciones, la distribución de la suma de un gran número de variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas se aproxima a una distribución normal, independientemente de la forma original de cada una de las distribuciones individuales. Suponiendo que una medida indirecta es función lineal de las magnitudes de entrada $Y = \sum_{i=1}^n d_i X_i$, la distribución asociada a Y se aproximará a una distribución normal con esperanza $E(Y) = \sum_{i=1}^n d_i E(X_i)$ y varianza $\sigma^2(Y) = \sum_{i=1}^n d_i^2 \sigma^2(X_i)$. Esto ocurre si las X_i son independientes y $\sigma^2(Y)$ es mucho mayor que cualquier otra componente $d_i \sigma^2(Y)$.

Las condiciones del teorema se cumplen cuando la incertidumbre combinada $u_c(y)$ no está dominada por componentes de incertidumbre obtenidas por evaluaciones de tipo A basadas en pocas observaciones, o en evaluaciones de tipo B basadas mayoritariamente en distribuciones rectangulares. La convergencia hacia la distribución normal será tanto más rápida cuanto mayor sea el número N de variables involucradas, cuanto más normales sean estas, y cuando no exista ninguna que predomine por sobre las otras.

Si el teorema se cumple, entonces es posible obtener una incertidumbre expandida $U_c(y)$ a partir de la incertidumbre combinada $u_c(y)$ calculada según la ecuación (3.8) multiplicándola por un factor de cobertura $k = 2$, que corresponda a un nivel de confianza aproximado de 95 % bajo distribución normal.

Caso contrario, si en la incertidumbre combinada preponderan componentes de incertidumbre obtenidas por evaluaciones de tipo A basadas en pocas observaciones, o en evaluaciones de tipo B basadas mayoritariamente en distribuciones rectangulares, la distribución resultante será una t de Student, con un factor de cobertura distinto para cada nivel de confianza [24].

3.3.5. Ejemplo: volumen de una muestra

En esta sección se propone como ejemplo un balance de incertidumbres para el cálculo del volumen de una muestra a partir de su altura (a), base (b) y profundidad (d) (3.9).

$$V_{abd} = a \cdot b \cdot d \quad (3.9)$$

Suponiendo que las 3 magnitudes (a, b y d) se miden en forma directa con una cinta métrica calibrada, corresponde estimarles fuentes de incertidumbre de tipo B por calibración y por resolución. Si la muestra no tiene un espesor bien definido se puede medir la altura en varios puntos de la muestra, y así asignarle una fuente de incertidumbre de tipo A por repetibilidad.

Siendo V_{abd} de la ecuación (3.9) el volumen de la muestra, las derivadas parciales con respecto a cada una de las magnitudes resultan triviales, y se puede desarrollar

un balance de incertidumbres para calcular la incertidumbre combinada asociada al volumen (tabla 3.1).

Fuente	Medición (m)	Origen	Tipo	Valor (m)	k	u_i (m)	c_i (m^2)	$c_i^2 u_i^2$ (m^2)	%
a	0,020	Cal	B	0,0001	2	0,00005		$3,04 \times 10^{-11}$	0,01
		Res	B	0,001	1,73	0,0003	$1,10 \times 10^{-1}$	$1,01 \times 10^{-9}$	0,33
		Rep	A	0,005	1	0,005		$3,04 \times 10^{-7}$	99,66
b	3,025	Cal	B	0,0001	2	0,00005	$7,29 \times 10^{-4}$	$1,33 \times 10^{-15}$	0,00
		Res	B	0,001	1,73	0,0003		$4,43 \times 10^{-14}$	0,00
d	3,645	Cal	B	0,0001	2	0,00005	$6,05 \times 10^{-4}$	$9,14 \times 10^{-16}$	0,00
		Res	B	0,001	1,73	0,0003		$3,05 \times 10^{-14}$	0,00

Tabla 3.1: Balance de incertidumbres empleado para determinar la incertidumbre u_{abd} asociada a V_{abd} .

En la tabla 3.1 se muestra la disposición típica de un balance de incertidumbres aplicado a la determinación de la incertidumbre u_{abd} asociada a V_{abd} . De izquierda a derecha se especifica la magnitud fuente de cada incertidumbre, el valor medido para cada magnitud, el origen, tipo y valor de la información disponible de cada incertidumbre (especificación o incertidumbre de calibración), el factor de cobertura asociado a la distribución de probabilidad correspondiente, la incertidumbre estándar u_i asociada a cada contribución, el coeficiente de sensibilidad c_i evaluado en los valores medidos, el producto de u_i y c_i al cuadrado y la contribución porcentual de cada tipo de incertidumbre.

Se observa que la mayor contribución a la incertidumbre total está dada por la componente de repetibilidad de la medición de la altura, siendo despreciables el resto de las contribuciones. Este tipo de análisis resulta fundamental en metrología, ya que permite analizar qué magnitudes se deben medir con mayor precisión, más veces o con otros instrumentos para achicar la incertidumbre total, en este caso sería deseable hacer más mediciones de la altura para así disminuir su incertidumbre por repetibilidad asociada.

Así, u_{abd} resulta de sumar todos los valores de la columna $c_i^2 u_i^2$ de la tabla 3.1, según la ecuación (3.8), y tomar su raíz cuadrada (3.10).

$$u_{\text{abd}} = 5,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \quad (3.10)$$

Siendo que la mayor contribución a u_{abd} está dada por la componente de repetibilidad de la medición de la altura, si las mediciones son suficientes (al menos 10) se cumplen las condiciones del teorema central del límite. De este modo la distribución resultante es normal y un factor de cobertura de $k = 2$ se corresponde aproximadamente a un nivel de confianza del 95 %, pudiéndose calcular a partir de u_{abd} en la ecuación (3.10) la incertidumbre combinada expandida U_{abd} (3.11).

$$U_{\text{abd}} = 2u_{\text{abd}} = 0,001 \text{ m}^3 \quad (3.11)$$

Finalmente, a partir de la ecuación (3.11) se puede reportar entonces el intervalo donde está contenido el valor de V_{abd} según la ecuación (3.12).

$$V_{abd} = (0, 221 \pm 0, 001) \text{ m}^3 \quad (3.12)$$

3.4. Comparación de resultados

En el ámbito de la metrología, es común la realización de ensayos interlaboratorio como una práctica fundamental para asegurar la calidad y comparabilidad de las mediciones. Estos ensayos permiten a diferentes laboratorios medir la misma muestra bajo condiciones controladas, facilitando la evaluación de la reproducibilidad y la identificación de posibles discrepancias entre los resultados obtenidos. Además, los ensayos interlaboratorio sirven como una herramienta para la validación de métodos de medición, el reconocimiento mutuo de competencias entre laboratorios y la mejora continua de los procesos de medición.

En el artículo “*The evaluation of key comparison data*”, M. G. Cox propone dos procedimientos para evaluar los resultados obtenidos de una comparación interlaboratorio [25]. De ellos, el procedimiento A es aplicable a comparaciones interlaboratorio cuando se cumplen las siguientes tres condiciones:

1. cada participante proporciona una medición, junto con su incertidumbre estándar asociada, de una muestra itinerante que tiene estabilidad durante el transporte entre laboratorios;
2. la medición de cada participante se realiza de manera independiente de las mediciones de los otros laboratorios en la comparación; y
3. para cada participante, se puede asignar una distribución gaussiana al mensurando del cual la medición del laboratorio es una estimación.

La implicación de la condición 2 es que no existe dependencia mutua entre las mediciones de los laboratorios, lo cual podría ocurrir si uno de los participantes le calibra instrumentos o patrones empleados en la comparación a otro.

Para una comparación de resultados entre M laboratorios se puede calcular un valor de referencia x_{ref} (KCRV por su sigla en inglés, “*Key Comparison Reference Value*”) a partir de los valores x_i medidos por cada laboratorio (3.13).

$$x_{\text{ref}} = \frac{\sum_{i=1}^M p_i x_i}{\sum_{i=1}^M p_i} \quad (3.13)$$

En la ecuación (3.13) se propone que cada valor x_i sea afectado por un peso inversamente proporcional a su incertidumbre $p_i = u^{-2}(x_i)$ de modo que los valores

cuya incertidumbre sea mayor tengan una menor contribución al valor de referencia x_{ref} y a su incertidumbre $u(x_{\text{ref}})$ (3.14) [25].

$$u(x_{\text{ref}}) = \left(\sum_{i=1}^M u^{-2}(x_i) \right)^{-1/2} \quad (3.14)$$

A partir de las ecuaciones (3.13) y (3.14) se puede definir el error normalizado En_i para cada valor x_i en relación al valor de referencia x_{ref} (3.15).

$$|\text{En}_i| = \frac{|x_i - x_{\text{ref}}|}{2\sqrt{u^2(x_i) - u^2(x_{\text{ref}})}} \quad (3.15)$$

A partir de la ecuación (3.15) se puede definir el criterio de evaluación del error normalizado, comúnmente usado para evaluar los resultados de un ensayo interlaboratorio. Este criterio indica que si se cumple $|\text{En}_i| \leq 1$ entonces existe acuerdo entre las mediciones, caso contrario x_i se clasifica como discrepante, se lo excluye de la comparación y se calcula un nuevo valor de referencia que no lo contenga.

Capítulo 4

Caracterización y diseño del dispositivo

En el INTI, la infraestructura empleada para llevar a cabo ensayos de absorción sonora se encuentra dividida en dos recintos: la cámara de transmisión y la cámara reverberante. Si bien ambas cámaras se encuentran separadas espacialmente, estas se conectan mediante un cableado que recorre internamente sus paredes. En la cámara de transmisión se ubican el generador de ruido y el amplificador, los cuales se comunican a través de una bornera con el micrófono y el parlante presentes en la cámara reverberante.

En este capítulo se detalla el instrumental perteneciente a cada cámara y se presentan esquemas con su disposición. De la cámara de transmisión se describe el funcionamiento del *Building Acoustics Analyzer Type 4417* de Brüel & Kjær, equipo que opera tanto de generador de ruido rosa filtrado como de sistema de adquisición calculando el tiempo de reverberación. Para la cámara reverberante, dada la geometría particular, entre otras condiciones, que exige la norma IRAM 4065:2019, resulta necesario caracterizar algunos de sus parámetros previo a afirmar que en la misma se pueden realizar ensayos de absorción sonora siguiendo los lineamientos normativos establecidos. Entre estos parámetros se pormenorizan: sus dimensiones, las áreas máximas de absorción sonora, su frecuencia mínima de resonancia y la difusividad del campo sonoro. Sobre el final del capítulo se presenta un instructivo de medición que da cuenta del procedimiento llevado a cabo en ambas cámaras al momento de realizar un ensayo.

4.1. Cámara de transmisión

La cámara de transmisión se encuentra separada de la cámara reverberante, a aproximadamente 5 metros de distancia, dentro del parque interno del edificio de Física y Metrología del Parque Tecnológico Miguelete del INTI (fig. 4.1) [26].



Fig. 4.1: imagen satelital del edificio de Metrología Física en el Parque Tecnológico Miguelete del INTI. En rojo cámara de transmisión, en azul cámara reverberante.

Estas cámaras se conectan a través de un cableado que pasa por el edificio que se encuentra entre medio de ambas, como se ve en la figura 4.1. Ambas cuentan con una bornera con 5 conectores hembra, 4 BNC y uno XLR, diseñadas para llevar a cabo 4 mediciones simultáneas de tiempo de reverberación, aunque inicialmente se midieron de a uno (fig. 4.2).



Fig. 4.2: bornera de la cámara de transmisión (izquierda) y bornera de la cámara reverberante (derecha). En el centro de ambas conector XLR hembra y por fuera 4 conectores BNC hembra. Los conectores BNC que se encuentran en la misma ubicación con respecto al conector XLR están conectados entre sí.

El *Building Acoustics Analyzer Type 4417* (BAAAn) es un equipo muy usado en acústica arquitectónica tanto para ensayos de absorción como de transmisión sonora. El mismo fue creado en 1980 por la empresa de electrónica danesa Brüel & Kjær, y opera tanto de generador de ruido rosa filtrado como de sistema de adquisición,

ya que cuenta con una función para calcular el tiempo de reverberación a partir de registrar la caída de una señal en función del tiempo (fig. 4.3).

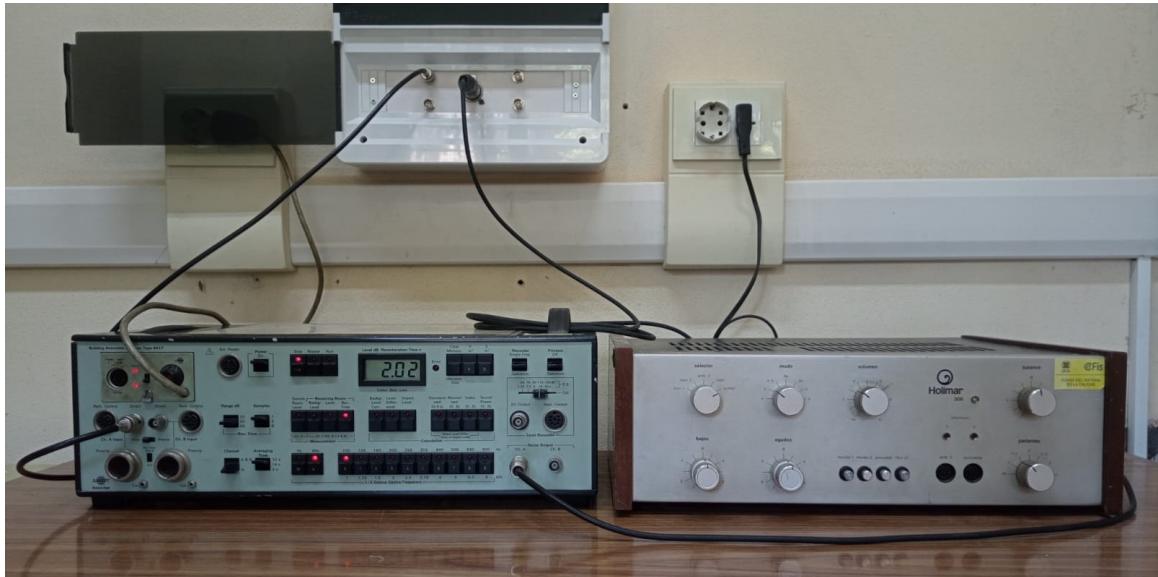


Fig. 4.3: dispositivo experimental de la cámara de transmisión. La salida de audio del BAAn se conecta a la entrada del amplificador, la salida del amplificador se conecta al conector XLR de la bornera y la entrada de audio del BAAn se conecta a un conector BNC.

En la figura 4.3, la salida de audio del BAAn se conecta a la entrada de un amplificador marca Holimar, para así amplificar y regular la intensidad de la señal sonora emitida por el BAAn. La salida de la señal sonora del amplificador se conecta al conector XLR de la bornera de la cámara de transmisión, desembocando a través de un cableado en la bornera de la cámara reverberante para conectarse a un parlante *OmniPower 3292* marca Brüel & Kjær. La señal sonora es captada por un micrófono condensador *Type 4165* también de Brüel & Kjær, montado en un pie de micrófono, el cual se conecta a un conector BNC de la bornera de la cámara reverberante, para que el BAAn reciba la señal conectándose al conector BNC correspondiente en la cámara de transmisión (en la sección 4.2.2 se presenta un esquema del arreglo experimental en la cámara reverberante).

4.1.1. Building Acoustics Analyzer

El BAAn tiene un generador de ruido rosa de banda ancha y 20 filtros de banda de tercio de octava (en concordancia con la norma IRAM 4081:1977) que cubren el rango de frecuencias de 100 Hz a 8 kHz. Para el modo de medición de tiempo de reverberación emite el ruido filtrado durante unos segundos (8 s a 100 Hz, disminuyendo el tiempo con el aumento de la frecuencia) para luego comenzar a registrar el nivel de presión sonora en función del tiempo. Esto lo hace de manera automática,

comenzando en 100 Hz y finalizando en 8 kHz, mostrando en la pantalla al terminar la medición de cada banda el valor del tiempo de reverberación en segundos con una resolución de una centésima (fig. 4.4).



Fig. 4.4: panel frontal del BAAAn. Se muestra configurado el modo de medición de tiempo de reverberación habiendo finalizado una medición de 2,02 s a 1 kHz, obtenida a partir del promedio de 3 mediciones en un rango de caída de 30 dB.

Como se ve en la figura 4.4, el BAAAn cuenta con un selector de cantidad de mediciones (1,3 ó 9) para las cuales se calcula cada valor y se muestra el valor promedio. Además cuenta con un selector de rango (20 dB, 30 dB ó 40 dB), dependiendo del rango deseado para realizar la medición y extrapolar la curva a una caída de 60 dB. Por cada curva registrada, el BAAAn calcula el tiempo de reverberación desde un nivel de -5 dB hasta 20 dB, 30 dB, ó 40 dB por debajo (fig. 4.5) [27].

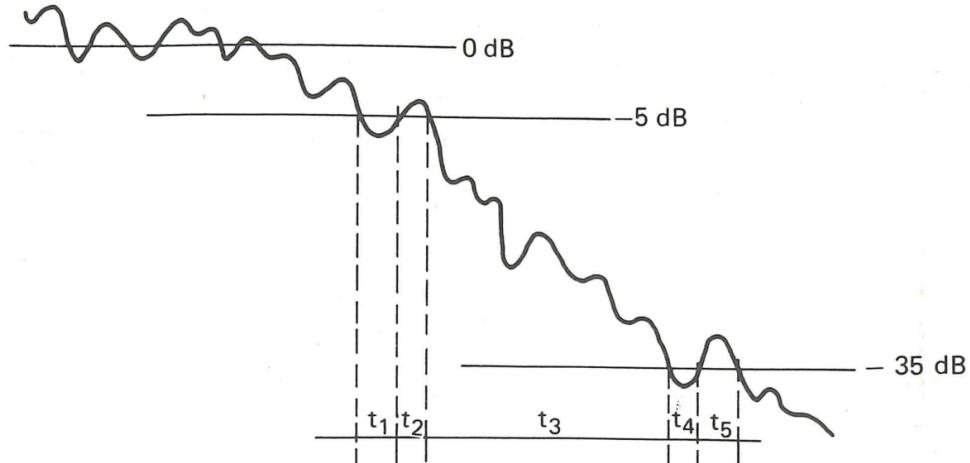


Fig. 4.5: esquema de una curva típica de nivel de presión sonora (dB) en función del tiempo (s) registrada por el BAAAn en un ensayo de absorción sonora. Los intervalos t_1 , t_3 y t_5 corresponden a los tiempos en donde el nivel de presión sonora se encuentra dentro del rango de medición deseado (de -5 dB a -35 dB) mientras que los intervalos t_2 y t_4 corresponden a los tiempos en donde se encuentra fuera de dicho rango.

En la figura 4.5 se observa cómo el nivel de presión sonora no solo disminuye en el rango de -5 dB a -35 dB, sino que a veces puede incrementarse o incluso bajar de -35 dB y volver a subir. El BAAAn contempla estos efectos calculando el tiempo de reverberación (TR) a partir de la suma de los intervalos temporales donde la señal

efectivamente tiene un nivel de presión sonora dentro del rango deseado (4.1).

$$TR = \frac{(t_1 + t_3 + t_5) \cdot 60 \text{ dB}}{30 \text{ dB}} \quad (4.1)$$

En la ecuación (4.1) se calcula el tiempo de reverberación para la curva de la figura 4.5, correspondiente a seleccionar un rango de 30 dB en el BAA n ya que solo se consideran los intervalos temporales en este rango.

4.2. Cámara reverberante

La cámara reverberante se encuentra ubicada a pocos metros de la cámara de transmisión, como se ve en la imagen satelital de la figura 4.1, y se conecta con la misma empleando la bornera de la figura 4.2 (derecha). La figura 4.1 adelanta su particular geometría, siendo que el techo visiblemente no es rectangular, y en la figura 4.6 se observa también cómo una de sus paredes no es perpendicular al suelo.



Fig. 4.6: vista exterior de la cámara reverberante del Laboratorio de Acústica y Vibraciones del INTI.

La norma IRAM 4065:2019 establece requisitos específicos que deben cumplir ciertos parámetros de una cámara reverberante a fines de poder ser empleada para realizar ensayos de absorción sonora, tales como: relaciones entre el mayor segmento de recta inscrito en la cámara y su volumen, cotas para las áreas equivalentes de absorción sonora y condiciones para aumentar la difusividad del campo sonoro.

4.2.1. Plano y modelado 3D

Un parámetro que se emplea para calcular α_s a partir de la ecuación (2.11) es el volumen interior de la cámara V. Según la norma este debe ser por lo menos de 150 m^3 y preferiblemente mayor a 200 m^3 , debiendo cumplir asimismo con la relación (4.2) [2].

$$L_{\max} < 1,9 \cdot V^{1/3} \quad (4.2)$$

En la ecuación (4.2), L_{\max} es el largo del mayor segmento de recta inscrito en la cámara en metros.

Para verificar estas relaciones se empleó el plano original confeccionado para la construcción de la cámara, donde figuran las medidas de la planta y las alturas de cada pared con los ángulos que forman las mismas (fig. 4.7).

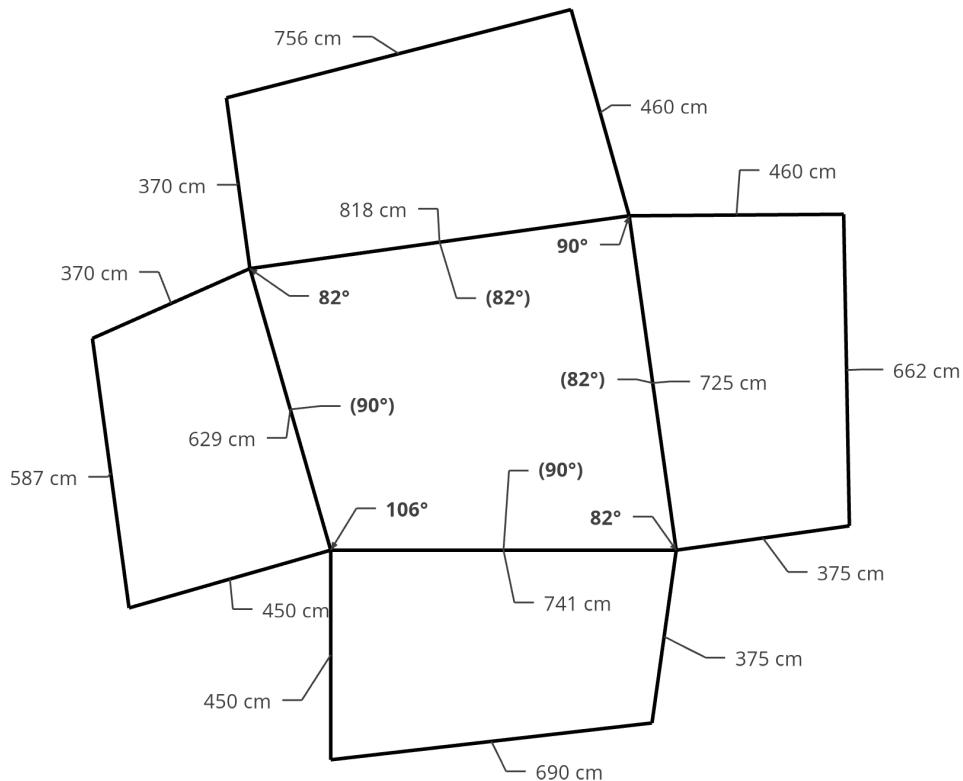


Fig. 4.7: plano digitalizado de la cámara reverberante del Laboratorio de Acústica y Vibraciones del INTI. Los ángulos de las esquinas indican los ángulos internos entre las paredes de la cámara a la altura del piso, mientras que los ángulos a mitad de cada lado indican la inclinación de cada pared con respecto al piso.

Empleando el programa de diseño 3D *SketchUp for Web* se modeló la cámara a partir del plano de la figura 4.7. Este modelado permitió obtener una primera

estimación de su volumen interno, dado que su geometría no permite aproximarla por un sólido regular (fig. 4.8) [28].

