

ANÁLISIS DE DIFUSIVIDAD DEL CAMPO ACÚSTICO PARA LA DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN SONORA EN CÁMARA REVERBERANTE

ANALYSIS OF ACOUSTIC FIELD DIFFUSIVITY FOR THE DETERMINATION OF THE SOUND ABSORPTION COEFFICIENT IN A REVERBERATION CHAMBER

F. F. Criscuolo^{*1}, F. A. Serrano¹, L. Álvarez^{1,2} y J. G. Skabar^{1,2}

¹INTI - Metrología Física, Av. Gral. Paz N° 5445, San Martín, Buenos Aires, Argentina

²UNSAM - Instituto de Calidad Industrial, San Martín, Buenos Aires, Argentina

Recibido: 25/10/2024 ; Aceptado: 14/05/2025

El Laboratorio de Acústica y Vibraciones del INTI está poniendo a punto un sistema para la determinación del coeficiente de absorción sonora en cámara reverberante mediante el método del ruido interrumpido siguiendo los lineamientos de la norma IRAM 4065:2019. Este trabajo se centra en dos aspectos: el análisis de la difusividad del campo sonoro y la estimación de incertidumbres del método, con especial énfasis en las incertidumbres asociadas al volumen de la cámara reverberante y a los tiempos de reverberación.

Para generar un campo sonoro uniforme se emplean difusores rectangulares de acrílico y esferas de poliestireno expandido (EPS) de alta densidad. Se comparan mediciones de tiempo de reverberación entre 500 Hz y 4 000 Hz para distintas configuraciones de difusores, encontrándose que la conformada por 10 paneles de acrílico y 3 esferas de EPS presenta la menor dispersión en los tiempos medidos. En cuanto a la estimación de incertidumbres, la asociada al cálculo del volumen de la cámara reverberante se estima a partir de un método variacional empleando la clase "Delaunay" del módulo "scipy.spatial" de Python, resultando en aproximadamente un 10% del volumen medido de la cámara. Finalmente, se presenta un método de calibración para el tiempo de reverberación medido con el analizador de doble canal *Building Acoustics Analyzer* modelo 4417, donde se generan rampas sintéticas de presión sonora en función del tiempo de tonos puros filtrados en bandas de tercios de octava y se inyectan electrónicamente al analizador para determinar su incertidumbre.

Palabras Clave: acústica arquitectónica, absorción sonora, cámara reverberante.

The Laboratory of Acoustics and Vibrations of INTI is fine-tuning a system for determining the sound absorption coefficient in a reverberation chamber using the interrupted noise method following the guidelines of IRAM 4065:2019. The study focuses on two main aspects: the analysis of sound field diffusivity through the addition of diffusers and the estimation of uncertainties of the method with particular emphasis on the uncertainties associated with the volume of the reverberation chamber and the reverberation times.

To generate a uniform sound field, rectangular acrylic diffusers and high-density polystyrene spheres are used. Reverberation time measurements between 500 Hz and 4 000 Hz are compared for different diffuser configurations, with the configuration consisting of 10 acrylic panels and 3 polystyrene spheres showing the least dispersion in the measured times. Regarding the uncertainty estimation, the one associated with the calculation of the reverberation chamber volume is estimated using a variational method employing the "Delaunay" class from the "scipy.spatial" module of Python, resulting in approximately 10% of the measured volume of the chamber. Finally, a calibration method for the reverberation time measured with the dual-channel analyzer *Building Acoustics Analyzer* model 4417 is presented, where synthetic sound pressure level decay curves are generated over time from pure tones filtered in one-third octave bands and electronically injected into the analyzer to determine its uncertainty.

Keywords: architectural acoustics, sound absorption, reverberant chamber.

<https://doi.org/10.31527/analesafa.2025.36.2.29>



ISSN - 1850-1168 (online)

I. INTRODUCCIÓN

La caracterización acústica de materiales fonoabsorbentes se realiza bajo lineamientos normativos en recintos de características específicas conocidos como "cámaras reverberantes". Estas cámaras consisten en salas de forma irregular de aproximadamente 200 m³ aisladas del ruido exterior, con superficies internas de alta reflectividad. Estas cualida-

des permiten garantizar que el tiempo que transcurre desde el cese de la emisión de un sonido hasta que el mismo decae 60 dB, 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 de la palabra en auditorios, salas de confe-

facundocriscuolo@gmail.com

rencias 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 muestras de aproximadamente 1 m² de área.

