

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Estudio y acondicionamiento de la cámara reverberante del IIE - UCLM”

TRABAJO FINAL DE MASTER

Autor/a:

JAIME VARGAS CALDERÓN

Tutor/a:

**FRANCISCO JAVIER REDONDO
PASTOR**

SAMUEL QUINTANA GÓMEZ

GANDIA, 2017

RESUMEN

El uso más común de las cámaras reverberantes es la obtención del coeficiente de absorción sonora de materiales, utilizados para acondicionar o aislar un recinto correctamente, en función de sus propiedades y uso. A su vez, son comúnmente utilizadas para obtener el nivel de potencia sonora de una fuente, como un altavoz o una máquina y para obtener la respuesta en frecuencia de transductores.

En el presente trabajo se aborda el estudio y la puesta en marcha de la cámara reverberante del recientemente construido Instituto de Investigación en la Edificación, perteneciente a la Universidad de Castilla-La Mancha y situado en Cuenca. Para ello, se ha hecho uso de la norma UNE-EN ISO 354:2004, Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante. (ISO 354:2003).

Por tanto, se podrá comprobar el estado acústico inicial de la cámara y las variaciones obtenidas en el coeficiente de absorción sonora de una muestra patrón en función de la cantidad de superficie de difusores instalados, necesarios para crear un campo sonoro lo más difuso posible y, por tanto, aumentar la aleatoriedad de los ángulos de incidencia.

Palabras clave: Cámara reverberante, coeficiente de absorción sonora, ISO 354, caracterización, acondicionamiento.

ABSTRACT

The most common use of reverberation chambers is the achievement of the sound absorption coefficient of different materials, which are used to improve the acoustic conditioning of buildings. These are also used to obtain the sound power level of any source and to measure transducers responses.

This project presents the study and startup of the newly IIEs reverberation chamber, which belongs to the University of Castilla-La Mancha and is located in Cuenca (Spain). For this purpose, UNE-EN ISO 354:2004, Acoustics. Measurement of sound absorption in a reverberation room has been used.

Therefore, it is possible to verify the initial acoustic state of the chamber and the variations obtained in the sound absorption coefficient as diffusers were installed to create a sound field as diffuse as possible and therefore, increase the arbitrariness of the incidence angles.

Keywords: Reverberation chamber, sound absorption coefficient, ISO 354, characterization, conditioning.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fin de máster quiero comenzar agradeciéndoselo al gran Samuel Quintana, amigo y profesor de la Escuela Politécnica de Cuenca, por la propuesta, por su entusiasmo y por no dudar en arremangarse y ponerse manos a la obra para ayudarme a alcanzar los objetivos fijados en cada una de las visitas que realicé a Cuenca. Nunca olvidaré las acrobacias que realizamos para colgar esos difusores... Sin ti, este trabajo no existiría.

Como no puede ser de otra manera, también quiero agradecer el apoyo recibido por mi familia y por Cristina, porque han sido mi motor un año más.

A todos los amigos que he hecho este curso, en especial a Anderson, Fabián, Josep, Manuel, Luis, Carlos y Jorge. ¡Sois grandes!

También deben ocupar una de estas líneas los profesores José Antonio Ballesteros y Pedro Huertas, por aportar conocimiento y ayudar cuando fue necesario.

A la empresa URSA Ibérica Aislantes, S.A. por facilitar los coeficientes de absorción de la muestra patrón.

Y al Instituto de Investigación en la Edificación por facilitarnos el trabajo haciendo frente al coste de la estructura metálica y paneles difusores.

ÍNDICE

RESUMEN	2
ABSTRACT	2
AGRADECIMIENTOS.....	2
1 CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	5
1.1 Objetivos	5
1.2 Normas de aplicación.....	6
1.3 Terminología	6
2 CAPÍTULO II: CONDICIONES INICIALES	10
2.1 La cámara reverberante	10
2.2 Restricciones UNE-EN ISO 354:2004.....	11
2.3 Desarrollo	12
2.4 Equipo de medida	13
2.4.1 Configuración del equipo de medida	14
2.4.2 Configuración de la medida	14
2.5 Puntos de medida	16
2.6 Estado acústico inicial de la cámara y selección de los puntos de medida.....	17
2.6.1 Nivel de presión sonora y ruido de fondo.....	17
2.6.2 Tiempo de reverberación – T20.....	20
2.6.3 Área de absorción sonora equivalente	21
2.7 Muestra absorbente	22
2.7.1 Coeficiente de absorción sonora de la muestra patrón - fabricante	24
2.8 Coeficiente de absorción sonora medido sin difusores.....	25
2.9 Estructura metálica	26
2.10 Difusores	27
3 CAPÍTULO III: RESULTADOS.....	29
3.1 Ensayo con 12m² de difusores – Tanda A.....	30
3.1.1 Área de absorción sonora equivalente – Tanda A	30

3.1.2	Coeficiente de absorción sonora – Tanda A.....	31
3.1.3	Desviación estándar T20 – Tanda A.....	32
3.2	Ensayo con 24m² de difusores – Tanda B	33
3.2.1	Área de absorción sonora equivalente – Tanda B	33
3.2.2	Coeficiente de absorción sonora – Tanda B.....	34
3.2.3	Desviación estándar T20 – Tanda B	35
3.3	Ensayo con 36 m² de difusores – TANDA C.....	36
3.3.1	Área de absorción sonora equivalente – Tanda C	36
3.3.2	Coeficiente de absorción sonora – Tanda C.....	37
3.3.3	Desviación estándar T20 – Tanda C	38
3.4	Coeficiente de absorción sonora práctico	39
3.4.1	α_p y α_w fabricante.....	39
3.4.2	α_p y α_w Sin difusores.....	39
3.4.3	α_p y α_w Tanda A.....	40
3.4.4	α_p y α_w Tanda B	40
3.4.5	α_p y α_w Tanda C	41
3.4.6	α_p de todos los ensayos	41
4	CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES	42
5	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	44
6	CAPÍTULO VI: BIBLIOGRAFÍA	46

1 CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETIVOS

El principal objetivo del presente trabajo es caracterizar, y por tanto adecuar, la nueva cámara reverberante del IIE del Campus de Cuenca (UCLM) y poder utilizarla, con garantías, bajo la norma UNE-EN ISO 354:2004. Por lo tanto, esta es la primera caracterización acústica de la cámara en su totalidad, lo que requiere un estudio profundo y metódico, ya que se pretende finalizar el trabajo cuando la difusividad en la cámara sea adecuada para poder utilizarla bajo normativa y hacer uso de ella tanto la comunidad universitaria como cualquier empresa externa que así lo desee.



Ilustración 1.1: Instituto de Investigación en la Edificación

Las cámaras reverberantes se suelen utilizar para medir absorción sonora de materiales u objetos, potencia sonora de fuentes y respuesta en frecuencia de micrófonos, no obstante, aparte de estos posibles ensayos, en esta cámara se incorpora la opción de medir aislamiento acústico de distintos elementos constructivos. En este trabajo, ha sido posible caracterizar la cámara para realizar mediciones de absorción debido al tiempo disponible y el emplazamiento de la misma, realizando para ello ensayos previos como punto de partida. Surgen por tanto líneas futuras de estudio respecto a las otras aplicaciones mencionadas.

A lo largo de esta memoria se podrán comprobar los resultados obtenidos en cada una de las fases del proyecto, así como las soluciones aportadas para mejorar la difusividad en la cámara reverberante.

1.2 NORMAS DE APLICACIÓN

La norma utilizada para estudiar y validar la cámara ha sido la **UNE-EN ISO 354:2004, Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante. (ISO 354:2003)**.

En esta norma se explica cómo medir y calcular la absorción acústica de diferentes elementos y cómo ir adecuando la cámara para obtener resultados fiables en las medidas que se realicen posteriores a su validación. A su vez indica ciertas condiciones geométricas y acústicas que debe cumplir la cámara, como son el volumen, longitud del mayor segmento de recta, área de absorción sonora máxima, condiciones ambientales, muestra absorbente y difusores. Todas estas condiciones y comprobaciones en la cámara reverberante bajo estudio se irán analizando progresivamente a lo largo de este trabajo.

La norma establece que las mediciones deben realizarse, como mínimo, en las bandas de tercio de octava comprendidas entre 100 Hz y 5000 Hz. Sin embargo, en este trabajo se mostrarán los resultados desde 50 Hz al disponer de una cámara de grandes dimensiones y, a priori, menor probabilidad de encontrar problemas de baja densidad modal y de un equipo de medida capaz de emitir y medir desde 50 Hz.

También se hará uso de la norma UNE-EN ISO 11654:1998, Acústica. Absorbentes acústicos para su utilización en edificios. Evaluación de la absorción acústica. (ISO 11654:1997). Con la utilización de esta norma, en cada ensayo, se podrán comparar los coeficientes de absorción sonora prácticos (α_p) y ponderados (α_w) de la muestra respecto a los valores ofrecidos por el fabricante. Para poder ofrecer un valor único de absorción de un material (α_w) es necesario disponer del coeficiente de absorción sonora en bandas de tercio de octava mediante la norma UNE-EN ISO 354:2004, para obtener posteriormente el coeficiente de absorción sonora práctico en bandas de octava, y mediante una curva de referencia desplazada, se puede obtener α_w . El proceso de obtención de dichos parámetros se puede estudiar en el siguiente apartado.

1.3 TERMINOLOGÍA

En este apartado se describen los diferentes términos utilizados en este trabajo para facilitar la comprensión del mismo, extraídos en gran parte de la norma UNE-EN ISO 354:2004.

- **Tiempo de reverberación, T:** Se define como el tiempo, en segundos, necesario para que el nivel de presión decaiga 60 dB con respecto al nivel de presión inicial, ya que, al interrumpir la señal utilizada, el nivel en un determinado punto no decaerá al instante, sino que lo hará progresivamente en función de lo reverberante que sea la sala.

El método de obtención de las curvas de caída empleado será señal de ruido interrumpida, en el cual se excita la sala con ruido de banda ancha y se obtiene la caída de nivel tras cesar la excitación. Para este trabajo se ha empleado ruido rosa y el número de caídas promediadas para una misma posición con el fin de reducir la incertidumbre de la medida causada por desviaciones estadísticas ha sido diez, así pues, se garantiza que la repetibilidad está equiparada con la repetibilidad que se obtendría con el método de la respuesta impulsiva integrada.

- **Nivel de presión sonora, SPL:** Se define como el nivel, en decibelios, que se genera en una posición determinada debido a las variaciones de presión.

La norma indica que, cuando se emplee ruido de banda ancha, en el espectro de ruido resultante en tiempo real, no deben existir diferencias de nivel de presión sonora entre bandas de tercio de octava adyacentes superiores a 6 dB.

- **Difusividad:** Se considera un campo acústico difuso cuando en cualquier posición del mismo se obtiene la misma intensidad sonora. Únicamente con fines de normalización, se considera que las ondas se distribuyen de manera uniforme por toda la cámara reverberante. Este hecho es muy complicado de conseguir en su totalidad, más aún cuando se inserta la muestra absorbente en la cámara, sin embargo, con el fin de obtener un campo más difuso, se emplean difusores para aumentar el número de reflexiones en distintos ángulos.
- **Área de absorción sonora equivalente de un recinto:** Área hipotética, en metros cuadrados, de una superficie totalmente absorbente sin efectos de difracción que, si fuera el único elemento absorbente en el recinto, tendría el mismo tiempo de reverberación que el recinto considerado.

- Para la cámara reverberante vacía, el término utilizado será A_1 [m²].

$$A_1 = \frac{55,3V}{cT_1} - 4Vm_1 \qquad m_1 = \frac{\alpha_1}{10 \log(e)}$$

(Ec. 1.1)

- Para la cámara reverberante con la muestra absorbente, el término utilizado será A_2 [m²].

$$A_2 = \frac{55,3V}{cT_2} - 4Vm_2 \qquad m_2 = \frac{\alpha_2}{10 \log(e)}$$

(Ec. 1.2)

donde:

- V es el volumen de la cámara, [m³];
 - c es la velocidad de propagación del sonido en el aire, [m/s];
 - T es el tiempo de reverberación, [s];
 - m es el coeficiente de atenuación sonora, en metros recíprocos (ISO 9613-1).
- **Área de absorción equivalente de la muestra de ensayo, A_T :** Se halla mediante la diferencia del área de absorción sonora equivalente de la cámara con la muestra y sin la muestra. En metros cuadrados:

$$A_T = A_2 - A_1 \text{ [m}^2\text{]} \quad (\text{Ec. 1.3})$$

Este término indica el área de absorción que ha aportado únicamente la muestra de ensayo, ya que, al obtenerlo mediante la diferencia de áreas, se anula el aporte de absorción sonora de la cámara vacía.

- **Área de la muestra de ensayo, S :** Metros cuadrados de superficie que ocupa la muestra.
- **Coefficiente de absorción sonora, α_s :** Cociente entre el área de absorción sonora equivalente de la muestra de ensayo (A_T) y el área de la muestra de ensayo (S). No tiene unidades.

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S} \quad (\text{Ec. 1.4})$$

- **Coefficiente de absorción sonora práctico, α_p :** Valor del coeficiente de absorción sonora calculado para bandas de octava. Se obtiene mediante el valor medio de los valores de α_s medidos en las bandas de un tercio de octava y redondeado a intervalos de 0,05.

$$\alpha_{pi} = \frac{\alpha_{i1} + \alpha_{i2} + \alpha_{i3}}{3} \quad (\text{Ec. 1.5})$$

Para $\alpha_{pi} > 1,00$, el valor se truncará a 1,00.

- **Coefficiente de absorción sonora ponderado, α_w :** Para la obtención del coeficiente de absorción sonora ponderado se hace uso del coeficiente de absorción sonora práctico y la siguiente curva de referencia:

Frecuencia (Hz)	250	500	1000	2000	4000
Curva ref.	0,80	1,00	1,00	1,00	0,90

Tabla 1.1: Curva de referencia para evaluar α_w según UNE-EN ISO 11654:1998.

Se traslada la curva de referencia en pasos de 0,05 hacia α_p , calculando a su vez la suma de las desviaciones desfavorables, hasta que esta suma sea menor o igual que 0,10.

El valor que se obtenga en la curva de referencia desplazada para 500 Hz será α_w .

Siempre que un coeficiente de absorción acústica práctico α_{pi} exceda el valor de la curva de referencia desplazada en un 0,25 o más, debe añadirse, entre paréntesis, al valor α_w uno o varios indicadores de forma. Si el exceso es en 250Hz, se utiliza la notación L. Si el exceso es en 500Hz o 1000Hz, se utiliza la M. Si el exceso es en 2000Hz o 4000Hz, utilizamos H.

A su vez, la norma UNE-EN ISO 11654:1998 permite clasificar los diferentes absorbentes en función de su coeficiente de absorción sonora ponderado, α_w . Dicha clasificación es comúnmente utilizada en edificación y permite obtener de manera simplificada una aproximación de la absorción de un material en concreto.

Clase de absorción acústica	α_w
A	0,90; 0,95; 1,00
B	0,80; 0,85
C	0,60; 0,65; 0,70; 0,75
D	0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55
E	0,25; 0,20; 0,15
Sin clasificar	0,10; 0,05; 0,00

Tabla 1.2: Clases de absorción acústica según UNE-EN ISO 11654:1998.

2 CAPÍTULO II: CONDICIONES INICIALES

2.1 LA CÁMARA REVERBERANTE

La cámara reverberante del Instituto de Investigación en Edificación de la Universidad de Castilla-La Mancha, inaugurado en mayo de 2017, tiene un volumen de 575,8 m³ y una superficie total de 470 m² aproximadamente. La superficie correspondiente al suelo es de 115 m² y la altura es de 5 metros.

En un primer momento, se partía de un recinto reverberante completamente vacío, dónde el suelo y techo conformaban dos superficies planas paralelas. Sin embargo, como se puede observar en el plano de la cámara, dispone de tres paredes verticales con forma de sierra para romper el paralelismo y obtener mayor aleatoriedad en la difusión de las ondas cuando éstas impacten en estas paredes.

