

ESTUDIO ACÚSTICO DEL CONSERVATORIO DE MÚSICA PEDRO ARANAZ DE CUENCA

Abel Segura López^{1*}
Samuel Quintana Gómez²
Marcos David Fernández Berlanga³

¹UCLM – Escuela Politécnica de Cuenca

^{2,3} UCLM – Escuela Politécnica de Cuenca – Grupo GAMMA

RESUMEN

Este trabajo tiene por objetivo la evaluación acústica del auditorio del conservatorio Pedro Aranaz de Cuenca, el cual se apoyará sobre 3 pilares fundamentales:

El primero es la caracterización acústica de la sala mediante medidas “in situ” de acuerdo con la norma ISO-3382. El auditorio funciona como sala de concierto y ensayo, por lo que se estudiarán las características colocando fuentes y receptores en ambas configuraciones. La sala tiene una geometría inusual, ya que tiene una altura de 8.5 m, cuenta con paneles acústicos móviles a modo de persianas y posee un difusor curvo en el techo. Para realizar las medidas se emplearán los programas EASERA 1.2.13 y DIRAC 6 para comparar los métodos de medida y resultados de ambos.

El segundo es la creación de un modelo de simulación electroacústica. Debido a la geometría de la sala y a la ausencia de planos, se ha recurrido a un sistema LiDAR como apoyo a la hora de generar el modelo 3D que se ajustará y validará mediante el programa EASE 4.4.

Finalmente, se diseñará y distribuirá una encuesta de percepción para tratar de relacionar los aspectos subjetivos de la percepción con los resultados experimentales más destacables y realizar comparativas entre diferentes grupos de personas.

ABSTRACT

This work aims to carry out an acoustic evaluation of Cuenca's Conservatory Pedro Aranaz auditorium. It will be based on three fundamental pillars:

First, there is the acoustic characterization of the auditorium through “in situ” measurements following ISO-3382 standards. The auditorium serves both as a concert and

rehearsal hall, so its characteristics will be studied by placing sources and receivers in both configurations. The room has an unusual geometry, with a height of 8.5 m, movable acoustic panels working as blinds, and a curved diffuser on the ceiling. The measurements will be conducted using the EASERA 1.2.13 and DIRAC 6 software programs to compare measurement methods and their respective results.

Second, the creation of an electroacoustic simulation model is planned. Due to the room's geometry and the lack of blueprints, a LiDAR system has been employed to assist in generating a 3D model. This model will be adjusted and validated using the EASE 4.4 program.

Finally, a perception survey will be designed and distributed to correlate subjective aspects of perception with the most notable experimental results and conduct comparisons among different groups of people.

Palabras Clave— ISO-3382, acústica arquitectónica, modelo geométrico, encuesta de percepción, auditorio.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando hablamos de un conservatorio, se nos viene a la cabeza un edificio con una acústica óptima pensado para el desarrollo de actividades musicales. Por este motivo, se estudiarán una serie de parámetros acústicos en el auditorio principal del conservatorio Pedro Aranaz de Cuenca con el fin de evaluar si realmente las condiciones de este son adecuadas.

La sala (figura 1) tiene una forma paralelepípedica con un techo que termina en una estructura triangular donde se encuentra colgado un difusor acústico con forma de barcaza. El auditorio posee unas dimensiones aproximadas de 19 m de

* 1: abelseguralopez@outlook.es

Copyright: ©2023 First autor et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

largo, 12 m de ancho y una altura máxima de 8.5 m. El número aproximado de asistentes es de 200, divididos entre 2 áreas de audiencia en la planta baja y un palco que simplemente tiene un uso ceremonial, por lo que no se estudiará al no ser relevante.



Figura 1. Fotografías del interior del auditorio del conservatorio

2. MEDIDA

En este apartado se detallará la metodología de medida seguida para la obtención de resultados. Por un lado se especificará dicha metodología junto a los equipos empleados y las posiciones de fuentes y receptores sobre un esquema de la sala. Por otro lado se mostrarán los resultados más relevantes de medida. Para llevar a cabo la medida se ha recurrido la norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010 “Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos” [1].