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

II. MARCO TEÓRICO

Difusión del campo sonoro

En las cámaras reverberantes donde se llevan a cabo los ensayos de absorción sonora se busca que el campo sonoro sea lo más difuso posible. Se conoce como campo difuso a un tipo de campo sonoro en el cual las ondas de sonido se distribuyen de manera uniforme en todas las direcciones. En contraposición al campo sonoro directo, donde las ondas de sonido se emiten desde una fuente sonora y viajan directamente hacia el receptor sin sufrir reflexiones en el camino, en un campo difuso la energía acústica se distribuye de manera homogénea en el espacio.

El mismo 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 uniforme en todas las direcciones. A medida que el número de reflexiones aumenta, el campo sonoro se vuelve cada vez más difuso.

Para lograr este efecto 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 que se sabe por experiencia 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.” [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 en m² del recinto donde se lleve a cabo el ensayo (A_i) con y sin la muestra, empleando los tiempos de reverberación para un determinado rango de frecuencias (ver ec. 1). [3]

$$A_i = \frac{55.3 \cdot V_i}{TR_i \cdot c_i} - 4V_i \cdot m_i \begin{cases} i = 1 \text{ sin muestra} \\ i = 2 \text{ con muestra} \end{cases} \quad (1)$$

En la ecuación 1, V_i es el volumen de aire disponible en la cámara en m³, c_i la velocidad del sonido en el aire en m/s, TR_i el tiempo de reverberación en s y $m_i = \frac{\alpha_i}{10 \text{ dB} \cdot \log(e)}$ el coeficiente de atenuación sonora, con α_i el coeficiente de atenuación atmosférica en dB/m.

Si bien la norma contempla en la ecuación 1 un único volumen $V_i = V$ correspondiente al volumen de aire disponible en la cámara sin la muestra, para este trabajo se propuso que $V_1 \neq V_2$, considerando que los absorbentes sonoros no ocupan un volumen despreciable dentro del recinto. Para el caso de absorbentes planos, el coeficiente de absorción sonora α_s resulta del cociente entre la diferencia de las áreas equivalentes de absorción sonora calculadas en la ecuación 1 y la superficie geométrica de la muestra denotada por S , conocida como ecuación de Sabine (ver ec. 2).

$$\alpha_s = \frac{A_2 - A_1}{S} \quad (2)$$

III. Dispositivo experimental

Método

Para medir el tiempo de reverberación, la norma IRAM 4065:2019 propone dos métodos de medición: el método del ruido interrumpido y el método de la respuesta impulsiva integrada. Si bien hoy en día el método de la respuesta al impulso está más aceptado que el método 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. 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 método para desarrollar ensayos de absorción sonora.

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.

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) [2].

Sistema de adquisición

El *Building Acoustics Analyzer Type 4417* (BAAn) 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 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.

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 [4]) que cubren el rango de frecuencias de 100 Hz a 8 000 Hz. Para el modo de medición de tiempo de reverberación emite el ruido filtrado durante unos segundos (aproximadamente 8 s a 100 Hz, disminuyendo 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 8 000 Hz, 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.

Cámara reverberante

La cámara reverberante del Laboratorio de Acústica y Vibraciones del INTI está conectada por medio de borneras y cableados con la cámara de transmisión, donde se encuentra el BAAn. La salida de audio del BAAn se conecta a la entrada de un amplificador *PM-600* marca Carver, para así amplificar y regular la intensidad de la señal sonora emitida. La salida de la señal sonora del amplificador se conecta a un 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 una fuente sonora omnidireccional *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.

Dentro de la cámara reverberante, 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**) para satisfacer los requisitos de la norma IRAM 4065:2019 en cuanto a las disposiciones geométricas micrófono/altavoz (ver fig. 1).

En la Fig. 1 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.

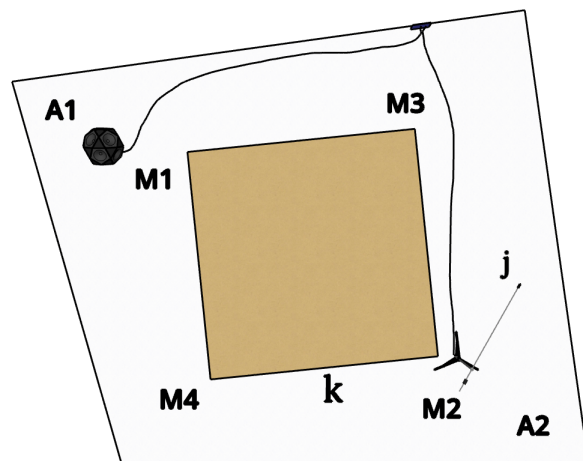


FIG. 1: esquema de distribución en planta del arreglo experimental dentro de la cámara reverberante para la configuración A1M2j.