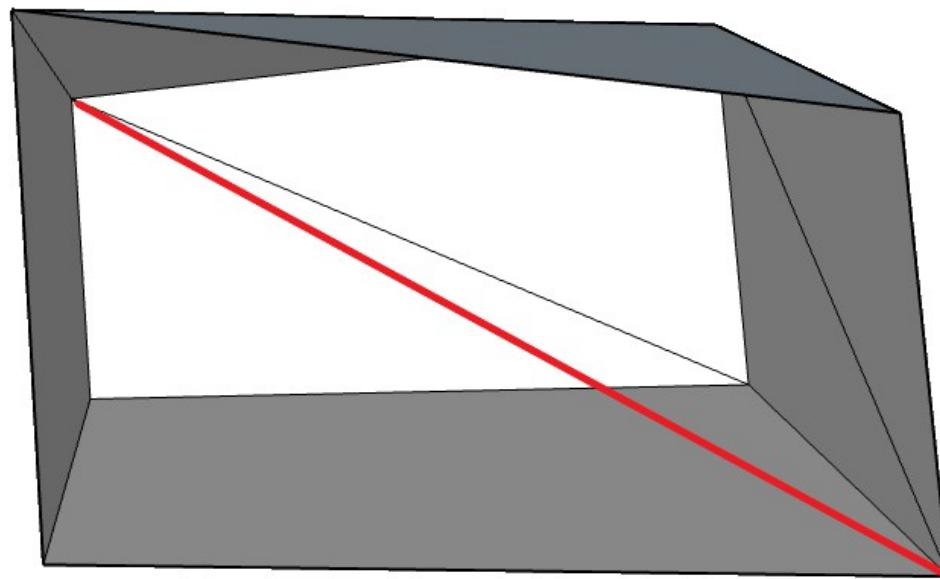


Fig. 4.8: modelo 3D de la cámara reverberante diseñado en *SketchUp for Web* sin la pared donde se encuentra la puerta. En rojo se marca la diagonal mayor L_{\max} .

El volumen del cuerpo de la figura 4.8 calculado por el programa fue de $V = 202,14 \text{ m}^3$, mientras que la longitud de la diagonal mayor se midió directamente con un distan- ciómetro láser, resultando en $L_{\max} = (11,056 \pm 0,048) \text{ m}$.

Luego, para obtener el volumen de aire disponible en la cámara sin la muestra (V_1) a partir de V basta con restar el volumen de todos los elementos contenidos en la cámara (lo cual se realiza en el capítulo 5).

Como el método por el cual el programa calcula el volumen de los objetos resulta desconocido, no es posible asignar una incertidumbre a V usando la ley de propagación de incertidumbres. Además, debido a la inexactitud de las medidas que se logran con las tecnologías de construcción, al medir directamente algunas aristas de la cámara y compararlas con las longitudes indicadas en el plano se detectaron diferencias de entre 10 cm y 20 cm. Estas discrepancias llevaron a estudiar cómo estas variaciones en las medidas de las aristas podrían afectar los ángulos entre las paredes y, en consecuencia, el volumen total de la cámara. Este análisis se describe en el capítulo 5, donde se emplea otro método para calcular el volumen de la cámara V junto con su incertidumbre.

A fin de verificar la relación dada por (4.2), se consideró la cota menor encontrada para el volumen en el capítulo 5, de $200,35 \text{ m}^3$, y la cota mayor encontrada para

la diagonal mayor tal que $11,10 \text{ m} \leq 1,9 \cdot (200,35)^{\frac{1}{3}} = 11,12 \text{ m}$, satisfaciéndose la inecuación.

4.2.2. Posiciones de micrófonos, parlantes y muestra

El principio del método del ruido interrumpido consiste en excitar la cámara con ruido de banda limitada empleando un altavoz y registrar las curvas de caída de nivel de presión sonora con un micrófono para rangos de frecuencia de un tercio de octava como mínimo. De esta manera se obtiene un valor de tiempo de reverberación para cada banda, debiéndose promediar varias mediciones tomadas en una posición micrófono/altavoz, con el objeto de reducir la incertidumbre de la medición causada por desviaciones estadísticas [2].

Según establece la norma IRAM 4065:2019, las disposiciones geométricas micrófono/altavoz dentro de la cámara deben ser por lo menos 12, cumpliéndose que el número mínimo de posiciones de micrófono sea 3 y de altavoz 2. Además, las posiciones de los micrófonos deben distar por lo menos 1,5 m entre ellas, 2 m del altavoz y 1 m de cualquier superficie de la cámara (incluyendo el piso).

A tales fines, la posición de la fuente sonora se alterna entre dos de sus esquinas (**A1** y **A2**). El pie de micrófono se monta en 4 puntos distintos de la cámara (**M1**, **M2**, **M3** y **M4**), y el micrófono rota entre 2 posiciones distintas por cada punto (**j** y **k**) (fig. 4.9).

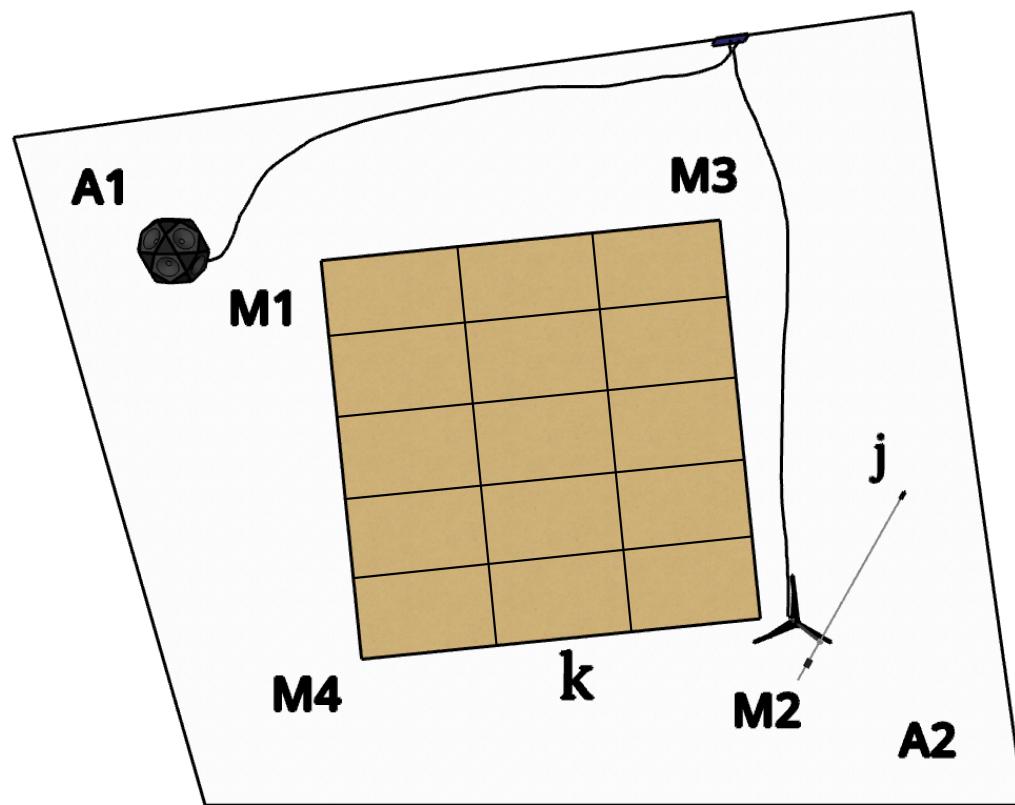


Fig. 4.9: esquema de distribución en planta del arreglo experimental dentro de la cámara reverberante para la configuración **A1M2j**.

En la figura 4.9 se observa cómo la muestra está montada sobre el piso, y cómo ninguno de sus bordes está en contacto con las paredes de la cámara. Esta disposición se denomina “montaje tipo A”, y se encuentra definida en el Anexo B de la norma IRAM 4065:2019 junto con otros 5 tipos de montajes.

El montaje tipo A es comúnmente usado para absorbentes planos, donde la muestra debe tener un área comprendida entre 10 m^2 y 12 m^2 . La norma especifica que “la muestra de ensayo debe ser de forma rectangular con una relación ancho/largo comprendida entre 0,7 y 1” y que “se debe colocar de forma que ninguna parte diste menos de 1 m de las aristas de la cámara” con los bordes de la muestra preferiblemente orientados para que no queden paralelos a la arista más próxima de la cámara.

Las principales solicitudes para ensayos de absorción sonora llegan al laboratorio desde sectores de la industria como la construcción y fabricantes de paneles acústicos, que generalmente buscan caracterizar cielorrasos y paneles de aproximadamente 1 m^2 de superficie. En estos casos, la muestra se compone de un arreglo de varios paneles, como se ve en la figura 4.9, a fines de alcanzar el área total especificada por la norma. Además, puede ser necesario cubrir las juntas entre paneles adyacentes con cinta u otro material que no sea absorbente sonoro, dependiendo de cómo sea la instalación de dicha muestra en la práctica. Algo similar ocurre con el perímetro de la muestra,

los paneles también absorberán sonido lateralmente, con lo cual deben cubrirse con un marco de madera o yeso, o bien su área debe tomarse en cuenta para el cálculo del área de la muestra (fig. 4.10).

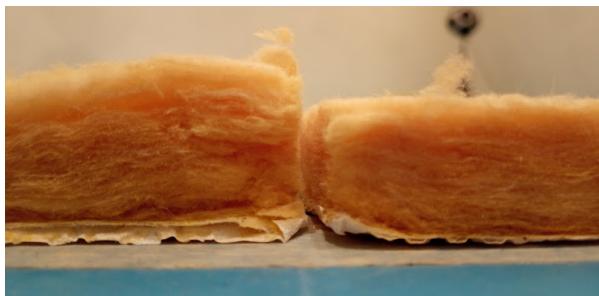


Fig. 4.10: vista lateral de la junta entre dos paneles absorbentes, correspondientes al material Andina Rústico PVC de Isover. Se observa cómo la junta entre los dos paneles no es perfecta, permitiendo la absorción sonora en esa región.

En la figura 4.10 se ve además que paneles de un mismo material pueden no tener el mismo espesor. Esto se traduce en una complicación al momento de determinar el espesor de la muestra para calcular su superficie geométrica S , que se usa en la ecuación (2.11). Para tratar esto, en el capítulo 5 se estima una fuente de incertidumbre de tipo A por repetibilidad para el espesor de la muestra.

Las juntas, los laterales y la diferencia de espesor son las componentes que dificultan hacer una buena estimación de S . Generalmente lo que ocurre es que se subestima el área de la muestra, ya que el sonido se filtra por lugares que no son tenidos en cuenta, siendo absorbido por la muestra. Es por esto que es común y aceptado en la práctica obtener valores de $\alpha_s > 1$, ya que al realizar el cociente de la ecuación (2.11), S resulta menor de lo que efectivamente es.

4.2.3. Áreas máximas de absorción sonora

Para verificar que las condiciones geométricas de la cámara cumplieran con los requisitos de la norma IRAM 4065:2019, se calcularon las áreas equivalentes de absorción sonora de la cámara vacía. La norma establece una tabla con valores máximos para cada banda de tercio de octava para un volumen de 200 m^3 , indicando que se debe multiplicar a los mismos por un factor $(V/200 \text{ m}^3)^{2/3}$ [2].

A partir de la ecuación (2.10) se calcularon las áreas equivalentes de absorción sonora de la cámara vacía A_1 y se promediaron las áreas calculadas a una misma frecuencia para las 12 posiciones, para así compararlas con las máximas establecidas por la norma IRAM 4065:2019 (tabla 4.1).

Frecuencia (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630
A ₁ máx (m ²)	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
A ₁ cal (m ²)	1,9	2,2	2,7	3,0	2,8	2,8	3,3	3,4	3,6
Frecuencia (Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
A ₁ máx (m ²)	6,5	7,0	7,6	8,1	9,6	10,6	12,1	13,1	14,1
A ₁ cal (m ²)	3,8	4,6	4,9	5,4	6,1	6,9	8,2	10,1	12,3

Tabla 4.1: áreas máximas de absorción sonora establecidas por la norma IRAM 4065:2019 para un volumen de 202,14 m³ (**A₁ máx**) comparadas con las calculadas (**A₁ cal**) para cada banda de tercio de octava en m² calculadas según la ecuación (2.10)

En la tabla 4.1 se observa cómo las áreas calculadas no superan las máximas establecidas por la norma para ninguna banda de tercio de octava, lo cual indica que las condiciones geométricas de la cámara son las adecuadas para llevar a cabo ensayos de absorción sonora cumpliendo con los requisitos de la norma IRAM 4065:2019.

4.2.4. Modos propios

De la ecuación (2.21) se pueden calcular las frecuencias de resonancia para un recinto con forma de prisma rectangular en sus tres longitudes características L_x , L_y y L_z , fijando los números de modo n_x , n_y y n_z . Los casos para los cuales 2 de los números de modo se fijan a 0 se conocen en acústica de salas como “modos axiales”, que son los más preponderantes. Si solo uno se fija a 0 y los otros dos quedan libres estos se conocen como “modos tangenciales”, y cuando todos son distintos de 0 “modos oblicuos” [29] [30].

Para estimar la mínima frecuencia de resonancia de un recinto se deben calcular los 3 primeros modos axiales en sus 3 longitudes características. En una cámara reverberante esta frecuencia resulta un parámetro de interés ya que indica el valor mínimo a partir del cual la cámara efectivamente resuena. Dado que la norma IRAM 4065:2019 establece que los ensayos deben realizarse desde 100 Hz, basta con verificar que la frecuencia mínima de resonancia está por debajo de este valor.

Como la cámara reverberante del INTI no cuenta con una geometría de prisma rectangular, se optó por hacer una aproximación tomando el mayor prisma rectangular que se pudiera inscribir dentro de la cámara, para así obtener las longitudes características mínimas para las cuales se pueden inducir ondas estacionarias. Para este prisma, de dimensiones aproximadas $L_x = 561$ cm, $L_y = 669$ cm y $L_z = 375$

cm se estimaron las frecuencias de resonancia de los primeros 9 modos normales y se graficaron la distribuciones de presiones según la ecuación (2.20) usando la librería “Matplotlib” de Python [31]. Para la velocidad del sonido en el aire (c) de la ecuación (2.20) se tomó $c = 34300$ cm/s, correspondiente a una temperatura de 20 °C.

En la figura 4.11 se observa que el modo (0,1,0) presenta la menor frecuencia de resonancia, de aproximadamente 25 Hz, muy por debajo de los 100 Hz mínimos necesarios para llevar a cabo un ensayo bajo lineamientos normativos.

4.2.5. Difusividad del campo sonoro

Para lograr un campo sonoro difuso dentro de una cámara reverberante la norma IRAM 4065:2019 recomienda emplear “láminas de baja absorción sonora y con una masa por unidad de superficie de aproximadamente 5 kg/m²” de “entre 0,6 m² y 3 m²” cada cara. Además establece, a partir de datos empíricos, que “el área (ambas caras) de difusores requerida para obtener una difusión adecuada es aproximadamente del 15 % al 25 % del área total de las superficies de la cámara”.

Así, el campo sonoro difuso se forma a través de una serie de reflexiones múltiples en las superficies de la habitación o recinto donde se encuentra la fuente sonora. Cada reflexión de las ondas sonoras produce una modificación en la dirección de propagación, lo que hace que las ondas sonoras se distribuyan de manera aleatoria en todas las direcciones. A medida que el número de reflexiones aumenta, el campo sonoro se vuelve cada vez más difuso, aunque cabe preguntarse: “¿cuánta difusividad es suficiente?” [32].

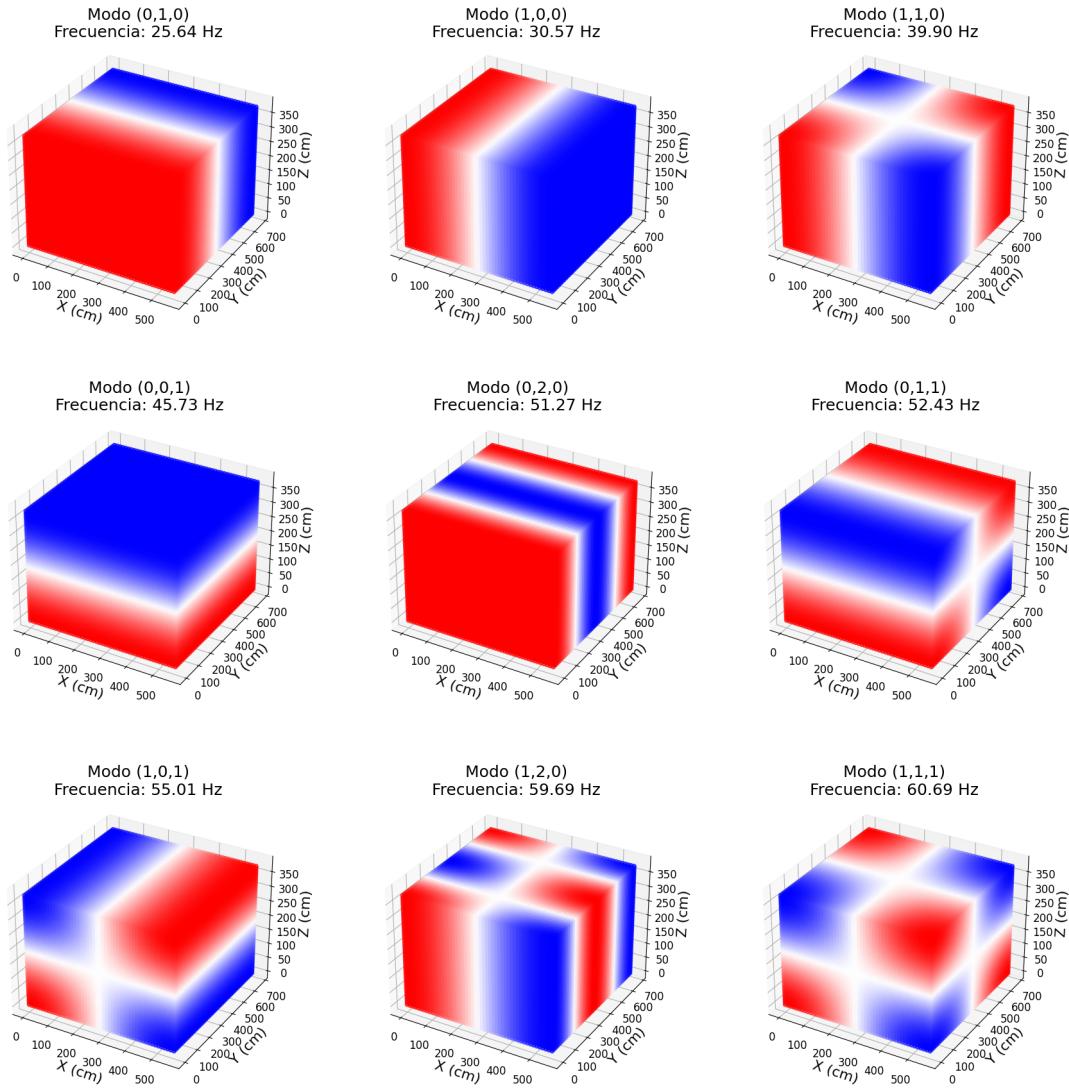


Fig. 4.11: distribución espacial de la presión $S(x, y, z)$ según la ecuación (2.20) de los primeros 9 modos para el mayor recinto de base rectangular inscrito en la cámara reverberante. En rojo y azul se ilustran las zonas con nodos y antinodos de presión respectivamente.

Difusores planos

La norma IRAM 4065:2019 establece el uso de paneles difusores suspendidos en el techo de la cámara reverberante, con el fin de maximizar las reflexiones de las ondas de sonido aumentando su aleatoriedad. Estos se incorporan a la cámara de a cantidades que representen un incremento de aproximadamente 5 m^2 , hasta que el campo sonoro se vuelva adecuadamente difuso.

Una forma de comprobar la difusividad del campo es calculando el promedio de α_s en el rango de 500 Hz a 4000 Hz de un material de referencia que resulte muy absorbente ($\alpha_s > 0,9$) y analizando su comportamiento en función del área total

de difusores. Cuando este valor tienda a ser aproximadamente constante, se habrá alcanzado el número óptimo de difusores. Por otro lado, la desviación estándar en los tiempos de reverberación medidos en las 12 posiciones del par micrófono/altavoz, también resulta un indicador de la homogeneidad del campo sonoro, ya que en condiciones de un campo completamente difuso, sin direcciones privilegiadas, el tiempo de reverberación debería ser independiente de la posición.

Inicialmente se emplearon como difusores 6 paneles de acrílico cuadrados de aproximadamente 1 m de lado y 4 rectangulares de 1,20 m por 0,8 m, ambos de 5 mm de espesor. Como material absorbente para la calibración se emplearon paneles de lana de vidrio cuadrados de 1,2 m de lado y 50 mm de espesor de *Acustiver P50* de la marca *Isover*, los cuales se montaron sobre el piso de la cámara reverberante.

Alternadamente se realizaron mediciones del tiempo de reverberación a cámara vacía y con la muestra, primero sin difusores, luego con un área de 4,92 m² difusores (2 rectangulares y 3 cuadrados) y finalmente con un área total de 9,84 m² (4 rectangulares y 6 cuadrados). Se analizaron los coeficientes de absorción sonora calculados en función de la frecuencia entre 500 Hz y 4000 Hz para las 3 cantidades de difusores empleados (fig. 4.12).

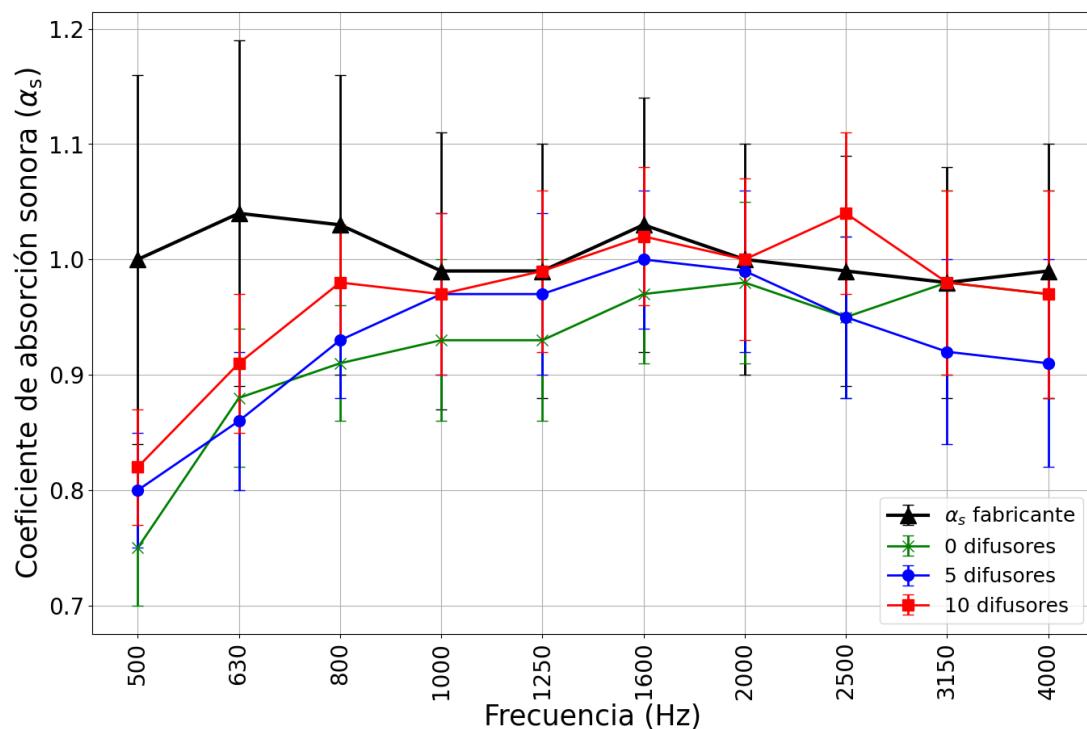


Fig. 4.12: coeficientes de absorción sonora en función de la frecuencia para 0, 5 y 10 difusores y valores informados por el fabricante.

En la figura 4.12 se muestra un gráfico típico con curvas de absorción sonora, siendo común en el campo de la acústica para su visualización reportarlas uniendo

los puntos con líneas rectas sin que esto implique una interpolación. Al aumentar el número de difusores, el valor medio de α_s se incrementa, dado que el campo se torna más difuso y la incidencia del sonido sobre el material se vuelve más pareja en todas las direcciones, lo cual favorece la absorción. Las diferencias entre los valores informados por el fabricante y los valores calculados para frecuencias menores a 800 Hz posiblemente se deban a cómo fue montada la muestra al momento de hacer el ensayo de absorción sonora, algo que no se informa en la hoja de datos del fabricante. De haberse llevado a cabo el ensayo de absorción sonora cubriendo los bordes de la muestra con un marco reflejante de sonido, no se puede esperar que la curva del fabricante tenga la misma forma que las de la figura 4.12.

