

PROYECTO FIN DE GRADO

TÍTULO: Diseño y validación de un modelo Geométrico para el estudio acústico de la Sala de Ensayo de Coro del Teatro Real de Madrid

AUTOR/A: Rosário Gonçalves Nunes

TITULACIÓN: Sonido e Imagen

DIRECTOR/A: María Larrosa Navarro

TUTOR/A: Juan José Gómez Alfageme

DEPARTAMENTO: Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones

VºBº TUTOR/A

Miembros del Tribunal Calificador:

PRESIDENTE/A: Francisco Javier Ramírez Ledesma

TUTOR/A: Juan José Gómez Alfageme

SECRETARIO/A: Elena Blanco Martín

Fecha de lectura:

Calificación:

El Secretario/La Secretaria,

Agradecimientos

A Juanjo por haber estado siempre dispuesto a ayudarme a lo largo de la realización de este proyecto.

Resumen

En esta memoria se detalla toda la información y el proceso llevado a cabo en el proyecto final de grado sobre el diseño y validación de la Sala de Ensayo del Coro del Teatro Real de Madrid. Este teatro, ubicado al lado del Palacio Real en el corazón de Madrid, es la ópera nacional de España y una institución de prestigio internacional. Aquí se pueden encontrar diferentes dependencias que permiten el desarrollo de las artes escénicas como la Sala de Ensayo del Coro.

Para el desarrollo del proyecto se realiza una toma de medidas acústicas en la sala, según la Norma UNE-EN ISO 3382-1, con el equipo proporcionado por la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación. Los resultados son procesados y analizados con Excel.

El proyecto se centra en la creación de un modelo virtual 3D que reproduce el interior del teatro utilizando el software Sketch Up, basado en las medidas hechas en el recinto. El modelo busca replicar la acústica de la sala por lo tanto es necesario reproducir simplificada su arquitectura para que el software de simulación acústica EASE pueda operar correctamente y sincronizarse con el diseño de Sketch Up. Posteriormente, se realiza la simulación acústica en EASE, utilizando como referencia los datos de mediciones *in situ*

El objetivo principal del proyecto es validar el modelo virtual, comparando los datos simulados con los obtenidos de las mediciones en la sala. Para lograrlo, se adaptan los valores simulados a los parámetros acústicos medidos, analizando su similitud a través del concepto de JND (Just Noticeable Difference), que mide la percepción de las diferencias entre dos parámetros. Esta validación se sustenta en las teorías de acústica estadística y geométrica, las cuales son las principales fuentes de cálculo empleadas.

Una vez finalizado este proyecto, se dispondrá un modelo 3D de la sala que permite la realización de estudios acústicos de la misma, simplificando así el proceso de evaluación acústica del recinto.

Abstract

This report details all the information and the process carried out in the final degree project on the design and validation of the Rehearsal Room of the Choir of the Teatro Real in Madrid. This theatre, located next to the Royal Palace in the heart of Madrid, is the national opera house of Spain and an institution of international prestige. Here you can find different rooms that allow the development of the performing arts such as the Choir Rehearsal Room.

For the development of the project, acoustic measurements are taken in the location, according to the UNE-EN ISO 3382-1 Standard, with the equipment provided by the Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación (School of Engineering and Telecommunication Systems). The results are processed and analysed with Excel.

The project focuses on the creation of a 3D virtual model that reproduces the interior of the theatre using Sketch Up software, based on the measurements made in the venue. The model aims to replicate the acoustics of the room, therefore it is necessary to simplify the reproduction of its architecture so that the EASE, the acoustic simulation software, can operate correctly and synchronize with the design made on Sketch Up. Afterward, the acoustic simulation is carried out in EASE and compared with the *in situ* measurement data.

The main goal of the project is to validate the virtual model by comparing the simulated data with the data obtained from measurements in the room. To achieve this, the simulated values are adapted to the measured acoustic parameters, analyzing their similarity through the concept of JND (Just Noticeable Difference), which measures the perception of differences between two parameters. This validation is based on the theories of statistical and geometric acoustics, which are the main sources of calculation used.

Once this project has been completed, a 3D model of the room will be available, allowing acoustic studies to be carried out, thus simplifying the process of acoustic evaluation of the venue.