Por otro lado, destacan las puertas de acceso a la cámara reverberante, pues deberían haberse instalado puertas completamente selladas, que aislasen la cámara de los posibles ruidos del exterior. A su vez, el gran volumen de la cámara supone un incremento en la absorción del aire para las altas frecuencias.

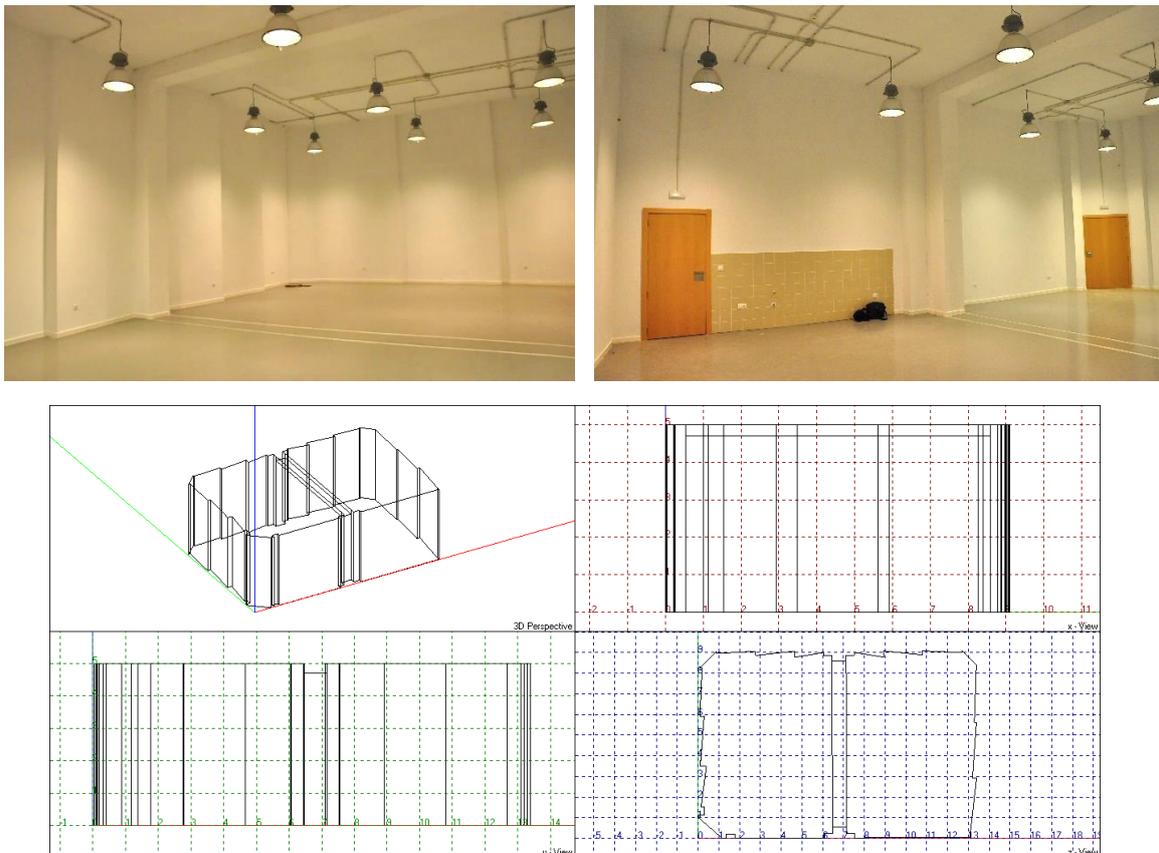


Ilustración 2.1: Fotografías y planos de la cámara reverberante.

2.2 RESTRICCIONES UNE-EN ISO 354:2004

La norma indica ciertas condiciones para poder realizar ensayos en las cámaras reverberantes, como un volumen mínimo de 150 m³. También advierte de la posibilidad de tener dificultades para medir el coeficiente de absorción en altas frecuencias para cámaras con un volumen superior a 500 m³, como es este caso, debido a la absorción del aire.

Asimismo, se indica que la longitud del mayor segmento inscrito en la cámara no sea superior a la siguiente relación:

$$I_{max} < 1.9 * V^{1/3}$$

(Ec. 2.1)

En este apartado se enumerarán de manera general las condiciones y restricciones que marca la norma respecto a la cámara reverberante y el procedimiento de medida. Los resultados de cada una de las restricciones se verán en sus apartados correspondientes para una mejor comprensión.

Parámetro	UNE-EN ISO 354:2004	Cámara IIE - Ensayos	¿Cumple?
Volumen	Al menos 150 m ³	575,8 m ³	Sí
Long. del mayor segmento	$I_{max} < 15,8 \text{ m}$	15,66 m	Sí
Rango de frecuencias	Mínimo de 100 Hz a 5000 Hz	De 50 Hz a 5000 Hz	Sí
Área máxima de absorción sonora equivalente [m²]	Hz	A1 [m²]	El cumplimiento de este apartado se detallará en el apartado de resultados, para cada una de las modificaciones llevadas a cabo.
	100	13,2	
	125	13,2	
	160	13,2	
	200	13,2	
	250	13,2	
	315	13,2	
	400	13,2	
	500	13,2	
	630	13,2	
	800	13,2	
	1000	14,2	
	1250	15,2	
	1600	16,2	
	2000	19,2	
2500	21,2		
3150	24,3		
4000	26,3		
5000	28,3		
Superficie de la muestra	Entre 10 y 24,3 m ²	12,15 m ²	Sí
Relación anchura/largo de la muestra	Entre 0,7 y 1	0,74	Sí

Parámetro	UNE-EN ISO 354:2004	Cámara IIE - Ensayos	¿Cumple?
Espesor de la muestra	Entre 5 y 10 cm	6 cm	Sí
Absorción de la muestra	$\alpha \geq 0,9$ de 500 a 4000 Hz	Apdo.: 2.7	Sí
Temperatura	Mayor de 15°C	Mínimo 18,1°C Máximo 18,4°C	Sí
Humedad	Entre 30% y 90%	Mínimo 62% Máximo 64,1%	Sí
Directividad de los micrófonos y fuente	Omnidireccional	Omnidireccional	Sí
Posición de los micrófonos	Mínimo: 1,5 m respecto cada posición 2 m respecto a la fuente 1 m respecto a cualquier superficie	Ninguna posición dista menos de las distancias límite	Sí
Curvas de caída medidas	Mínimo 12	16 <i>12 para el último ensayo</i>	Sí
Promediados de las mediciones	Mínimo 3	10	Sí
Masa por unidad de superficie de los difusores	Aproximadamente 5 kg/m ²	Aproximadamente 5,2 kg/m ²	Sí
Superficie de los difusores (una cara)	Entre 0,8 y 3 m ²	Entre 1 y 3 m ²	Sí

Tabla 2.1: Requisitos y cumplimiento de la norma.

2.3 DESARROLLO

El proceso de caracterización de una cámara reverberante conlleva un profundo estudio previo acerca de las actuaciones a llevar a cabo en el proceso de caracterización, así como la adecuación de la cámara para la suspensión de los paneles difusores, la selección de la muestra de ensayo y el uso del equipamiento adecuado para obtener resultados fiables y repetibles.

Al igual que la tabla anterior, se ha realizado un esquema con el proceso llevado a cabo para la caracterización completa de la cámara reverberante y poder así entender mejor los apartados posteriores.

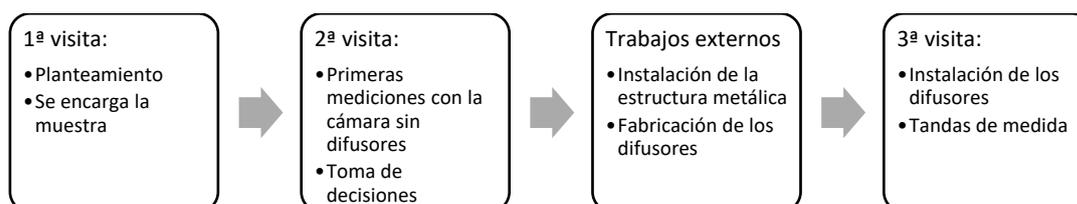


Ilustración 2.2: Proceso de desarrollo del proyecto.

2.4 EQUIPO DE MEDIDA

El equipo de medida utilizado está formado, mayormente, por equipos fabricados o desarrollados por Brüel & Kjær y consta de los siguientes elementos:

Cantidad	Descripción	Fabricante	Modelo	N.º de serie	
1	Unidad de adquisición de datos. 5 canales	Brüel & Kjær	3560-B-130	2652336	
1			3560-B-140	2639114	
5	Micrófonos ½" LEMO para 3560-B-130		4189-L-001	2626742 2626743 2626744 2626745 2626746	
5	Micrófonos ½" BNC para 3560-B-140		4189-A-021	2440033 2440034 2440035 2440036 2440037	
1	Calibrador		4231	2445758	
1	Fuente Omnipower (50 Hz – 5000 Hz)		4292 L	2466001	
1	Amplificador		2716C	407-013	
1	Sonda de temperatura y humedad relativa		Testo	400	00980065/406
1	Software Pulse		Brüel & Kjær	15.1	
1	Ordenador		Dell	Latitude E6410	
1	Router	Linksys	WET54G		
10	Cables de micrófono (5 LEMO-LEMO y 5 BNC-BNC)	Sin determinar			
1	Cable BNC (Sincronismo front-ends)				
1	Cable de red RJ-45				
1	Cable jack - speakon				
10	Trípodes				

Tabla 2.2: Equipo de medida.

2.4.1 Configuración del equipo de medida

Al disponer de equipamiento de última generación y un mismo fabricante, la conectividad entre los diferentes elementos hardware y software se hizo, una vez estudiado y practicado, más amigable, debido a la versatilidad que ofrecen las unidades de adquisición de datos, ya que permiten configurar, controlar y visualizar las medidas mediante wifi o cable de red, con 5 canales por cada uno de ellos.

Para entender de una manera sencilla cómo se realizó el conexionado de los equipos, se ha realizado el esquema gráfico de la ilustración 2.3:

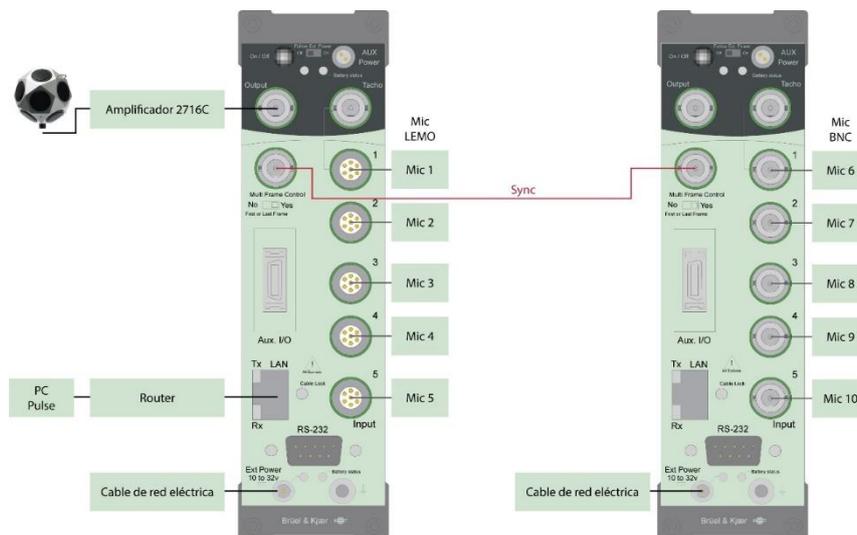


Ilustración 2.3: Conexionado de los equipos

Durante la batería de medidas, todos los equipos, salvo el ordenador, se encontraron dentro de la cámara reverberante. Las mediciones fueron configuradas y supervisadas desde la sala de control contigua a la cámara.

2.4.2 Configuración de la medida

Para la medición del nivel de presión sonora se utilizaron los 10 canales simultáneamente, realizándose grabaciones de 30 segundos una vez alcanzado el nivel estacionario, para ello, se insertó un retardo en el comienzo de la medida de 5 segundos, evitando así la captación del ataque.

En el caso del tiempo de reverberación, una vez definidas las posiciones finales, las mediciones se hicieron con 8 canales simultáneamente. Para medir el tiempo de reverberación correctamente, antes de interrumpir la señal, debe existir la condición de campo estacionario en la cámara. La norma indica que el tiempo de excitación debe ser, al menos, la mitad del tiempo de reverberación esperado. Por tanto, la duración de la excitación fue de 10 segundos, dejando posteriormente 20 segundos para almacenar la curva de caída correctamente una vez apagada la fuente.

Como ya se ha comentado, la norma UNE-EN ISO 354:2004 establece que se debe medir en las bandas de tercio de octava de las frecuencias comprendidas entre 100 Hz y 5000 Hz. En este trabajo se ha establecido como frecuencia mínima 50 Hz, y como frecuencia máxima 5000 Hz para representar los datos.

En la siguiente imagen se puede ver la interfaz de la plantilla utilizada y la configuración de la medida para el nivel de presión sonora:

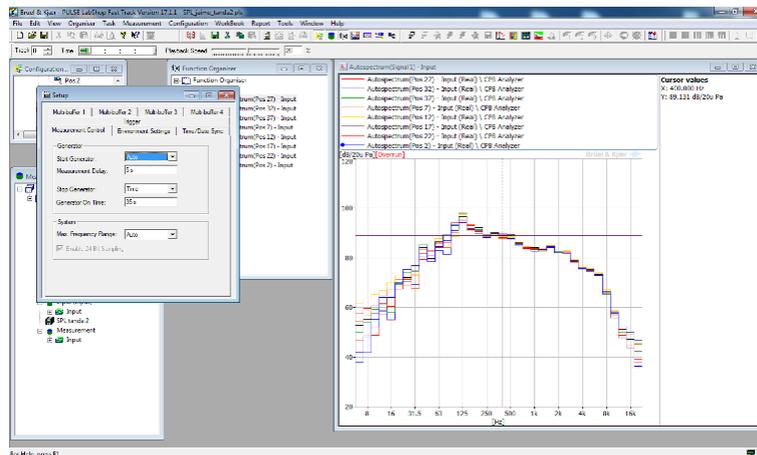


Ilustración 2.4: Plantilla de medida para el nivel de presión sonora

2.4.2.1 Calibración

Antes de realizar cada una de las baterías de medidas, se comprobaron las calibraciones de los micrófonos. Para realizar este proceso y que el software ajuste la sensibilidad, se debe acceder al submenú *Calibration* de Pulse, en él aparecen cada uno de los micrófonos que la unidad de adquisición de datos está reconociendo, en amarillo, el cual indica que el sistema está listo para que se inserte el calibrador. Si la lectura es satisfactoria, la ventana cambiará a color verde.

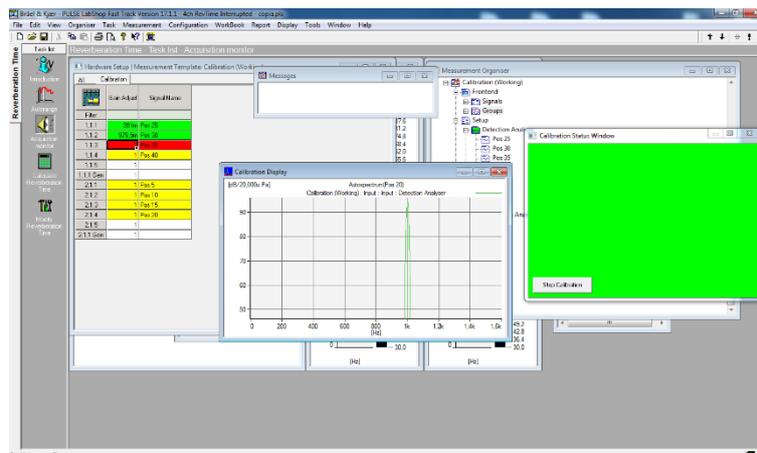


Ilustración 2.5: Proceso de calibración

2.5 PUNTOS DE MEDIDA

El suelo de la cámara reverberante se dividió en una malla con 40 puntos equidistantes entre sí. Estos puntos cumplen con la distancia mínima de 1,5m entre posiciones de micrófono que marca la norma. Con ello, se garantiza estudiar la cámara en su totalidad para poder elegir los puntos de medida más homogéneos entre sí y respecto a las dos posiciones de fuente. Para ello, se realizaron 160 medidas de nivel de presión sonora y 160 medidas de tiempo de reverberación. A su vez, se midió el ruido de fondo en diez posiciones repartidas por la cámara.