Esta observación motivó la incorporación de una mayor cantidad de difusores, dado que incluso para la cantidad empleada no se cumplía la recomendación de la norma de que el área (ambas caras) de difusores ($19,68 \text{ m}^2$) esté comprendida entre el 15 % ($31,72 \text{ m}^2$) y el 25 % ($52,87 \text{ m}^2$) del área total de las superficies de la cámara.

Difusores esféricos

Dado que el acrílico es muy costoso, se optó por emplear esferas de telgopor de alta densidad ya que, si bien no están contempladas explícitamente en la norma IRAM 4065:2019, otros laboratorios de acústica usan como difusores esferas de estas características de aproximadamente 1 m de diámetro [33]. Como el tamaño de esfera más grande disponible en el mercado local era de 0,6 m de diámetro ($4,52 \text{ m}^2$), se emplearon 3 esferas para alcanzar un área total de $(33,14 \pm 0,06) \text{ m}^2$, cumpliendo con la recomendación de la norma IRAM 4065:2019. Las esferas fueron recubiertas con 3 capas de pintura acrílica de alto tránsito para que adquirieran una mayor reflectividad y fueron colgadas del techo de la cámara en los lugares que menos cantidad de difusores había.

En las figuras 4.13 y 4.14 se observa la disposición final de los difusores en la cámara reverberante. Se analizaron los coeficientes de absorción sonora calculados en función de la frecuencia entre 500 Hz y 4000 Hz para la configuración de los 10 difusores planos y los 3 esféricos (fig. 4.15).



Fig. 4.13: cámara reverberante con la configuración final adoptada para los difusores, sobre el piso se monta una muestra de *Andina PVC Rústico* de la marca *Isover*.



Fig. 4.14: ubicación de las 3 esferas de telgopor de alta densidad recubiertas con pintura acrílica de alto tránsito.

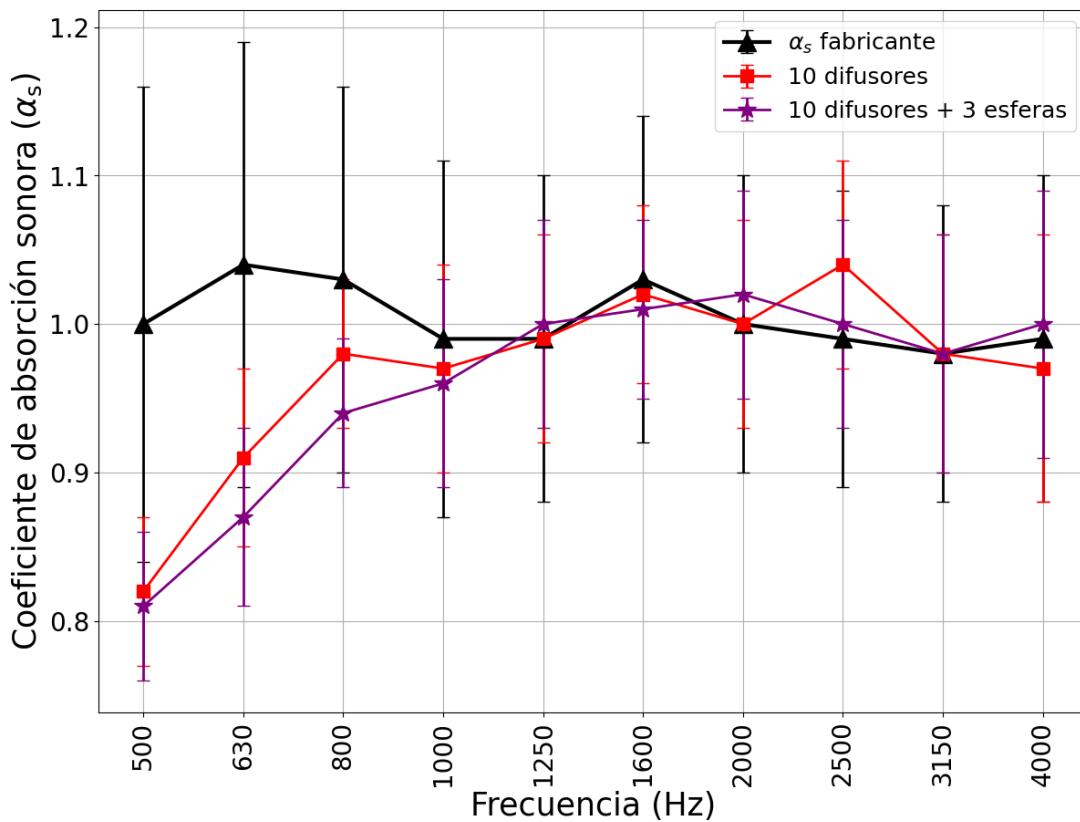


Fig. 4.15: coeficientes de absorción sonora en función de la frecuencia para distintas configuraciones de difusores y valores informados por el fabricante.

En la figura 4.15 no se observan diferencias significativas entre la configuración de los 10 difusores planos y la que incorpora los 3 difusores esféricos. Sin embargo, al analizar los tiempos de reverberación medidos, se observó que estos disminuyeron casi a la mitad con la nueva configuración.

En la figura 4.16 se observa cómo en todo punto la dispersión de la configuración con solamente 10 difusores de acrílico es mayor que la resultante al incorporar los 3 difusores de telgopor. De esta manera, se logró cumplir con la recomendación de la norma IRAM 4065 en cuanto al área de difusores empleada, verificando además que las desviaciones estándar de la media de los tiempos de reverberación disminuyeron con el agregado de los difusores esféricos, resultando el campo sonoro de la cámara reverberante con una difusión adecuada para llevar a cabo ensayos de absorción sonora.

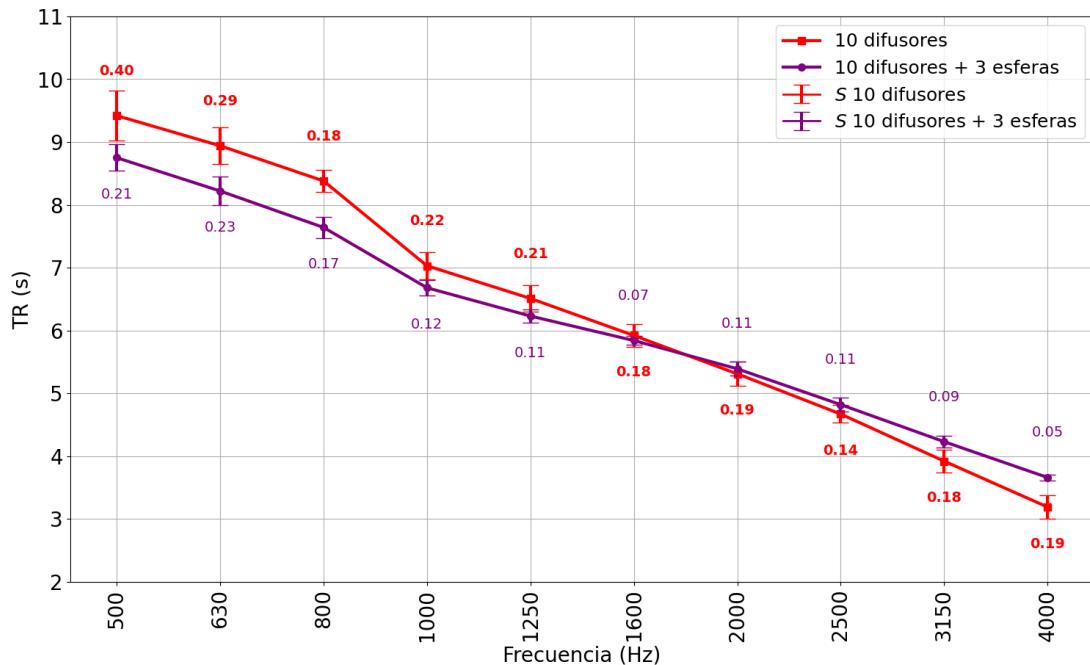


Fig. 4.16: tiempos de reverberación de la cámara sin la muestra (TR_1). Cada punto es resultado de un promedio sobre 12 posiciones para el par micrófono/altavoz, con su correspondiente incertidumbre.

4.3. Instructivo de medición

Producto del trabajo llevado a cabo y con el objetivo de sistematizar el protocolo de medición se desarrolló el siguiente instructivo. En el mismo se comentan los aspectos principales a tener en cuenta al momento de realizar ensayos de absorción sonora en cámara reverberante con el dispositivo experimental que se describió en este capítulo. Posteriormente, a partir de este instructivo, el laboratorio podrá desarrollar un procedimiento de ensayo conforme a los lineamientos de la norma ISO:17025 [34].

1. Montar la muestra de ensayo en la cámara reverberante. En caso de ser un absorbente plano, hacerlo dentro del área delimitada por la cinta blanca en el piso de la cámara reverberante, comprendiendo una superficie de entre 10 m^2 y 12 m^2 . De ser otro tipo de absorbente sonoro, hacerlo de acuerdo con el Anexo B de la norma IRAM 4065:2019.
2. Tomar las medidas de la muestra necesarias para calcular su volumen y su superficie expuesta al sonido. Considerar la necesidad de realizar varias mediciones de alguna de sus dimensiones si la muestra es irregular.
3. Controlar que las condiciones ambientales se encuentren dentro de los rangos establecidos por la norma: para la temperatura $t = (22,5 \pm 7,5)^\circ\text{C}$ y para la

humedad relativa $hr = (60 \pm 30)\%$. Sin embargo, si la temperatura está muy cercana a la cota inferior de 15°C , los tiempos de reverberación a bajas frecuencias resultan mayores a 20 s, quedando fuera del rango de medición del BAAn.

4. Verificar que el aire acondicionado está apagado y cerrar ambas puertas de la cámara reverberante al momento de realizar la medición, para que el ruido de fondo no enmascare las curvas de caída de nivel de presión sonora.
5. Seleccionar en el BAAn el modo *Rev. Time* para medir tiempos de reverberación. Se recomienda colocar la selectora *Samples* en 3, para realizar 3 mediciones en cada banda de frecuencia y obtener el tiempo de reverberación promedio, y la selectora *Range dB* en 30, ya que en este modo los valores medidos resultan menos dispersos que en los otros dos.
6. Seleccionar en el BAAn los botones correspondientes a *Hz* y a *100* para que cuando comience la medición lo haga en esta banda. Seleccionar *Run* para que comience la medición, se realizará la cantidad de mediciones de acuerdo a lo elegido en *Samples* y la pantalla mostrará el valor de tiempo de reverberación promedio. Luego, automáticamente el equipo pasará a la banda siguiente, comenzando a titilar la luz roja del número de frecuencia que se esté midiendo. Después de medir a 5 kHz, pulsar *Stop* y verificar que todos los valores se hayan guardado correctamente, seleccionando manualmente el número correspondiente a la frecuencia central de cada banda. Si algún valor no se guardó correctamente debido a un error, seleccionar *Repeat* para realizar nuevamente la medición.
7. Luego de cada medición del rango completo de frecuencias registrar la temperatura y la humedad relativa de la cámara reverberante, las cuales serán la temperatura y humedad relativa finales de la medición recientemente realizada y la temperatura y humedad relativa iniciales de la medición siguiente. Verificar que la diferencia entre temperaturas sea menor a 9°C y que la diferencia entre humedades relativas sea menor a 10 %, para así poder calcular α_s empleando el modelo simplificado.
8. Cambiar la configuración micrófono/altavoz de la cámara reverberante y volver a medir. Se deben realizar mediciones en todas las 12 configuraciones de la figura 4.9: A1M2j, A1M2k, A1M3j, A1M3k, A1M4j, A1M4k, A2M1j, A2M1k, A2M3j, A2M3k, A2M4j y A2M4k (teniendo en cuenta que el altavoz y el micrófono nunca comparten posición).
9. Una vez finalizadas las 12 series de mediciones para la cámara reverberante con la muestra, quitar la muestra de la cámara reverberante y volver a realizar las 12 mediciones, esta vez, correspondientes a la cámara reverberante sin la muestra. De haberse instalado un marco para cubrir los bordes de la muestra,

las mediciones a cámara vacía deben realizarse con el marco incluido en la cámara.

Cada medición del rango completo de frecuencias dura aproximadamente 10 minutos, constituyendo un total aproximado de 4 horas llevar a cabo el ensayo, sin contar el tiempo destinado al montaje de la muestra. Las mediciones a cámara reverberante sin la muestra demoran más que las mediciones con la muestra, ya que los tiempos de reverberación medidos resultan más largos. En caso de medirse más de una muestra el mismo día, se pueden realizar las mediciones a cámara reverberante sin la muestra solo una vez, en caso de que las condiciones ambientales no se modifiquen significativamente a lo largo del día (en el capítulo 6 se analiza la influencia de las condiciones ambientales).

Capítulo 5

Estimación de incertidumbres

El balance de incertidumbres se desarrolló siguiendo los lineamientos y recomendaciones de la GUM a partir del modelo matemático establecido por la ecuación (2.11). Al expresar dicho modelo en términos de las magnitudes medidas, aislando los parámetros de influencia, se observan dos casos posibles: un modelo simplificado y otro completo, dependiendo de si se considera o no respectivamente el cambio en las condiciones ambientales a lo largo del ensayo.

Se analizaron ambos casos por separado junto con sus fuentes de incertidumbres, las cuales se presentan en un orden conveniente para la evaluación de la incertidumbre de medición asociada a α_s .

5.1. Análisis de modelos de medición

Dada la exposición de la cámara reverberante del INTI a los cambios de temperatura se optó por analizar el grado de influencia de las condiciones ambientales en el cálculo de α_s . A partir del análisis de la ecuación (2.11) se distinguieron dos modelos: aquel más simple que no incluye el término de atenuación, suponiendo $m_1 = m_2$, y aquel más complejo que sí lo incluye, considerando la variación de las condiciones ambientales a lo largo del ensayo. Explícitamente, cada coeficiente de atenuación atmosférica $m = m(t, hr, ps)$, definiéndose las condiciones ambientales como la temperatura, la humedad relativa y la presión atmosférica.

5.1.1. Modelo simplificado (MS)

Inicialmente no se consideraron los términos m_1 y m_2 de la ecuación (2.10) que involucran la atenuación sonora, asumiendo que las condiciones ambientales no varían significativamente entre que se realizan las mediciones a cámara con y sin la muestra

(en la sección 6.1 se analizan estas variaciones). De esta manera se redefinieron algunas de las variables:

- $V_2 = V_1 - V_m$ el volumen de la cámara reverberante con la muestra, donde V_m es el volumen de la muestra, que para un absorbente plano rectangular con base (b), profundidad (d) y altura, o espesor, (a) es $V_m = abd$;
- $S = 2ab + 2ad + bd$ el área para absorbentes planos que tengan sus bordes expuestos; y
- $c = 331 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 0,6 \frac{\text{m}}{\text{s}^{\circ}\text{C}}$ t la velocidad del sonido para un rango de temperaturas entre 15 °C y 30 °C.

De esta manera, se puede expresar el modelo simplificado a partir de las redefiniciones realizadas (5.1).

$$\alpha_s = \frac{\frac{55,3 \cdot (V_1 - abd)}{TR_2 \cdot (0,6 \frac{\text{m}}{\text{s}^{\circ}\text{C}} t_2 + 331 \frac{\text{m}}{\text{s}})} - \frac{55,3 V_1}{TR_1 \cdot (0,6 \frac{\text{m}}{\text{s}^{\circ}\text{C}} t_1 + 331 \frac{\text{m}}{\text{s}})}}{2ab + 2ad + bd} \quad (5.1)$$

La medición de las longitudes (a, b y d) fue realizada en forma directa con instrumentos calibrados en el INTI. Tal como se mencionó en el ejemplo de la sección 3.3.5, las contribuciones de incertidumbres de estas magnitudes por un lado están asociadas a componentes por calibración y por resolución del instrumento. Dichas componentes corresponden a incertidumbres de tipo B y han sido evaluadas de acuerdo a las ecuaciones (3.6) y (3.5) respectivamente. En el caso de absorbentes compuestos por lana de vidrio u otros materiales que no tengan un espesor bien definido, la altura (a) se mide en varios puntos de la muestra, asignándosele además una fuente de incertidumbre de tipo A, por repetibilidad. De tratarse de muestras rectangulares o con geometrías bien definidas, no resulta necesario asignar este tipo de incertidumbre a la base (b) ni a la profundidad (d). El detalle de la evaluación de incertidumbre de estas magnitudes dimensionales se resume en la tabla 3.1 del ejemplo propuesto en la sección 3.3.5.

De manera similar, para la evaluación de incertidumbres de las temperaturas (t_1 y t_2) se tuvieron en cuenta las contribuciones debidas a la calibración del termohigrómetro digital, para el rango de temperaturas considerado (de 15 °C a 30 °C), $U_{t,\text{cal}} = 0,6$ °C, y la resolución de dicho instrumento, 0,1 °C. Estas contribuciones también fueron evaluadas de acuerdo a las ecuaciones (3.6) y (3.5), asumiendo distribuciones normal y rectangular, respectivamente. Por otro lado, dado que la temperatura se mide en las 12 posiciones del par micrófono/altavoz a cámara con y sin la muestra, se estimó una fuente de incertidumbre de tipo A, por repetibilidad de acuerdo a la ecuación (3.3).

Las fuentes de incertidumbre asociadas al volumen de la cámara sin la muestra (V_1) y de los tiempos de reverberación (TR_1 y TR_2) resultaron de un análisis más minucioso, y se abordan en las secciones 5.2 y 5.3 respectivamente.

En la figura 5.1 se observa un diagrama de Ishikawa con las contribuciones de cada fuente de incertidumbre del modelo simplificado a la incertidumbre de α_s .

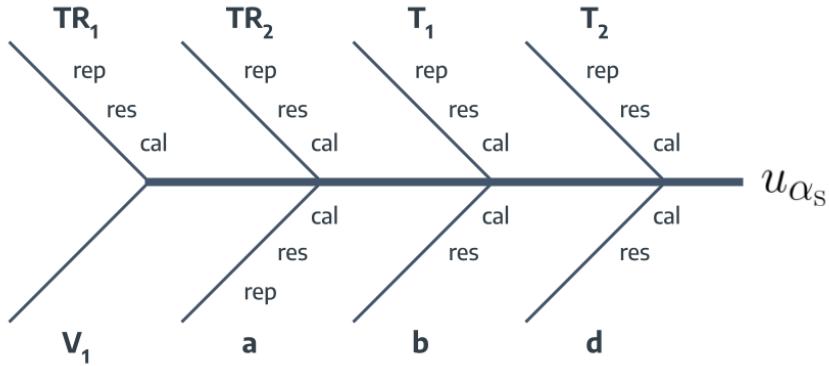


Fig. 5.1: contribución de cada fuente de incertidumbre del modelo simplificado a u_{α_s} .

El cálculo de los coeficientes de sensibilidad, necesarios para poder aplicar la ecuación (3.8) y obtener un valor de incertidumbre U_{α_s} para cada α_s en el modelo simplificado, se detalla en el apéndice A.

5.1.2. Modelo completo (MC)

El modelo completo resulta de considerar que los términos que involucran la atenuación sonora no se cancelan entre sí al restarlos en (2.11), es decir que hay un cambio considerable en las condiciones ambientales entre que se miden los tiempos de reverberación de la cámara con y sin la muestra. Como se vio en la sección 2.4.3, en la ecuación (2.12) el término de atenuación toma en cuenta la temperatura, la humedad relativa y la presión para calcular las frecuencias de relajación del oxígeno y del nitrógeno molecular $f_{r,O}$ y $f_{r,N}$ respectivamente en las ecuaciones (2.13) y (2.14).

Como la diferencia entre A_1 y A_2 en forma explícita se torna particularmente extensa, se optó por emplear la librería “sympy” de Python para manipular todos los términos con mayor facilidad y poder calcular las derivadas parciales en forma simbólica (celda 5.1) [35].

```

1 from sympy import symbols, exp, log, diff, lambdify
2 import numpy as np
3
4 V1, t1, t2, TR1, TR2, a, b, d, hr1, hr2, ps1, ps2, f1, f2, T0, T01,
5     T1, T2, ps0, e = symbols("V1\u00d7t1\u00d7t2\u00d7TR1\u00d7TR2\u00d7a\u00d7b\u00d7d\u00d7hr1\u00d7hr2\u00d7ps1\u00d7ps2\u00d7
6     f1\u00d7f2\u00d7T0\u00d7T01\u00d7T1\u00d7T2\u00d7ps0\u00d7e")
7
8 T0 = 293.15
9 T01 = 273.16
10 T1 = t1+273.15
11 T2 = t2+273.15
12 ps0 = 1
13 e = np.e

```

Celda 5.1: definición de las variables simbólicas con sympy para expresar el modelo completo del cálculo de α_s .

En la celda 5.1 se definen los símbolos a emplear y luego se asignan valores numéricos a aquellos que resultan constantes. También se definen T_1 y T_2 en Kelvin a partir de t_1 y t_2 ya que las temperaturas en la ecuación (2.12) están definidas en Kelvin. Las variables que se redefinieron para el modelo simplificado en la sección 5.1.1 también se emplean en el modelo completo (celda 5.2).

```

1 V2 = V1-a*b*d
2
3 S = 2*a*b + 2*a*d + b*d
4
5 c1 = 331 + 0.6*t1
6 c2 = 331 + 0.6*t2

```

Celda 5.2: redefiniciones de V_2 , S y $c_{1,2}$ en función de las magnitudes medidas.

En la celda 5.2 se redefinen V_2 , S y c en función de las magnitudes medidas. De la ecuación 2.12 a la ecuación 2.16 se definen los parámetros a partir de los cuales se calculan los coeficientes de atenuación sonora α (celda 5.3).

```

1 psat1 = -6.8346 * (T01 / T1)**1.261 + 4.6151
2 psat2 = -6.8346 * (T01 / T2)**1.261 + 4.6151
3
4 h1 = ps0 * (hr1 / ps1) * (psat1 / ps0)
5 h2 = ps0 * (hr2 / ps2) * (psat2 / ps0)
6
7 F1 = f1 / ps1
8 F2 = f2 / ps2
9
10 Fr01 = (1 / ps0) * (24 + 4.04 * 10**4 * h1 * (0.02 + h1) / (0.391 +
11     h1))
12 FrN1 = (1 / ps0) * ((T0 / T1)**(1/2)) * (9 + 280 * h1 * exp(-4.17 *
13     (((T0 / T1)**(1/3)) - 1)))
14 Fr02 = (1 / ps0) * (24 + 4.04 * 10**4 * h2 * (0.02 + h2) / (0.391 +
15     h2))
16 FrN2 = (1 / ps0) * ((T0 / T2)**(1/2)) * (9 + 280 * h2 * exp(-4.17 *
17     (((T0 / T2)**(1/3)) - 1)))
18
19 alpha1 = ps1 * (20 / log(10)) * (F1**2 / ps0) * (
20     1.84 * 10**(-11) * (T1 / T0)**(1/2) +
21     (T1 / T0)**(-5/2) * (
22         0.01275 * exp(-2239.1 / T1) / (Fr01 + F1**2 / Fr01) +
23         0.1068 * exp(-3352 / T1) / (FrN1 + F1**2 / FrN1)
24     )
25 )
26
27 alpha2 = ps2 * (20 / log(10)) * (F2**2 / ps0) * (
28     1.84 * 10**(-11) * (T2 / T0)**(1/2) +
29     (T2 / T0)**(-5/2) * (
30         0.01275 * exp(-2239.1 / T2) / (Fr02 + F2**2 / Fr02) +
31         0.1068 * exp(-3352 / T2) / (FrN2 + F2**2 / FrN2)
32     )
33 )

```

Celda 5.3: definición de los coeficientes de atenuación atmosférica $\alpha_{1,2}$ de acuerdo con las ecuaciones 2.12 a 2.16.

A partir de la celda 5.3 se pueden definir los coeficientes de atenuación atmosférica m que son tenidos en cuenta en el modelo completo (celda 5.4).

```

1 m1 = alpha1/(10*log(e,10))
2 m2 = alpha2/(10*log(e,10))
3
4 A1 = (55.3 * V1)/(c1*TR1) - 4*V1*m1
5 A2 = (55.3 * V2)/(c2*TR2) - 4*V2*m2
6
7 alpha_s = (A2-A1)/S

```

Celda 5.4: definición del modelo completo a partir de las variables simbólicas definidas en las celdas 5.1 a 5.3.

En la celda 5.4 se explicita la forma del modelo completo a partir de la diferencia entre A_2 y A_1 , como en la ecuación 2.11.