Índice de figuras

Figura 1. Imagen del origen del Teatro Real de Madrid.....	5
Figura 2. Imagen del Teatro Real de Madrid en 2024.	6
Figura 3. Imagen de la Sala de Ensayo de Coro.	7
Figura 4. Formato de los escalones JND.....	14
Figura 5. Fuente omnidireccional AVM DO-12.	18
Figura 6. Micrófono omnidireccional, CK 92.	19
Figura 7. Micrófono bidireccional, CK 94.	19
Figura 8. Preamplificador, AKG SE 300 B.	19
Figura 9. Tarjeta de sonido, MOTU Ultra Lite MK3.	20
Figura 10. Amplificador, Crown XLS2002 Drive Core.	20
Figura 11. Diagrama de bloques de las medidas realizadas <i>in situ</i>	20
Figura 12. Sonómetro Brüel & Kjaer 2260.	21
Figura 13. Detalle de la ocupación de la Sala de Ensayo de Coro.....	22
Figura 14. Detalle de la ocupación de la Sala de Ensayo de Coro, Coro 1.	23
Figura 15. Detalle de la ocupación de la Sala de Ensayo de Coro, Coro 2.	23
Figura 16. Ejemplo de los datos EDT filtrados en el fichero de Excel de octavas.....	25
Figura 17. Ejemplo de la máscara INR para los resultados medidos en octavas.....	26
Figura 18. Distribución de Gauss.....	26
Figura 19. Ejemplo de los datos de EDT, después de aplicado el criterio de Chauvenet.....	27
Figura 20. Gráfica de los valores promedios de EDT, por zonas.....	28
Figura 21. Gráfica de los valores promedios de T20, por zonas.....	29
Figura 22. Gráfica de los valores promedios de T30, por zonas.....	30
Figura 23. Gráfica de los valores promedios de RT, por zonas.....	31
Figura 24. Gráfica de los valores promedios de C50, por zonas.....	33
Figura 25. Gráfica de los valores promedios de C80, por zonas.....	34
Figura 26. Gráfica de los valores promedios de D50, por zonas.....	35
Figura 27. Gráfica de los valores promedios de Ts, por zonas.....	36
Figura 28. Gráfica de los valores promedios de LF, por zonas.....	38
Figura 29. Gráfica de los valores promedios de LFC, por zonas.....	39
Figura 30. Gráfica de los valores promedios de STI, por zonas.....	41
Figura 31. Gráfica de los valores promedios de Alcons, por zonas.....	41
Figura 32. Suelo, visto desde arriba.....	43
Figura 33. Pared del lado izquierdo, vista lateral.....	43
Figura 34. Suelo y paredes de la sala.....	44
Figura 35. Techo, detalle, vista de abajo.....	44
Figura 36. Sala con techo, vista desde arriba.....	44
Figura 37. Pared con ventanas y puertas.....	45
Figura 38. Superficies huecas: tarima del coro y lamas de madera, vista lateral.....	45
Figura 39. Sala amueblada, vista frontal.....	46