2.1. Metodología de medida

Toda la metodología se ha realizado de acuerdo con la ISO 3382-1. Los equipos empleados han sido una tarjeta de sonido Roland Rubix 22, micrófonos omnidireccionales B&K 4190-L con el previo B&K 4720, el acondicionador de señal B&K Nexus 2690, el HATS B&K 4100, un par de micrófonos AudioTechnica AT4050 con patrón de direccionalidad variable, un amplificador B&K 2716, una fuente omnidireccional B&K 4296 y una fuente vocal B&K 4720. Los programas empleados han sido EASERA 1.2 y DIRAC 6.

Como se ha mencionado en el resumen, la sala se emplea en 2 configuraciones principales: concierto (S1) y ensayo (S2). En ambos casos consideraremos 2 posiciones de fuente y 6 posiciones de medida. Debido a la simetría de la sala, en la posición de concierto únicamente es necesario estudiar un

área de audiencia. En la posición de ensayo, no se encuentran músicos en la zona de la segunda área, por lo que se reutilizarán los puntos de medida de la primera.

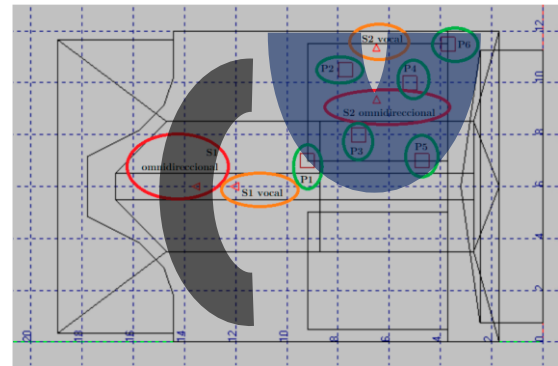


Figura 2. Distribución de posiciones de fuente y receptores en la sala

La posición de concierto está representada por el sombreado negro, donde los músicos se orientan hacia el público en las áreas de audiencia (el ancho de la agrupación puede variar en función de si se trata de un único intérprete o una agrupación). En este caso la fuente vocal está orientada hacia las áreas de audiencia ya que el hablante se dirigirá hacia el público.

La posición de ensayo está representada por el sombreado azul. Esta posición es más propia de la orquesta y la banda. En este caso, la fuente vocal sí se encuentra orientada hacia los músicos (ya que es el director quien les dirige la palabra) y podemos mantener las posiciones de medida ya que al no haber público, los receptores son los propios intérpretes.

Los parámetros que evaluaremos serán el tiempo de decaimiento temprano (EDT) y la claridad (C80). Estos se estudiarán entre 63 Hz y 8 kHz con DIRAC (añadiendo una banda inferior y superior a lo indicado por la norma) y entre 125 Hz y 8 kHz con EASERA ya que este programa no permite evaluar los resultados por debajo de esta frecuencia.

Debido a la peculiaridad de los paneles móviles presentes en los laterales del recinto, estudiaremos el comportamiento de la sala con estos abiertos o cerrados. También se realizará una medida de coeficiente de absorción para caracterizarlos y poder incluirlos en el modelo de simulación.

2.2. Resultados de medida

En este apartado mostraremos los resultados de medida de EDT y C80 para ambas posiciones (concierto y ensayo), estados de la sala (paneles abiertos y cerrados) y con ambos programas. Las curvas representadas son el promedio de todas las posiciones de medida.

La nomenclatura empleada en las leyendas es *PAR snX* donde *PAR* indicará el parámetro, *sn* la posición de interpretación y *X* el estado de los paneles.

En las figuras 3 y 4 encontramos las gráficas de EDT obtenidas mediante los 2 programas de medida empleados.