Para calcular el volumen de la cámara reverberante, que se corresponde con el volumen de aire disponible V_1 en la ecuación 1, se empleó la clase “Delaunay” del módulo “scipy.spatial” de Python, la cual permite aplicar una tetraedralización de Delaunay sobre un conjunto de vértices para descomponer el volumen conformado por esos vértices en tetraedros [5]. La tetraedralización de Delaunay es una forma de subdividir un conjunto de puntos en el espacio tridimensional en tetraedros 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 [6].

Tomando las medidas del plano empleado para la construcción de la cámara reverberante, se graficaron las posiciones de sus vértices empleando la librería “trimesh” de Python [7], aplicando sobre los mismos una tetraedralización de Delaunay (ver Fig. 2).

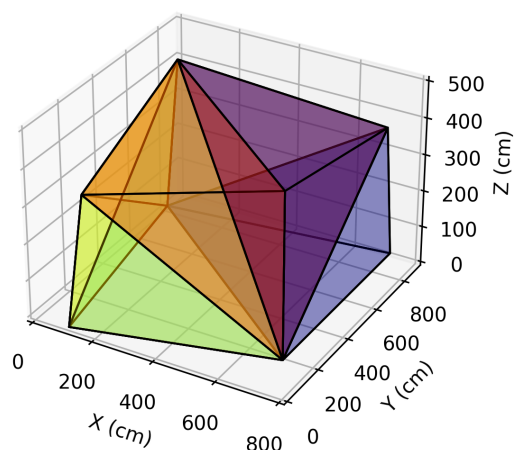


FIG. 2: tetraedralización de Delaunay, se muestran los 7 tetraedros en colores distintos.

En la Fig. 2 se observa que la división óptima del cuerpo calculada según el algoritmo resultó de 7 tetraedros, componiendo la suma de sus volúmenes un volumen total de $202,14 \text{ m}^3$ (en la Sección V se estima su incertidumbre co-

rrespondiente).

IV. DIFUSIVIDAD DEL CAMPO SONORO

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 m², 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 4 000 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 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 caracterización del campo difuso de la cámara se emplearon 9 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 en un arreglo de 3 × 3 sobre el piso de la cámara reverberante, dejando sus bordes exteriores descubiertos. En total, la superficie de la muestra empleada fue de aproximadamente 13,68 m², incluyendo los bordes exteriores del conjunto de paneles.

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 de 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 4 000 Hz para las 3 cantidades de difusores empleados (ver Fig. 3).

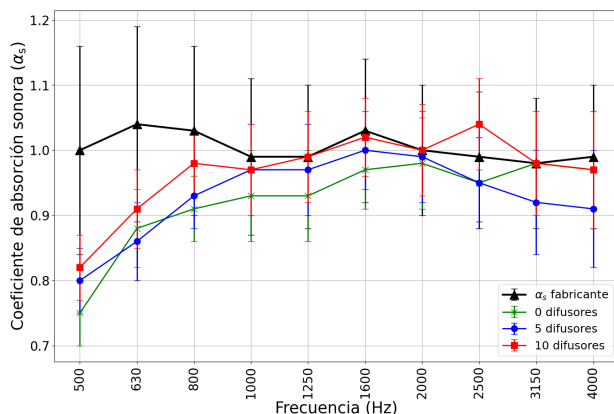


FIG. 3: coeficientes de absorción sonora en función de la frecuencia para 0, 5, 10 difusores y valores informados por el fabricante.

En la Fig. 3 se muestra un gráfico 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.

Esta observación motivó la incorporación de una mayor cantidad de difusores, ya que incluso para la cantidad empleada no se cumplía la recomendación de la norma de que el área (ambas caras) de difusores (19,68 m²) esté comprendida entre el 15 % (31,72 m²) y el 25 % (52,87 m²) del área total de las superficies interiores de la cámara.