Figura 40. Sala amueblada, vista lateral.....	46
Figura 41. Vista frontal en el interior de la sala comparación, arriba: Sketch up; abajo: Real.....	46
Figura 42. Vista lateral en el interior de la sala comparación, con detalle de techo, arriba: Sketch up; abajo: Real.....	47
Figura 43. Vista lateral en el interior de la sala comparación, arriba: Sketch up; abajo: Real.....	47
Figura 44. Selección de materiales para cada una de las superficies del proyecto.....	49
Figura 45. Sala en EASE, con volumen cerrado.....	50
Figura 46. Sala en EASE con materiales asignados, arriba izquierda: Vista 3D; arriba derecha: Vista alzado longitudinal; abajo izquierda: Vista planta; abajo derecha: Vista sección transversal.....	50
Figura 47. Comparación del valor RT en EASE con los valores reales.....	51
Figura 48. Comparación entre los valores de absorción de los materiales 061 y 060.....	52
Figura 49. Valores de absorción del material 275.....	52
Figura 50. Valores de absorción del material 040.....	52
Figura 51. Comparación del valor RT en EASE con los valores reales, modificación 1.....	53
Figura 52. Comparación entre los valores de absorción de los materiales 005 y 180.....	55
Figura 53. Comparación entre los valores de absorción de los materiales 003 y 189.....	56
Figura 54. Parámetros los cálculos realizados en AURA.....	58
Figura 55. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de EDT, Coro 1.....	60
Figura 56. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de T20, Coro 1.....	61
Figura 57. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de T30, Coro 1.....	62
Figura 58. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de RT, Coro 1.....	63
Figura 59. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de C50, Coro 1.....	64
Figura 60. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de C80, Coro 1.....	65
Figura 61. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de D50, Coro 1.....	66
Figura 62. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de Ts, Coro 1.....	67
Figura 63. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de LF, Coro 1.....	68
Figura 64. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de LFC, Coro 1.....	69
Figura 65. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de STI, Coro 1.....	70
Figura 66. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de Alcons, Coro 1.....	70
Figura 67. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de EDT, Coro 2.....	74
Figura 68. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de T20, Coro 2.....	75
Figura 69. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de T30, Coro 2.....	76
Figura 70. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de RT, Coro 2.....	77
Figura 71. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de C50, Coro 2.....	78
Figura 72. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de C80, Coro 2.....	79
Figura 73. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de D50, Coro 2.....	80
Figura 74. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de Ts, Coro 2.....	81
Figura 75. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de STI, Coro 2.....	82
Figura 76. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de Alcons, Coro 2.....	82
Figura 77. Gráfica del Ruido de Fondo Promedio.....	94
Figura 78. Gráfica de los valores promedios de RT por zonas, en bandas de octava.....	96

Figura 79. Gráfica de los valores promedios de EDT por zonas, en bandas de octava.....	97
Figura 80. Gráfica de los valores promedios de T20 por zonas, en bandas de octava.	98
Figura 81. Gráfica de los valores promedios de T30 por zonas, en bandas de octava.	99
Figura 82. Gráfica de los valores promedios de C50 por zonas, en bandas de octava.	100
Figura 83. Gráfica de los valores promedios de C80 por zonas, en bandas de octava.	101
Figura 84. Gráfica de los valores promedios de D50 por zonas, en bandas de octava.....	102
Figura 85. Gráfica de los valores promedios de Ts por zonas, en bandas de octava.....	103
Figura 86. Gráfica de los valores promedios de LF por zonas, en bandas de octava.....	104
Figura 87. Gráfica de los valores promedios de LFC por zonas, en bandas de octava.	105
Figura 88. Gráfica de los valores promedios de STI por zonas.....	106
Figura 89. Gráfica de los valores promedios de Alcons por zonas.	106

Índice de Tablas

Tabla 1. Tabla de valoración del criterio STI.....	13
Tabla 2. Tabla de valoración del criterio Alcons%.....	13
Tabla 3. Posiciones utilizadas durante las mediciones.....	23
Tabla 4. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro EDT.....	28
Tabla 5. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro T20.....	29
Tabla 6. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro T30.....	30
Tabla 7. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro RT.....	31
Tabla 8. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro C50.....	33
Tabla 9. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro C80.....	34
Tabla 10. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro D50.....	35
Tabla 11. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro Ts.....	36
Tabla 12. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro LF.....	38
Tabla 13. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro LFC.....	39
Tabla 14. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro STI.....	41
Tabla 15. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro AlCons.....	41
Tabla 16. Valores de los escalones JND, modificación 1.....	54
Tabla 17. Valores de los escalones JND, modificación 2.....	55
Tabla 18. Valores de los escalones JND, modificación 3.....	56
Tabla 19. Valores de los escalones JND, modificación 4.....	57
Tabla 20. Comparación de valores medidos y simulados de EDT, Coro 1.....	60
Tabla 21. Comparación de valores medidos y simulados de T20, Coro 1.....	61
Tabla 22. Comparación de valores medidos y simulados de T30, Coro 1.....	62
Tabla 23. Comparación de valores medidos y simulados de RT, Coro 1.....	63
Tabla 24. Comparación de valores medidos y simulados de C50, Coro 1.....	64
Tabla 25. Comparación de valores medidos y simulados de C80, Coro 1.....	65
Tabla 26. Comparación de valores medidos y simulados de D50, Coro 1.....	66
Tabla 27. Comparación de valores medidos y simulados de Ts, Coro 1.....	67
Tabla 28. Comparación de valores medidos y simulados de LF, Coro 1.....	68
Tabla 29. Comparación de valores medidos y simulados de LFC, Coro 1.....	69
Tabla 30. Comparación de valores medidos y simulados de STI, Coro 1.....	70
Tabla 31. Comparación de valores medidos y simulados de Alcons, Coro 1.....	70
Tabla 32. Escalones JND de los diferentes parámetros acústicos, Coro 1.....	72
Tabla 33. Porcentajes de los escalones JND, Coro 1.....	72
Tabla 34. Comparación de valores medidos y simulados de EDT, Coro 2.....	74
Tabla 35. Comparación de valores medidos y simulados de T20, Coro 2.....	75
Tabla 36. Comparación de valores medidos y simulados de T30, Coro 2.....	76
Tabla 37. Comparación de valores medidos y simulados de RT, Coro 2.....	77
Tabla 38. Comparación de valores medidos y simulados de C50, Coro 2.....	78
Tabla 39. Comparación de valores medidos y simulados de C80, Coro 2.....	79