A las fuentes de incertidumbre definidas para el modelo simplificado en la sección 5.1.1 se incorporan fuentes de incertidumbre para las humedades relativas hr y para las presiones p_s que, de usar el modelo completo, son medidas directamente en la cámara reverberante al momento de realizar las mediciones con y sin la muestra.

La humedad relativa se midió con el mismo termohigrómetro digital con el que se midió la temperatura. Para la evaluación de las incertidumbres se tuvieron en cuenta las contribuciones de tipo B por calibración, $U_{hr,cal} = 4\%$ y de resolución, 1%, del instrumento para el rango de interés (de 30 % a 90 %). Al igual que en el caso de la temperatura, estas contribuciones han sido evaluadas de acuerdo a las ecuaciones (3.6) y (3.5), asumiendo distribuciones normal y rectangular, respectivamente. Dado que esta magnitud se midió en las 12 posiciones del par micrófono/altavoz a cámara con y sin la muestra se evaluó la correspondiente contribución de tipo A, por repetibilidad, de acuerdo a la ecuación (3.3).

Un tratamiento análogo se dió a las contribuciones de incertidumbre asociadas a la medición de la presión, que se midió con un barómetro *DPI 740* marca Drück calibrado ($U_{ps,cal} = 0,0002$ atm) de resolución 0,0001 atm.

En la figura 5.2 se observa un diagrama de Ishikawa con las contribuciones de cada fuente de incertidumbre del modelo completo a la incertidumbre de α_s .

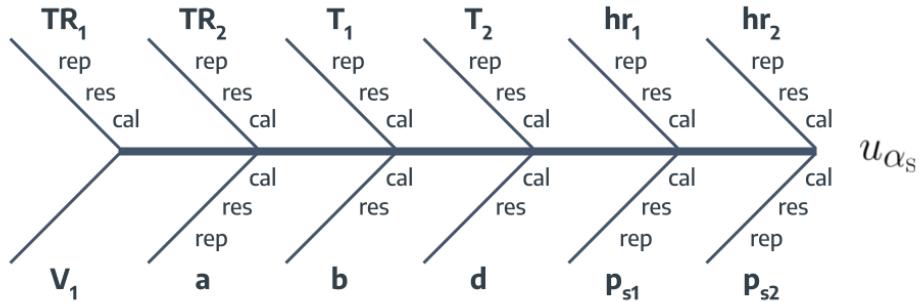


Fig. 5.2: contribución de cada fuente de incertidumbre del modelo simplificado a u_{α_s} .

Habiendo definido el modelo completo usando sympy se vuelve inmediato calcular los coeficientes de sensibilidad a ser evaluados en los valores medidos para estimar las incertidumbres combinadas según la ecuación (3.8) (celda 5.5).

```

1 dV1sym = diff(alpha_s,V1)
2
3 dV1 = lambdify((V1, t1, t2, TR1, TR2, a, b, d, hr1, hr2, ps1, ps2,
      f1, f2), dV1sym, "numpy")

```

Celda 5.5: cálculo de derivadas parciales en forma simbólica usando las funciones *diff()* y *lambdify()* de sympy.

En la celda 5.5 se muestra el ejemplo del cálculo de $\frac{\partial \alpha_s}{\partial V_1}$ empleando la función *diff()* de sympy. Luego, la función *lambdify()*, también de sympy, permite convertir la forma simbólica a una forma funcional con valores numéricos como entradas, aclarando explícitamente de cuáles de las variables simbólicas va a depender.

Los coeficientes de sensibilidad, necesarios para poder aplicar la ecuación (3.8) y obtener un valor de incertidumbre u_{α_s} para cada α_s en el modelo completo, se calculan en el apéndice B.

5.2. Incertidumbre en V_1

Como no se encontró documentación acerca del método que emplea el programa de diseño 3D *SketchUp for Web*, empleado en la sección 4.2.1, para calcular el volumen de los objetos que se diseñan, no se pudo realizar una correcta evaluación de incertidumbres para esta operación en función de las magnitudes de entrada. Se propusieron entonces dos métodos distintos para estimar una incertidumbre de tipo B para V_1 : escalar uniformemente todo el volumen y modificar individualmente las posiciones de sus vértices.

5.2.1. Escalado de la diagonal mayor

Se optó por escalar una longitud característica del volumen, su diagonal mayor I_{\max} , hasta aumentar (y luego disminuir) la misma en una unidad de la resolución que presenta el programa (0,001 m). De este análisis se obtuvo un $\Delta V = 0,14 \text{ m}^3$ al escalar al volumen por su diagonal mayor en $\times 1,0001$ y $\times 0,9999$. Asumiendo una distribución rectangular de rango $0,14 \text{ m}^3$ se puede definir para el volumen de la cámara vacía V una incertidumbre estándar de tipo B, como en la ecuación (3.5), asociada a la determinación del volumen por medio del programa u_{SketchUp} (5.2).

$$u_{\text{SketchUp}} = \frac{0,14 \text{ m}^3/2}{\sqrt{3}} = 0,04 \text{ m}^3 \quad (5.2)$$

Sin embargo, este enfoque solo contempla que el volumen de la cámara pueda ser mayor o menor escalando todas sus dimensiones proporcionalmente, es decir, no considera variaciones en los ángulos que forman las paredes entre sí y con el piso.

En la sección 4.2.1 se anticipó que esto podía llegar a ocurrir, dadas las diferencias observadas entre el plano de la figura 4.7 y las mediciones de las aristas realizadas en la cámara.

5.2.2. Variación de las posiciones de los vértices

Para cuantificar las variaciones angulares se decidió estudiar cuánto estas repercutían en el cálculo del volumen variando independientemente las posiciones individuales de todos los vértices de la cámara. Si bien esto se podría hacer manualmente en *SketchUp for Web*, demoraría mucho tiempo ya que el programa no cuenta con una herramienta para automatizar estas variaciones, con lo cual se consideró trasladar el problema a Python y buscar librerías adecuadas que facilitaran esta automatización.

La librería “trimesh” de Python permite cargar y visualizar a partir de un archivo *.obj* una malla (*mesh*) compuesta por todas las caras que forman el objeto dentro del archivo [36]. Con los atributos *mesh.vertices* y *mesh.faces* se puede acceder a las posiciones de todos los vértices que componen el objeto en coordenadas cartesianas, referenciados a un marco de referencia propio del archivo, y a cómo se conectan los vértices para formar cada una de las caras respectivamente (fig. 5.3).

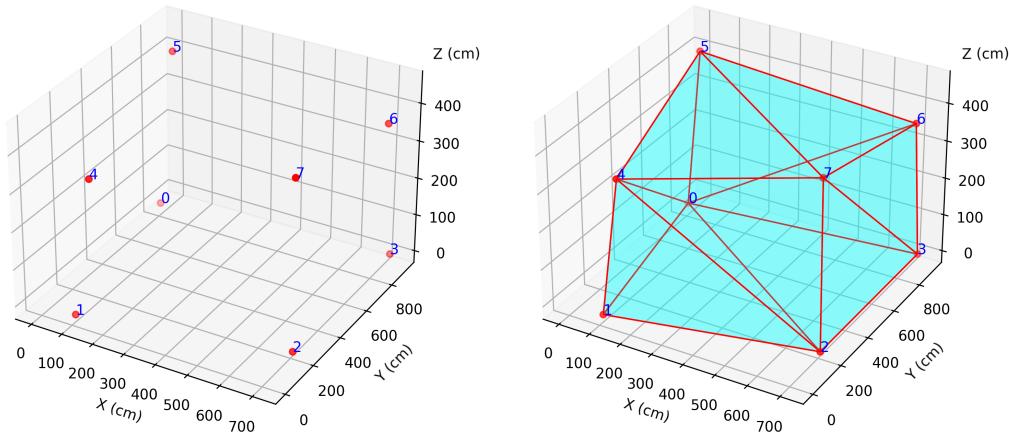


Fig. 5.3: vértices de la cámara enumerados del 0 al 7 (izquierda). Conexiones de a tres vértices para formar cada una de las caras de la cámara (derecha).

Conociendo las coordenadas de cada uno de los vértices se vuelve entonces mucho más sencillo modificar cada una de sus posiciones para formar distintos volúmenes a partir de nuevas configuraciones. El problema sigue siendo: ¿cómo calcular el volumen de un cuerpo irregular?

La clase *Delaunay* del módulo “scipy.spatial” permite aplicar una tetraedralización de Delaunay sobre un conjunto de vértices para descomponer el volumen conformado

por esos vértices en tetraedros [37]. La tetraedralización de Delaunay es una generalización tridimensional de la triangulación de Delaunay en 2D. Es una forma de subdividir un conjunto de puntos en el espacio tridimensional en tetraedros (símplices de 3 dimensiones) de tal manera que ningún punto del conjunto esté dentro de la circunferencia circunscrita de ningún tetraedro. Este principio garantiza que los tetraedros resultantes sean lo más “bien formados” posible, evitando ángulos muy agudos o tetraedros alargados [38].

Por otro lado, el cálculo del volumen de un tetraedro es conocido. Para un tetraedro con vértices en (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) , (x_3, y_3, z_3) , y (x_4, y_4, z_4) , el volumen V del tetraedro se puede calcular a partir del determinante de Cayley-Menger (5.3) [39].

$$V = \frac{1}{6} \left| \det \begin{pmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ x_4 - x_1 & y_4 - y_1 & z_4 - z_1 \end{pmatrix} \right| \quad (5.3)$$

De esta manera, empleando la tetraedralización de Delaunay y el determinante de Cayley-Menger, se vuelve posible obtener el volumen de cualquier cuerpo irregular descomponiéndolo en tetraedros.

Se aplicó la tetraedralización al conjunto de vértices de la figura 5.3, correspondientes al problema original de la cámara reverberante sin modificar. La división óptima del cuerpo calculada según el algoritmo resultó de 7 tetraedros, componiendo un volumen total de 202,14 m³, idéntico al calculado en *SketchUp for Web* (fig. 5.4).

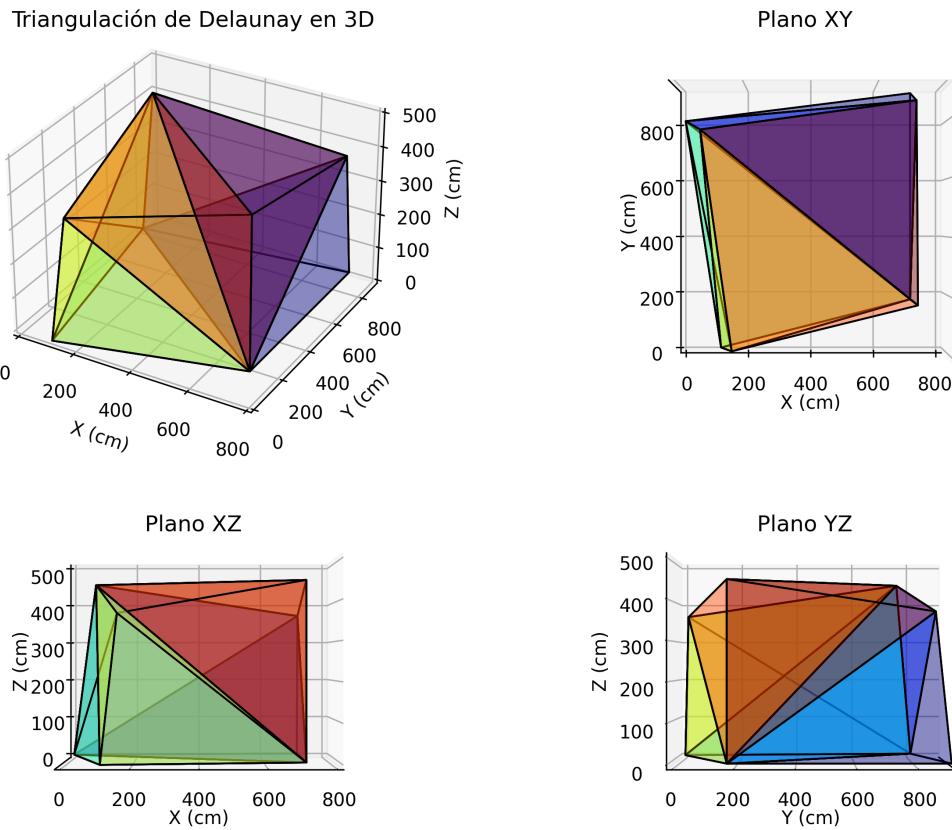


Fig. 5.4: tetraedrización de Delaunay, se muestran los 7 tetraedros en colores distintos (parte superior izquierda). Vistas de la configuración en los planos XY (parte superior derecha), XZ (parte inferior izquierda) e YZ (parte inferior derecha).

Como se mencionó en la sección 4.2.1, al comparar algunas longitudes de las aristas que figuraban en el plano de la figura 4.7 con mediciones realizadas en la cámara se detectaron diferencias de entre 10 cm y 20 cm. Dado que una diferencia de 20 cm se obtiene al alejar dos vértices entre sí en sentidos opuestos, se tomó un $\varepsilon = 10$ cm para modificar individualmente las posiciones de todos los vértices (fig. 5.5).

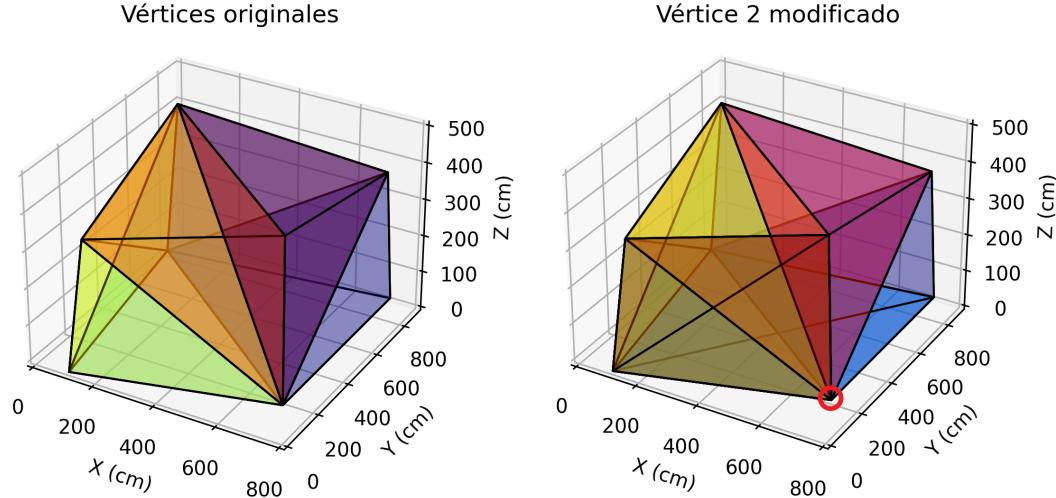


Fig. 5.5: tetraedrización de Delaunay sobre los vértices originales de la figura 5.4 (izquierda). Tetraedrización de Delaunay con el vértice 2 (en rojo) de la figura 5.3 modificado en $\varepsilon(\hat{x} + \hat{y} + \hat{z})$ (derecha). Se observa cómo la triangulación cambia al modificar la posición del vértice, ya que así el algoritmo garantiza que los tetraedros estén “bien formados”.

En la figura 5.5 se observa una de las modificaciones efectuadas sobre el vértice 2 de la figura 5.3, desplazándolo en ε a lo largo de \hat{x} , \hat{y} y \hat{z} . Iterando para los 8 vértices se calcularon todos los volúmenes obtenidos de modificar las posiciones de cada vértice en $\pm\varepsilon$ en \hat{x} , \hat{y} y \hat{z} , resultando en un volumen máximo $V_{\max} = 204,94 \text{ m}^3$ y un volumen mínimo $V_{\min} = 200,35 \text{ m}^3$ (ver apéndice C).

De este análisis, tomando la mayor cota encontrada para el volumen mínimo, se obtuvo un $\Delta V = 5,6 \text{ m}^3$. Sobreestimando la cota inferior, se puede asumir una distribución rectangular centrada en $202,1 \text{ m}^3$ de rango $5,6 \text{ m}^3$, de modo que todos los valores comprendidos resulten equiprobables y que tanto V_{\max} como V_{\min} queden incluidos en el intervalo (5.4).

$$V = (202,1 \pm 2,8) \text{ m}^3 \quad (5.4)$$

Se puede definir para el volumen de la cámara vacía V una incertidumbre estándar de tipo B, como en la ecuación (3.5), asociada a la determinación del volumen u_V (5.5).

$$u_V = \frac{5,6 \text{ m}^3/2}{\sqrt{3}} = 1,6 \text{ m}^3 \quad (5.5)$$

Finalmente, el volumen de aire disponible dentro de la cámara V_1 resulta de sustraer al volumen de la cámara V los volúmenes de los objetos que permanecen

dentro de la cámara durante todo el ensayo (5.6).

$$V_1 = V - 3 \cdot V_{\text{esf}} - V_{\text{AA}} = 198,8 \text{ m}^3 \quad (5.6)$$

En la ecuación (5.6) V_{esf} es el volumen de cada esfera de telgopor de 60 cm de diámetro empleada como difusor y V_{AA} el volumen del equipo de aire acondicionado empleado para regular las condiciones ambientales en la cámara reverberante. La expresión (5.6) desprecia los volúmenes ocupados por los difusores planos, por el micrófono y su fuente y por el parlante dodecaédrico, dado que la suma de todos ellos resulta inferior a la segunda cifra significativa con la cual se reporta V .

Tanto cada volumen V_{esf} como V_{AA} se determinaron geométricamente a partir de mediciones realizadas sobre el diámetro de las esferas y las aristas del aire acondicionado, suponiendo que son sólidos regulares. Las incertidumbres correspondientes se evaluaron siguiendo los lineamientos descritos en el capítulo 3. De esta manera, propagando las incertidumbres asociadas al cálculo de V_1 , resulta la incertidumbre estándar $u_{V_1} = 1,6 \text{ m}^3$ (que se tomó idéntica a u_V ya que las diferencias se observan recién en la tercera cifra significativa).

5.3. Incertidumbre en TR

Como se describió en la sección 4.1.1, el BAAn calcula el tiempo de reverberación a partir de la suma de los intervalos temporales donde la señal tiene un nivel de presión sonora en el rango deseado (20 dB, 30 dB ó 40 dB), y dependiendo de la posición del selector de cantidad de mediciones (1, 3 ó 9) realiza un promedio antes de mostrar el resultado en la pantalla. Además de las incertidumbres de resolución y de repetibilidad que se estiman para TR_1 y TR_2 , corresponde estimar también una incertidumbre de calibración que resulte de medir a la magnitud tiempo de reverberación con el BAAn.

En acústica arquitectónica no es usual realizar calibraciones de equipos para esta magnitud, dado que en la industria del acustizado de espacios generalmente solo interesa conocer α_s a modo orientativo, dependiendo del rango de frecuencias en el cual se quiera generar la absorción. Sin embargo, a fines de describir de forma completa al modelo y al balance de incertidumbres, en esta sección se propone una forma de calibrar el BAAn para estimar una incertidumbre de calibración para las mediciones de TR_1 y TR_2 .

5.3.1. Procedimiento de calibración de TR

El principio del método de calibración consistió en inyectarle tonos puros que decaen en el tiempo (rampas) con pendientes conocidas al BAAn y registrar el tiempo de reverberación calculado por el mismo en el rango de frecuencias de 100 Hz a 5000 Hz. Estas rampas simulan el comportamiento de la señal sonora captada por el

micrófono dentro de la cámara reverberante, luego de que cese la emisión del ruido filtrado en bandas de tercio de octava emitido por el parlante, resultando la pendiente de cada rampa directamente proporcional al tiempo de reverberación, como ya se vio en (4.1).

Para la confección de las rampas se emplearon tonos puros en lugar de ruido rosa filtrado, para que de esta manera no fuera necesario obtener el intervalo temporal del rango deseado sumando los intervalos t_i , como se ve en la figura 4.5. Los tonos puros se generaron en formato .wav con el programa *Audacity* para cada valor de frecuencia central de las bandas de tercio de octava entre 100 Hz y 5000 Hz. Las rampas se confeccionaron multiplicando a cada tono puro por una exponencial decreciente de la forma e^{-bt} siendo $b = 3/(TR_r \cdot \log_{10}(e))$ con TR_r el tiempo de reverberación deseado para la rampa, como se ve en la celda 5.6 [40].

```

1 import numpy as np
2 import soundfile as sf
3 from scipy.io import wavfile
4
5 sample_rate, data = wavfile.read('1000Hz.wav')
6
7 fs = sample_rate
8 t = np.arange(0, len(data)/sample_rate, 1/fs)
9
10 A = 1                         # Amplitud inicial
11 TRr = 3                         # TR deseado para la rampa
12 b = 3/(TRr*np.log10(np.e))      # b(TRr)
13
14 y = A*np.e**(-b*t)              # Exponencial decreciente
15 y = y*data/np.max(y)            # Normalizada
16
17 name = 'tr100-' + str(TRr) + 's' # Archivo de audio final
18 sf.write(name + '.wav', y, fs)

```

Celda 5.6: fragmento de código empleado para generar las rampas a partir de los tonos puros confeccionados en *Audacity*.

5.3.2. Linealidad en tiempo y en tensión

Para medir los TR_r de cada rampa y compararlos con los medidos por el BAAn, se empleó un analizador de espectro *Real Time Analyser Type 830* marca Norsonics (RTA). Este permite registrar el nivel de presión sonora de una señal en función del tiempo en rangos de 1 s a 64 s, y recorrer con un cursor la señal medida con una resolución temporal dependiente del rango elegido. Cada TR_r fue obtenido a partir de la diferencia entre los tiempos para los cuales el nivel de presión sonora disminuía 60 dB, análogo al cálculo que efectuaría el BAAn en la figura 4.5 si entre t_1 y t_5 la señal decreciera linealmente.

Para garantizar la trazabilidad de los tiempos medidos, se calibró la escala temporal del RTA con un osciloscopio calibrado con trazabilidad al segundo, tomando como criterio para efectuar una corrección que la diferencia entre los tiempos medidos con ambos instrumentos fuera mayor a la resolución del BAAn de 0,01 s. Se emplearon pulsos cuadrados de entre 1 s y 18 s de duración, obteniéndose que en todo el rango la diferencia entre los valores medidos con ambos instrumentos resultaba inferior a 0,01 s. En la figura 5.6 se muestra el dispositivo experimental empleado para esta calibración.

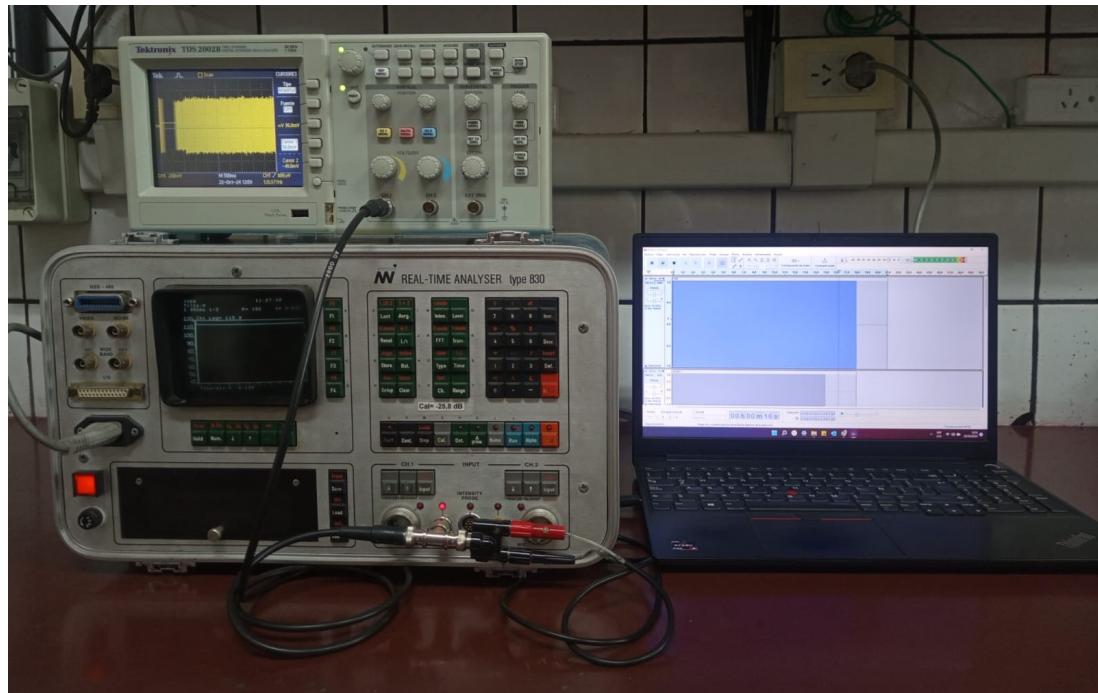


Fig. 5.6: dispositivo experimental empleado para la calibración de la base temporal del RTA. Las señales de audio se emiten desde la computadora, la cual se conecta con dos cables BNC y una ficha T al RTA y al osciloscopio.