Los puntos 5 y 40 no cumplen con la distancia mínima de 2 metros respecto a la fuente, como indica la norma, por lo que no fueron tomados en cuenta para la realización de los cálculos.

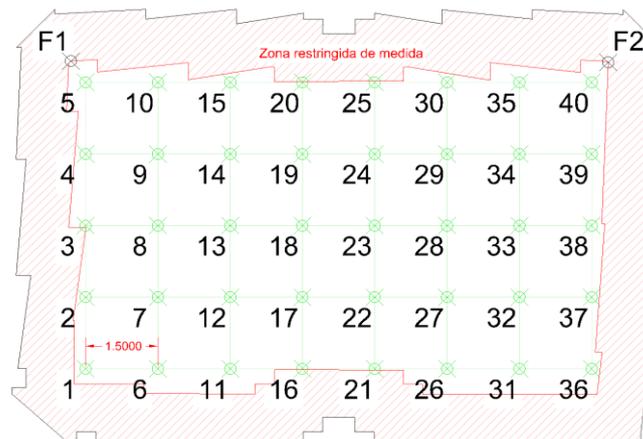


Ilustración 2.6: Puntos de medida definidos.

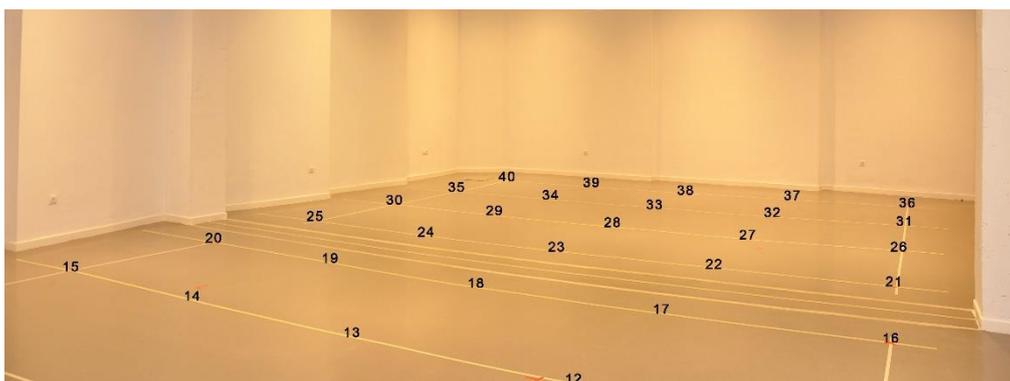


Ilustración 2.7: División de puntos en la cámara reverberante.

La zona restringida, marcada en rojo en el plano anterior, indica el área de la cámara donde, según la norma, no se debe medir, puesto que la distancia hasta la pared de la cámara, delimitada con el contorno negro, es menor a 1 metro.

2.6 ESTADO ACÚSTICO INICIAL DE LA CÁMARA Y SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MEDIDA

Determinar los puntos óptimos de medida en una cámara con estas dimensiones conlleva realizar múltiples ensayos y sus análisis. La norma UNE-EN ISO 354:2004 establece la obtención del coeficiente de absorción sonora como único indicador del grado de mejora en la difusividad de la cámara. Sin embargo, respecto al método para seleccionar los puntos de medida para comenzar a caracterizar la cámara, únicamente indica que la diferencia en el nivel de presión sonora entre bandas adyacentes no debe ser superior a 6 dB. Por tanto, se realizaron medidas de nivel de presión sonora, ruido de fondo y tiempo de reverberación con la cámara vacía (sin difusores) a fin de determinar los puntos de medida para los ensayos posteriores.

2.6.1 Nivel de presión sonora y ruido de fondo

En primer lugar, se midió nivel de presión sonora con la cámara completamente vacía, sin difusores ni muestra, para las dos posiciones de fuente (F1 y F2, ambas a 1,8 metros de altura) y dos alturas de micrófono (1,2m y 1,5m). Esto dio como resultado un total de 160 mediciones:

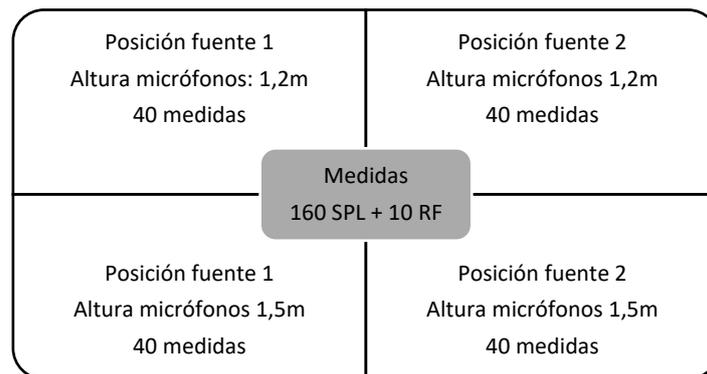


Ilustración 2.8: Medidas de nivel de presión sonora.

En la gráfica 2.1, se puede comparar el nivel de presión sonora promedio, obtenido a través del nivel recibido en las distintas configuraciones de fuente y altura. También se representa el ruido de fondo existente en la cámara reverberante. Como se puede observar, el ruido de fondo es lo suficientemente bajo como para generar las curvas de caída en el cálculo del tiempo de reverberación correctamente, ya que al final de la caída, el nivel siempre era superior a 10 dB respecto al ruido de fondo como indica la norma. Cabe destacar que las mediciones posteriores se realizaron con las luces apagadas, a fin de reducir el ruido generado por los transformadores de los focos.

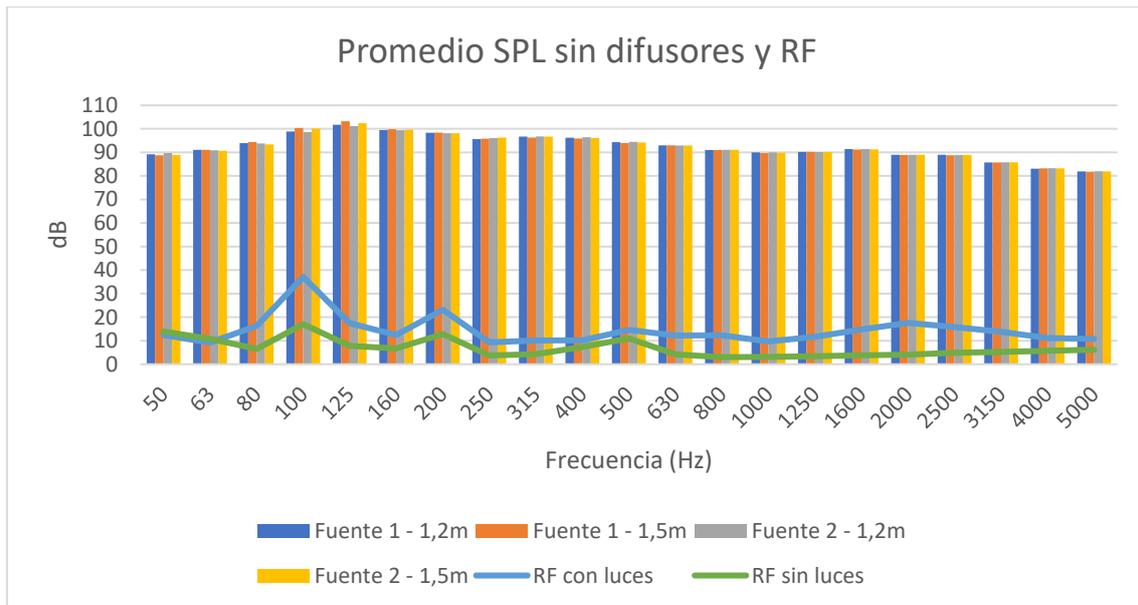


Gráfico 2.1: Nivel de presión sonora promedio y ruido de fondo.

Se observa, por tanto, que la variación de la altura no produce cambios significativos en la respuesta obtenida, por lo que se obvió utilizar dos alturas, siendo 1,5m la altura fijada para el resto de ensayos realizados debido a su menor desviación en baja frecuencia. También se comprobó que la posición de fuente que presenta menor desviación es la posición 2, denominada como F2.

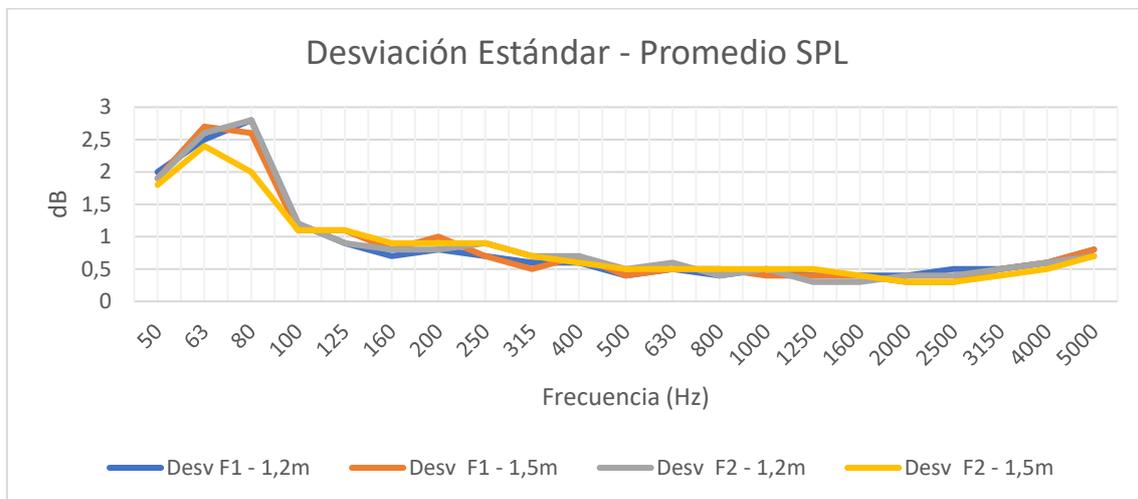


Gráfico 2.2: Desviación estándar del ruido de fondo.

A su vez, también se comprobó que las diferencias entre bandas de tercio de octava no superaban los 6 dB cuando se estaban realizando las mediciones, pues el sistema de adquisición de datos permite su visualización en tiempo real.

Tras este primer estudio se midieron los tiempos de reverberación en todas las posiciones, con la cámara vacía, sin difusores ni muestra, dando como resultado 160 nuevas mediciones. Con ello, se obtienen dos fuentes de información para seleccionar los puntos más homogéneos.

El nivel de presión sonora global se utilizó para filtrar las posiciones más similares con una única posición de fuente. Tras obtener las posiciones más similares entre sí, se volvieron a filtrar, pero comparando ahora entre las diferentes posiciones de fuente. Por tanto, se disponían de diferentes puntos de medida con un nivel global muy similar entre ellos y entre distintas configuraciones de fuente. Para seleccionar de entre todos ellos los puntos a continuar estudiando, se hizo uso del tiempo de reverberación medido en esas posiciones, descartando los puntos que presentaban mayor desviación. Los puntos más homogéneos obtenidos, para ambas configuraciones, fueron los siguientes:

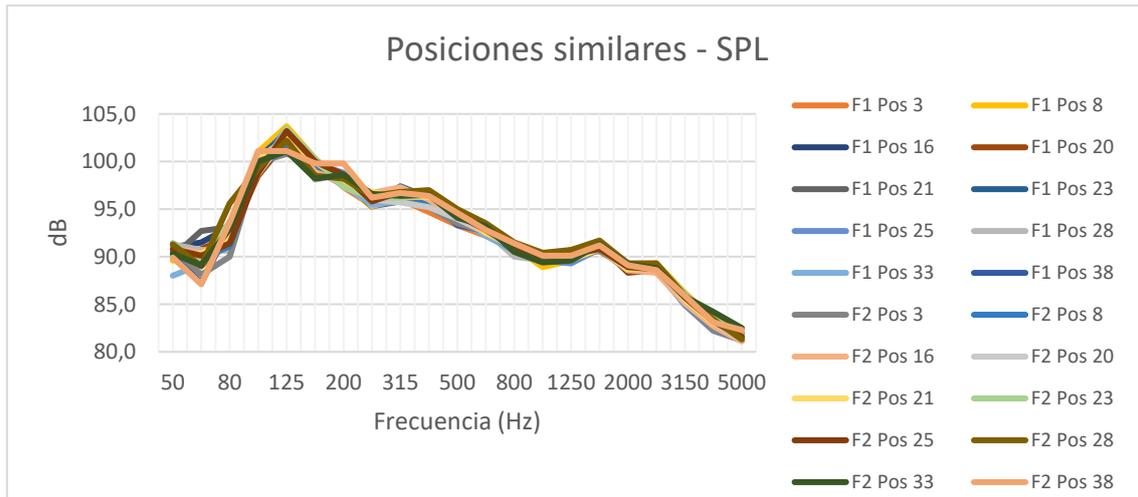


Gráfico 2.3: Posiciones con SPL similar.

Sin embargo, se decidió filtrar una vez más las posiciones obtenidas, seleccionando así 8 posiciones (2 más de las 6 mínimas que indica la norma). Este proceso se realizó analizando la desviación estándar que presentaban los niveles para las distintas frecuencias, siendo la banda de tercio de octava de 50 Hz la que mayor desviación presentaba. Por ello, se filtraron las posiciones utilizando dicha banda, ya que es el peor caso.



Gráfico 2.4: Desviación estándar de las posiciones similares.

Las posiciones que se utilizaron finalmente para realizar las baterías de medida y completar el trabajo fueron las posiciones 3, 8, 16, 20, 21, 25, 33 y 38, ya que presentaron menor desviación y por tanto eran más similares entre sí. Se dispone así de 2 posiciones de medida extras respecto a las 6 mínimas que indica la norma. Como se puede comprobar, las posiciones obtenidas son casualmente simétricas entre sí, y permiten la colocación de la muestra en el centro de la cámara sin interferir en las distancias mínimas que indica la norma respecto a la muestra.

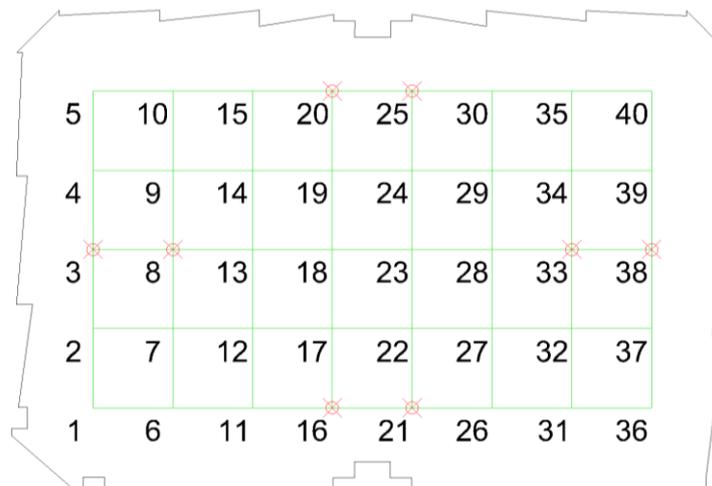


Ilustración 2.9: Posiciones de medida finales.

Para el resto de ensayos se medirá únicamente tiempo de reverberación, pues para las diferentes tandas de difusores, el nivel de presión sonora únicamente aportará información útil si se mide nuevamente en los 38 puntos de medida, pudiendo ver así si las posiciones seleccionadas inicialmente continúan siendo las más óptimas. Como ya se ha comentado, la comprobación de la mejora en la difusión del sonido en la cámara se realizará mediante el coeficiente de absorción sonora, como indica la norma, quedando como futura línea de investigación determinar las posiciones de medida más óptimas cuando la cámara se encuentre en su estado final.