Tabla 40. Comparación de valores medidos y simulados de D50, Coro 2.	80
Tabla 41. Comparación de valores medidos y simulados de Ts, Coro 2.	81
Tabla 42. Comparación de valores medidos y simulados de STI, Coro 2.	82
Tabla 43. Comparación de valores medidos y simulados de Alcons, Coro 2.	82
Tabla 44. Escalones JND de los diferentes parámetros acústicos, Coro 2.	84
Tabla 45. Porcentajes de los escalones JND, Coro 2.	84
Tabla 46. Medidas del Ruido de Fondo.	93
Tabla 47. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro RT en bandas de octava.	96
Tabla 48. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro EDT en bandas de octava.	97
Tabla 49. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro T20 en bandas de octava.	98
Tabla 50. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro T30 en bandas de octava.	99
Tabla 51. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro C50 en bandas de octava.	100
Tabla 52. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro C80 en bandas de octava.	101
Tabla 53. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro D50 en bandas de octava.	102
Tabla 54. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro Ts en bandas de octava.	103
Tabla 55. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro LF en bandas de octava.	104
Tabla 56. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro LFC en bandas de octava.	105
Tabla 57. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro STI.	106
Tabla 58. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro Alcons.	106

Lista de acrónimos

	Significado	Meaning
ALCONS	Pérdida de Inteligibilidad de Consonantes	Percentage Loss of Consonants
C	Claridad	Clarity
D	Definición	Definition
EDT	Tiempo de Reverberación Temprano	Early Decay Time
INR	Relación Impulso a Ruido	Impulse Response to Noise Ratio
JND	Umbral Diferencial	Just Noticeable Difference
LF	Eficiencia Lateral	Lateral Fraction
LFC	Eficiencia Lateral Coseno	Lateral Fraction Cosine
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible	Sustainable Development Goals
RT	Tiempo de Reverberación	Reverberation Time
SNR	Relación Señal a Ruido	Signal to Noise Ratio
SPL	Nivel de Presión Sonora	Sound Pressure Level
STI	Transmisión del Habla	Speech Transmission Index
TS	Tiempo Central	Central Time
UNE	Una Norma Española	A Spanish Standard
EN	Norma Europea	European Norm
ISO	Organización Internacional de Normalización	International Organization Standardization
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional	International Electrotechnical Commission