Por cuestiones de costos, se optó por EPS de alta densidad en lugar del acrílico que, si bien no está contemplado explícitamente en la norma IRAM 4065:2019, otros laboratorios de acústica usan como difusores esferas de estas características de aproximadamente 1 m de diámetro [8]. Dado que el tamaño de esfera más grande disponible en el mercado local fue de 0,6 m de diámetro (4,52 m²), se emplearon 3 esferas para alcanzar un área total de 33,14 m², 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 Figs. 4 y 5 se observa la configuración de los difusores en la cámara reverberante. Se analizaron los coeficientes de absorción sonora calculados en función de la frecuencia entre 500 Hz y 4 000 Hz para la configuración de los 10 difusores planos y los 3 esféricos (ver Fig. 6).



FIG. 4: cámara reverberante con paneles de Andina Rústico de la marca Isover.

En la Fig. 6 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 sus dispersiones disminuyeron casi a la mitad con la nueva configuración. En la Fig. 7 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



FIG. 5: configuración de difusores.

difusores de EPS. De esta manera, se logró cumplir con la recomendación de la norma IRAM 4065:2019 en cuanto al área de difusores empleada, verificando además que las desviaciones estándar 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.

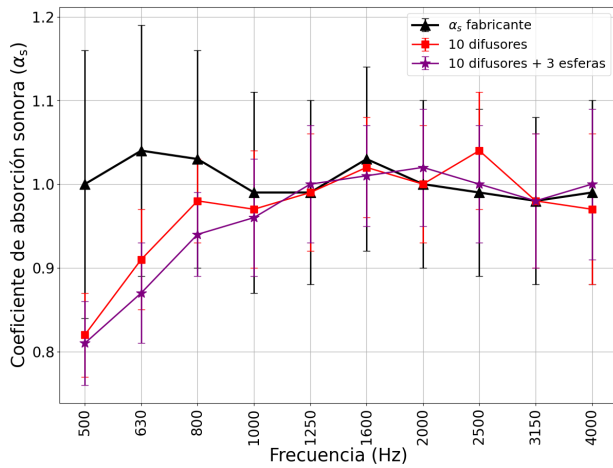


FIG. 6: coeficientes de absorción sonora en función de la frecuencia para distintas configuraciones de difusores y valores informados por el fabricante.

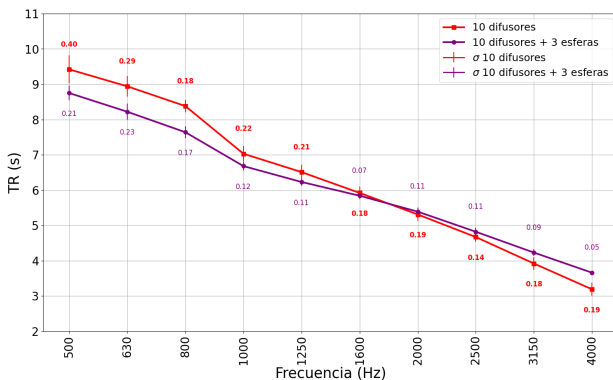


FIG. 7: tiempos de reverberación de la cámara sin la muestra (TR_1). Cada punto es resultado de un promedio sobre 12 posiciones para el par micrófono/altavoz, con su correspondiente incertidumbre.

V. ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRES

Modelo de medición

Para este trabajo se consideró el caso donde los términos m_1 y m_2 de la ecuación 1, que involucran la atenuación sonora, resultan idénticos, proponiendo que las condiciones atmosféricas no varían significativamente entre que se realizan las mediciones a cámara con y sin la muestra. De esta manera se redefinieron algunas de las variables:

- $V_2 = V_1 - V_m$, donde V_m es el volumen de la muestra que, para un absorbente plano rectangular con altura (a), base (b) y profundidad (d), es $V_m = abd$, expresado en m^3 ;
- $S = bd$, para absorbentes planos rectangulares que tengan sus bordes cubiertos por un material reflejante de sonido y $S = 2ab + 2ad + bd$ en caso contrario; y
- $c_i = c_0 + k \cdot t_i$ es la velocidad del sonido en m/s para la temperatura t_i , expresada en $^{\circ}C$. $c_0 = 331$ m/s y corresponde a la velocidad del sonido a la temperatura de $0^{\circ}C$, y $k = 0,6$ (m/s) / $^{\circ}C$ es la tasa de cambio de velocidad por grado Celsius para un rango de temperaturas (t_i) entre $15^{\circ}C$ y $30^{\circ}C$.