2.6.2 Tiempo de reverberación – T20.

Para la obtención del tiempo de reverberación por el método de señal interrumpida, la norma establece que, como mínimo, se deben promediar 3 caídas de nivel en cada posición de micrófono.

Sin embargo, **el número de caídas promediadas han sido diez**, consiguiendo así reducir la incertidumbre de la medida causada por desviaciones estadísticas.

La norma también señala que, con los diez promediados, la repetibilidad con este método está en el rango de la repetibilidad del método de la respuesta impulsiva integrada.

Los tiempos de reverberación promedio obtenidos y necesarios para la obtención del área de absorción sonora equivalente de la cámara y su comparación con el área de absorción sonora máxima que marca la norma, se muestran a continuación:

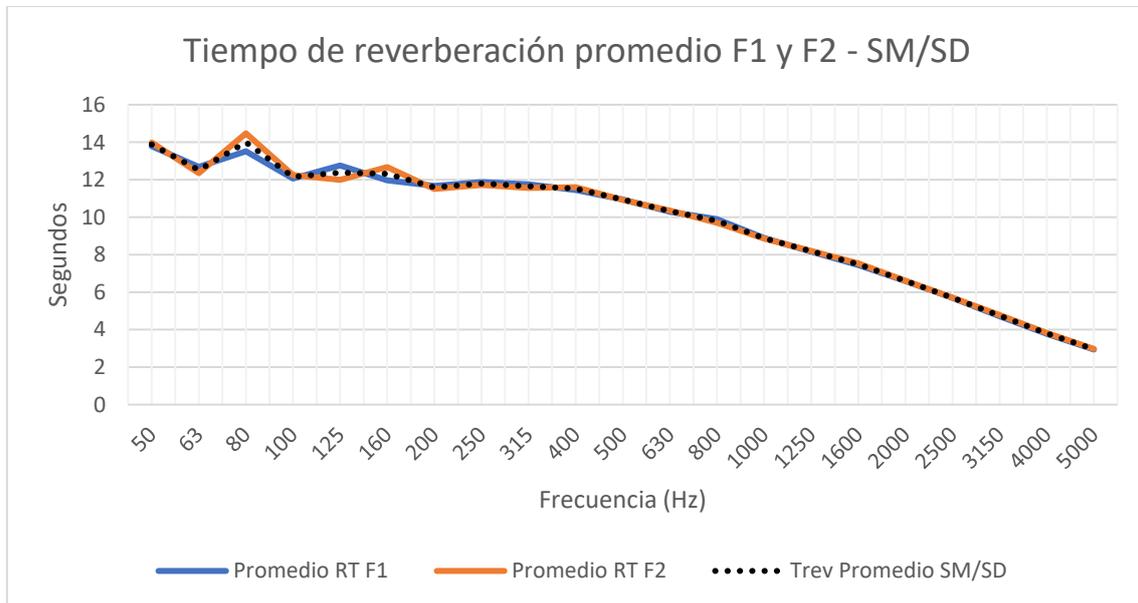


Gráfico 2.5: Tiempos de reverberación sin muestra ni difusores.

2.6.3 Área de absorción sonora equivalente

La norma indica restricciones respecto al área de absorción sonora máxima de la cámara vacía, que es el valor máximo que puede tomar el área de absorción sonora equivalente (Ec. 1). Este hecho debe cumplirse cuando la cámara está vacía (sin muestra) pero con todos los difusores con los que se tiene un funcionamiento óptimo. Por tanto, el área de absorción sonora equivalente se mostrará en cada uno de los procesos de instalación de difusores para comprobar si dicha actuación incrementa la absorción de la cámara de manera que incumpliese la norma.

Cabe comentar que los valores del área absorción sonora máxima vienen expresados para las bandas de tercio de octava de 100 Hz a 5000 Hz.

Los valores que no se deben superar vienen determinados por el volumen de la cámara, multiplicando los valores de la Tabla 1 del punto 6.1.4 de la norma por la siguiente relación $\left(\frac{V}{200m^3}\right)^{\frac{2}{3}}$. Estos valores, para las condiciones de volumen de la cámara bajo estudio, han sido representados mediante la línea negra en la gráfica 2.6:

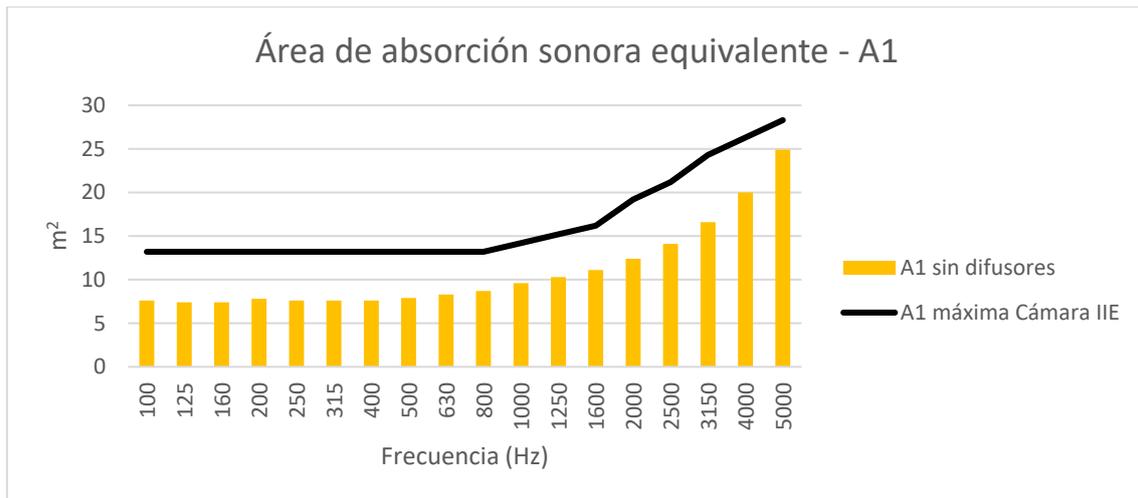


Gráfico 2.6: Cumplimiento del valor máximo de A1 para el ensayo sin difusores.

Después de este primer análisis del estado inicial de la cámara reverberante en cuanto al área de absorción sonora equivalente respecto a la absorción máxima, se puede concluir que se cumplen las restricciones que marca la norma en todas las bandas de frecuencia, lo que indica que la cámara reverberante, en su estado inicial y sin muestra, no aporta un grado de absorción alto.

Los valores numéricos en forma de tabla del área de absorción sonora equivalente para todos los ensayos realizados se pueden comprobar en la hoja de cálculo del Anexo I.

2.7 MUESTRA ABSORBENTE

Los ensayos realizados se han llevado a cabo con absorbentes planos, por lo tanto, según la norma, la muestra debe cumplir una serie de condiciones en cuanto a tamaño y absorción.

Se indica que la muestra a elegir debe tener como mínimo un área de 10 m² y 24,3 m². A su vez, tiene que ser de forma rectangular y cumplir la relación anchura/largo entre 0,7 y 1.

En el anexo A de la norma UNE-EN ISO 354:2004 se menciona que, para la comprobación de la difusividad, la muestra de ensayo adecuada tendrá un espesor de 5 a 10 cm, y el material absorbente será poroso y homogéneo, con un coeficiente de absorción sonora mayor de 0,9 en el rango de frecuencias de 500 a 4000 Hz.

La colocación de la muestra absorbente debe cumplir uno de los montajes expuestos en el Anexo B. En este trabajo se ha utilizado el montaje tipo A, con la muestra colocada sobre la superficie del suelo. El perímetro de la muestra fue sellado con un marco de madera de densidad media para evitar la absorción producida por los bordes. Este marco, según la norma, debe tener, como mínimo, 12,5 mm de espesor. El marco utilizado fue de 19 mm y de la misma altura que la muestra, cumpliendo así con la norma, como se puede ver en la ilustración 2.11.

La muestra de ensayo seleccionada, URSA TERRA 65, está compuesta de lana mineral y tiene un espesor de 65 mm. Cada panel que conforma la muestra tiene unas dimensiones de 0,6 m de ancho y 1,35 m de largo.



Ilustración 2.10: Panel Ursa Terra 65

Los paneles se colocaron de manera que la relación anchura/largo fuese superior a 0,7. Esto se consiguió colocando 15 paneles, 3 columnas de 5 paneles en horizontal.



Ilustración 2.11: Colocación de la muestra absorbente y marco perimetral.

Por tanto, el área de la muestra absorbente utilizada son 12,15 m².

Nótese que la colocación de la muestra no es paralela a la única pared plana de la cámara, como indica la norma, por lo que está ligeramente girada.

2.7.1 Coeficiente de absorción sonora de la muestra patrón - fabricante

Como se ha comentado en el apartado anterior, el coeficiente de absorción sonora en las bandas de frecuencia comprendidas entre 500 y 4000 Hz debe ser mayor de 0,9. Por tanto, se cumplen los criterios de absorción, como se puede ver a continuación:

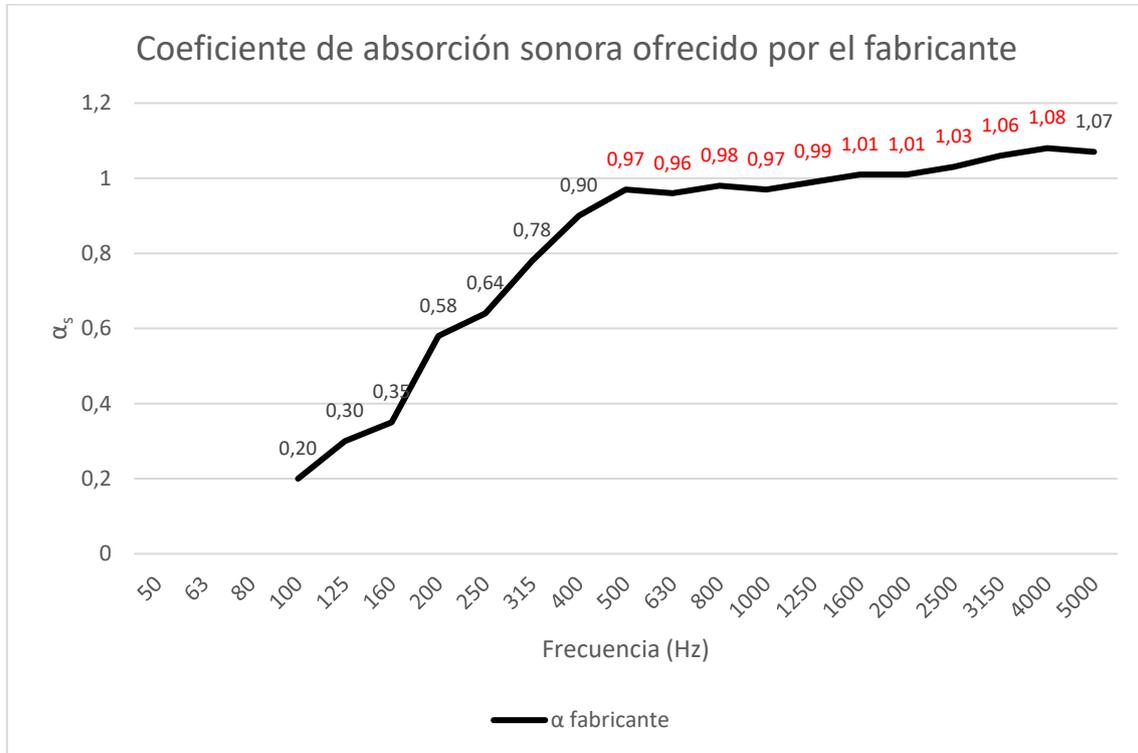


Gráfico 2.7: Coeficiente de absorción sonora de la muestra – fabricante.

Los valores ofrecidos por el fabricante han sido obtenidos empleando la misma norma que aplica en este trabajo el día 5 de febrero de 2016, mediante la empresa Applus, acreditada para realizar dichos ensayos por ENAC. Dicho ensayo se puede encontrar en el Anexo 2.

2.8 COEFICIENTE DE ABSORCIÓN SONORA MEDIDO SIN DIFUSORES

En esta primera caracterización se estudió el coeficiente de absorción sonora de la muestra antes de instalar la estructura metálica en la cámara y por tanto sin difusores. De esta manera, se puede observar si realmente es necesaria la instalación de difusores y, en su caso, cuanto difiere, por debajo, el coeficiente de absorción de la muestra medido respecto al ofrecido por el fabricante.

Condiciones climatológicas durante los ensayos:

	Sin muestra	Con muestra
Temperatura (°C)	18.1°C	18.1°C
Humedad relativa (%)	63.8%	64.1%
Presión atmosférica (mb)	920	920

Tabla 2.3: Condiciones climatológicas – Ensayo sin difusores.

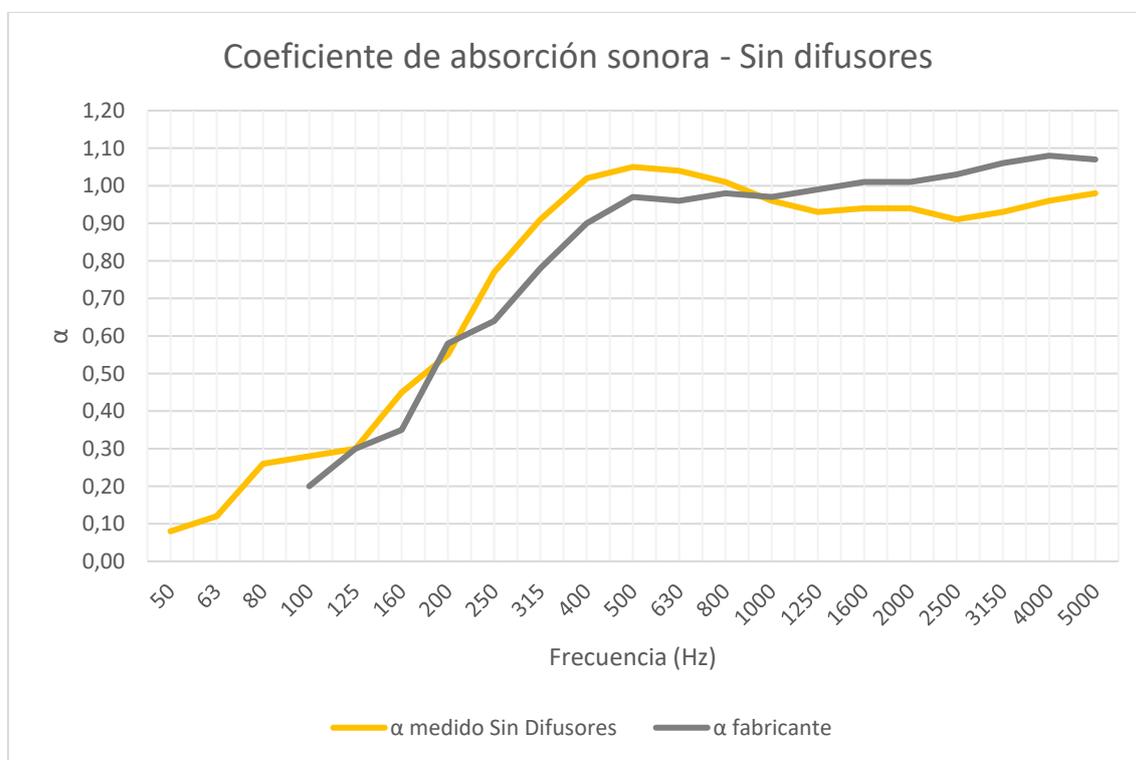


Gráfico 2.8: Coeficiente de absorción sonora medido sin difusores vs. fabricante.

Frecuencia (Hz)	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500
α medido Sin Difusores	0,08	0,12	0,26	0,28	0,30	0,45	0,55	0,77	0,91	1,02	1,05
α fabricante	Sin datos			0,20	0,30	0,35	0,58	0,64	0,78	0,9	0,97
Frecuencia (Hz)	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	
α medido Sin Difusores	1,04	1,01	0,96	0,93	0,94	0,94	0,91	0,93	0,96	0,98	
α fabricante	0,96	0,98	0,97	0,99	1,01	1,01	1,03	1,06	1,08	1,07	

Tabla 2.4: Coeficiente de absorción sonora medido sin difusores vs. fabricante.