Al mismo tiempo, era necesario garantizar la linealidad en tensión para todo el rango de frecuencias del RTA. Empleando un calibrador de tensión *Schallmess-Kalibrator* marca Hentschel (SK), con trazabilidad al volt, se midieron señales de 1 V (120 dB), 100 mV (100 dB) y 1 mV (60 dB) a las frecuencias centales de bandas de tercio de octava entre 100 Hz y 5000 Hz (y a 315 Hz ya que el SK además contaba con esta frecuencia, de común uso en comunicaciones) en el RTA (tabla 5.1).

Tensiones SK (dB)	120,0	100,0	60,0
Frecuencia (Hz)	Tensiones RTA (dB)		
125	119,9	100,0	60,0
250	120,0	100,0	60,0
315	120,0	100,0	60,0
500	120,0	100,0	60,0
1000	120,0	100,0	60,0
2000	120,0	100,0	60,0
4000	120,0	99,9	60,1

Tabla 5.1: valores de tensión en dB generados por el SK y medidos por el RTA para frecuencias del rango del ensayo.

Como se observa en la tabla 5.1, en todos los casos los valores medidos con el RTA resultaron indistinguibles de los generados con el SK, confirmándose el correcto funcionamiento en tensión del RTA.

5.3.3. Calibración de TR

El BAAn usa un cristal de cuarzo CXO de 1,92 MHz, lo cual permite garantizar la estabilidad en un orden de 10^{-7} s, mientras que la resolución de la pantalla es de apenas 10^{-2} s [41]. De esta manera no resulta necesario hacer una calibración de la base de tiempo del BAAn, y basta con comparar los resultados obtenidos en el BAAn con los medidos en el RTA. En la figura 5.7 se muestra el dispositivo experimental empleado para esta calibración.

Al momento de generar las rampas para la calibración era posible variar dos parámetros independientes entre sí: el tiempo de reverberación y la frecuencia. En la práctica ambos se encuentran vinculados, ya que generalmente las frecuencias bajas son las que tienen asociadas tiempos de reverberación altos, pero al realizar una calibración con curvas sintéticas se debió considerar combinar ambos parámetros.

Primero se generaron rampas con $TR_r = 3,00$ s a partir de tonos puros de las 18 frecuencias centrales de bandas de tercio de octava entre 100 Hz y 5000 Hz y se midieron sus tiempos de reverberación en el RTA y en el BAAn. En el proceso de medición se observó que en el RTA se podía medir consistentemente siempre el mismo valor de TR para cada señal, comprendido entre 3,01 s y 3,06 s, mientras que el BAAn, arrojaba resultados más dispersos (figura 5.8).

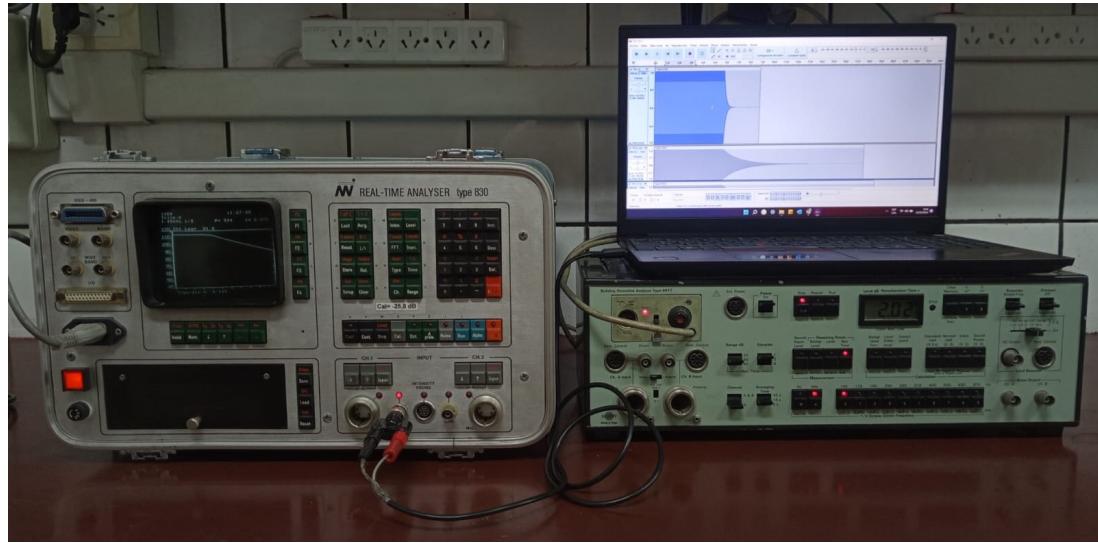


Fig. 5.7: dispositivo experimental empleado para la calibración de los tiempos de reverberación medidos por el BAAn. Las señales de audio patrones se emiten desde la computadora, la cual se conecta primero al RTA y luego al BAAn, registrándose los tiempos de reverberación.

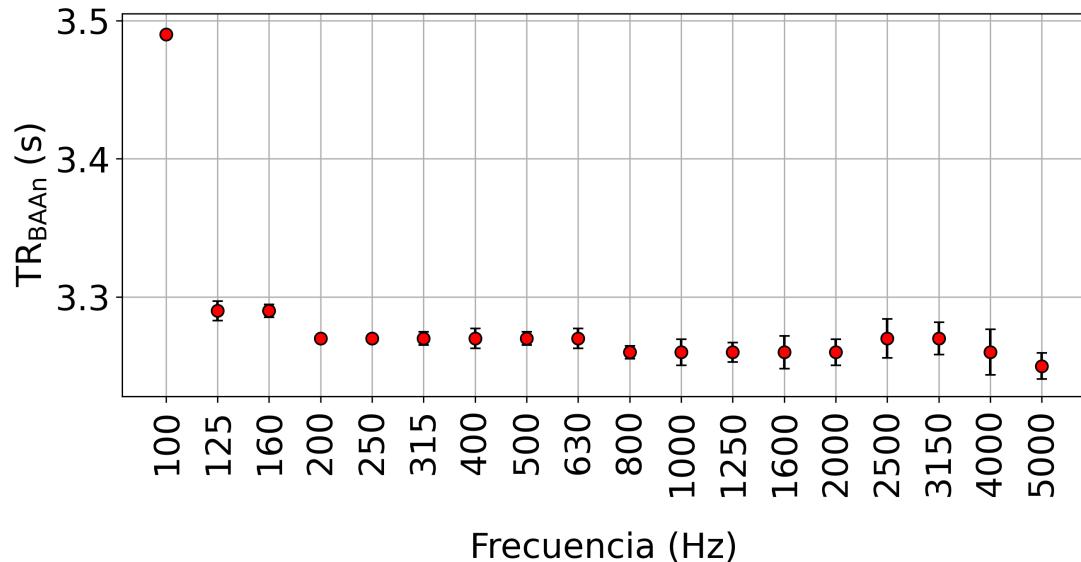


Fig. 5.8: tiempo de reverberación medido con el BAAn en función de la frecuencia para las rampas sintéticas con $TR_r = 3$ s. Cada punto es resultado de un promedio de 7 mediciones realizadas en el BAAn, representando las barras verticales sus desviaciones estándar del promedio.

En la figura 5.8 se observa cómo el BAAn registra un tiempo de reverberación de entre 3,20 s y 3,30 s para las rampas sintéticas con $TR_r = 3$ s entre 125 Hz y

5000 Hz, descartando que resulte significativo aplicar una corrección dependiente de la frecuencia en este rango. Sin embargo, para 100 Hz el valor medido dista del mayor valor medido entre 125 Hz y 5000 Hz en 0,20 s, el doble de la resolución instrumental del BAAn, revelando un error sistemático. Como se vio en el capítulo 3, la corrección se define como el valor añadido algebraicamente al resultado de una medición para compensar un error sistemático, con lo cual corresponde aplicar una corrección de -0,20 s para los valores medidos a 100 Hz.

Por otro lado, se generaron rampas con TR_r equiespaciados entre 1,00 s y 18,00 s a partir de un tono puro de 1000 Hz, una frecuencia de uso común para la calibración de equipos acústicos. Se midieron 7 veces sus tiempos de reverberación en el RTA y en el BAAn, observándose un corrimiento cada vez mayor entre ambos valores medidos con el aumento del tiempo de reverberación (figura 5.9).

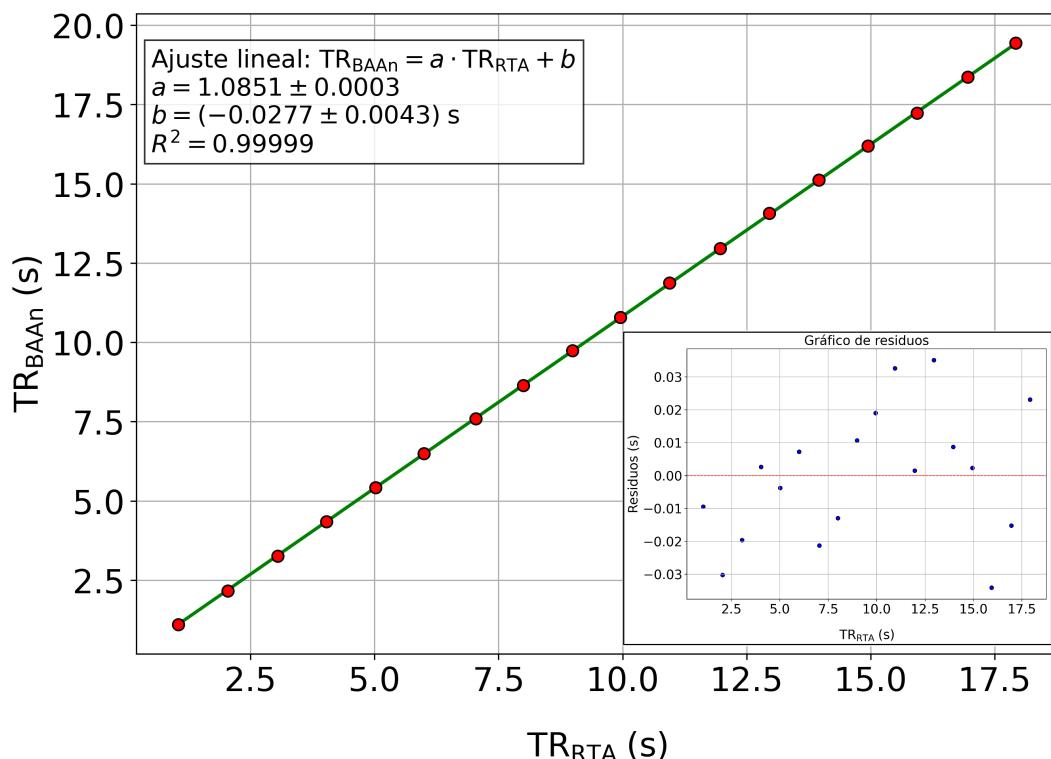


Fig. 5.9: Tiempo de reverberación medido con el RTA en función del tiempo de reverberación medido con el BAAn. En verde, ajuste lineal ponderado de los datos registrados.

En la figura 5.9 se evidencia la necesidad de aplicar una corrección a los valores de tiempos de reverberación medidos con el BAAn, dado que la pendiente de la recta de ajuste es mayor a 1. Si bien para tiempos bajos no resulta apreciable, el corrimiento se amplifica para tiempos altos. Por ejemplo, para un $TR_r = 1,00$ s la corrección a

efectuar es de $-0,05$ s, mientras que para un $TR_r = 18,00$ s la corrección se vuelve de $-1,52$ s.

Para establecer los valores de corrección en todo el rango resulta práctico visualizar al valor de la corrección en función de TR_{BAA} en lugar de a TR_{RTA} como en la figura 5.9 (figura 5.10).

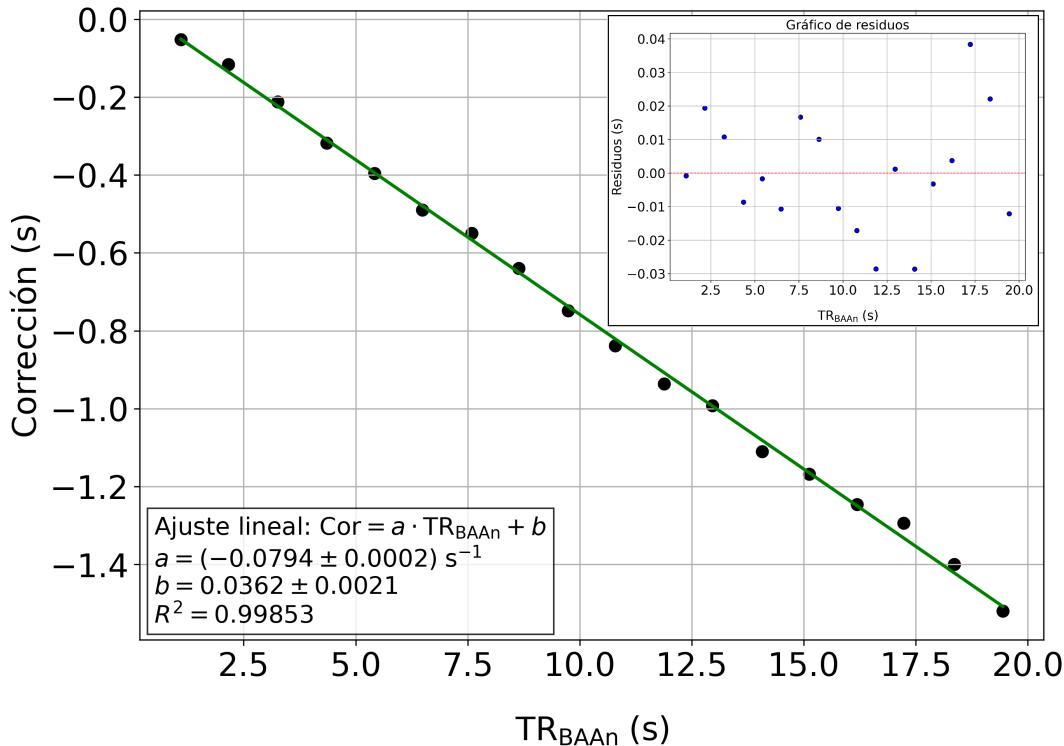


Fig. 5.10: corrección en función del tiempo de reverberación medido con el BAA. En verde, ajuste lineal ponderado de los datos registrados.

En la figura 5.10 se muestra el ajuste lineal que permite corregir los resultados de tiempos de reverberación medidos con el BAA. Se observa que para todos los tiempos posibles de detectar por el equipo (entre 1,00 s y 20,00 s) los valores de corrección son negativos, lo cual implica que el equipo siempre mide de más en relación al valor de referencia de tiempo de reverberación (medido con el RTA).

Por otro lado, se observa que la repetibilidad, dada por la incertidumbre estándar del promedio se encuentra en el orden de la resolución del BAA, entre 0,01 s y 0,03 s en todo el rango. De esta manera, considerando todas las contribuciones y siguiendo los lineamientos de la GUM, se obtienen las incertidumbres combinadas de u_{cBAA} para cada valor de tiempo indicadas en la tabla 5.2.

TR _{BAN} (s)	u_{cBAN} (s)	TR _{BAN} (s)	u_{cBAN} (s)
1,10	0,01	10,79	0,02
2,16	0,01	11,88	0,02
3,26	0,02	12,96	0,02
4,35	0,02	14,07	0,02
5,43	0,02	15,12	0,02
6,49	0,02	16,19	0,02
7,59	0,02	17,23	0,02
8,64	0,02	18,36	0,03
9,74	0,02	19,44	0,03

Tabla 5.2: incertidumbres combinadas según (3.7) para cada valor de TR_{BAN} medido.

La tabla 5.2 reúne las incertidumbres combinadas de los valores de tiempos de reverberación medidos con el BAAn. Estas incertidumbres son entonces las incertidumbres de calibración determinadas para TR₁ y TR₂, siempre y cuando estos valores se midan con el BAAn dentro del rango considerado.

5.4. Comparación de balances de incertidumbres

A partir de la estimación de las fuentes de incertidumbres correspondientes a ambos modelos, se realizaron balances análogos al de la tabla 3.1 para determinar la incertidumbre expandida U_{α_s} . Como ya se mencionó en el capítulo 3, los balances de incertidumbres permiten comparar las contribuciones porcentuales de cada fuente de incertidumbre, visualizando qué componentes contribuyen en mayor medida a la incertidumbre combinada. Con esta información, se vuelve posible modificar condiciones específicas del experimento, tales como aumentar el número de mediciones, emplear instrumentos de mayor resolución o incluso mejorar la calibración de estos últimos, para así enfocarse en reducir las componentes más significativas y disminuir la incertidumbre combinada.

Las fuentes para el modelo simplificado detalladas en la sección 5.1.1 fueron reunidas en los balances de incertidumbres del apéndice D. Por su parte, las fuentes para el modelo completo detalladas en la sección 5.1.2 fueron reunidas en los balances de incertidumbres del apéndice E. Los balances de cada modelo se llevaron a cabo para cada una de las 18 frecuencias centrales de banda de tercio de octava, a partir de los cuales se calculan las incertidumbres U_{α_s} para cada valor de α_s .

En particular, en los gráficos de torta que resultan de los balances, se observa que a lo largo de todo el rango de frecuencias las contribuciones porcentuales de cada fuente varían significativamente, tanto dentro de un mismo modelo como comparando los modelos entre sí (figs. 5.11, 5.12, 5.13 y 5.14).

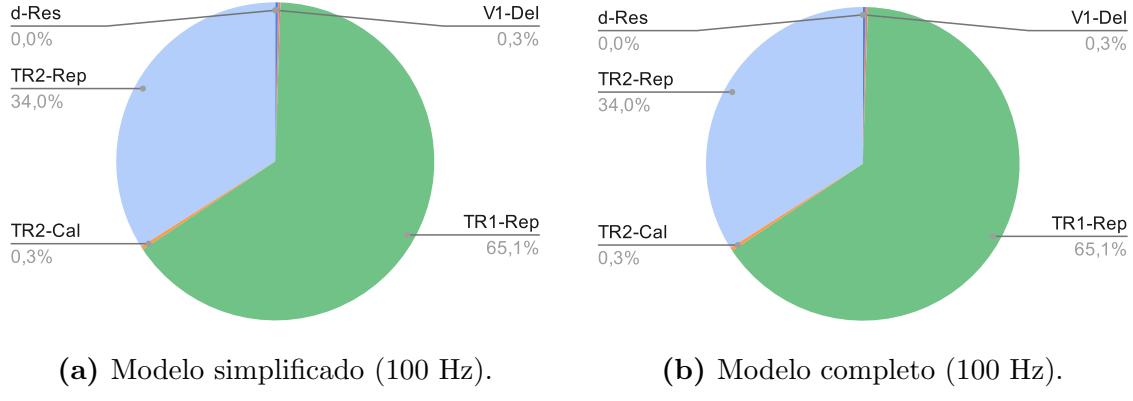


Fig. 5.11: contribución porcentual de cada fuente de incertidumbre a la incertidumbre expandida U_{α_s} a 100 Hz. Se observa que para ambos modelos las incertidumbres de repetibilidad asociadas a TR_1 ($TR_1\text{-Rep}$) y TR_2 ($TR_2\text{-Rep}$) tienen la mayor contribución.

De la figura 5.11 se observa que a 100 Hz las fuentes de incertidumbres asociadas a TR_1 y TR_2 , específicamente de repetibilidad, son las que más aportan a la incertidumbre expandida U_{α_s} en ambos modelos. El hecho de que las contribuciones dominantes sean las de repetibilidad da cuenta de la dispersión en los tiempos de reverberación medidos a bajas frecuencias. Comparando las figuras 5.11a y 5.11b entre sí, no se observan diferencias entre las contribuciones de ambos modelos, indicando que resulta indistinto calcular U_{α_s} empleando uno o el otro.

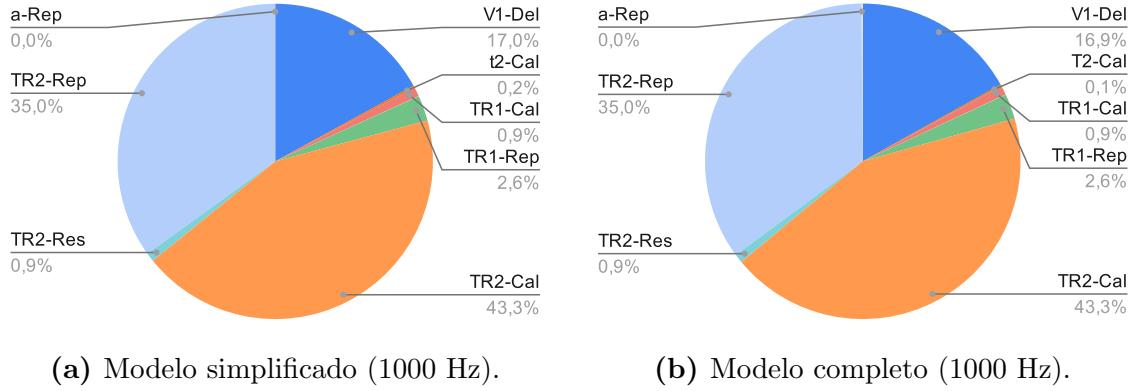


Fig. 5.12: contribución porcentual de cada fuente de incertidumbre del modelo simplificado a la incertidumbre expandida U_{α_s} a 1000 Hz. Se observa que para ambos modelos las incertidumbres asociadas a TR_2 de repetibilidad ($TR_2\text{-Rep}$) y de calibración ($TR_2\text{-Cal}$) tienen la mayor contribución, seguidas principalmente de la incertidumbre asociada al cálculo de V_1 usando la triangulación de Delaunay ($V1\text{-Del}$).

Con el aumento de la frecuencia a 1000 Hz, en la figura 5.12 se ve que otras fuentes de incertidumbre comienzan a tener una mayor contribución, principalmente las incertidumbres de calibración asociadas a TR_1 y TR_2 y la asociada al cálculo de

V_1 usando la triangulación de Delaunay. Al igual que en las figuras para 1000 Hz, en las figuras 5.12a y 5.12b no se observan diferencias entre las contribuciones de ambos modelos.

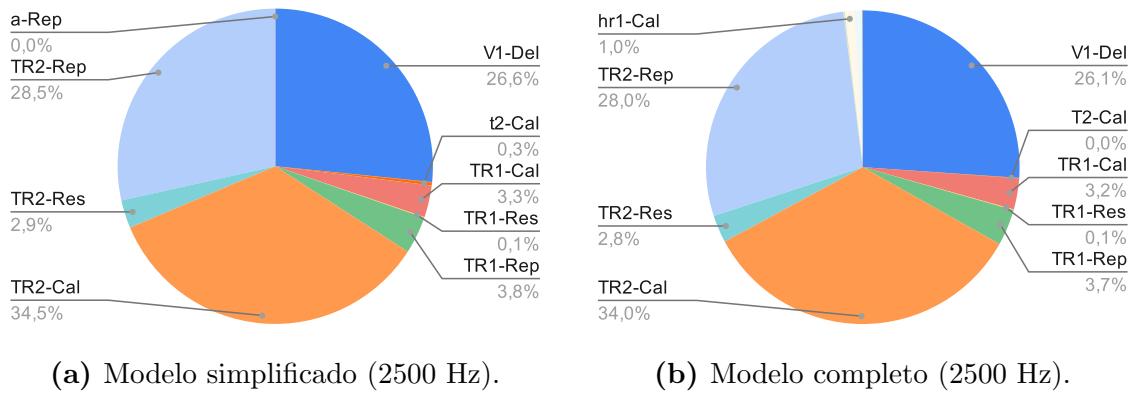


Fig. 5.13: contribución porcentual de cada fuente de incertidumbre del modelo simplificado a la incertidumbre expandida U_{α_s} a 2500 Hz. Se observa que para ambos modelos las incertidumbres asociadas a TR_2 de repetibilidad (TR2-Rep) y de calibración (TR2-Cal) tienen la mayor contribución, seguidas principalmente de la incertidumbre asociada al cálculo de V_1 (V1-Del).