Así, se puede expresar el modelo simplificado a partir de las redefiniciones realizadas, sin despreciar la disminución en el volumen de aire disponible en la cámara al agregar la muestra (ver ec. 3).

$$\alpha_s = \frac{\frac{55.3 \cdot (V_1 - abd)}{TR_2 \cdot (c_0 + k \cdot t_2)} - \frac{55.3 \cdot V_1}{TR_1 \cdot (c_0 + k \cdot t_1)}}{2ab + 2ad + bd} \quad (3)$$

Las fuentes de incertidumbre asociadas a las variables del modelo de medición de la ecuación 3 se estimaron siguiendo los lineamientos clásicos establecidos por la GUM [9]. Para este trabajo se eligió mostrar en detalle la estimación de las fuentes de incertidumbre asociadas al volumen de la cámara sin la muestra (V_1) y de los tiempos de reverberación (TR_1), las cuales resultan de un análisis más minucioso.

Incetidumbre en V_1

Durante el cálculo del volumen de la cámara reverberante, al comparar algunas longitudes de las aristas que figuraban en el plano de la misma con mediciones realizadas en la cámara se detectaron diferencias de entre 10 cm y 20 cm. 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.

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 de la Fig. 2. 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 $V_{\max} = 204,96 m^3$ y un volumen mínimo $V_{\min} = 200,35 m^3$.

De este análisis, sobreestimando la cota encontrada para el volumen mínimo, se puede estimar una incertidumbre de tipo B expandida para el volumen de la cámara

en $U_{V_1} = 2,82 \text{ m}^3$, de modo que el valor del volumen de la cámara reverberante se encuentre dentro del intervalo $V_1 = (202,14 \pm 2,82) \text{ m}^3$, abarcando V_{\max} y V_{\min} .

Incertidumbre en TR_i

El principio del método de calibración consistió en inyectarle al BAA_n tonos puros que decaen en el tiempo (rampas) con pendientes conocidas y registrar el tiempo de reverberación calculado por el mismo en el rango de frecuencias de 100 Hz a 5 000 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 emitido por el parlante, resultando la pendiente de cada rampa proporcional al tiempo de reverberación.

Para la confección de las rampas se emplearon tonos puros en lugar de ruido rosa filtrado, de manera de tener señales más estables y poder garantizar la repetibilidad. 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 5 000 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 [10].

Para medir los TR_r de cada rampa y compararlos con los medidos por el BAA_n, 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. Para garantizar la trazabilidad de los tiempos medidos, se calibró la escala temporal del RTA con un osciloscopio tomando como criterio para efectuar una corrección que la diferencia entre los tiempos medidos con ambos instrumentos fuera mayor a la resolución del BAA_n 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.

El BAA_n 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 [11]. De esta manera no resulta necesario hacer una calibración de la base de tiempos del BAA_n, y basta con comparar los resultados obtenidos en el BAA_n con los medidos en el RTA.

Se generaron rampas con TR_r equiespaciados entre 1 s y 18 s a partir de un tono puro de 1 000 Hz, una frecuencia de común uso para la calibración de equipos acústicos. Se midieron sus tiempos de reverberación en el RTA y en el BAA_n, observándose un corrimiento cada vez mayor entre ambos valores medidos con el aumento del tiempo de reverberación. Resulta práctico visualizar al valor de corrección en función de TR_{BAA_n} en lugar de TR_{RTA} (Fig. 8).

En la Fig. 8 se muestra el ajuste lineal que permite corregir los resultados de tiempos de reverberación medidos con el BAA_n. Se observa que para todos los tiempos posibles de detectar por el equipo (entre 1 s y 20 s) existe un error

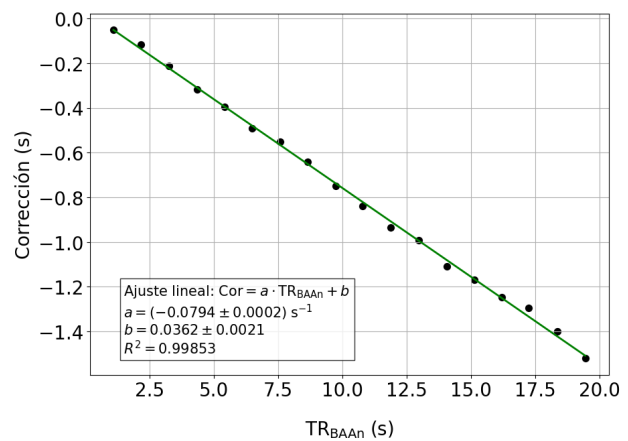


FIG. 8: corrección en función del tiempo de reverberación medido con el BAA_n. En verde, ajuste lineal por cuadrados mínimos ponderados.

sistemático, por lo que es necesario aplicar una corrección sobre las mediciones. En particular, 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).