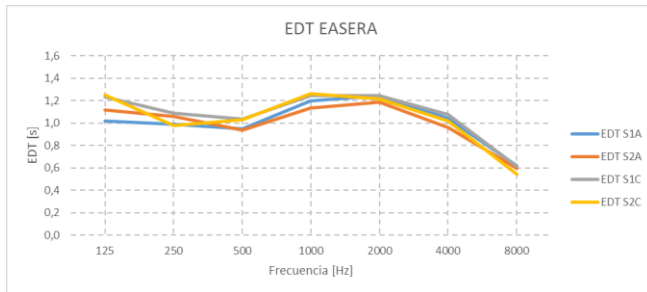


Figura 3. Resultados de medida EDT EASERA

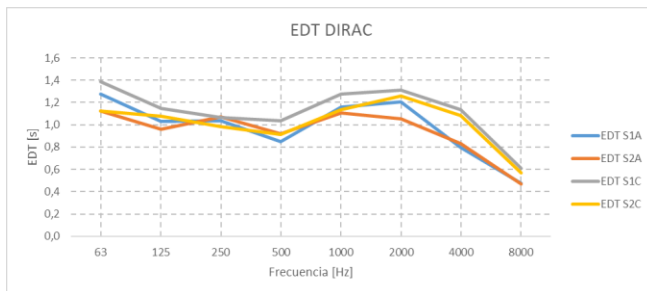


Figura 4. Resultados de medida EDT DIRAC

Podemos comprobar como la posición de la agrupación musical o el estado de los paneles apenas tiene influencia ya que el comportamiento espectral es similar. También se puede apreciar la misma tendencia en la curva con ambos programas.

En la figura 5 encontramos una comparativa de la curva entre ambos programas estableciendo como criterio comparativo la posición de concierto con los paneles abiertos. Ambos programas nos arrojan un resultado muy similar con diferencias del JND inferiores al 5%. Entendiendo el JND (umbral diferencial) como la diferencia mínima perceptible entre los valores de un parámetro [2].

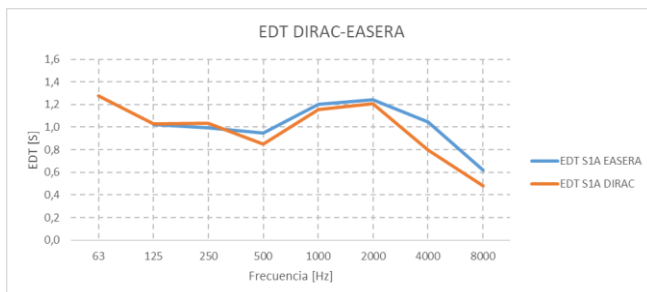


Figura 5. Comparativa EDT EASERA-DIRAC

El caso de C80 es más particular, como se ve reflejado en las figuras 6 y 7.

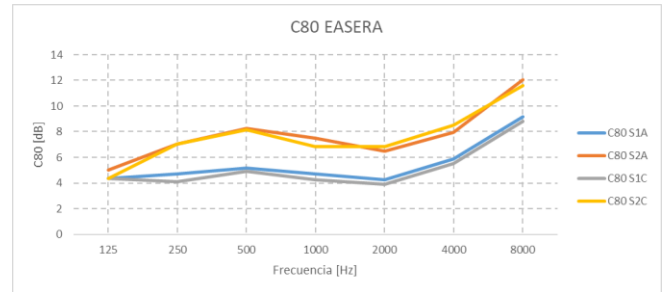


Figura 6. Resultados de medida C80 EASERA

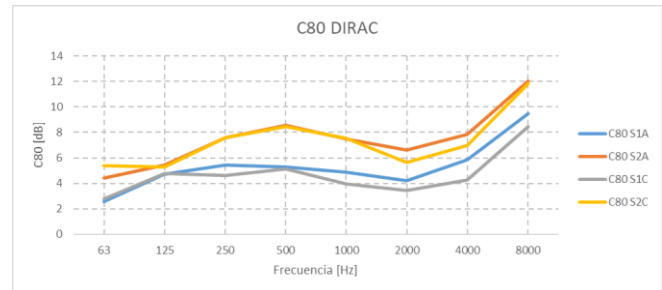


Figura 7. Resultados de medida C80 DIRAC

De estas gráficas podemos extraer que el estado de los paneles apenas tiene influencia sobre la sala, pero la posición de fuentes y receptores sí influye, lo que se refleja en la diferencia de claridad en las configuraciones estudiadas.

La gráfica de la figura 8 muestra una comparativa entre los resultados de este parámetro obtenidos con ambos programas. Podemos apreciar que el resultado de medida es prácticamente idéntico (la mayor diferencia se encuentra en la banda de 250 Hz y es menor al JND), por lo que podemos validar los resultados de EASERA y DIRAC.