A 2500 Hz la figura 5.13 muestra contribuciones similares a las de la figura 5.12 a 1000 Hz. Sin embargo, en las figuras 5.13a y 5.13b comienzan a observarse diferencias entre el modelo simplificado y el modelo completo, ya que en el modelo completo figura la incertidumbre de calibración asociada a hr_1 . Si bien esta componente es de apenas un 1%, la misma muestra que los balances de incertidumbres de ambos modelos no resultan idénticos en todo el rango de frecuencias.

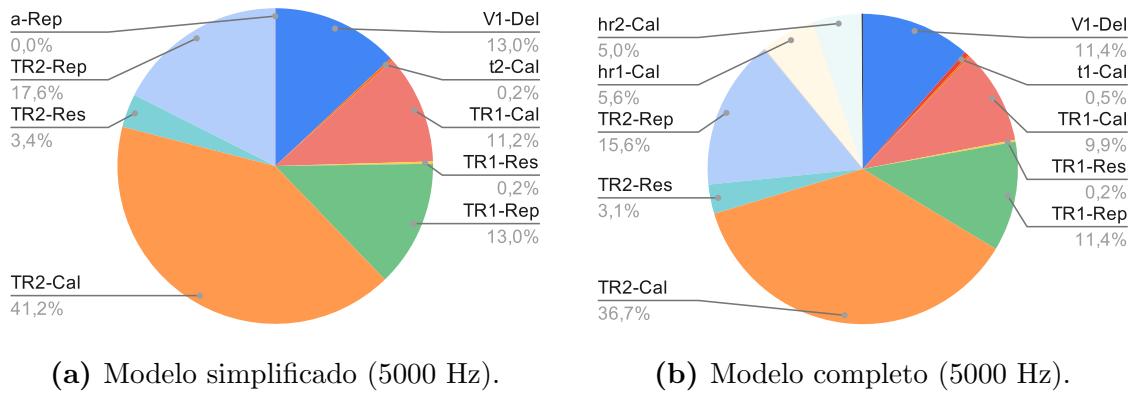


Fig. 5.14: contribución porcentual de cada fuente de incertidumbre a la incertidumbre expandida U_{α_s} a 5000 Hz. Se observa que para ambos modelos la incertidumbre de calibración asociada a TR_2 (TR2-Cal) tiene la mayor contribución, seguida principalmente de la de repetibilidad asociada a TR_2 (TR2-Rep), de las asociadas a TR_1 de repetibilidad (TR1-Rep) y de calibración (TR1-Cal) y de la asociada al cálculo de V_1 (V1-Del).

A 5000 Hz, en la figura 5.14 se observa que las incertidumbres de calibración asociadas a TR₁ y TR₂ acaparan en conjunto más del 50 % de la contribución. Las figuras 5.14a y 5.14b dan cuenta de que la diferencia entre ambos modelos se amplifica con el aumento de la frecuencia, ya que la incertidumbre de calibración asociada a hr₁ pasó de un 1,0 % en la figura 5.13b a un 5,6 % en la figura 5.14b e incluso cobró relevancia la incertidumbre de calibración asociada a hr₂, de un 5,0 %.

La comparación entre ambos modelos muestra que recién para una frecuencia de 2500 Hz el modelo completo comienza a aportar contribuciones provenientes de las condiciones ambientales mayores al 1 %. Si se deseara disminuir la contribución proveniente de la incertidumbre de calibración asociada a hr₁ y hr₂, bastaría con emplear un instrumento con una menor incertidumbre de calibración. Sin embargo incluso para la frecuencia máxima de ensayo (5000 Hz), estas contribuciones resultan apenas cercanas al 10 %, con lo cual frente al resto, principalmente asociadas a TR₁ y TR₂, se vuelven despreciables.

De esta manera, se ve que probablemente haya que usar un equipo más moderno que el BAAn para disminuir la incertidumbre total, que pueda aportar menores incertidumbres de calibración y una mejor repetibilidad. En su defecto, para disminuir las incertidumbres de repetibilidad, que tienen como estimador a la desviación estándar de la media, también se podría aumentar el número de mediciones realizadas en cada posición del micrófono dentro de la cámara o incluso incorporar nuevas configuraciones micrófono/altavoz.

Este análisis evidencia que las contribuciones a la incertidumbre U_{α_s} que incorpora el modelo completo resultan despreciables frente a las contribuciones asociadas a la medición del tiempo de reverberación con el BAAn, que ya predominaban en el modelo simplificado. De esta manera, resulta indistinto emplear un modelo u otro para estimar la incertidumbre U_{α_s} .

Capítulo 6

Resultados

6.1. Condiciones ambientales

Todos los cálculos efectuados en el capítulo 4 se realizaron empleando el modelo simplificado descrito en el capítulo 5, que desprecia el cambio en las condiciones ambientales (temperatura, humedad relativa y presión) entre que se realizan las mediciones a cámara sin y a cámara con la muestra. Si bien en el capítulo 5 se mostró que las componentes de incertidumbre asociadas a las condiciones ambientales no contribuyen significativamente a la incertidumbre de α_s , cabe analizar si los valores calculados de α_s empleando el modelo simplificado difieren o no de los calculados empleando el modelo completo. Para ello se llevó a cabo una serie de mediciones a distintos valores de temperatura y humedad relativa, en los cuales siempre la presión atmosférica permaneció relativamente constante a 1,01 atm.

Se montó en la cámara reverberante un arreglo rectangular de absorbentes planos de lana de vidrio, modelo *Acustiver P50* de la marca Isover de $(13,68 \pm 0,03) \text{ m}^2$ en total. Se registraron los tiempos de reverberación de la cámara reverberante con la muestra a una temperatura de $(16,1 \pm 0,4)^\circ\text{C}$, e inmediatamente después se retiró la muestra y se volvieron a registrar los tiempos de reverberación, ahora de la cámara sin la muestra a una temperatura de $(17,1 \pm 0,4)^\circ\text{C}$. Se calcularon los valores de α_s en todo el rango de frecuencias, empleando ambos modelos para analizar la influencia de la temperatura (fig 6.1).

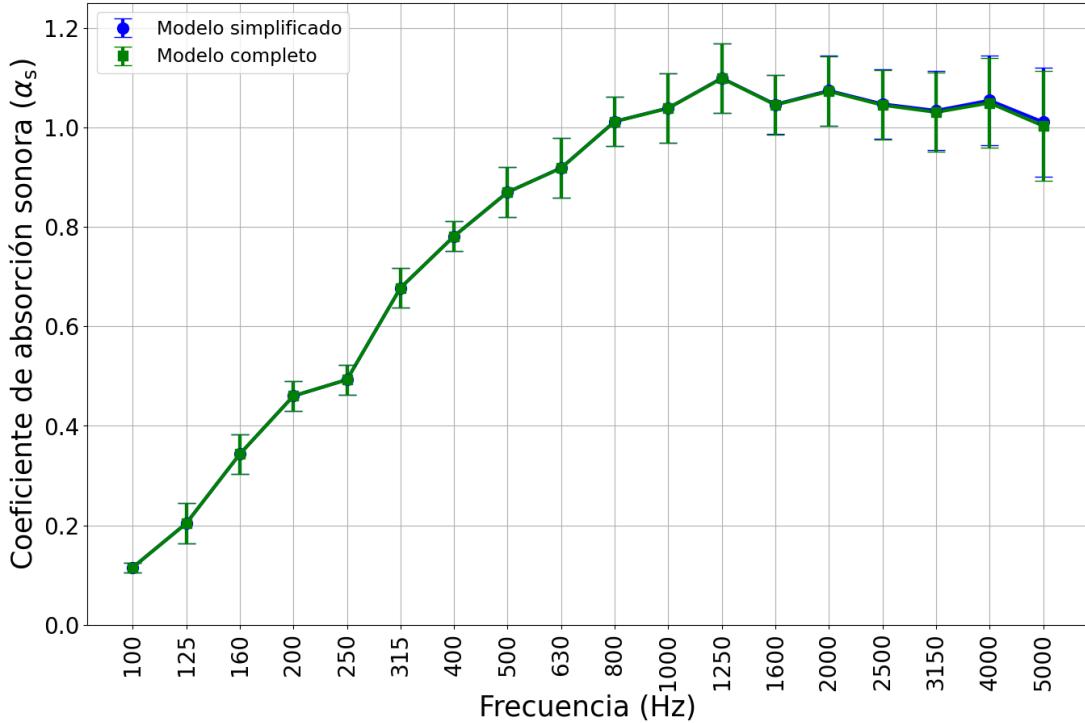


Fig. 6.1: coeficientes de absorción sonora en función de la frecuencia para una muestra de *Acustiver P50* de Isover calculados según el modelo simplificado (azul) y según el modelo completo (verde). Se registró una temperatura promedio de $(16,1 \pm 0,4)^\circ\text{C}$ y una humedad relativa promedio de $(51 \pm 5)\%$ en la cámara con la muestra y una temperatura promedio de $(17,1 \pm 0,4)^\circ\text{C}$ y una humedad relativa de $(52 \pm 5)\%$ en la cámara sin la muestra.

En la fig 6.1 no se observan diferencias significativas entre los valores de α_s calculados con ambos modelos. Comparando los valores de α_s en cada banda se observan diferencias recién en la tercera cifra significativa en unos pocos casos, en el resto las diferencias figuran a partir de la cuarta o la quinta. Se puede concluir entonces que para diferencias de temperatura de aproximadamente 1°C se pueden despreciar las variaciones ocasionadas por el cambio en las condiciones ambientales, siendo $m_1 \approx m_2$.

Posteriormente se volvieron a registrar los tiempos de reverberación únicamente de la cámara sin la muestra, ahora a una temperatura aproximada de $(20,0 \pm 0,4)^\circ\text{C}$, y con los tiempos de la cámara con la muestra a $(16,1 \pm 0,4)^\circ\text{C}$ se calcularon nuevamente los valores de α_s en todo el rango de frecuencias empleando ambos modelos (fig 6.2).

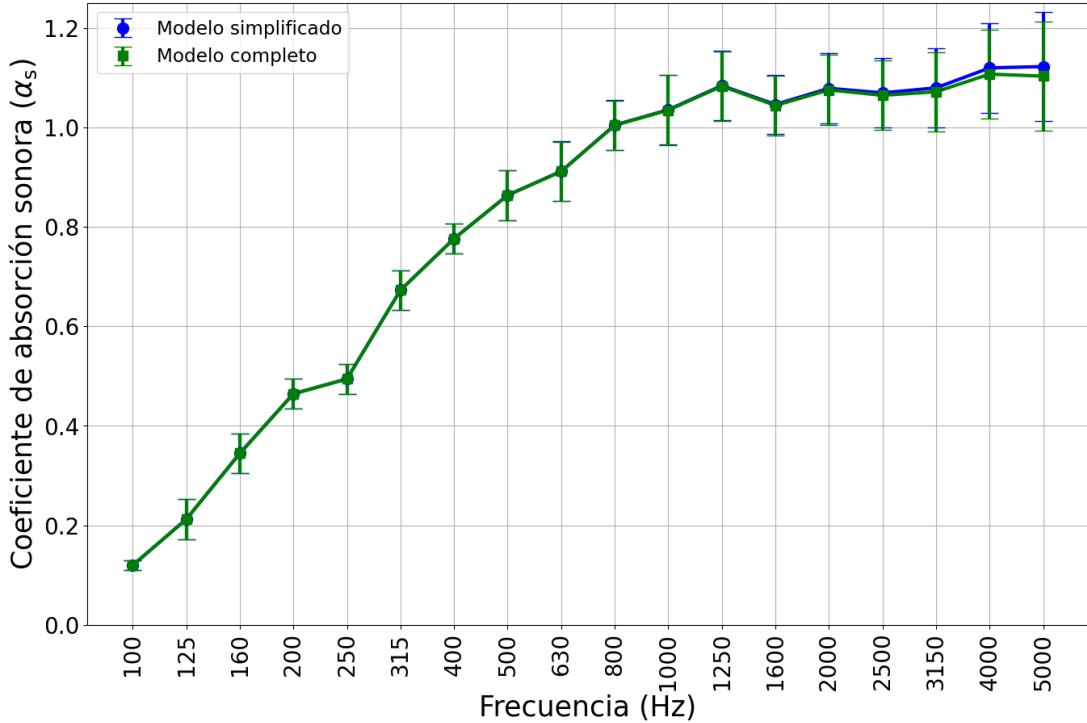


Fig. 6.2: coeficientes de absorción sonora en función de la frecuencia para una muestra de *Acustiver P50* de Isover calculados según el modelo simplificado (azul) y según el modelo completo (verde). Se registró una temperatura promedio de $(16,1 \pm 0,4)^\circ\text{C}$ y una humedad relativa promedio de $(51 \pm 5)\%$ en la cámara con la muestra y una temperatura promedio de $(20,0 \pm 0,4)^\circ\text{C}$ y una humedad relativa de $(53 \pm 5)\%$ en la cámara sin la muestra.

En la fig 6.2, si bien los puntos a frecuencias altas se encuentran un poco más distanciados que los de la fig. 6.1, tampoco se observan diferencias significativas entre los valores de α_s calculados con ambos modelos. Se puede concluir entonces que para diferencias de temperatura de aproximadamente 4°C también se pueden despreciar las variaciones ocasionadas por el cambio en las condiciones ambientales.

Posteriormente se volvió a medir y se repitió la comparación, ahora con la cámara sin la muestra a $(25,0 \pm 0,4)^\circ\text{C}$ y con una humedad relativa de 37% (fig 6.3).

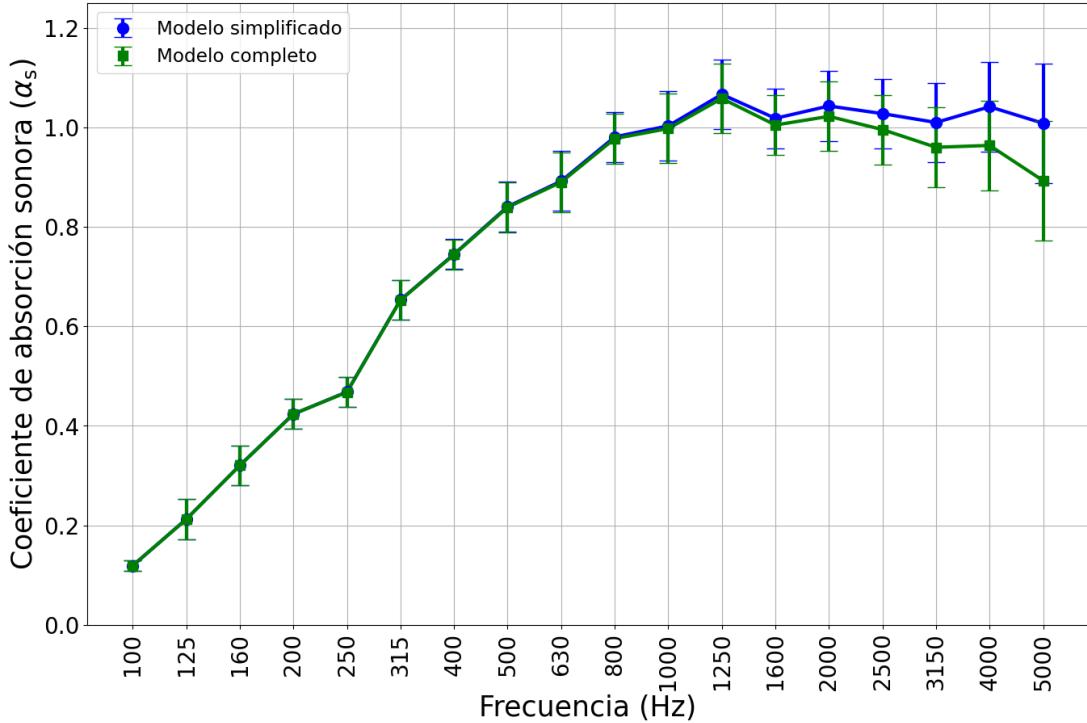


Fig. 6.3: coeficientes de absorción sonora en función de la frecuencia para una muestra de *Acustiver P50* de Isover calculados según el modelo simplificado (azul) y según el modelo completo (verde). Se registró una temperatura promedio de $(16,1 \pm 0,4)^\circ\text{C}$ y una humedad relativa promedio de $(51 \pm 5)\%$ en la cámara con la muestra y una temperatura promedio de $(25,0 \pm 0,4)^\circ\text{C}$ y una humedad relativa de $(37 \pm 5)\%$ en la cámara sin la muestra.

En la fig. 6.3 se observa un mayor distanciamiento aún entre los valores calculados con ambos modelos a frecuencias altas aunque, dado que las incertidumbres por encima de los 2000 Hz son grandes (aproximadamente de 0,1), los intervalos en los cuales se encuentran los valores se solapan. Sin embargo, como la humedad relativa promedio fue de $(51 \pm 5)\%$ en la cámara con la muestra y de $(37 \pm 5)\%$ en la cámara sin la muestra, no se puede afirmar que ante un cambio de aproximadamente 9 °C también se pueden despreciar las variaciones ocasionadas por el cambio en las condiciones ambientales, ya que son dos las variables que se modificaron.

Se registraron los tiempos de reverberación de la cámara sin la muestra a $(21,0 \pm 0,4)^\circ\text{C}$ y con una humedad relativa de $(66 \pm 5)\%$, repitiéndose la comparación (fig. 6.4).

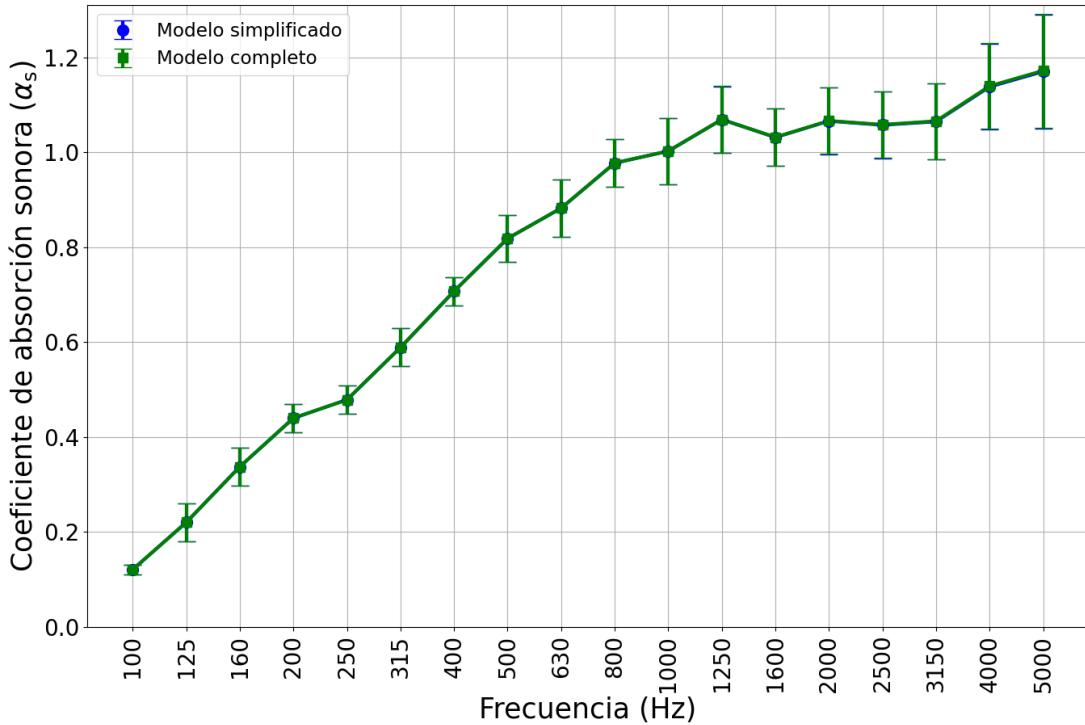


Fig. 6.4: coeficientes de absorción sonora en función de la frecuencia para una muestra de *Acustiver P50* de Isover calculados según el modelo simplificado (azul) y según el modelo completo (verde). Se registró una temperatura promedio de $(16,1 \pm 0,4)^\circ\text{C}$ y una humedad relativa promedio de $(51 \pm 5)\%$ en la cámara con la muestra y una temperatura promedio de $(21,0 \pm 0,4)^\circ\text{C}$ y una humedad relativa de $(66 \pm 5)\%$ en la cámara sin la muestra.

En la fig. 6.4 no se observan diferencias significativas entre los valores medidos en todo el rango de frecuencias. Comparándola con la fig. 6.2, donde la cámara reverberante sin la muestra presentaba una temperatura similar $(20,0 \pm 0,4^\circ\text{C})$ y una humedad relativa distinta $(53 \pm 5\%)$, se puede concluir que un cambio de aproximadamente el 10 % en la humedad relativa también permite calcular los valores de α_s con el modelo simplificado y que estos resulten equivalentes a los calculados con el modelo completo. A partir de este análisis, se puede concluir para la fig. 6.3 que el mayor distanciamiento entre valores a altas frecuencias es más atribuible a la diferencia de temperatura (9°C) y no a la de humedad relativa (10%) , con lo cual para una diferencia de temperatura de aproximadamente 9°C también se pueden despreciar las variaciones ocasionadas por el cambio en las condiciones ambientales.

Si bien ninguna de las combinaciones de condiciones ambientales estudiadas permitió observar diferencias significativas entre los valores calculados por ambos modelos, no es posible generalizar para todo el rango de temperatura y humedad relativa contemplado en la norma IRAM 4065:2019. Sin embargo, en la práctica difícilmente en el lapso de las 4 horas que dura el ensayo se registren diferencias de temperatura del orden de los 10°C y de humedad relativa del orden del 10 %, con lo cual podrían

calcularse los valores de α_s empleando el modelo simplificado donde $m_1 \approx m_2$. De todos modos vale la pena llevar un registro cuidadoso de las condiciones ambientales, incluida la humedad relativa a pesar de que esta no sea un parámetro del modelo simplificado, para así asegurar la estabilidad de las condiciones ambientales y el correcto uso del modelo.

6.2. Muestras ensayadas

Los gráficos del coeficiente de absorción sonora en función de la frecuencia que se muestran en la sección 6.1 corresponden a una muestra de lana de vidrio *Acustiver P50* de la marca Isover. Este es un material que se presenta en paneles cuadrados de aproximadamente 50 mm de espesor y 1,2 m de lado, especialmente diseñado para el aislamiento acústico de tabiquería interior de montaje en seco y cielorrasos.

Otro material de similar composición es el *Acustiver R50*, también de la marca Isover. A diferencia del *Acustiver P50* este se distribuye en un rollo de 18,2 m de largo, 0,4 m de alto y 50 mm de espesor, y también es empleado para el aislamiento acústico de paredes de construcción en seco.

Ambos materiales son extremadamente deformables, siendo posible modificar notoriamente su espesor si no son manipulados con cuidado. En particular el *Acustiver R50* al venir en formato de rollo presenta un espesor muy irregular, resultando muy difícil la determinación de las dimensiones de una muestra de este material.

Otros materiales, como el *Andina PVC Rústico* de Isover, resultan mucho menos deformables y fáciles de manipular, ya que una de sus caras viene revestida con un PVC gofrado de color blanco. Este se presenta en paneles rectangulares de 20 mm de espesor, 1,215 m de largo y 0,605 m de ancho y es usado en cielorrasos desmontables, instalándose directamente sobre perfilería a la vista.

Un parámetro comúnmente usado para clasificar el grado de absorción de distintos materiales absorbentes es el NRC (por su sigla en inglés *Noise Reduction Factor*). Este parámetro es el promedio de los coeficientes de absorción sonora a las frecuencias de 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz, con lo cual brinda una descripción del material para un rango intermedio del rango total de frecuencias establecido por la norma IRAM 4065:2019. Sin embargo, al ser un promedio de frecuencias puntuales, el NRC pierde información sobre el comportamiento del material en frecuencias intermedias y extremas, limitando su representatividad para aplicaciones donde es importante conocer la absorción en todo el espectro audible.

El Laboratorio de Acústica y Vibraciones del INTI cuenta con varias cajas de estos tres materiales, provistos por Isover para realizar pruebas de absorción sonora. Se midieron en cámara reverberante muestras de los tres materiales, en todos los casos montándolas directamente sobre el piso de la cámara sin recubrir sus bordes exteriores con un marco (fig. 6.5).