Además, las incertidumbres estándar de la media asociadas a los puntos de la Fig. 8 (que son el promedio de 7 mediciones con el BAA_n), se encuentran en el orden de la resolución del BAA_n, entre 0,01 s y 0,03 s en todo el rango. De esta manera, para garantizar la cobertura de 100 Hz a 5 000 Hz, se determinó una incertidumbre asociada a la calibración del analizador para los tiempos de reverberación de $U_{TR} = 0,03$ s.

VI. Conclusiones

El estudio realizado sienta las bases para que el Laboratorio de Acústica y Vibraciones del INTI realice ensayos de absorción sonora utilizando el método de ruido interrumpido, lo cual resulta de interés ya que ayuda a la industria a caracterizar materiales acústicos.

El estudio sobre la difusividad del campo sonoro llevó a la incorporación de un mayor número de difusores que los inicialmente disponibles, adoptando una configuración final de 10 difusores planos de acrílico ($19,68 \text{ m}^2$ de superficie) y 3 esferas de EPS de alta densidad ($13,56 \text{ m}^2$), alcanzando una superficie total de difusión de $33,24 \text{ m}^2$. Con la configuración que contenía solo difusores planos, se registraron tiempos de reverberación significativamente más altos en comparación con los registrados con la configuración que también incluía las esferas de EPS.

Para analizar las fuentes de incertidumbre, el modelo fue reescrito en función de todas las variables medidas en la determinación de α_s . A partir de la variación de las posiciones de los vértices del volumen de la cámara modelada, empleando la clase “Delaunay” del módulo “scipy.spatial” de Python, se definió una incertidumbre asociada para el volumen de la cámara vacía V_1 en $U_{V_1} = 2,82 \text{ m}^3$.

Para la incertidumbre de calibración asociada al tiempo de reverberación, se realizó una calibración para el *Building Acoustics Analyzer* modelo 4417 utilizando tonos puros multiplicados por exponenciales decrecientes, regulando la pendiente de estas rampas para así variar el tiempo de

reverberación deseado. Se determinó una función de corrección en función del tiempo de reverberación medido junto con una incertidumbre asociada a la calibración del analizador de $U_{TR} = 0,03$ s para el rango de frecuencias de ensayo, de 100 Hz a 5 000 Hz.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue llevado a cabo en el marco de una beca de grado del sistema de becas INTI.

REFERENCIAS

- [1] T. M. L. Beranek. *Acoustics: Sound Fields and Transducers* ISBN: 9780123914217. <http://dx.doi.org/10.1016/C2011-0-05897-0> (Elsevier, 2012).
- [2] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). *IRAM 4065:2019 - Acústica - Medición de la absorción sonora en una cámara reverberante* 2019. <https://www.iram.org.ar/>.
- [3] M. Long. *Architectural Acoustics, Second Edition*. cap. 8. ISBN: 9780123982582 (Academic Press, 2014).
- [4] 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. <https://www.iram.org.ar/>.
- [5] Pauli Virtanen, Ralf Gommers et al. *SciPy: Open source scientific tools for Python* Último acceso: 06/10/2024. 2020. <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.spatial.Delaunay.html>.
- [6] E. Verbree. DELAUNAY TETRAHEDRALIZATIONS: HONOR DEGENERATED CASES. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **38** (2010). https://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/4-w15/Paper_ISPRS_Oral/12_3DGeoInfo2010_148_Verbree_Delaunay_Tetrahedralizations.pdf.
- [7] Dawson-Haggerty et al. *Trimesh* Último acceso: 06/10/2024. <https://trimesh.org/>.
- [8] H. G. Giuliano et al. The Reverberation Chamber at the Laboratorio de Acústica y Luminotecnia of the Comisión de Investigaciones Científicas. *Applied Acoustics* **49** (1996). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X9500054D>.
- [9] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP y OIML. *Guide to the expression of uncertainty in measurement - Part 1: Introduction* Joint Committee for Guides in Metrology, GUM-1:2023. https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_GUM-1.pdf/74e7aa56-2403-7037-f975-cd6b555b80e6?version=2.0&t=1706191395655&download=true.
- [10] P. Gulia y A. Gupta. en *Mathematics Applied to Engineering* (eds. Ram, M. y Paulo Davim, J.) 55-82 (Academic Press, 2017). ISBN: 978-0-12-810998-4. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012810998400003X>.
- [11] M. A. Lombardi. en *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook* cap. 18 (CRC Press, 2014).