Analizando los resultados, se puede ver cómo se obtiene un coeficiente de absorción sonora superior al ofrecido por el fabricante hasta 1000 Hz. Esto indica que la cámara funciona bien para frecuencias por debajo de 1000 Hz antes de la instalación de los difusores. Sin embargo, para las frecuencias superiores se obtiene un coeficiente de absorción sonora ligeramente inferior al ofrecido por el fabricante.

Por tanto, con la finalidad de crear un campo sonoro más difuso, se solicitó la instalación de la estructura metálica al igual que la fabricación de los difusores para su posterior instalación.

2.9 ESTRUCTURA METÁLICA

Para poder suspender los difusores del techo fue solicitada la instalación de una estructura metálica simétrica, formada por tubos metálicos y uniones en forma de T y de esquina. La estructura montada cumple con la norma UNE-EN 10255:2005. Su montaje e instalación se pueden ver a continuación:



Ilustración 2.12: Montaje y detalles de la estructura metálica.

De esta forma, se dispone de la infraestructura necesaria para poder instalar paneles difusores suspendidos del techo, rompiendo así con el paralelismo existente entre el suelo y techo y creando, con los difusores, mayor difusión sonora al impactar las ondas en diferentes superficies colocadas aleatoriamente y curvadas. A su vez, la estructura permitirá colgar diferentes elementos para su caracterización cuando así sea necesario.

2.10 DIFUSORES

Aumentar el grado de difusión en las cámaras reverberantes es algo imprescindible pero limitado, ya que aumentar el número de difusores no conlleva a un aumento en la difusión cuando ya se ha insertado cierto porcentaje de difusores. Por ello, se instalaron en tandas de 12 m² (una cara) para, posteriormente, estudiar cómo había afectado la inserción de dichos difusores a la difusión del sonido y a la absorción de la cámara.

En el Anexo A de la norma se recomienda el uso de difusores formados por láminas de baja absorción acústica y con una masa por unidad de superficie de aproximadamente 5kg/m². A su vez, la superficie debe ser de 0,8 m² como mínimo y 3 m² como máximo, recomendando el empleo de difusores de diferentes tamaños.

Los difusores, cortados y curvados por mi progenitor, fueron de 1 m², 2 m² y 3 m² (una cara), con el fin de aportar mayor homogeneidad en la difusión para las diferentes frecuencias. Los paneles de 1 m² pesan aproximadamente 5 kg, por lo que se ajusta a la recomendación de la norma.

Los difusores empleados son de madera de densidad media (MDF) de 6,6 mm de grosor. En un gran número de cámaras reverberantes se utilizan difusores de madera laminada (plywood), sin embargo, al ser un material más poroso, se consideró más adecuado utilizar madera de densidad media con ambas caras chapadas para cerrar sus poros. Igualmente, se suelen emplear difusores hechos de metacrilato ya que presentan menor absorción y para grosores pequeños permiten ser flexionados, sin embargo, el coste es mucho mayor, por lo que fueron descartados. Para la segura instalación de los difusores se hizo uso del siguiente equipamiento y material:

Cantidad	Descripción
1	Andamio
1	Estructura metálica
20 instalados 25 fabricados	Paneles difusores
100	Cáncamos
200	Tuercas
200	Arandelas
1	Taladro
1	Corta cables
Sin determinar	Bridas
Sin determinar	Cable de acero

Tabla 2.5: Equipo y material utilizado para la instalación de los difusores.

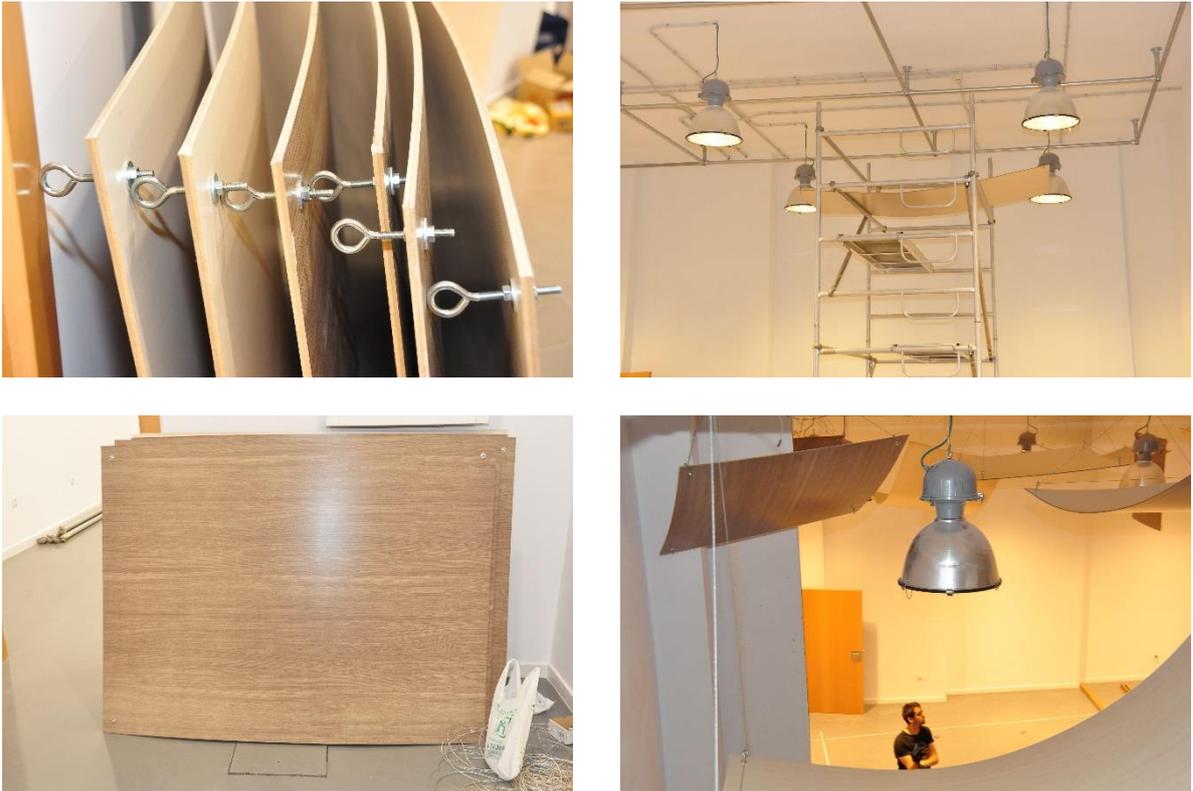


Ilustración 2.13: Difusores e instalación.

3 CAPÍTULO III: RESULTADOS

Como ya se ha mencionado anteriormente, se parte de un estado inicial de la cámara reverberante que cumple con la norma en todas las restricciones. A su vez, la selección de la muestra que se utilizará en los ensayos y los difusores empleados también cumplen con lo establecido en la norma.

En este apartado se podrá comprobar el área de absorción sonora equivalente, el coeficiente de absorción sonora y la desviación estándar del tiempo de reverberación para cada uno de los ensayos realizados. Con la comparativa del coeficiente de absorción sonora obtenido y la desviación en los tiempos de reverberación para los diferentes ensayos se podrán observar los cambios en la difusión de la cámara reverberante a medida que se insertan las tandas de difusores. La norma UNE-EN ISO 354:2004 establece únicamente la medición del coeficiente de absorción sonora con diferentes tandas de difusores para comprobar la variación del mismo, hasta la superficie de difusores en que no se produzca más variación. Sin embargo, en numerosos estudios se aplica la desviación estándar de los tiempos de reverberación medidos, a fin de poder comparar cada una de las ejecuciones desde un punto de vista diferente al coeficiente de absorción sonora. Las desviaciones han sido obtenidas para los ensayos realizados sin muestra.

Para altas frecuencias, se obtienen valores superiores a 1. Este hecho ocurre debido a que se presupone una difusión del sonido de igual probabilidad en todas las direcciones. Sin embargo, cuando las ondas inciden sobre la muestra, la mayor parte de esa energía no se refleja, creándose un efecto de difracción en los bordes de la muestra debido a la discontinuidad. Este efecto conlleva la ampliación, desde el punto de vista acústico, del área de la muestra y, por tanto, del área absorbente para algunas frecuencias.

También se podrán comparar los coeficientes de absorción sonora prácticos de los diferentes ensayos con el ofrecido por el fabricante (α_p – UNE-EN ISO 11654:1998. Acústica. Absorbentes acústicos para su utilización en edificios. Evaluación de la absorción acústica. (ISO 11654:1997)). Este coeficiente de absorción sonora práctico se obtiene para bandas de octava mediante un promedio aritmético de los coeficientes de absorción sonora obtenidos en las bandas de tercio de octava, redondeado con una precisión de 0,05 como se ha explicado en el apartado 1.3 Terminología de esta memoria.

3.1 ENSAYO CON 12M² DE DIFUSORES – TANDA A

Los primeros difusores que se instalaron fueron los de mayor superficie (3 m² – una cara), con el fin de comprobar si existe una mejor distribución de la energía mediante el coeficiente de absorción sonora con 4 difusores únicamente. Este ensayo también dará información acerca de cuanto ha variado el área de absorción sonora equivalente de la cámara respecto al ensayo sin difusores. Estas variaciones darán una idea de los posibles cambios que pueden suceder en los posteriores ensayos, donde la superficie de difusores instalados ha sido la misma. Por tanto, se instalaron un total de 12 m² de difusores, denominados Tanda A.



Ilustración 3.1: Primeros difusores instalados, de 3 m² cada uno.

	Sin muestra	Con muestra
Temperatura (°C)	18°C	18.4°C
Humedad relativa (%)	64,1%	62,4%
Presión atmosférica (mb)	950	950

Tabla 3.1: Condiciones climatológicas – Tanda A.

3.1.1 Área de absorción sonora equivalente – Tanda A

Una vez realizadas las mediciones de tiempo de reverberación sin muestra y con los difusores instalados, se estudia el área de absorción sonora equivalente, con el fin de comprobar si la instalación de los 12 m² de difusores ha implicado el incumplimiento de la norma en cuanto a los valores límite de área de absorción sonora máxima se refiere:

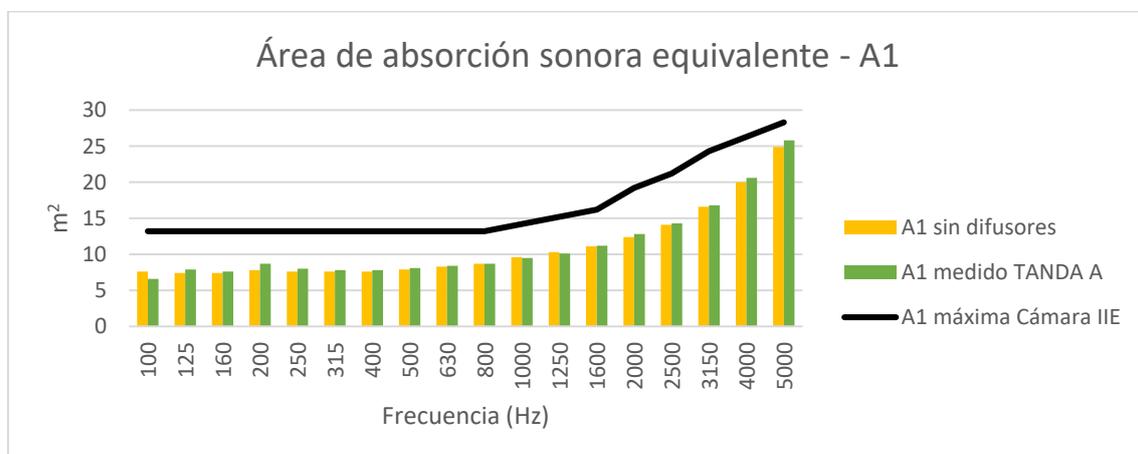


Gráfico 3.1: Cumplimiento del valor máximo de A1 para la Tanda A.

Como se puede observar en la gráfica, se continúa cumpliendo con los límites establecidos para todas las frecuencias. Sin embargo, el área de absorción sonora equivalente ha aumentado ligeramente respecto al estado inicial de la cámara, cuando se encontraba sin difusores, como era de esperar.

3.1.2 Coeficiente de absorción sonora – Tanda A

En lo que se refiere al coeficiente de absorción sonora, en este primer ensayo con difusores, cabe destacar la ligera mejora en los resultados obtenidos respecto al ensayo anterior, pues, salvo para la frecuencia de 160 Hz, se obtiene un coeficiente de absorción de la muestra más alto respecto al ensayo sin difusores. No obstante, en las bandas comprendidas entre 1600 Hz y 5000 Hz, el coeficiente de absorción sonora es aun inferior al ofrecido por el fabricante. Respecto al valor obtenido en la banda de tercio de octava de 160 Hz, cabe comentar que puede ser debido a la variación del comportamiento modal de la cámara, causada en las posiciones de medida por la instalación de esta primera tanda en dicha frecuencia.

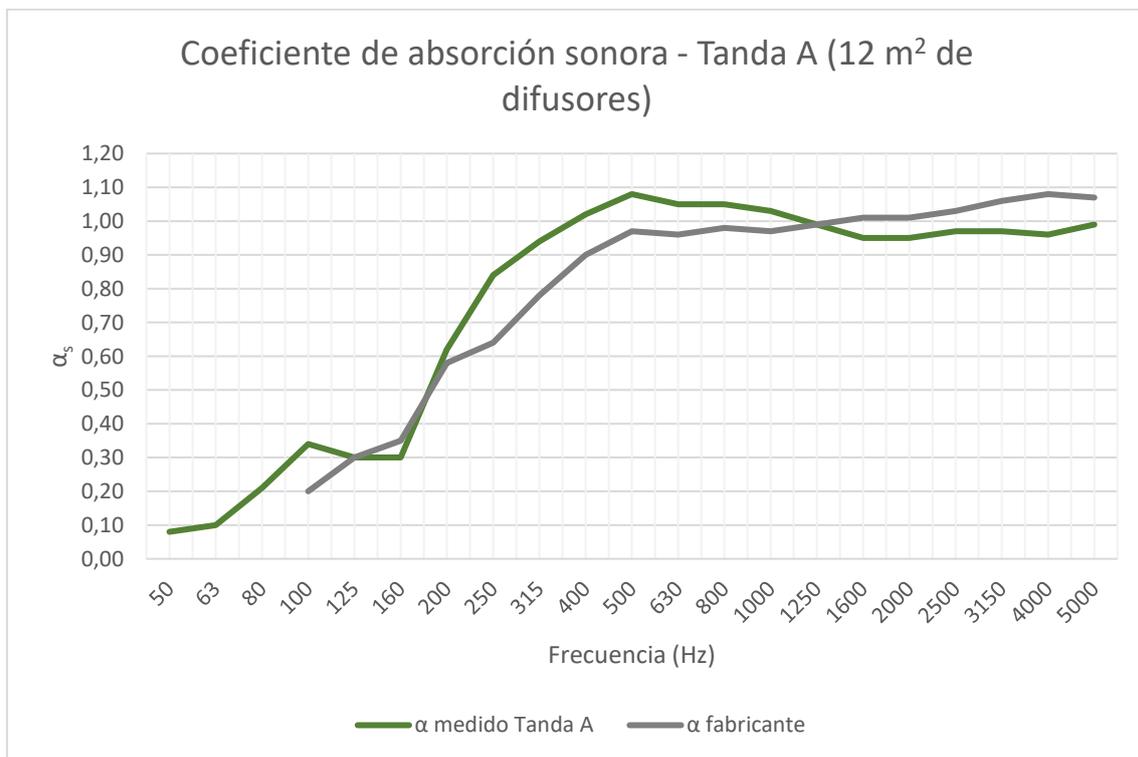


Gráfico 3.2: Coeficiente de absorción sonora medido - Tanda A vs. fabricante.