Índice de contenidos

Agradecimientos	iii
Resumen	v
Abstract	vii
Índice de figuras	ix
Índice de Tablas.....	xiii
Lista de acrónimos.....	xv
1. Introducción.....	1
2. Objetivos.....	3
3. Contexto Histórico.....	5
4. Introducción Teórica.....	7
4.1 Teorías Acústicas	7
4.2 Respuesta al impulso.....	7
4.3 Parámetros Acústicos.....	8
4.3.1 Parámetros temporales.....	8
4.3.2 Parámetros Energéticos	9
4.3.3 Parámetros espaciales.....	10
4.3.4 Parámetros de inteligibilidad.....	11
4.3.5 Escalones JND.....	11
5. Obtención de las Medidas <i>In situ</i>	17
5.1 Norma UNE-EN ISO 3382-1	17
5.2 Instrumentación	18
5.3 Procedimiento de Medida.....	21
6. Procesado de los Datos Medidos	25
7. Diseño 3D del Modelo	43
8. Configuración Inicial del Modelo en EASE.....	49
9. Validación del Modelo en EASE.....	51
9.1 Ajuste del Tiempo de Reverberación	51
9.2 Ajuste de los Parámetros Acústicos	53
9.3 Estudio de los Resultados.....	57
10. Impacto del Proyecto.....	85
11. Presupuesto	87
12. Conclusiones	89
13. Referencias	91

Anexo I: Ruido de fondo	93
Anexo II: Estudio Acústico del Teatro en Octavas	95

1. Introducción

Este documento describe en detalle el proceso completo de un proyecto final de grado centrado en el campo de la acústica arquitectónica, dentro del Grado en Ingeniería de Sonido e Imagen.

En este proyecto se realiza un análisis acústico de la Sala de Ensayo de Coro del Teatro Real de Madrid. El objetivo es obtener una simulación 3D de esta misma sala que se pueda utilizar en EASE, un programa de análisis acústico. La acústica en un recinto de espectáculos es un factor crucial a considerar, ya que de ella depende la calidad de la experiencia auditiva de los espectadores durante la actuación.

Tras la finalización de este proyecto se podrá simular la respuesta acústica de la sala a diferentes sonidos y realizar estudios acústicos de la sala sin necesidad de acudir al recinto. Esto permitirá un uso óptimo de la sala, ya que facilita el estudio de que condiciones cambiar según los parámetros que se desea mejorar.

Para llegar a este fin, es necesario medir diferentes parámetros acústicos de la sala. También es necesario procesar estos datos para obtener resultados válidos y que reflejen correctamente el comportamiento de la sala.

Para ello, se crea un modelo 3D de la sala, teniendo en cuenta tanto sus dimensiones como los materiales que la componen. Y se realizan simulaciones en EASE para ajustar la absorción de estos materiales, así como una simulación final para observar los resultados obtenidos en la simulación en EASE.

El desarrollo de este proceso se describe a lo largo de este documento que se encuentra dividido en 10 apartados. Donde se describen, también, los conceptos utilizados en lo largo del proyecto y los orígenes del Teatro Real de Madrid. Para finalizar, se presentan las conclusiones y resultados obtenidos.

2. Objetivos

El propósito de este proyecto es crear un modelo geométrico válido que reproduzca el comportamiento acústico de Sala de Ensayo de Coro del Teatro Real en Madrid. Para ello, se han seguido diferentes pasos, los cuales se desarrollan a lo largo de este informe.

A continuación, se enumeran los objetivos que se han seguido en la realización de este proyecto, para lograr el resultado final deseado.

- En primer lugar, se procede con la selección del teatro, estableciendo contacto y solicitando los permisos necesarios para llevar a cabo las mediciones. Posteriormente, se realiza una visita al teatro, en la cual se realizan las mediciones *in situ* de los parámetros acústicos, siguiendo la Norma UNE-EN ISO 3382-1 [1], y utilizando el software DIRAC para la adquisición de datos.
- Una vez completados estos pasos, se procesan los datos obtenidos en las mediciones. Estos datos se filtran para obtener resultados precisos y dentro de los límites deseados.
- Se realiza el diseño de un modelo geométrico, basado en las medidas del recinto. A partir de este diseño se crea el modelo 3D de la sala utilizando el software Sketch Up. Este modelo debe mantener las proporciones reales de la sala, aunque simplificando detalles para ajustarse al proceso en el programa de acústica.
- Con el modelo 3D del recinto finalizado, este se importa al software de simulación acústica EASE. En este software, se verifica que el modelo está completamente cerrado, se incluye la absorción de los materiales y se simula el comportamiento acústico de la sala, tomando como referencia los datos procesados de las mediciones *in situ*. Para ajustar los parámetros acústicos de la sala modelada a la realidad, se tienen en cuenta los materiales presentes en el recinto.
- Se realiza la validación acústica, comparando los datos obtenidos y procesados en estas simulaciones con los resultados de las mediciones *in situ* del teatro.
- Finalmente, se redacta la memoria del proyecto, la cual documenta todo el proceso, así como los datos y resultados obtenidos tras la creación del modelo y la simulación acústica. Y se añade esta sala a una base de datos formada por modelos acústicos de diferentes salas.