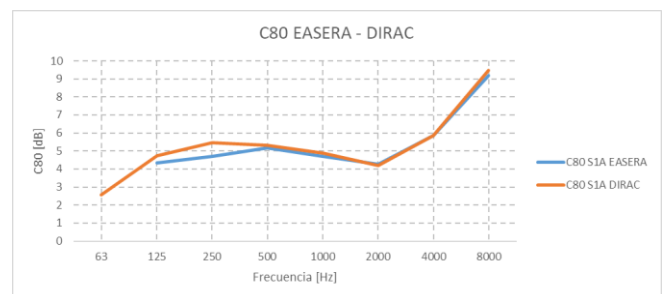


Figura 8. Comparativa C80 EASERA-DIRAC

3. SIMULACIÓN

En este apartado se detallará la metodología de simulación, un resumen del ajuste del modelo y algunos resultados de la misma comparándolos con los de medida.

3.1. Metodología de simulación

La simulación parte de una nube de puntos obtenida con LiDAR. En la figura 9 encontramos una vista de la sala.

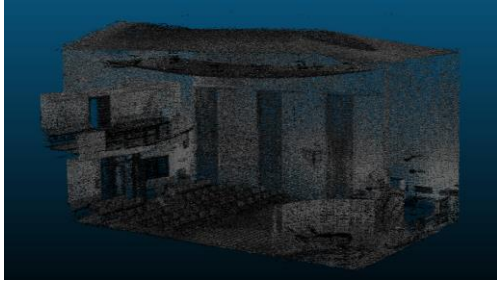


Figura 9. Nube de puntos de la sala generada por LiDAR

Tras filtrar los puntos, se ha empleado el programa AutoCAD de la suite de Autodesk para extraer unos cortes de la sala y poder obtener las medidas necesarias para el modelado de la sala en EASE (figura 10).

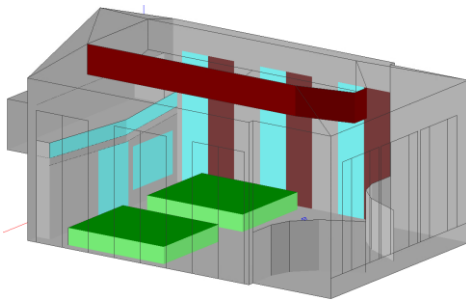


Figura 10. Modelo EASE auditorio

Algunas peculiaridades del modelo son la capacidad de estudiar el estado de la sala con paneles abiertos y cerrados sustituyendo las parejas de superficies panel – pared por ventana – panel. También es destacable que la barcaza se encuentra “hundida” en el techo ya que en esa zona no aparecen puntos de la nube y por tanto podemos asumir que no habrá presencia de reflexiones sonoras.

3.2. Ajuste del modelo

El ajuste del modelo se ha realizado en base a 2 parámetros: tiempo de reverberación y claridad.

La reverberación depende principalmente de los materiales empleados y la absorción del aire (principalmente en alta frecuencia) [3]. La elección de los materiales se ha realizado empleando las bases de datos integradas en EASE. Con los resultados de medida, podemos elegir el tipo de yeso, madera o parqué que permite aproximar la reverberación del modelo con la real [4].

La claridad depende principalmente de la distribución de los materiales y la geometría de la sala, por lo que asumiendo que

la geometría es adecuada se ha modificado la difusión de las superficies geoméricamente más complejas [5].

También es destacable la caracterización de los paneles acústicos (persianas). Para ello, se ha recurrido a las teorías de Helmholtz [6], donde se muestran los cálculos para caracterizar un resonador múltiple de cavidad a base de paneles perforados o ranurados. La frecuencia de resonancia teórica del panel vacío se encuentra en torno a 378 Hz. Para medir el coeficiente de absorción con DIRAC se ha recurrido a la norma ISO 13472-1:2022 [7]. Los resultados de medida muestran que el máximo se encuentra en el tercio de octava de 200 Hz, lo cual coincide con la teoría, que dicta que la frecuencia de resonancia del panel relleno es aproximadamente la mitad que la del panel vacío. Asignando el material de la base de datos de EASE que más se ajusta al proceso experimental

Para realizar la simulación hemos incluido el SPL de la fuente empleada, un *patch size* de 0.5 metros (aproximadamente una silla) y el ruido medido “in situ”. El número de partículas ha sido de 1834000 (*Very High Resolution, Slow*), la longitud de 2470 ms (*Extended, Slow*) y el valor por defecto para las superficies sin datos de difusión ha sido la opción de *Default S-Curve*. El techo, los paneles y las áreas de audiencia se ajustaron con una difusión desde el 40% en 400 Hz hasta el 20% en 4 kHz.