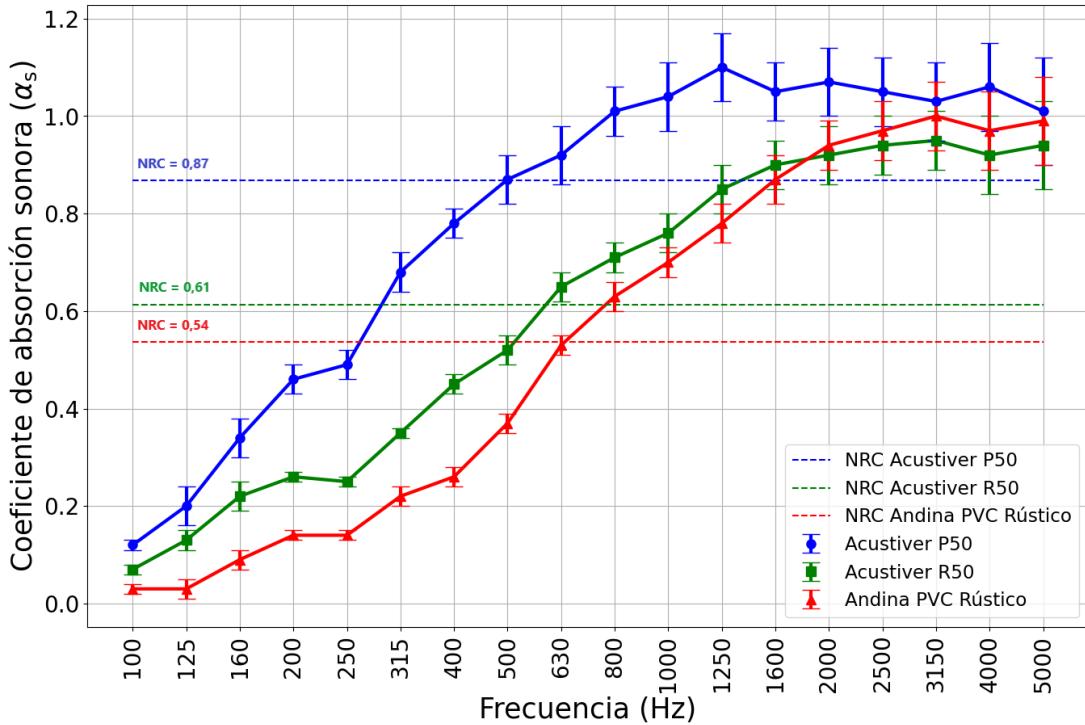


Fig. 6.5: coeficientes de absorción sonora en función de la frecuencia para muestras de lana de vidrio de marca Isover. En azul *Acustiver P50* (NRC = 0,87), en verde *Acustiver R50* (NRC = 0,61) y en rojo *Andina PVC Rústico* (NRC = 0,54).

En la fig. 6.5 se observan las tres curvas de absorción sonora para los tres materiales de interés. En líneas punteadas se grafican los valores de NRC correspondientes para cada uno, dando muestra de cuan absorbente es cada material. En todo el rango de frecuencias el *Acustiver P50* es el material más absorbente, de hecho fue por eso que se empleó en el capítulo 4 al momento de caracterizar la difusión del campo sonoro, ya que se requería un material altamente absorbente ($\alpha_s > 0,90$) entre 500 Hz y 4000 Hz. Luego, si bien en casi todo el rango el *Acustiver R50* es mucho más absorbente que el *Andina PVC Rústico*, a altas frecuencias se lleva a inviertir la tendencia en la curva, aunque los valores de α_s resulten prácticamente idénticos dado que los intervalos de los valores medidos se solapan casi por completo.

6.3. Repetibilidad

Típicamente en un análisis de repetibilidad, a fines de evaluar la consistencia de los resultados obtenidos bajo idénticas condiciones de medida, la posición de la muestra sobre la cual se realizan las mediciones debería permanecer fija durante todo el proceso de medición y en cada repetición. En el método de medición de absorción sonora en cámara reverberante las mediciones a cámara con y sin la muestra tienen

una duración aproximada de 2 horas cada una, con lo cual llevar a cabo 5 mediciones seguidas de la misma muestra montada en la cámara supondría al menos 10 horas de duración. Durante todo este lapso, el tiempo sería suficiente como para que las condiciones ambientales sufran cambios significativos, las cuales también son condiciones de medida que se desean mantener estables en un estudio de repetibilidad.

Dada la naturaleza del método, se priorizó realizar las mediciones en los menores períodos de tiempo posible, y así limitar la fluctuación de las condiciones ambientales entre el comienzo y el final del ensayo. Para reproducir la posición de la muestra dentro de la cámara entre ensayo y ensayo, luego del primer montaje se delimitó el perímetro de la muestra con cinta de papel sobre el piso de la cámara, con lo cual para este análisis las condiciones de repetibilidad contemplan el montaje y desmontaje de la muestra dentro de la región delimitada.

Para estudiar la repetibilidad del método se midió la muestra de *Andina PVC Rústico* 4 veces más. En cada medición se montó la muestra en la misma posición dentro de la cámara reverberante y se mantuvo el ordenamiento de los paneles, para así limitar la cantidad de variables involucradas (fig. 6.6).

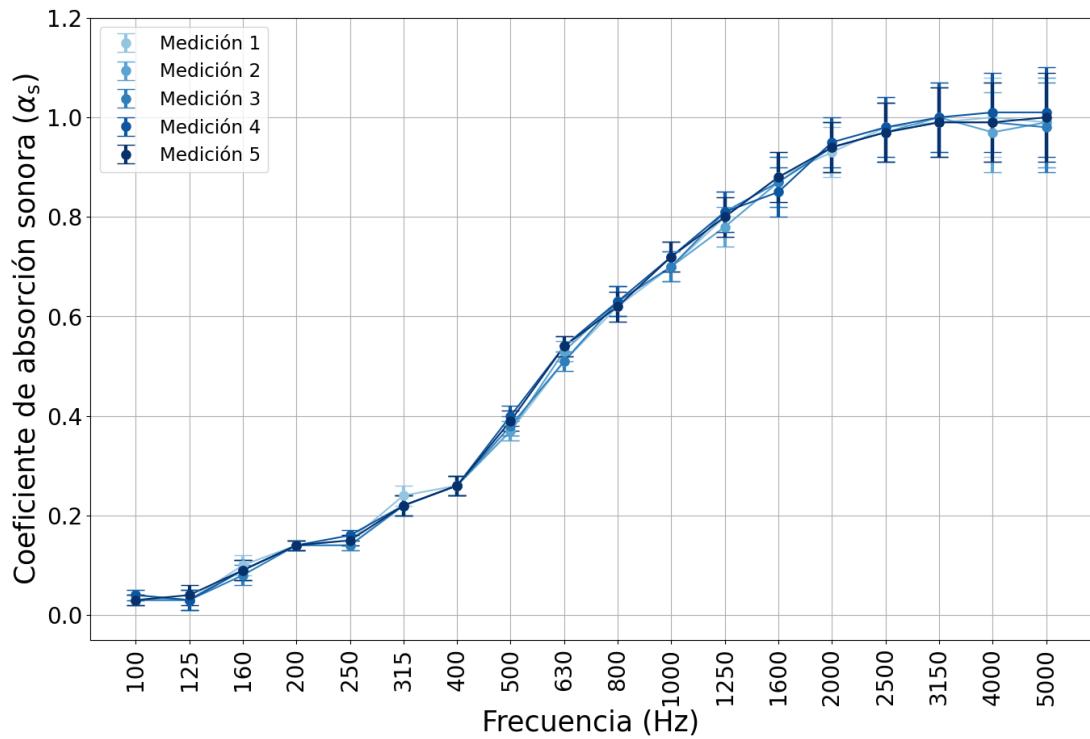


Fig. 6.6: coeficientes de absorción sonora en función de la frecuencia para 5 mediciones de una misma muestra de *Andina PVC Rústico*.

En la figura 6.6 se observa que los intervalos de las 5 mediciones para los valores de α_s se solapan entre sí en todas las frecuencias del rango, y para las frecuencias de 200 Hz y 400 Hz incluso se observa que las 5 mediciones son coincidentes. Esto

indica que la repetibilidad del método se mantendrá siempre dentro de estos valores, que resultan más que aceptables, siempre y cuando se mantenga la posición donde se monta la muestra dentro de la cámara y el ordenamiento de los paneles.

Las 5 mediciones de la figura 6.6 se tomaron en 4 días distintos en el lapso de una semana. En ninguno de los casos se observaron variaciones significativas de las condiciones ambientales entre el comienzo y el final del ensayo (tabla 6.1).

Medición	Día	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)
1	04/04/24	22,0 ± 0,5	50 ± 1
2	05/04/24	22,0 ± 0,5	58 ± 1
3		22,0 ± 0,5	58 ± 1
4	08/04/24	20,5 ± 0,5	66 ± 1
5	09/04/24	21,1 ± 0,5	73 ± 3

Tabla 6.1: condiciones ambientales durante para las 5 mediciones de la figura 6.6.

En la tabla 6.1 se observa cómo las condiciones ambientales se mantuvieron estables a lo largo de un mismo ensayo e incluso entre varios ensayos. La temperatura no varió más de 0,5 °C a lo largo de un día y todas las mediciones se encuentran abarcadas en los $(21,5 \pm 1,0)$ °C. La humedad relativa fluctúa más entre mediciones pero para un mismo día como mucho varía en un 3 %. Por lo visto en la sección 6.1, ninguna de las dos condiciones varía significativamente, con lo cual se puede considerar que se mantuvieron estables las condiciones ambientales durante el análisis de repetibilidad del método.

Capítulo 7

Validación

En el campo de la metroología la validación de métodos es un paso fundamental para poder garantizar que los resultados obtenidos sean confiables. Cuando un laboratorio realiza un proceso de validación sobre un método en particular lo que busca es poder contar con un fundamento estadístico de que dicho método es adecuado para los fines previstos. Siguiendo este lineamiento, se realizó un proceso de validación al método desarrollado a fin de poder consolidarlo como una nueva capacidad de ensayo en el INTI. Para esto, se llevó a cabo una comparación con el Laboratorio de Acústica y Luminotecnia (LAL) de la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC) de la Provincia de Buenos Aires. El área de Acústica del LAL ofrece un servicio de mediciones y ensayos entre los cuales se encuentra la medición de absorción sonora de materiales en cámara reverberante [33]. Este ejercicio comparativo es muy común en metrología y se denomina “interlaboratorio”. En particular, cuando solamente participan dos laboratorios se llama “comparación bilateral”.

7.1. Protocolo

Previo a dar inicio a la comparación se confeccionó conjuntamente un protocolo entre el Laboratorio de Acústica y Vibraciones del INTI (laboratorio piloto) y el LAL (laboratorio participante). Para la confección del protocolo se tomó como modelo el artículo “*Towards more reliable measurements of sound absorption coefficient in reverberation rooms: An Inter-Laboratory Test*”, donde 11 laboratorios de acústica participan de un ensayo interlaboratorio para poner a prueba un nuevo borrador de la norma ISO 354:2003 [42].

7.1.1. Método de medición

En relación al método, cada laboratorio debió reportar su método de medición en general, detallando la forma de medir el tiempo de reverberación, que propone

la IRAM 4065:2019, junto con la marca y modelo del equipamiento utilizado para caracterizar a la muestra de ensayo.

7.1.2. Muestra de ensayo

Como material para el ensayo se acordó emplear 15 paneles de un material incógnito de aproximadamente 20 mm de grosor y dimensiones de 0,605 m x 1,215 m. La muestra de ensayo consistió en un arreglo rectangular de los paneles apoyados sobre el suelo de la cámara, cumpliendo con las condiciones establecidas por la norma IRAM 4065:2019 para absorbentes planos (fig. 7.1).

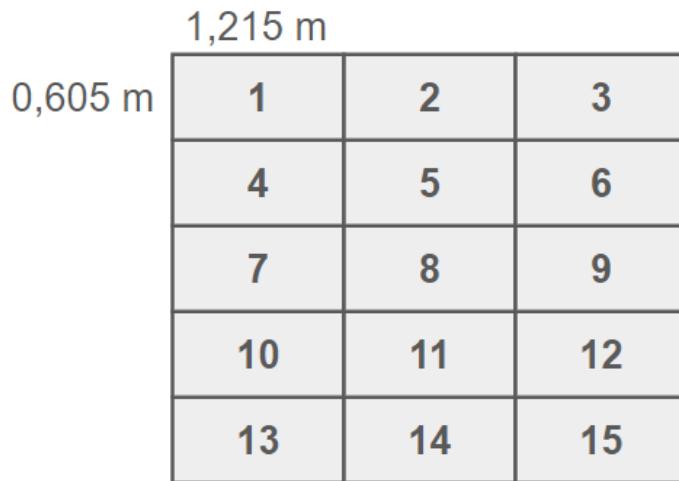


Fig. 7.1: disposición de los paneles a colocar sobre el piso de la cámara reverberante.

Las juntas entre paneles adyacentes no se cubrieron, sino que se acomodaron los paneles para que quedaran lo más juntos posible entre sí. Tampoco se hizo uso de un marco para cubrir el perímetro de la muestra, a modo de limitar la influencia de efectos no deseados y garantizar la reproducibilidad. Este quedó al descubierto y su área fue incluida en el cálculo del área de la muestra.

7.1.3. Valores a reportar

Para tener además una noción de la repetibilidad del método, cada laboratorio realizó el ensayo de absorción sonora 5 veces para la misma muestra y configuración de la fig. 7.1, reportando para cada repetición a cámara sin y con la muestra lo siguiente:

- el volumen de la cámara reverberante, empleado en el cálculo de A_1 y A_2 ;
- la superficie de la muestra utilizada para los cálculos de α_s ;

- los tiempos de reverberación para cada posición del par micrófono/altavoz, tanto para cámara sin como con la muestra, aclarando el parámetro utilizado para el tiempo de reverberación (T_{20} , T_{30} , etc.);
- los tiempos de reverberación promedio, tanto para cámara sin como con la muestra, utilizados para el cálculo de A_1 y A_2 ;
- los valores del área equivalente de absorción sonora calculados (A_1 y A_2);
- los valores del coeficiente de absorción sonora calculados (α_s) y sus incertidumbres (U_{α_s}); y
- las condiciones ambientales (temperatura, humedad relativa y presión) al comienzo y al final de medir a cámara sin y con la muestra.

Una vez devuelta la muestra al INTI, se realizó el ensayo nuevamente, a modo de verificar que el material de ensayo no hubiera sufrido daños o alteraciones durante el traslado.

7.1.4. Resultados

Para evaluar y comparar los resultados obtenidos por cada laboratorio se empleó el criterio del error normalizado descrito en (3.15). Se calculó el valor de referencia x_{ref} a partir de los 10 valores medidos para cada banda de tercio de octava entre 100 Hz y 5000 Hz, obteniéndose así 18 valores de referencia. De cumplirse que para cada banda $|E_{n_i}| \leq 1$ entonces existiría acuerdo entre las mediciones, considerándose la comparación como satisfactoria.

7.1.5. Cronograma

Se propuso un cronograma para establecer los tiempos de traslado y permanencia en cada laboratorio, contemplando la disponibilidad de cada uno para realizar los ensayos.

- Primera medición de la muestra en INTI: 25/03/2024 al 12/04/2024.
- Transporte de la muestra al laboratorio participante: 22/04/2024 al 26/04/2024.
- Medición de la muestra en el laboratorio participante: 29/04/2024 al 17/05/2024.
- Transporte de la muestra a INTI: 03/06/2024 al 07/06/2024.
- Segunda medición de la muestra en INTI: 10/06/2024 al 28/06/2024.

A continuación el laboratorio piloto realizó el cálculo y análisis de resultados junto con el reporte correspondiente, llevando a cabo la discusión de resultados entre ambas partes. Finalmente se realizó la aprobación de un informe final entre los laboratorios participantes.

7.2. Resultados del INTI y medición de comprobación

Para verificar que la muestra no se hubiera dañado durante los traslados, se llevó a cabo una medición de comprobación en el INTI luego de que el LAL hubiera realizado sus 5 mediciones (fig. 7.2).

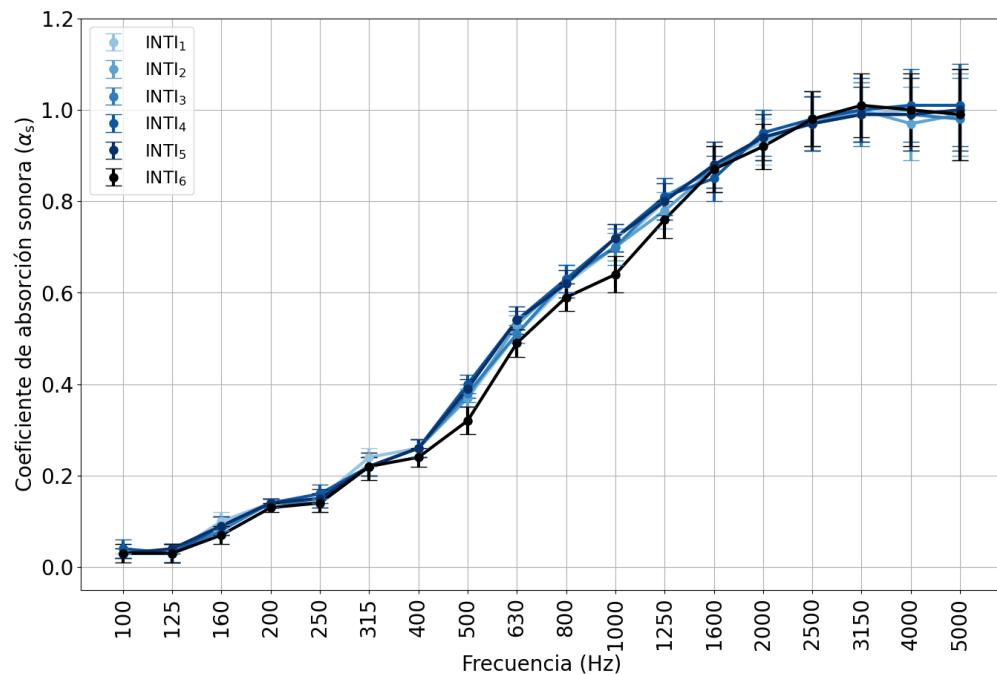


Fig. 7.2: coeficientes de absorción sonora en función de la frecuencia para las 5 mediciones llevadas a cabo por el INTI antes de que el LAL realice las mediciones (en gama de azules) y para la medición de comprobación (en negro).

En la figura 7.2 se observa cómo los intervalos asociados a los valores calculados en la sexta medición por parte del INTI se solapan con los de las 5 mediciones previas, en todo el rango de frecuencias.

Sin embargo se observa, sobre todo en el rango de 500 Hz a 1000 Hz, un distanciamiento considerable entre las 5 primeras mediciones y la medición de comprobación. De acuerdo con esta última medición, la muestra sería menos absorbente en este rango que lo calculado con las 5 mediciones anteriores. Una posible explicación de esta

discrepancia podría ser que la muestra se compactó durante el traslado, perdiendo espesor y por lo tanto resultando su superficie geométrica menor o modificándose sus propiedades absorbentes. De todos modos la información disponible no es suficiente como para asegurar esto y las discrepancias tampoco resultan significativas, ya que el solapamiento de los intervalos entre los dos conjuntos de mediciones permite confirmar que el material no sufrió alteraciones considerables durante el traslado.

En conclusión, la muestra se mantuvo estable durante el interlaboratorio, siendo válidos los resultados y los análisis que resultan de los mismos.

7.3. Resultados del LAL

Luego de las primeras 5 mediciones llevadas a cabo por el INTI la muestra se trasladó al LAL, donde se realizaron otras 5 mediciones (fig. 7.3).

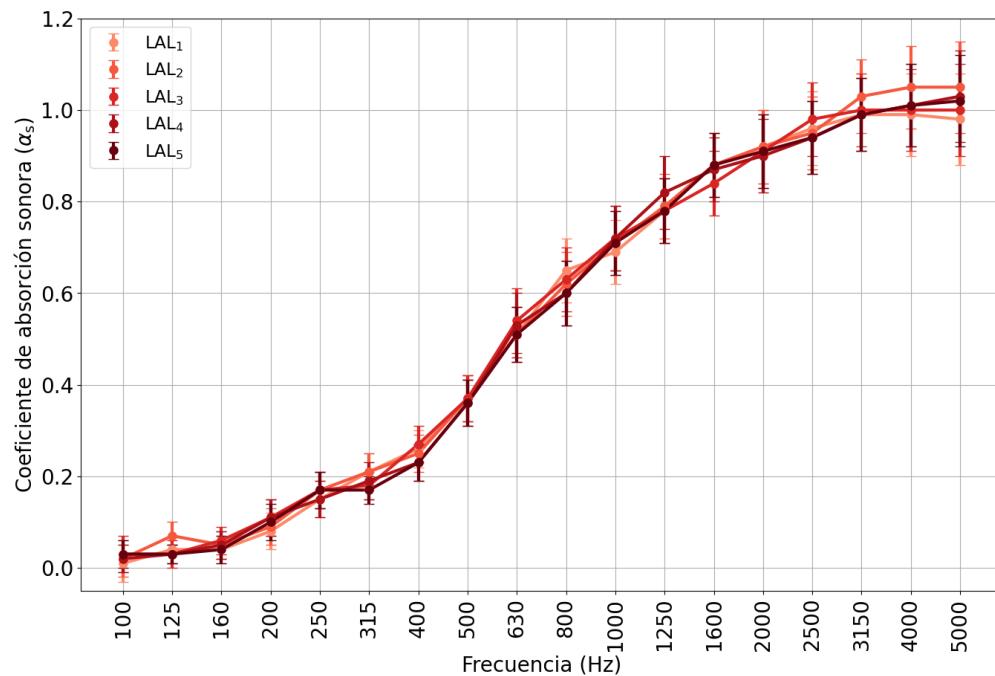


Fig. 7.3: coeficientes de absorción sonora en función de la frecuencia para las 5 mediciones llevadas a cabo por el LAL (en gama de rojos).

En la figura 7.3 se observan los resultados de las 5 mediciones realizadas por el LAL. Se observa cómo todos los intervalos de los valores medidas para cada banda se solapan.

7.4. Comparación de resultados

A fin de comparar los resultados de ambos participantes, se reunieron en un mismo gráfico las 10 curvas de absorción sonora determinadas por cada uno para la muestra de material incógnito (fig. 7.4).

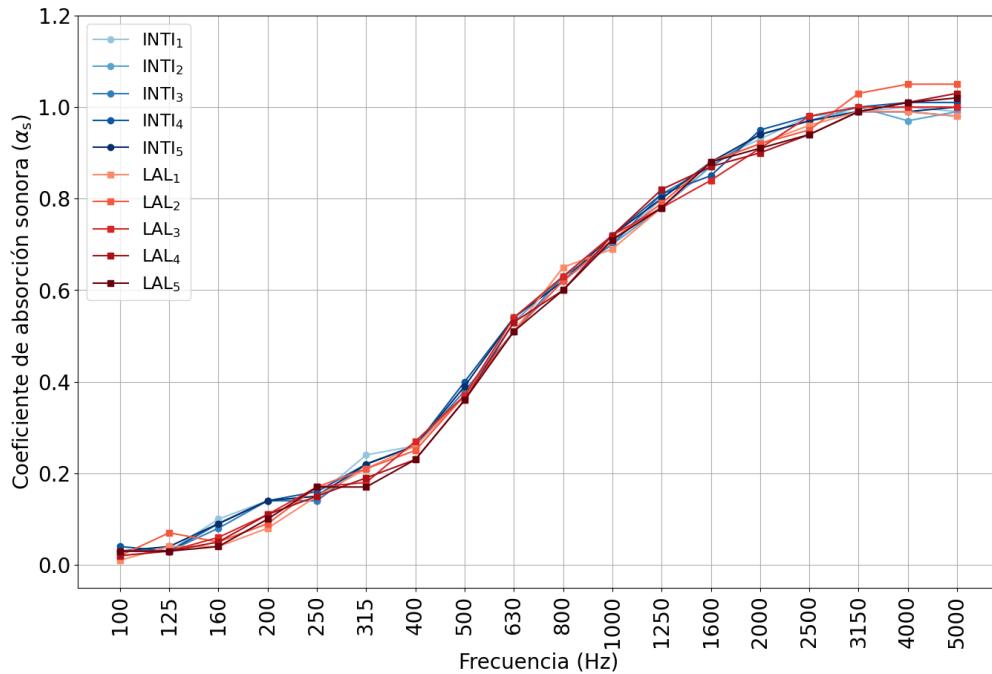


Fig. 7.4: coeficientes de absorción sonora en función de la frecuencia para las 5 mediciones llevadas a cabo por el INTI (en gama de azules) y para las 5 llevadas a cabo por el LAL (en gama de rojos). No se grafican las barras de incertidumbre para visualizar mejor la curvas de absorción sonora.

En la figura 7.4 se observa que todas las curvas siguen la misma tendencia, notándose una mayor dispersión de los resultados en los rangos de 125 Hz a 315 Hz y de 3150 Hz a 5000 Hz.