Frecuencia (Hz)	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500
α medido Tanda A	0,08	0,10	0,21	0,34	0,30	0,30	0,62	0,84	0,94	1,02	1,08
α fabricante	Sin datos			0,20	0,30	0,35	0,58	0,64	0,78	0,9	0,97

Frecuencia (Hz)	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
α medido Tanda A	1,05	1,05	1,03	0,99	0,95	0,95	0,97	0,97	0,96	0,99
α fabricante	0,96	0,98	0,97	0,99	1,01	1,01	1,03	1,06	1,08	1,07

Tabla 3.2: Coeficiente de absorción sonora medido - Tanda A vs. fabricante.

3.1.3 Desviación estándar T20 – Tanda A

Como se puede ver en la gráfica, para esta primera tanda de difusores instalados, se obtiene una desviación estándar en los tiempos de reverberación ligeramente superior respecto al estado inicial de la cámara en algunas frecuencias. Estas variaciones son mínimas, sin embargo, indican que, en las posiciones de medida seleccionadas, para la tanda A y estas frecuencias donde la desviación es mayor, el campo es menos homogéneo respecto al caso anterior. A su vez, cabe comentar que en todos los ensayos acústicos existen límites respecto a la repetibilidad de las medidas, por lo que también puede haber influido en los resultados. Las líneas discontinuas marcan la tendencia de la desviación respecto a la frecuencia, eligiendo la línea de tendencia logarítmica al obtener variaciones en baja frecuencia y valores estables en alta frecuencia.

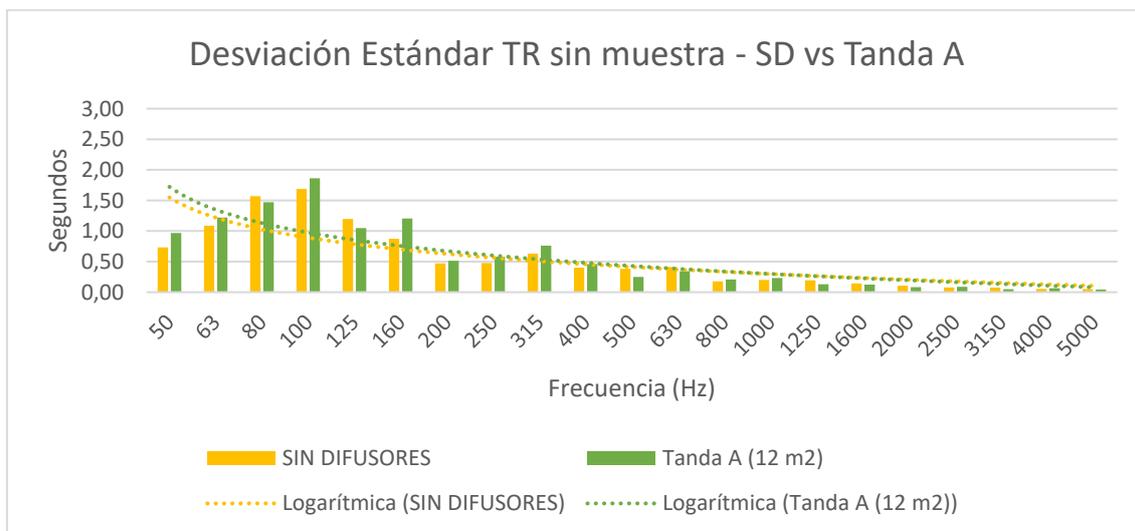


Gráfico 3.3: Desviación estándar TR sin muestra – SD vs Tanda A.

3.2 ENSAYO CON 24M² DE DIFUSORES – TANDA B

Con el fin de aumentar el coeficiente de absorción en las bandas comprendidas entre 1600 Hz y 5000 Hz se instalaron otros 12 m² de difusores (una cara), esta vez compuestos por piezas de 2 m² (una cara), por lo que se instalaron 6 difusores. Por tanto, la superficie total de difusores instalados en la cámara en este ensayo son 24 m² a una cara.



Ilustración 3.2: Difusores de 3 m² y 2 m² instalados.

Condiciones climatológicas durante los ensayos:

	Sin muestra	Con muestra
Temperatura (°C)	18.2°C	18.2°C
Humedad relativa (%)	63,7%	63.2%
Presión atmosférica (mb)	945	945

Tabla 3.3: Condiciones climatológicas – Tanda B.

3.2.1 Área de absorción sonora equivalente – Tanda B

Al igual que en el caso anterior, se estudia la variación del área de absorción sonora equivalente, que se puede ver a continuación:

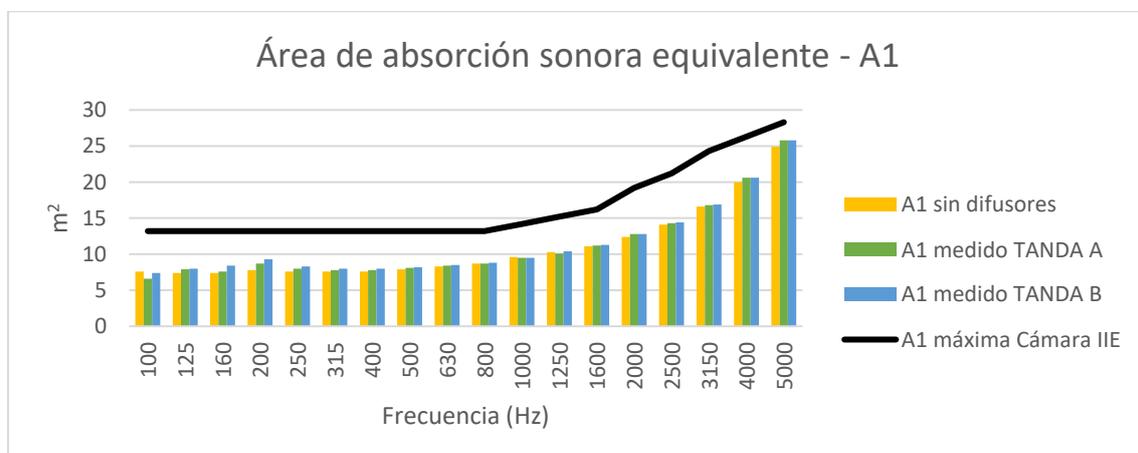


Gráfico 3.4: Cumplimiento del valor máximo de A1 para las tandas A y B.

Como se puede comprobar, los resultados son muy similares al ensayo anterior, obteniendo las mayores variaciones en baja y media frecuencia. A su vez, se vuelve a cumplir con los valores límite.

3.2.2 Coeficiente de absorción sonora – Tanda B

En este penúltimo ensayo, con 24 m² de difusores, se puede comprobar cómo se obtienen valores muy cercanos al fabricante en alta frecuencia. Se ha aumentado de nuevo el coeficiente de absorción sonora respecto al caso anterior, sin embargo, la absorción del aire está afectando a la obtención de un coeficiente de absorción sonora igual o mayor en las bandas de 1250 Hz a 5000 Hz, ya que la muestra se midió por el fabricante en una cámara de 200m³, donde la absorción del aire tiene menor peso que en la cámara a caracterizar. A su vez, se obtiene un valor inferior en la banda de frecuencia de 125 Hz, al igual que en el caso anterior, donde dicha variación estaba en 160 Hz. Estas variaciones pueden ser nuevamente debidas a un problema de modos propios que va desplazándose en frecuencia a medida que se crea un campo acústico más difuso. Como línea de investigación futura, podría ser interesante realizar mediciones mediante un método de excitación diferente, como puede ser empleando señales MLS, barridos o impulsos, a fin de minimizar los efectos que pueden ocasionar los modos propios sobre el resultado.

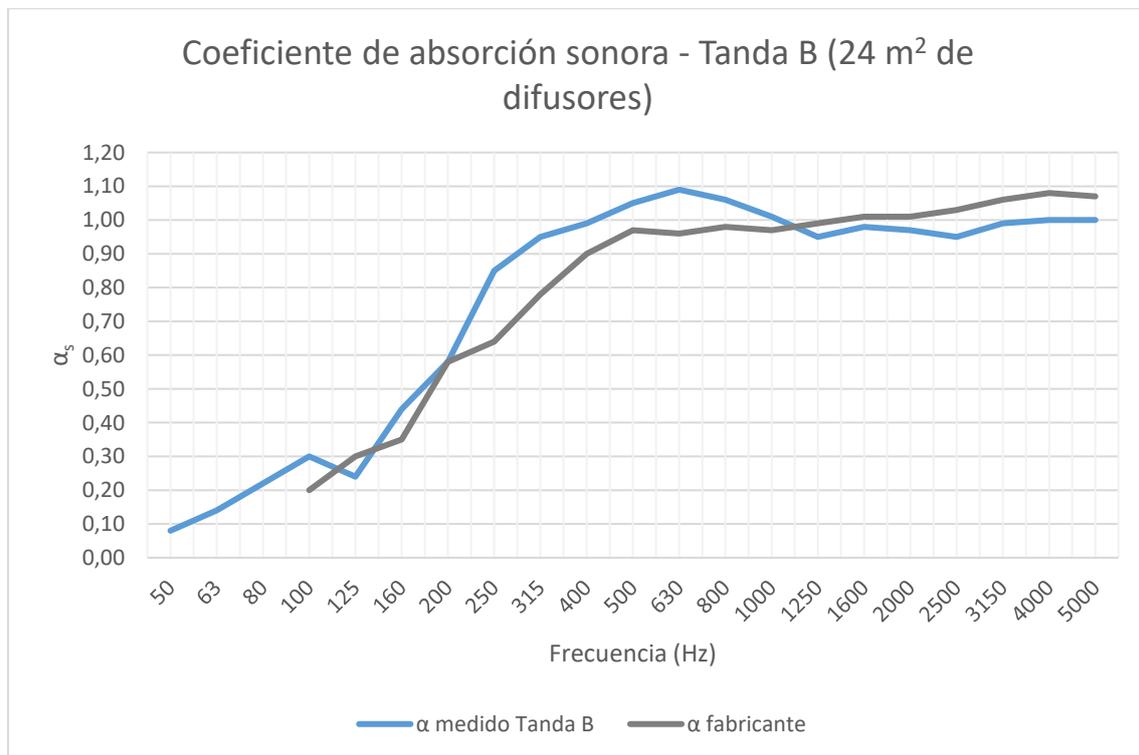


Gráfico 3.5: Coeficiente de absorción sonora medido - Tanda B vs. fabricante.

Frecuencia (Hz)	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500
α medido Tanda B	0,08	0,14	0,22	0,30	0,24	0,44	0,58	0,85	0,95	0,99	1,05
α fabricante	Sin datos			0,20	0,30	0,35	0,58	0,64	0,78	0,9	0,97

Frecuencia (Hz)	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
α medido Tanda B	1,09	1,06	1,01	0,95	0,98	0,97	0,95	0,99	1,00	1,00
α fabricante	0,96	0,98	0,97	0,99	1,01	1,01	1,03	1,06	1,08	1,07

Tabla 3.4: Coeficiente de absorción sonora medido - Tanda B vs. fabricante.

A título personal, los resultados obtenidos podrían darse por válidos en dichas frecuencias, pues la variación es mínima y los resultados son cercanos a la unidad. Sin embargo, con el fin de continuar mejorando la cámara, afinando en estos detalles, se decidió instalar la última tanda de difusores.

3.2.3 Desviación estándar T20 – Tanda B

En este caso, se observa cómo ha disminuido la desviación estándar de los tiempos de reverberación medidos en la tanda B respecto a la cámara sin difusores y en la tanda A. Sin embargo, destaca el valor obtenido en 125 Hz, donde se obtiene mayor desviación que en la tanda A. Por tanto, en el siguiente ensayo se comprobará si estas diferencias obtenidas en un primer momento en 160 Hz y en este nuevo ensayo en 125 Hz desaparecen, se desplazan o se acentúan aún más.

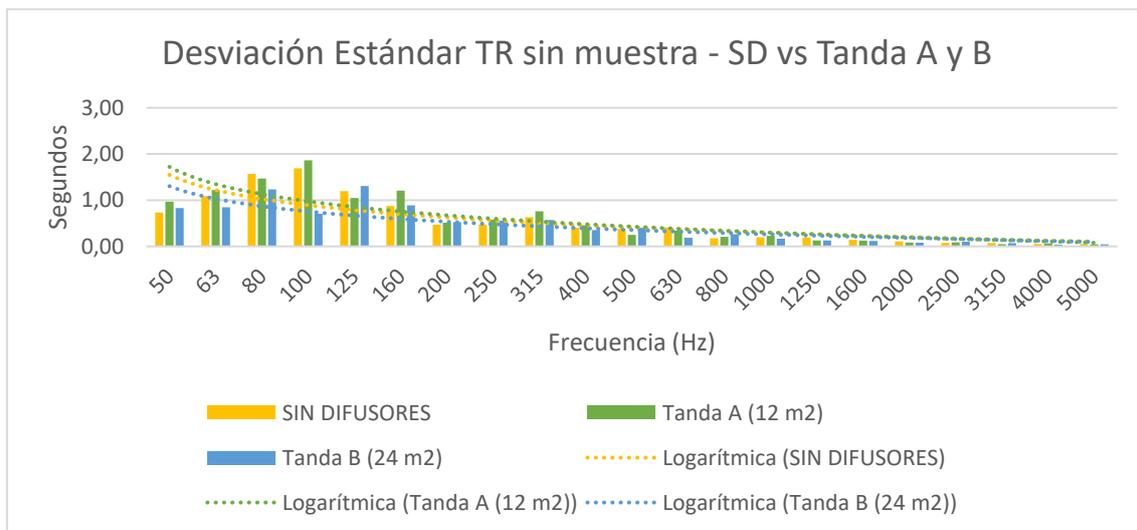


Gráfico 3.6: Desviación estándar TR sin muestra – SD vs Tanda A y B.

3.3 ENSAYO CON 36 M² DE DIFUSORES – TANDA C

En este último ensayo se instalaron nuevamente 12 m² de difusores (una cara), compuestos por 12 piezas de 1 m². El área total de difusores instalados en la cámara fue, por tanto, 36 m² (una cara), compuestos por piezas de 3 m², 2 m² y 1 m².



Ilustración 3.3: Difusores de la cámara reverberante del IIE.

Condiciones climatológicas durante los ensayos:

	Sin muestra	Con muestra
Temperatura (°C)	18.3°C	18.3°C
Humedad relativa (%)	62%	63.1%
Presión atmosférica (mb)	940	940

Tabla 3.5: Condiciones climatológicas – Tanda C.

3.3.1 Área de absorción sonora equivalente – Tanda C

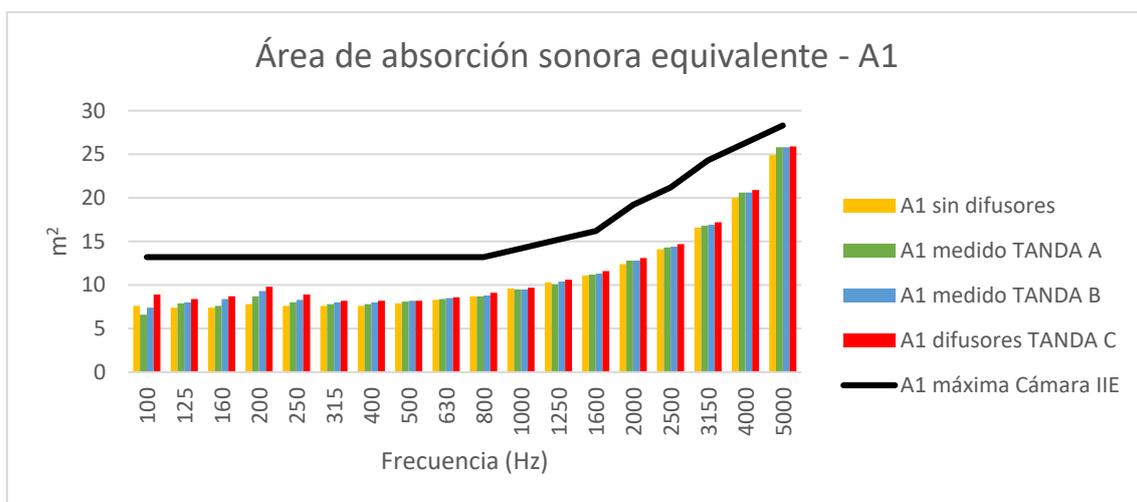


Gráfico 3.7: Cumplimiento del valor máximo de A1 para las tandas A, B y C.