3.3. Resultados de simulación

Los resultados de simulación, que se han obtenido mediante el módulo AURA [8] se mostrarán en conjunto con los de medida. Para obtener mejores resultados seguiremos la guía de comparación de simulación acústica y medida de Cheol Ho Jeong [9]. Esta publicación recomienda mostrar los valores medios, mínimos y máximos de medida en todos los puntos para evaluar de forma más completa el recinto.

Para el caso del tiempo de decaimiento temprano podemos apreciar la gráfica comparativa entre medida y simulación en la figura 11.

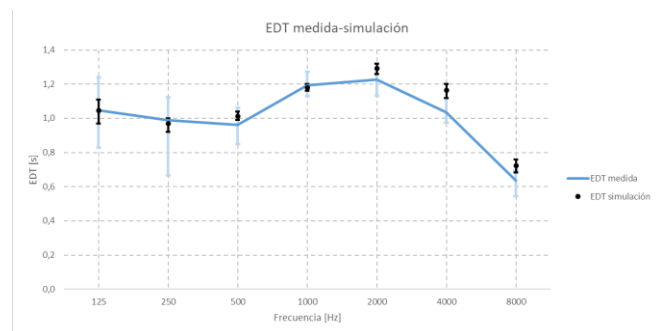


Figura 11. Comparativa EDT entre medida y simulación

Podemos considerar válido este parámetro ya que se puede apreciar que la simulación mantiene el mismo comportamiento que la medida “in situ” y se encuentra dentro de los márgenes de variación espacial.

En la figura 12 podemos encontrar representado el EDT medido junto a unas barras verdes que nos indican la diferencia con la simulación. Las barras rojas son el JND definido en la norma ISO 3382, por lo que si la barra verde se encuentra por debajo de la roja podemos concluir que no hay diferencia perceptible entre medida y simulación.

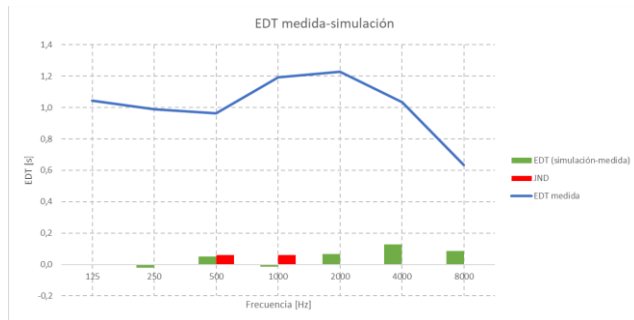


Figura 12. Diferencia entre el valor promedio medida-simulación y JND

Podemos comprobar como el JND en las bandas de 500 Hz y 1 kHz es superior a la diferencia entre el resultado de medida y simulación ya que el tiempo de reverberación del modelo se ha ajustado con el medido en la sala. Se ha centrado el estudio del JND sobre las bandas de interés establecidas en la norma ISO 3382 para calcular el valor promediado en frecuencia de número único.

En la figura 13 podemos apreciar la comparativa entre la claridad medida y la obtenida mediante simulación.

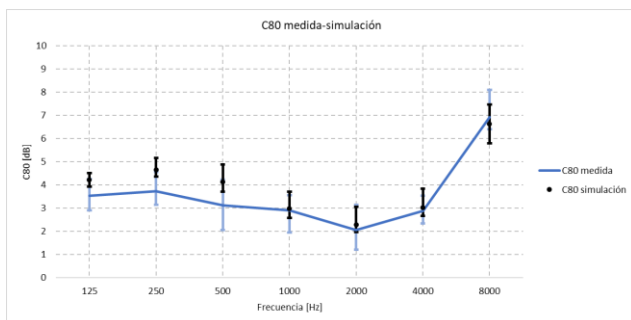


Figura 13. Comparativa C80 entre medida y simulación

Con este parámetro nos encontramos con un resultado similar al del EDT. Podemos apreciar como los comportamientos de C80 en simulación siguen la misma tendencia respecto a la medida.