Se calculó el valor de referencia según (3.13) para cada banda de frecuencia y su incertidumbre según (3.14) y se graficó la curva de absorción correspondiente junto con las curvas INTI₂ y LAL₂ de la figura 7.4, ya que son las que más distan entre sí de cada laboratorio (fig. 7.5).

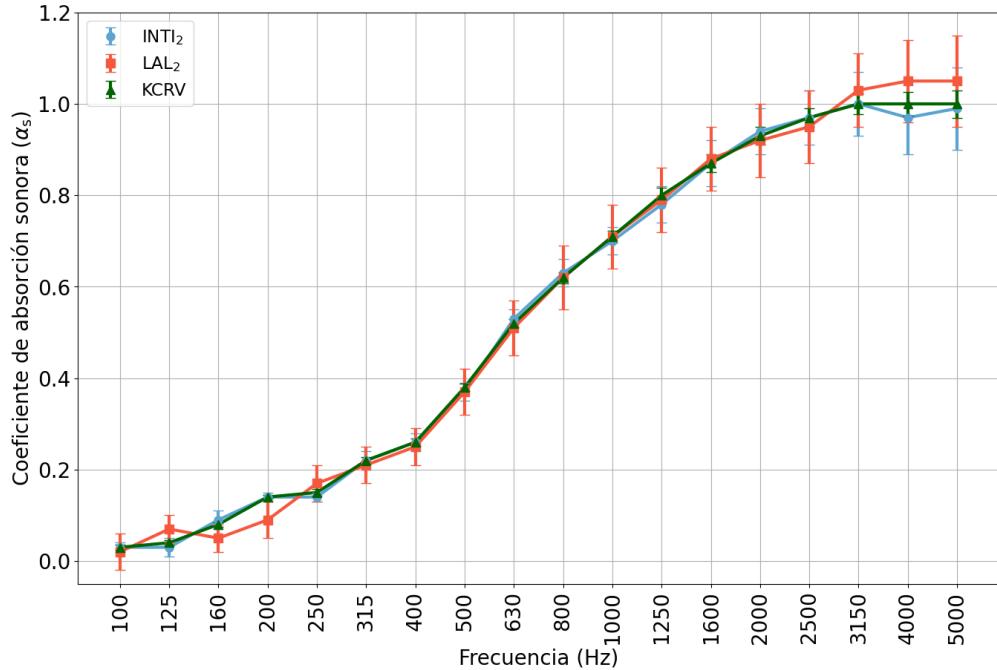


Fig. 7.5: coeficientes de absorción sonora en función de la frecuencia para las mediciones de subíndice 2 de la figura 7.4 llevadas a cabo por el INTI (en celeste), por el LAL (en naranja) y para el valor de referencia calculado según (3.13) (en verde).

En la figura (7.5) se observa cómo el valor de referencia se encuentra siempre contenido entre ambas curvas, y cómo sobre todo a bajas frecuencias dista menos de la curva INTI₂ que de la LAL₂, dado que las incertidumbres asignadas por el INTI resultan menores. También se observa cómo a 160 Hz y a 200 Hz los intervalos entre las mediciones INTI₂ y LAL₂ apenas se solapan, dando muestra de que para estas frecuencias posiblemente no se cumpla el criterio de evaluación del error normalizado.

7.5. Errores normalizados

A partir de los resultados de la figura 7.4 y de sus incertidumbres, se calcularon según (3.15) los errores normalizados para las 10 curvas (fig. 7.6).

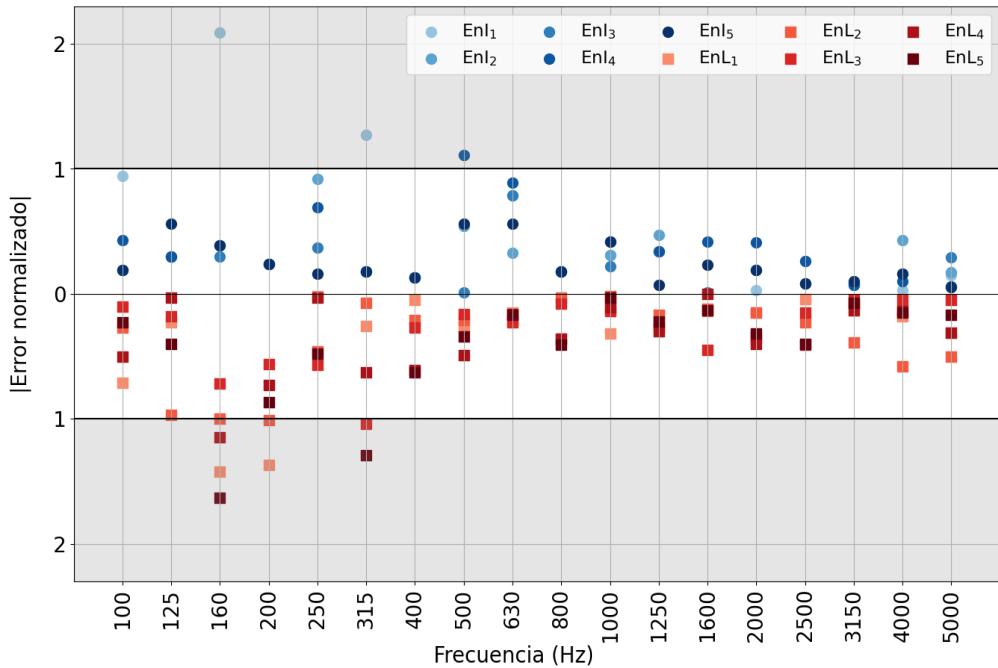


Fig. 7.6: errores normalizados en función de la frecuencia calculados según (3.15) para las 5 mediciones llevadas a cabo por el INTI (en gama de azules) y para las 5 llevadas a cabo por el LAL (en gama de rojos).

En la figura 7.6 se observa cómo entre 160 Hz y 500 Hz varios valores no cumplen con el criterio de evaluación. Esto, como ya mostraba la figura 7.5 se debe a que las bajas incertidumbres asignadas por el INTI en ese rango de frecuencias fuerzan al valor de referencia a alejarse de las curvas del LAL, haciendo que varios de sus valores no cumplan con el criterio de evaluación.

Sin embargo, esto no necesariamente implica que el INTI deba ampliar sus incertidumbres a bajas frecuencias, ya que como se observa en la figura 7.2, la repetibilidad en este rango es buena. En particular a 200 Hz las 5 primeras mediciones se solapan entre sí, e incluso coinciden con la medición de comprobación.

Al involucrar tan solo dos participantes, las comparaciones bilaterales presentan algunas limitaciones en lo referente al análisis de resultados. Por un lado no es posible realizar una generalización de los resultados ya que no se cuenta con una representación lo suficientemente amplia de la variabilidad. Por otro lado, la interpretación de discrepancias no es concluyente. Ante esta última situación si los resultados de uno de los laboratorios estuviesen afectados por un error sistemático, la comparación resultaría sesgada sin contar con las herramientas suficientes para concluir cual de los dos laboratorios presenta el problema. Sin embargo, este sienta un precedente importante por lo que demuestra que sería deseable contar con la participación de un tercer laboratorio (o más) y así evaluar la existencia de errores sistemáticos en alguno de los dos laboratorios participantes.

Capítulo 8

Conclusiones

El estudio realizado sienta las bases para que el Laboratorio de Acústica y Vibraciones del Instituto Nacional de Tencnología Industrial (INTI) lleve a cabo ensayos de absorción sonora en cámara reverberante. Esto es de particular interés metrológico, ya que le permite a la industria nacional caracterizar de manera efectiva materiales acústicos. Este trabajo permitió desarrollar un método de medición del coeficiente de absorción sonora de materiales mediante el método del ruido interrumpido, siguiendo los lineamientos normativos establecidos por la norma IRAM 4065:2019 y la Guía para la Expresión de la Incertidumbre en la Medición (GUM). El método desarrollado se validó en un rango amplio de frecuencias realizando una comparación bilateral con otro laboratorio de acústica que realiza ensayos de absorción sonora.

Se caracterizó la geometría de la cámara reverberante a modo de verificar que esta cumpla con las condiciones normativas. Se verificó que el volumen de la cámara reverberante es de $(202, 1 \pm 2, 8)$ m³, conteniendo al valor de 200 m³ recomendado por la norma . Para el máximo prisma rectangular contenido por el volumen de la cámara, se calcularon los primeros modos normales a fin de obtener la mínima frecuencia de resonancia del recinto. Dicha frecuencia se estimó en un valor aproximado de 25 Hz, por debajo de los 100 Hz mínimos necesarios para llevar a cabo ensayos bajo lineamientos normativos.

El estudio sobre la difusividad del campo sonoro llevó a analizar y rediseñar la configuración y el número de difusores acústicos, incorporando un mayor número de difusores que los inicialmente disponibles. Así, la configuración final consiste en 10 difusores planos de acrílico y 3 esferas de telgopor de alta densidad, alcanzando una superficie total de difusión de $(33, 14 \pm 0, 06)$ m², comprendida entre los valores recomendados por la norma. Con la configuración que contenía solo difusores planos, se registraron tiempos de reverberación con desviaciones significativamente más altas en comparación a los registrados con la configuración actual con las esferas de telgopor. Esto confirma que la nueva configuración propuesta resulta adecuada para generar un campo sonoro suficientemente difuso para la realización de ensayos de absorción sonora.

Para analizar las fuentes de incertidumbre, se reescribió el modelo en función de todas las variables medidas en la determinación de α_s . Se desarrolló un método para evaluar la contribución asociada al volumen de la cámara empleando la clase *Delaunay* del módulo “scipy.spatial” de Python. A partir de la variación de las posiciones de los vértices del volumen de la cámara modelada, se definió una incertidumbre asociada para el volumen de la cámara vacía V_1 en $uv_1 = 0,82 \text{ m}^3$. Para la incertidumbre de calibración asociada al tiempo de reverberación, se propuso un método de calibración para el analizador *Building Acoustics Analyzer* modelo 4417. Como referencias se emplearon tonos puros multiplicados por exponenciales decrecientes, regulando la pendiente de estos decaimientos para así variar el tiempo de reverberación deseado. Se determinó una función de corrección en función del tiempo de reverberación medido junto con las incertidumbres asociadas a la calibración del analizador para el rango de frecuencias de ensayo de 100 Hz a 5 kHz.

Se analizó el grado de influencia de las condiciones ambientales en el cálculo de α_s en dos modelos: uno simplificado que no considera la variación de las condiciones ambientales (temperatura, humedad relativa y presión) a lo largo del ensayo y otro más complejo que sí las tiene en cuenta. De la comparación de los balances de incertidumbres de ambos modelos se observó que las contribuciones porcentuales a la incertidumbre de α_s no se modifican significativamente al considerar la variación de las condiciones ambientales. A su vez, las componentes de calibración y de repetibilidad asociadas a los tiempos de reverberación son de aproximadamente un 90 % del total en todo el rango de frecuencias, indicando que para disminuir la incertidumbre de α_s lo más efectivo sería cambiar de sistema de adquisición. Este análisis muestra que es posible calcular la incertidumbre de α_s a partir del modelo simplificado sin necesidad de considerar las condiciones ambientales con el modelo completo. También se evaluó α_s a distintos valores de temperatura y humedad relativa empleando ambos modelos, obteniéndose que en un rango de variación de temperatura del orden de los 10 °C y de humedad relativa del orden del 10 % resulta indistinto emplear un modelo u otro.

Se estudió la repetibilidad del método realizando 5 mediciones de una muestra compuesta por 15 paneles de lana de vidrio. En cada medición se montó la muestra en la misma posición dentro de la cámara y se mantuvo el ordenamiento de los paneles. Se observó que los intervalos de las 5 mediciones se solapan entre sí en todas las frecuencias del rango, indicando que la repetibilidad del método se mantendrá dentro de estos valores siempre y cuando se mantenga la posición de la muestra y el ordenamiento de los paneles.

Finalmente, a modo de validación del método desarrollado, se llevó a cabo una comparación bilateral con el Laboratorio de Acústica y Luminotecnia (LAL) de la Comisión de Investigaciones Científicas. Se desarrolló un protocolo de medición para la comparación de 5 ensayos de absorción sonora de una muestra incógnita compuesta de 15 paneles de lana de vidrio. Para cada banda de tercio de octava se calculó un valor de referencia a partir de los 10 resultados obtenidos, pesados por las incerti-

dumbres, y se calcularon los errores normalizados correspondientes. Se observó una buena reproducibilidad general, excepto para el rango entre 160 Hz y 500 Hz, donde varios valores provenientes de las mediciones de ambos laboratorios no cumplían con el criterio de evaluación. Se concluyó que la comparación resultó sesgada, ya que al tratarse de una comparación bilateral, no resulta posible analizar si los resultados de uno de los laboratorios estuvieron afectados por un error sistemático. Esto evidencia la necesidad de llevar a cabo un nuevo interlaboratorio, contando esta vez con la participación de un tercer laboratorio (o más), con el objetivo de validar por completo el método y finalmente incorporar los ensayos de absorción sonora a la oferta de servicios ofrecidos por el INTI.

Apéndice A

Coeficientes de sensibilidad (MS)

Con las redefiniciones realizadas en la sección 5.1.1, los coeficientes de sensibilidad del modelo simplificado dado por la ecuación (5.1) resultan a partir de las derivadas parciales con respecto a cada una de las 8 variables involucradas:

$$\frac{\partial \alpha_s}{\partial V_1} = \frac{\frac{55,3}{TR_2 \cdot (0,6 \frac{m}{s^oC} t_2 + 331 \frac{m}{s})} - \frac{55,3}{TR_1 \cdot (0,6 \frac{m}{s^oC} t_1 + 331 \frac{m}{s})}}{2ab + 2ad + bd}, \quad (A.1)$$

$$\frac{\partial \alpha_s}{\partial t_1} = \frac{33,18 \frac{m}{s^oC} V_1}{TR_1 \cdot (0,6 \frac{m}{s^oC} t_1 + 331 \frac{m}{s})^2 \cdot (2ab + 2ad + bd)}, \quad (A.2)$$

$$\frac{\partial \alpha_s}{\partial t_2} = -\frac{33,18 \frac{m}{s^oC} \cdot (V_1 - abd)}{TR_2 \cdot (0,6 \frac{m}{s^oC} t_2 + 331 \frac{m}{s})^2 \cdot (2ab + 2ad + bd)}, \quad (A.3)$$

$$\frac{\partial \alpha_s}{\partial TR_1} = \frac{55,3 V_1}{TR_1^2 \cdot (0,6 t_1 + 331) (2ab + 2ad + bd)}, \quad (A.4)$$

$$\frac{\partial \alpha_s}{\partial TR_2} = -\frac{55,3 \cdot (V_1 - abd)}{TR_2^2 \cdot (0,6 t_2 + 331) (2ab + 2ad + bd)}, \quad (A.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_s}{\partial a} &= \frac{(-2b - 2d) \left(\frac{55,3 \cdot (V_1 - abd)}{TR_2 \cdot (0,6 \frac{m}{s^oC} t_2 + 331 \frac{m}{s})} - \frac{55,3 V_1}{TR_1 \cdot (0,6 \frac{m}{s^oC} t_1 + 331 \frac{m}{s})} \right)}{(2ab + 2ad + bd)^2} \\ &\quad - \frac{55,3 bd}{TR_2 \cdot (0,6 \frac{m}{s^oC} t_2 + 331 \frac{m}{s}) (2ab + 2ad + bd)}, \end{aligned} \quad (A.6)$$

$$\frac{\partial \alpha_s}{\partial b} = \frac{(-2a - d) \left(\frac{55,3 \cdot (V_1 - abd)}{TR_2 \cdot (0,6 \frac{m}{s^o C} t_2 + 331 \frac{m}{s})} - \frac{55,3 V_1}{TR_1 \cdot (0,6 \frac{m}{s^o C} t_1 + 331 \frac{m}{s})} \right)}{(2ab + 2ad + bd)^2}$$

$$- \frac{55,3 ad}{TR_2 \cdot (0,6 \frac{m}{s^o C} t_2 + 331 \frac{m}{s}) (2ab + 2ad + bd)}, \quad (A.7)$$

$$\frac{\partial \alpha_s}{\partial d} = \frac{(-2a - b) \left(\frac{55,3 \cdot (V_1 - abd)}{TR_2 \cdot (0,6 \frac{m}{s^o C} t_2 + 331 \frac{m}{s})} - \frac{55,3 V_1}{TR_1 \cdot (0,6 \frac{m}{s^o C} t_1 + 331 \frac{m}{s})} \right)}{(2ab + 2ad + bd)^2}$$

$$- \frac{55,3 ab}{TR_2 \cdot (0,6 \frac{m}{s^o C} t_2 + 331 \frac{m}{s}) (2ab + 2ad + bd)}. \quad (A.8)$$

Apéndice B

Coeficientes de sensibilidad (MC)

Hipervínculo al Google Colab donde se encuentra el cálculo de los coeficientes de sensibilidad del modelo completo de la sección 5.1.2:

<https://colab.research.google.com/drive/1uSEL4aemhrXhNuT1sqb9AuyPFfLE7edy?usp=sharing>.

Apéndice C

Estimación de incertidumbre en V_1

Hipervínculo al Google Colab donde se encuentra el código empleado para la estimación de incertidumbre en la sección 5.2.2:

<https://colab.research.google.com/drive/1-ywW1ki3TtS2AKjEGPHoeGLSU9bkXd2S?usp=sharing>.

Apéndice D

Balance de incertidumbres (MS)

Hipervínculo a la planilla de cálculo donde se encuentra el balance de incertidumbres del modelo simplificado, cuyos gráficos se muestran en la sección 5.4:

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1FNPymEu6KX8nBLsaD1iIB5Zc4GYsTX1X_-PkBQ41Mhc/edit?usp=sharing.

Apéndice E

Balance de incertidumbres (MC)

Hipervínculo al Google Colab donde se encuentra el balance de incertidumbres del modelo completo, cuyos gráficos se muestran en la sección 5.4:

https://colab.research.google.com/drive/13k2VJZJ63HD6_K9Llpwt45DUx1y1wNkv?usp=sharing.

Bibliografía

- [1] T. Mellow L. Beranek. *Acoustics: Sound Fields and Transducers*. Academic Press, 2012.
- [2] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). *IRAM 4065:2019 - Acústica - Medición de la absorción sonora en una cámara reverberante*, 2019.
- [3] R. Depine. *Ondas*. Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, 2020.
- [4] P. V. Brüel y V. Kjær. *Acoustic Noise Measurements*. Brüel & Kjær, 1980.
- [5] Higin Arau Puchades. *ABC de la acústica: Leyes Físicas que regulan el Aislamiento Acústico, el Ruido de Impacto y la Absorción Acústica en los Edificios y en el medio Urbano (Tomo II)*. Arau Acústica, 2018.
- [6] Atelier Crescendo. Sound reverberation – part 1: Basics. <https://ateliercrescendo.ac/sound-reverberation-part-1-basics/>, 2021. Último acceso: 06/09/2024.
- [7] F. Ruffa y R. Sánchez Quintana E. Bergallo. *Acústica Aplicada*, page 63. Editorial del Centro de Arte y Tecnología, 2002.
- [8] Cyril Harris. *Handbook of Noise Control*, volume 67. Journal of the SMPTE, 1958.
- [9] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). *IRAM 4081:1977 - Acústica - Filtros de banda de octava, de media octava y de tercio de octava destinados al análisis de sonidos y vibraciones*, 1977. Norma Argentina.
- [10] International Electrotechnical Commission (IEC). *IEC 61260-1:2014 - Electro-acoustics - Octave-band and fractional-octave-band filters - Part 1: Specifications*, 2014. International Standard.
- [11] Caruso Acoustic. Segunda clase de acústica: el tiempo de reverberación. <https://carusoacoustic.com/es/magazine/segunda-clase-de-acustica-el-tiempo-de-reverberacion/>, 2017. Último acceso: 06/09/2024.

- [12] International Organization for Standardization (ISO). *ISO 354:2003 - Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room*, 2003.
- [13] S. Wang y L. Hayes Q. Meng, D. Sen. Impulse response measurement with sine sweeps and amplitude modulation schemes. *Signal Processing and Communication Systems*, 2009.
- [14] M. Long. *Architectural Acoustics, Second Edition - Sound in Enclosed Spaces*. Science Direct, 2014.
- [15] International Organization for Standardization (ISO). *ISO 11654:1997 - Acoustics - Sound absorbers for use in buildings - Rating of sound absorption*, 1997.
- [16] International Organization for Standardization (ISO). *ISO 9613-1:1993 - Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere*, 1993.
- [17] S. Ferreyra et al. IdentificaciÓn y anÁlisis de modos propios de recintos a partir de sus respuestas impulsivas. *AsociaciÓn Argentina de Mecánica Computacional*, 31(3969-3989), 2012.
- [18] Computational Acoustics. What is acoustic modelling? <https://computational-acoustics.gitlab.io/website/posts/2-what-is-acoustic-modelling/>, 2020. Último acceso: 2024-10-20.
- [19] Computational Acoustics. Acoustic modes of a rectangular room. <https://computational-acoustics.gitlab.io/website/posts/5-acoustic-modes-of-a-rectangular-room/>, 2020. Último acceso: 2024-10-20.
- [20] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML. International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM). Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 200:2012. (3rd edition).
- [21] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML. Guide to the expression of uncertainty in measurement — Part 1: Introduction. Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM GUM-1:2023.
- [22] BIPM. Publicaciones del JCRB. <https://www.bipm.org/en/committees/jc/jcrb>. Último acceso: 06/09/2024.
- [23] A. Gittens y D. Tomlinson. How the Caribbean Fits Into the International Metrology System. The Q-Factor, 2021.
- [24] M. M. Pérez Hernández. Estimación de incertidumbres. *Revista Española de Metrología: e-medida*, 3, 2012.
- [25] M. G. Cox. The evaluation of key comparison data. *Metrologia*, 39(6), 2002.

- [26] Google. Google maps. <https://www.google.com/maps>.
- [27] Brüel & Kjær product data - Building Acoustics Analyzer Type 4417.
- [28] Trimble Inc. Sketchup 3d modeling software. <https://www.sketchup.com>, 2024.
- [29] GIK Acoustics. What are room modes? <https://www.gikacoustics.com/what-are-room-modes/#:~:text=Room%20modes%20are%20caused%20by,the%20dimensions%20of%20the%20room.>, 2024. Último acceso: 2024-10-20.
- [30] AMCoustics. Amroc room acoustics calculator. <https://amcoustics.com/tools/amroc?l=561&w=669&h=375&r60=0.6>, 2024. Último acceso: 2024-10-20.
- [31] J. D. Hunter. Matplotlib: A 2d graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3):90–95, 2007.
- [32] J. Balint, M. Berzborn, M. Nolan, y M. Vorländer. Measuring sound absorption: The hundred-year debate on the reverberation chamber method. *Acoustics Today*, 19:13–21, 2023.
- [33] H. G. Giuliano, A. G. Velis y A. M. Méndez. The Reverberation Chamber at the Laboratorio de Acústica y Luminotecnia of the Comisión de Investigaciones Científicas. *Applied Acoustics*, 49(1), 1996.
- [34] International Organization for Standardization (ISO). *ISO 17025:2017 - Testing and calibration laboratories*, 2017.
- [35] A. Meurer et al. Sympy: symbolic computing in python. <https://docs.sympy.org/latest/index.html>, 2017. Último acceso: 16/09/2024.
- [36] D. Haggerty et al. Trimesh: 3d triangle mesh processing library. <https://trimesh.org/>, 2024. Último acceso: 06/09/2024.
- [37] Delaunay. Delaunay triangulation. <https://pypi.org/project/delaunay/>, 2024. Último acceso: 06/09/2024.
- [38] E. Verbree. Delaunay tetrahedralizations: Honor degenerated cases. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, 2015.
- [39] D. M. Y. Sommerville. *An Introduction to the Geometry of n Dimensions*. New York: Dover Publications, 1958.
- [40] A. Gupta P. Gulia. *Mathematics Applied to Engineering*. Academic Press, 2017.
- [41] M. Lombardi. *Time Measurement*, page 21. CRC Press, 02 2014.
- [42] C. Scrosati et al. Towards more reliable measurements of sound absorption coefficient in reverberation rooms: An Inter-Laboratory Test. *Applied Acoustics*, 165, 2020.



Tesis disponible bajo Licencia Creative Commons, Atribución – No Comercial – Compartir Igual (by-nc-sa) 2.5 Argentina

Buenos Aires, 2024