En este último caso, el área de absorción sonora equivalente ha aumentado muy ligeramente respecto al caso anterior. Igualmente se cumple con los valores límites para

todas las frecuencias, por lo que se puede determinar que el estado final de la cámara reverberante, en términos de área de absorción sonora equivalente respecto al área de absorción sonora máxima, cumple holgadamente con la norma.

3.3.2 Coeficiente de absorción sonora – Tanda C

Por último, se observa que el coeficiente de absorción ha aumentado respecto al caso anterior en las bandas de tercio de octava comprendidas entre 1600 Hz y 5000 Hz. Este aumento hace que el coeficiente de absorción sonora sea cercano o superior a la unidad y difiere muy ligeramente del coeficiente ofrecido por el fabricante. Esta diferencia no indica que la cámara del IIE no pueda medir bien a estas frecuencias, pues la reproducibilidad en este tipo de ensayos está aún bajo estudio.

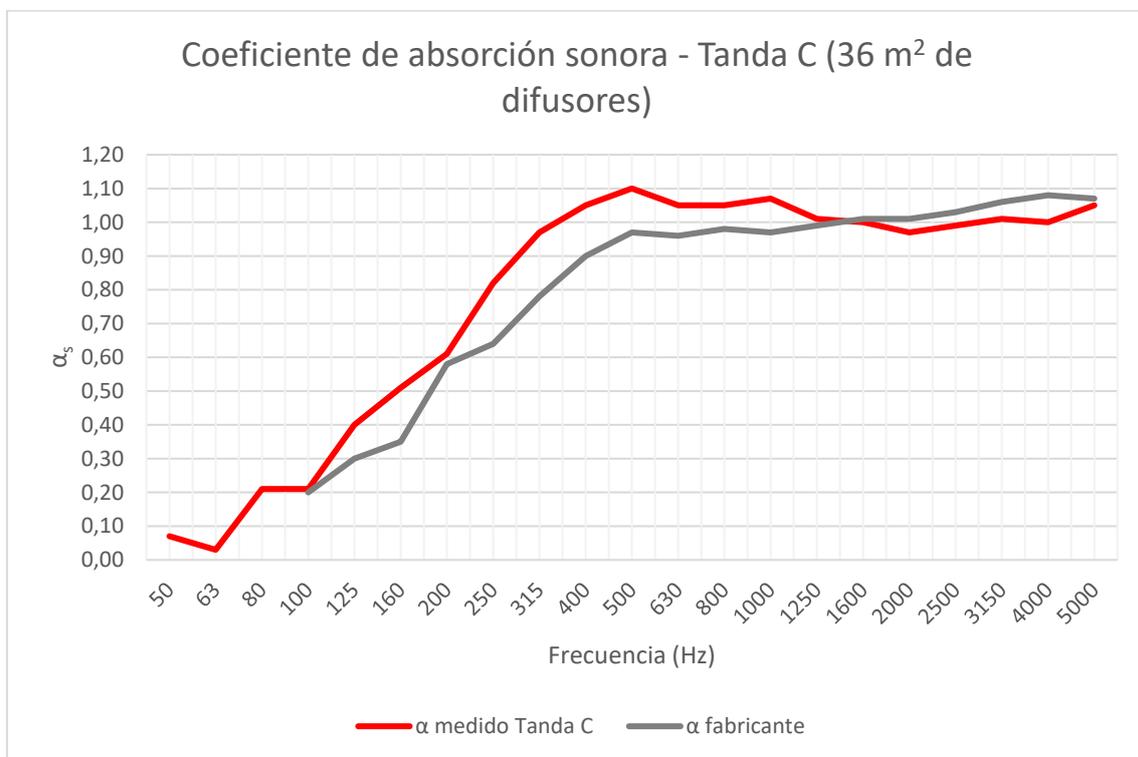


Gráfico 3.8: Coeficiente de absorción sonora medido - Tanda C vs. fabricante.

Frecuencia (Hz)	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500
α medido Tanda C	0,07	0,03	0,21	0,21	0,40	0,51	0,61	0,82	0,97	1,05	1,1
α fabricante	Sin datos			0,20	0,30	0,35	0,58	0,64	0,78	0,9	0,97

Frecuencia (Hz)	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
α medido Tanda C	1,05	1,05	1,07	1,01	1,00	0,97	0,99	1,01	1,00	1,05
α fabricante	0,96	0,98	0,97	0,99	1,01	1,01	1,03	1,06	1,08	1,07

Tabla 3.6: Coeficiente de absorción sonora medido - Tanda C vs. fabricante.

3.3.3 Desviación estándar T20 – Tanda C

Respecto a la desviación estándar de este último ensayo, se observa cómo ha vuelto a disminuir respecto a los casos anteriores. Sin embargo, tanto en el coeficiente de absorción sonora como en la desviación estándar obtenida para la banda de 100 Hz, se comprueba un cambio significativo con respecto el caso anterior. Esto hace pensar que existía un problema de modos propios en la banda de frecuencia de 160 Hz, que se ha ido desplazando hacia frecuencias menores a medida que se instalaban nuevas tandas de difusores.

Cabe comentar que se obtuvieron valores de tiempo de reverberación con mayor desviación para las posiciones 38 y 21, por lo que, al disponer de 2 puntos extra respecto a los mínimos que indica la norma, no fueron tenidos en cuenta para este análisis. Este hecho será comentado en las conclusiones del trabajo.

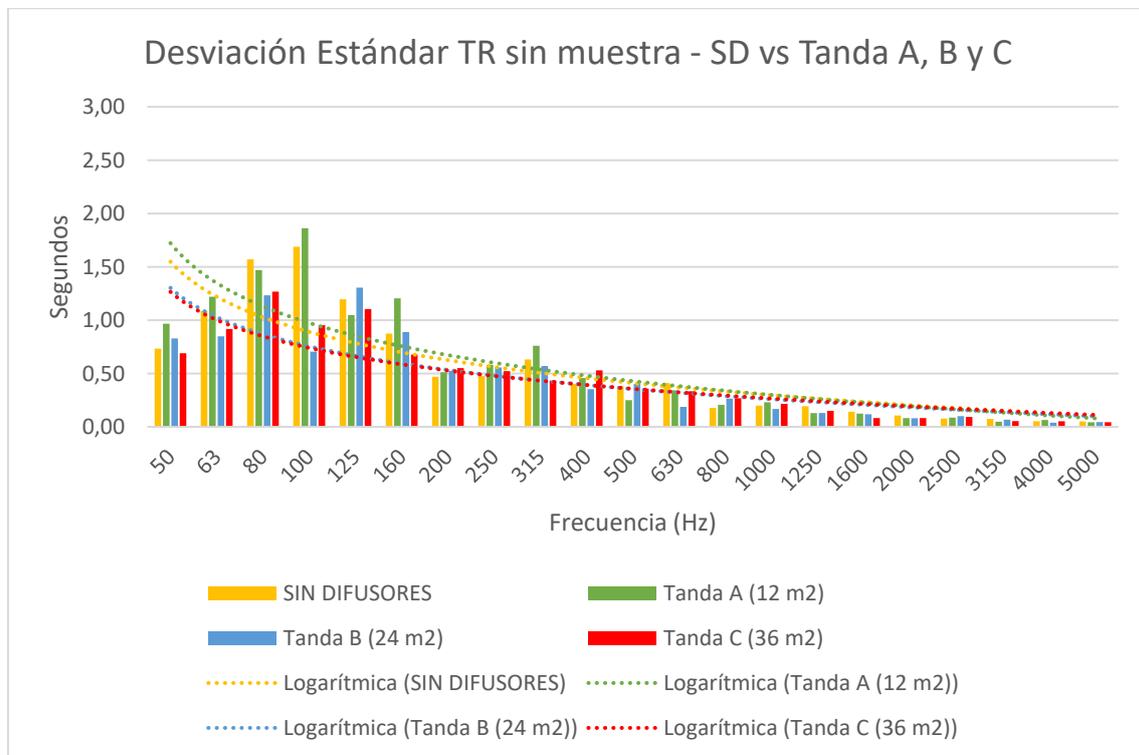


Gráfico 3.9: Desviación estándar TR sin muestra – SD vs Tanda A, B y C.

3.4 COEFICIENTE DE ABSORCIÓN SONORA PRÁCTICO

A efectos prácticos, para la utilización de estos materiales con fines absorbentes como pueden ser aislantes acústicos en la construcción o acondicionamiento de recintos, se emplea el coeficiente de absorción sonora práctico (α_p) y ponderado (α_w), así como su clasificación según la norma UNE-EN ISO 11654:1998.

3.4.1 α_p y α_w fabricante

En la hoja técnica ofrecida por el fabricante se indica el coeficiente de absorción sonora práctico y ponderado. Como se puede ver en la gráfica, $\alpha_w = 0,95$, por lo que se incluye dentro de la clase de absorbentes de tipo A.

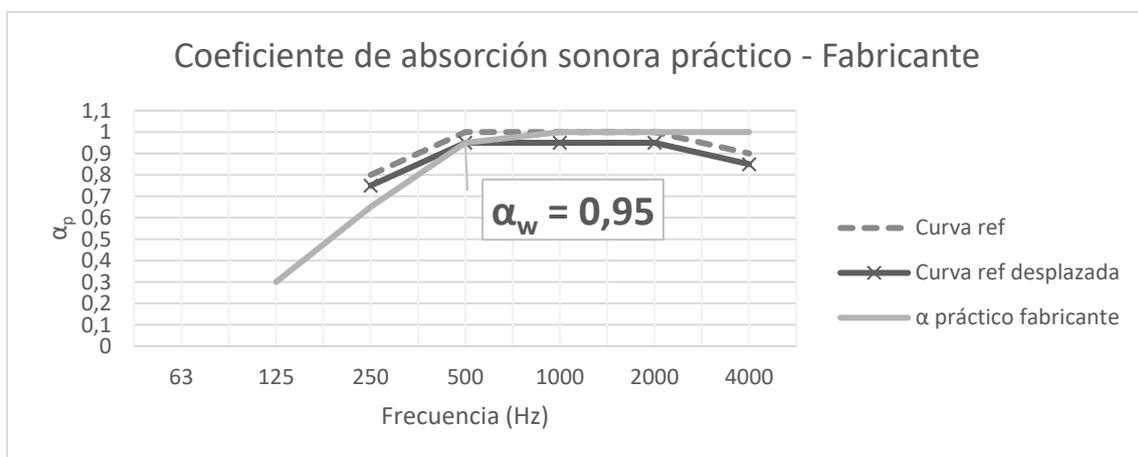


Gráfico 3.10: Coeficiente de absorción sonora práctico y ponderado – Fabricante.

3.4.2 α_p y α_w Sin difusores.

Mediante el coeficiente de absorción sonora obtenido en el primer ensayo sin difusores, se obtiene un coeficiente de absorción sonora ponderado igual que el obtenido por el fabricante. Sin embargo, el coeficiente de absorción sonora práctico es superior hasta la frecuencia de 500 Hz e inferior para las frecuencias de 1000 Hz, 2000 Hz y 4000 Hz.

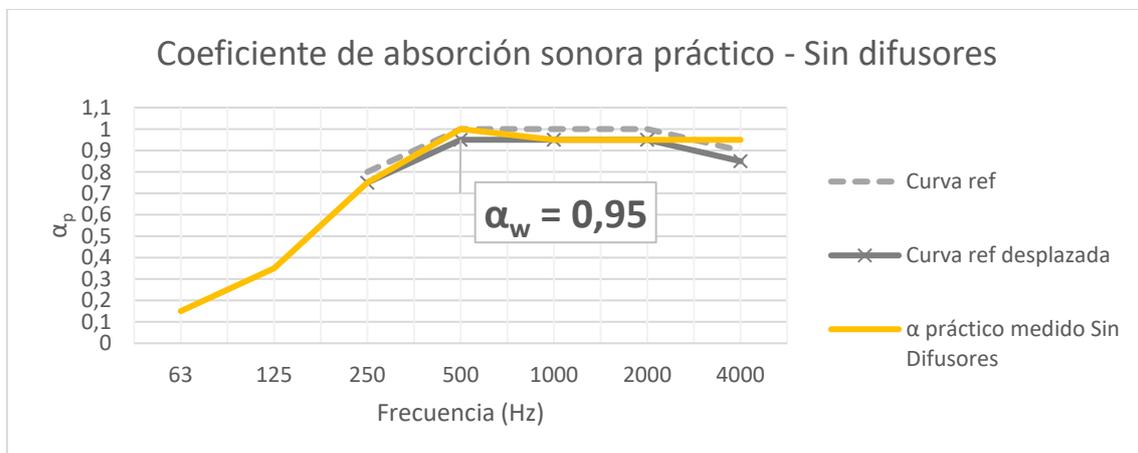


Gráfico 3.11: Coeficiente de absorción sonora práctico y ponderado –Sin difusores.

3.4.3 α_p y α_w Tanda A

Para la primera tanda de difusores instalados se observa un incremento en el valor del coeficiente de absorción sonora ponderado, pues se ha alcanzado el máximo valor que puede tomar, 1,00. A su vez, se comprueba como para la banda de octava de 1000 Hz, se ha aumentado el coeficiente de absorción sonora práctico hasta la unidad, descendiendo hasta 0,95 para las bandas de octava de 2000 Hz y 4000 Hz.

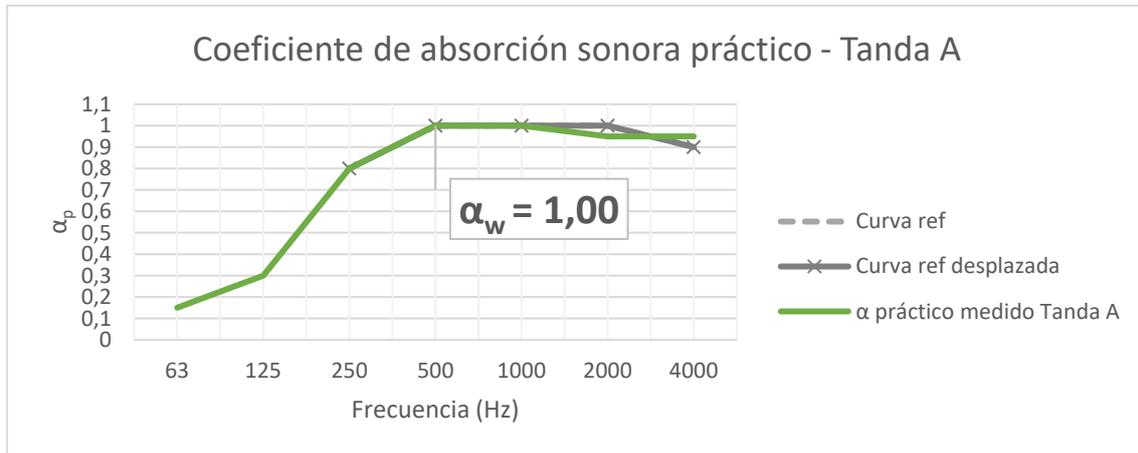


Gráfico 3.12: Coeficiente de absorción sonora práctico y ponderado – Tanda A.

3.4.4 α_p y α_w Tanda B

Con la inserción de los difusores de 2 m², existiendo por tanto una superficie total de 24 m² en la cámara, se obtiene un coeficiente de absorción sonora práctico similar al anterior, sin embargo, el valor obtenido para la banda de octava de 4000 Hz ha alcanzado la unidad.