En la figura 14 encontramos una comparativa de C80 entre simulación – medida y JND.

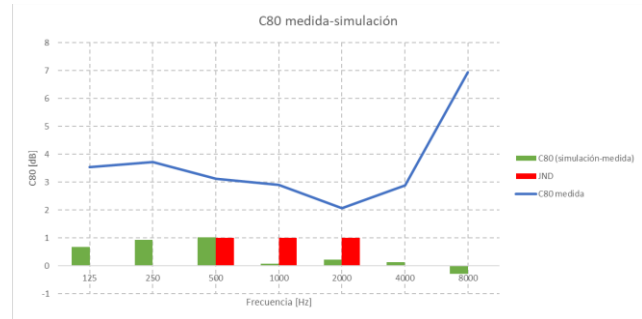


Figura 14. Diferencia entre el valor promedio medida-simulación y JND

Para las bandas de interés se ha conseguido ajustar el valor de C80 con un valor igual o inferior al JND ya que al igual que con la reverberación, la claridad ha sido un parámetro ajustado con las medidas “in situ”. Puesto que el JND de la claridad es de 1 dB, podemos asumir que el valor medio entre medida y simulación no será perceptible.

4. ENCUESTA DE PERCEPCIÓN

En este punto detallaremos el diseño de la encuesta realizada y trataremos los resultados obtenidos.

4.1. Diseño de la encuesta

La encuesta se ha llevado a cabo en papel con el fin de aumentar la predisposición de los asistentes a rellenarla. Debido a que la mayoría de músicos profesionales no suelen poseer conocimientos en ingeniería acústica no se ha considerado necesario realizar una encuesta diferenciada. Esta se ha repartido a lo largo de 3 días, donde se consiguió encuestar al 100% de los 65 asistentes a las audiciones y durante las cuales se llevaron a cabo interpretaciones de distintos géneros musicales y agrupaciones o conjuntos de músicos. Únicamente se dispone de 4 opciones por pregunta. Se ha descartado un número impar para evitar la respuesta de compromiso (en caso de duda la respuesta central) y se ha considerado que 6 opciones eran demasiadas y se dificultaba la redacción de las respuestas, ya que estas siguen la estructura de “poco – razonablemente – bastante – muy” [10].

En primer lugar nos encontramos con una pregunta “cero” de control que nos permitirá clasificar los resultados según el sexo (hombre o mujer), la edad (menor de 25 años y mayor de 25 años) y los conocimientos musicales (separando los alumnos de educaciones elementales de los de educaciones profesionales o superiores).

La primera pregunta hace referencia al tiempo de reverberación y es: “¿Cómo describiría la duración del sonido después de que se extinga la fuente sonora?”. Las opciones son menos de 1 segundo, entre 1 y 5 segundos, entre 5 y 10 segundos y más de 10 segundos. Dado que el tiempo de

reverberación se mide en segundos, que es una magnitud conocida, podemos incluir este parámetro en las respuestas de forma directa. Se ha elegido un rango temporal amplio en cada opción para tratar de minimizar las posibles dudas y facilitar la elección de una respuesta ya que si empleamos rangos de 1 o 2 segundos podría haber más confusión.

La pregunta referente a la claridad (C80), definición (D) y tiempo central (Ts) es la misma ya que la norma ISO-3382 agrupa estos 3 parámetros en el aspecto subjetivo de “claridad del sonido”. La pregunta es la siguiente: “¿Cómo describiría la nitidez o claridad de los sonidos?”. Debido a que no podemos preguntar por decibelios o milisegundos, las respuestas varían de poco claros o nítidos hasta muy claros o nítidos. Ya que el rango típico de C80 según la ISO-3382 es de -5 dB a 5 dB, consideramos que poco claros o nítidos representa menos de -5 dB, razonablemente claros o nítidos de -5 a 0 dB, bastante claros o nítidos de 0 a 5 dB y muy claros o nítidos más de 5 dB.

4.2. Resultados encuesta

Los resultados promediado en frecuencia de número único de EDT son 1.05 s con EASERA y 1 s con DIRAC, lo cual se corresponde con la respuesta del 65% de los encuestados, que valora el tiempo de reverberación de la sala entre 1 y 5 segundos. El 21% de los encuestados ha percibido el tiempo de reverberación entre 5 y 10 segundos. El grupo que más ha aportado a este porcentaje son las mujeres menores de 25 años con conocimientos musicales del tercer día. Dado que se trataba de una audición de violín, es posible que estas mujeres confundieran el tiempo de reverberación de la sala con el tiempo que dura un golpe de arco (el tiempo que puede estar el arco del violín sobre la cuerda produciendo sonido).

El C80 arroja un promediado en frecuencia de número único alrededor de los 5 dB con ambos programas (4.94 dB con EASERA y 5.09 dB con DIRAC). El 54% de los encuestados ha percibido un valor de claridad entre 0 y 5 dB y el 26% un valor superior a esos 5 dB. De los resultados parciales podemos extraer que el día que hubo una audición de viento de alumnos de educaciones profesionales, la percepción de la claridad era mayor al día que la audición era de violín y alumnos de educaciones elementales, lo cual se puede asimilar a que los estudiantes avanzados son capaces de generar un sonido considerado más claro.

5. CONCLUSIONES

Se han contrastado los resultados experimentales obtenidos mediante 2 programas de medida cuyos resultados son muy similares y se encuentran por debajo del JND, consiguiendo a su vez diseñar, ajustar y validar un modelo de simulación creado con EASE en el que se pone de manifiesto la utilidad de sistemas como el LiDAR. La encuesta de percepción ha

permitido obtener una valoración perceptual de la acústica de la sala y confrontarla con los resultados experimentales. Este trabajo trata de remarcar la importancia de integrar en la acústica de recintos los procesos de medida, simulación y percepción.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] «UNE-EN-ISO 3382-1:2010,» [En línea]. Available: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0044829>. [Último acceso: 5 septiembre 2023].
- [2] Agustín Martín Domingo. Universidad Politécnica de Madrid, «Apuntes de acústica,» [En línea]. Available: <https://oa.upm.es/23098/1/amd-apuntes-acustica-v2.1.pdf>. [Último acceso: 12 septiembre 2023].
- [3] Remy Wenmaekers, Constant Hak and Maarten Hornikx, «The effective air absorption coefficient for predicting reverberation time in full octave bands,» The Journal of the Acoustical Society of America, nº DOI:10.1121/1.4901710.
- [4] Ruiguang Yu, Erhao Ma, Li Fan, Jun Liu, Bing Cheng and Zhilu Jiang, «Effects of Different Building Materials and Treatments on Sound Field Characteristics of the Concert Hall,» 5 octubre 2022. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.3390/buildings12101613>. [Último acceso: 10 septiembre 2023].
- [5] Shtrepi, L., Pelzer, S., Rychtáriková, M., Vitale, R., Astolfi, A., & Vorländer, M., Objective and subjective assessment of scattered sound in a virtual acoustical environment simulated with three different algorithms. In 41st International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2012, INTER-NOISE 2012 (Vol. 8, pp. 6807–6818), 2012.
- [6] A. C. Isbert, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Barcelona: Edicions UPC, 1998.
- [7] «ISO 13472-1:2022,» [En línea]. Available: <https://www.iso.org/standard/77032.html>. [Último acceso: 7 septiembre 2023].
- [8] AFMG, «AURA 4 Module,» [En línea]. Available: <https://www.afmg.eu/en/aura-4-module>. [Último acceso: 10 septiembre 2023].
- [9] C. H. Jeong, «Comparison of room acoustics simulation and measurement,» agosto 2023. [En línea]. Available: https://www.linkedin.com/posts/cheol-ho-jeong-121a473_comparison-of-room-acoustic-simulation-activity-7096207270790709248-cjhY?utm_source=share&utm_medium=member_android. [Último acceso: 8 septiembre 2023].
- [10] R. Likert, «A technique for the measurement of attitudes,» junio 1932. [En línea]. Available: https://legacy.voteview.com/pdf/Likert_1932.pdf. [Último acceso: 7 septiembre 2023].