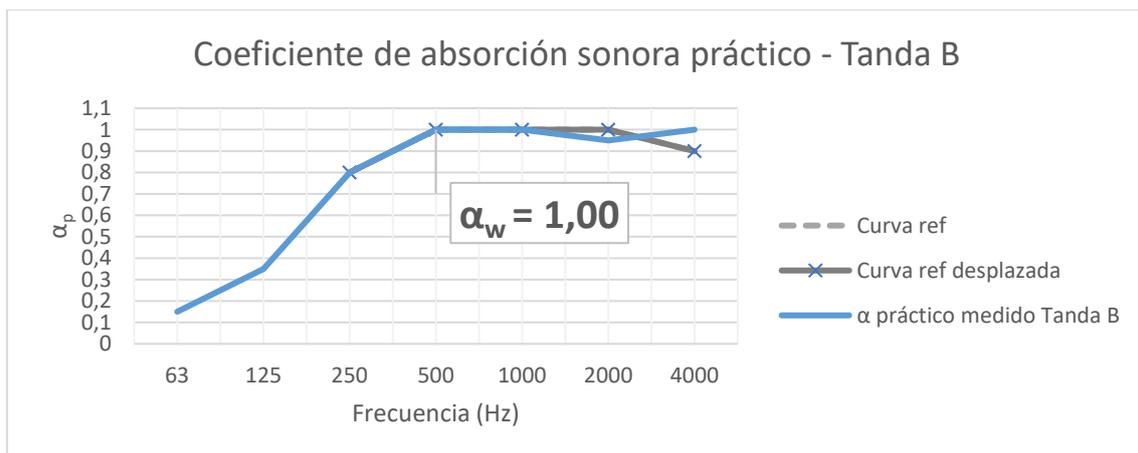


Gráfico 3.13: Coeficiente de absorción sonora práctico y ponderado – Tanda B.

3.4.5 α_p y α_w Tanda C

Por último, se comprueban ambos parámetros para el estado final y actual de la cámara reverberante del IIE, donde se obtiene un coeficiente de absorción sonora máximo para las bandas de octava comprendidas entre 500 Hz y 4000 Hz.

Por tanto, el coeficiente de absorción sonora ponderado se ha visto incrementado en 0,05 respecto al valor ofrecido por el fabricante, siendo igualmente clasificado como absorbente de tipo A.

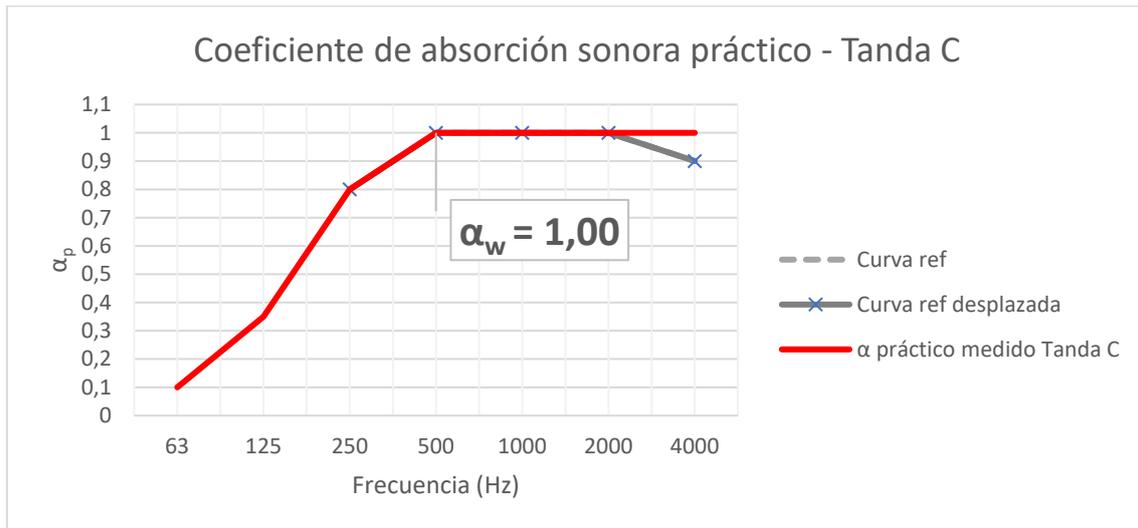


Gráfico 3.14: Coeficiente de absorción sonora práctico y ponderado – Tanda A.

3.4.6 α_p de todos los ensayos

A fin de poder comparar fácilmente los resultados obtenidos en el coeficiente de absorción sonora práctico en cada uno de los ensayos, se representan a continuación todos ellos:

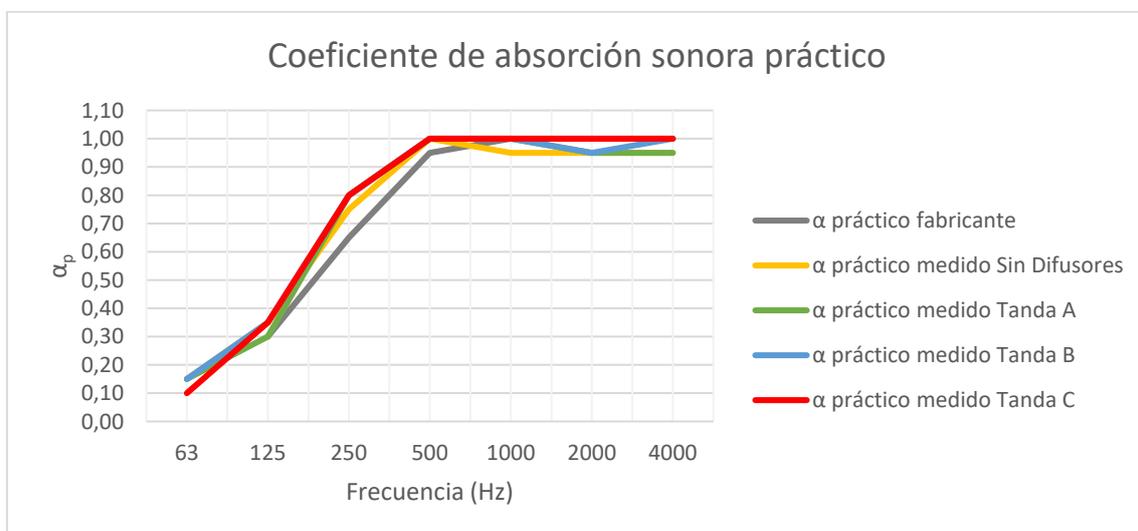


Gráfico 3.15: Coeficientes de absorción sonora prácticos de todos los ensayos.

4 CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES

1. El objetivo de este trabajo fin de máster se ha cumplido en el marco temporal establecido, pues la cámara reverberante del IIE ha quedado caracterizada y adecuada para su uso docente e investigador, partiendo de un recinto vacío, cuyo estado acústico inicial fue estudiado. Tras este estudio, se decidió instalar una estructura metálica y colgar diferentes tandas de difusores con el objetivo de aumentar la difusión en la cámara.
2. Se ha comprobado que, a mayor cantidad de difusores, el coeficiente de absorción sonora obtenido se veía incrementado. Esto es debido a que mayor cantidad de energía es dispersada aleatoriamente a lo largo de la cámara, pues inicialmente la dispersión se veía aumentada en el plano horizontal debido a las paredes en forma de sierra y no tanto en el plano vertical debido a las superficies paralelas de suelo y techo. Este hecho ha cambiado gracias a la instalación de los difusores. A consecuencia de ello, más energía incide sobre la muestra y, por tanto, más energía es absorbida, lo que resulta en un coeficiente de absorción sonora mayor.
3. Como se puede comprobar en la tabla 2.1 y en cada uno de los apartados correspondientes, la cámara reverberante cumple estrictamente con las restricciones que indica la norma, en cuanto a geometría, absorción, muestra absorbente, equipo de medida y configuración de la medida, condiciones ambientales y difusores.
4. Se diseñaron, cortaron y curvaron los difusores instalados en la cámara reverberante, formando parte activa en este proceso.
5. Con 36 m² de difusores se obtiene un coeficiente de absorción sonora superior al ofrecido por el fabricante en bajas y medias frecuencias y muy similar en altas frecuencias. Sin embargo, sería interesante realizar nuevas medidas y compararlas con las medidas obtenidas en este trabajo, viendo así el grado de repetibilidad de los ensayos realizados en la cámara. A su vez, igual de interesante sería instalar nuevos difusores para comprobar si se consigue igualar o superar el coeficiente de absorción sonora en altas frecuencias, pues no fue realizado en este trabajo por falta de tiempo y material.
6. Respecto a la ligera diferencia obtenida en el coeficiente de absorción sonora medido en el último ensayo y el ofrecido por el fabricante, cabe comentar que la reproducibilidad de los ensayos para una misma muestra, pero en diferentes cámaras reverberantes aun es tema de investigación, pues comúnmente se obtienen variaciones en los resultados a pesar de disponer de cámaras reverberantes con buena difusividad.

7. Los diferentes ensayos realizados han servido para comprobar la mejora en la difusividad de la cámara reverberante respecto al estado inicial. Para ello, fue necesario estudiar la metodología a seguir, decidiendo, por ejemplo, realizar un total de 10 caídas promediadas en cada posición de medida.
8. El estudio realizado desde la banda de tercio de octava de 50 Hz ha servido para comprobar que la cámara reverberante es apta para obtener información en las bandas de tercio de octava de 50 Hz, 63 Hz y 80 Hz, pues no se obtienen problemas de modos propios.
9. Sin embargo, sería recomendable estudiar la banda de frecuencia de 100 Hz, pues como se ha comprobado, en un primer momento se obtenía mayor desviación en la frecuencia de 160 Hz para la tanda A, que posteriormente bajó a 125 Hz en la tanda B y finalmente a 100 Hz en la tanda C.
10. Continuando con lo anterior, cabe comentar que las posiciones de medida utilizadas son seleccionadas como las posiciones más similares para el estado inicial de la cámara, siendo por tanto recomendable realizar un nuevo estudio en los 40 puntos de medida definidos para comprobar si estos puntos siguen siendo óptimos para realizar ensayos o si existe una combinación de puntos con menor desviación, pues la mejora con respecto al estado inicial de la cámara ha sido comprobada.
11. Como estudio adicional, se ha calculado el coeficiente de absorción sonora práctico y ponderado, obteniendo un valor de $\alpha_w = 1,00$ para el último ensayo respecto al valor de 0,95 del fabricante. A su vez, el coeficiente de absorción sonora práctico es superior al medido por el fabricante para frecuencias bajas y medias, e igual para frecuencias altas como se ha podido comprobar en los apartados 3.4.5 y 3.4.6.
12. La existencia de puertas convencionales supone tener un aislamiento menor respecto a los posibles ruidos del exterior. Por suerte, durante los ensayos, las instalaciones colindantes y pasillos se encontraban vacíos, pero se estima necesario la instalación de puertas especiales que aislen la cámara adecuadamente.

5 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

1. Realizar un análisis modal completo en baja frecuencia para determinar las posiciones con mayor y menor afección.
2. Comparativa entre el parámetro EDT y tiempo de reverberación para comprobar el grado de difusión de la cámara reverberante, ya que, si los resultados de ambos parámetros son similares, se considera que la difusión del campo acústico es adecuada.
3. Es conocida la discusión acerca del uso de la ecuación de Sabine en la norma ISO 354:2005, pues es válida cuando la muestra no tiene un coeficiente de absorción sonora elevado. Para coeficientes de absorción sonora elevados es más recomendable utilizar Eyring, como se indica en [6] y [12]. El coeficiente de absorción sonora mediante Eyring ha sido calculado, pero no discutido en este trabajo, por lo que surge una nueva línea de trabajo, a fin de poder estudiar y aportar información a dicha discusión.
4. Determinar qué señal de excitación ofrece una mejor estimación del tiempo de reverberación, pues la excitación de los modos propios y por tanto la variación en la densidad modal dependerá de la señal utilizada.
5. Como se ha comentado, el coeficiente de absorción sonora alcanzado en el último ensayo es superior al ofrecido por el fabricante para frecuencias bajas y medias, y ligeramente inferior en frecuencias altas. Sin embargo, como se ha indicado a lo largo del trabajo y en [8], [9] y [10], la reproducibilidad conseguida con la norma UNE-EN ISO 354:2004 es aun deficiente, siendo necesario estudiar y determinar una variabilidad máxima en los datos. Para poder determinar dicha variación, una posible medida sería establecer un único absorbente estándar. Igualmente, si dicho absorbente presenta coeficientes de absorción elevados, sería recomendable modificar la norma estableciendo Eyring como ecuación para determinar la absorción de la muestra.
6. A su vez, como se ha indicado previamente a lo largo de esta memoria, la norma establece un mínimo de 6 posiciones de medida, con la única condición respecto a nivel, de no obtener diferencias mayores de 6 dB en las bandas de tercio de octava adyacentes. Sin embargo, es conocido que obtener condiciones de campo completamente difuso es prácticamente imposible, y, por tanto, se cree recomendable establecer pautas para determinar las mejores posiciones de medida. Igualmente, aunque la norma establezca un mínimo de 6 posiciones, es recomendable realizar los cálculos con más posiciones, a fin de reducir la incertidumbre.

7. Este es un primer estudio y acondicionamiento de la cámara reverberante para su uso en mediciones de absorción sonora. Sin embargo, nuevos estudios deberán realizarse para comprobar si el comportamiento acústico es el necesario para realizar los siguientes ensayos, con sus normativas correspondientes:
- Medición de potencia sonora de fuentes.
 - Aislamiento acústico.
 - Aislamiento de cabinas.
 - Medición de silenciadores.
 - Medida de la pérdida de inserción de silenciadores.

6 CAPÍTULO VI: BIBLIOGRAFÍA

1. Norma UNE-EN ISO 354:2004, Acústica. *Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante. (ISO 354:2003).*
2. Norma UNE-EN ISO 11654:1998, Acústica. *Absorbentes acústicos para su utilización en edificios. Evaluación de la absorción acústica. (ISO 11654:1997).*
3. Norma UNE-EN ISO 3741:2011, Acústica. *Determinación de los niveles de potencia acústica y de los niveles de energía acústica de las fuentes de ruido a partir de la presión acústica. Métodos de laboratorio en cámaras reverberantes. (ISO 3741:2010).*
4. Duanqi, X., Zheng, W., & Jinjing, C. (febrero 1990). *Acoustic Design of a Reverberation Chamber. Applied Acoustics, 32, 83-91.*
5. Kolano, R., Abhyankar, S., & Martin, T. (mayo 2015). *Restoring and Upgrading a Reverberation Room Test Suite. 2017, de SOUND & VIBRATION Sitio web: www.SandV.com*
6. Torregrosa, S., Soler, S., Rosell, I., & Arau, H. (2005). *ESTUDIOS DE LA DIFUSIVIDAD DE UN CAMPO ACÚSTICO. 2017, de SEA Acústica Sitio web: http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/Gandia06_ASLO05.pdf*
7. Hernández, F. *Trabajo fin de Máster: Mejora de la difusión acústica de la cámara reverberante del Campus de Gandía de la UPV. 2012.*
8. Hrelja, P. *Trabajo fin de Máster: Análisis de las causas de dispersión en los resultados de las medidas del coeficiente de absorción acústica en cámara reverberante. 2014.*
9. Lautenbach, M.R. and Vercammen, M.L. "Can we use the standard deviation of the reverberation time to describe diffusion in a reverberation chamber?", *Proceedings of Meetings on Acoustics, Montreal, Canada, 2-7 June 2013.*
10. Vercammen, M.L. (2010). *Improving the accuracy of sound absorption measurement according to ISO 354. 2017, de Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics, ISRA 2010 Sitio web: https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/ICA2010/cdrom-ISRA2010/Papers/P2d.pdf*

11. Vallis, J., Hayne, M., Mee, D., Devereux, R., & Steel, A. (2015). *IMPROVING SOUND DIFFUSION IN A REVERBERATION CHAMBER*. *Acoustics 2015 Hunter Valley*, 1, 1-11.
12. Jeong, C. (2016). *Diffuse sound field: challenges and misconceptions*. *Inter-Noise*, 1, 1015-1021.
13. Hughes, W., McNelis, A., Nottoli, C., & Wolfram, E. (2015). *Examination of the Measurement of Absorption Using the Reverberant Room Method for Highly Absorptive Acoustic Foam*. 2017, de NASA Sitio web: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20150023091.pdf>