3. Contexto Histórico

En este apartado se explica en resumen la historia del Teatro Real para entender mejor las características de este proyecto.

El Teatro Real es una institución de prestigio internacional, es también la ópera nacional de referencia en España, y la referencia en las artes escénicas y musicales. La característica más importante de este teatro es la caja escénica. Esta caja permite cambios complejos de decoración escénica mediante sus 18 plataformas articuladas, que permiten múltiples combinaciones en el escenario y en el foso de la orquesta.

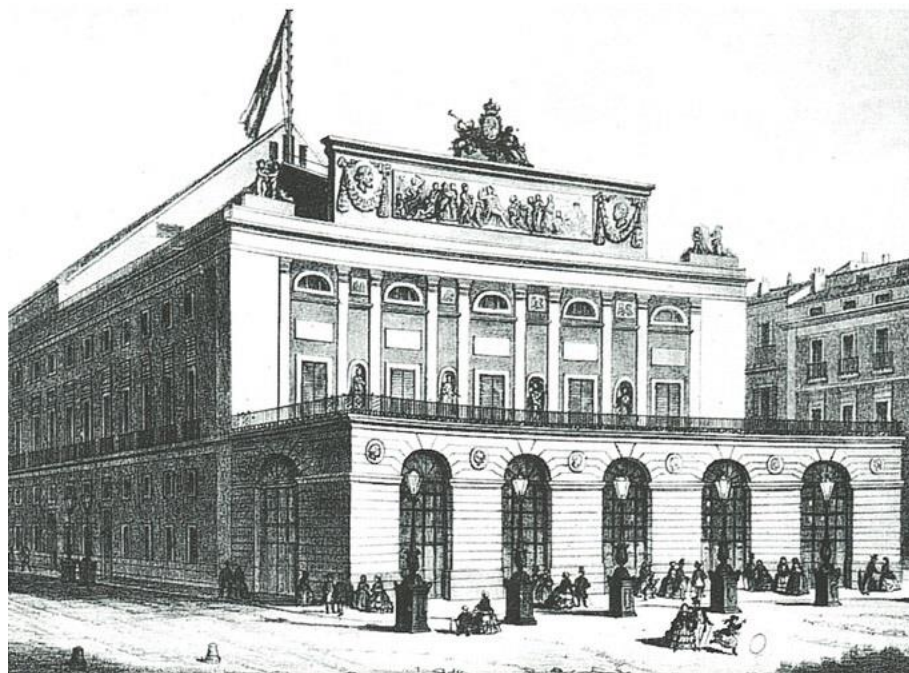


Figura 1. Imagen del origen del Teatro Real de Madrid.

Los orígenes del actual ubicación del Teatro Real se remontan a 1738, cuando se inauguró el Teatro Real de Caños del Peral. Pero no fue hasta 1818, durante el reinado del rey Fernando VII, cuando en ese mismo local se dieron comienzo las obras de construcción del Teatro Real.

Tras extensos periodos con interrupciones, estas obras finalizaron en 1850, durante el reinado de Isabel II. En octubre de 1925, el teatro se cerró temporalmente debido a un hundimiento y se iniciaron unas obras de reconstrucción y ampliación que duraron 41 años.

Se abrió al público en 1966 como auditorio y sede del Real Conservatorio Superior de Música y Escuela de Arte Dramático. Posteriormente, en enero de 1991 empezaron las obras de rehabilitación como teatro de ópera.

Finalmente, el 11 de octubre de 1997, se reabre el Teatro Real como teatro de ópera, como lo conocemos actualmente, según se aprecia en la Figura 2.[2]



Figura 2. Imagen del Teatro Real de Madrid en 2024.

El Teatro Real consta de varias salas. Destaca la Sala Principal donde se encuentra la caja escénica, pero también cuenta con salas de dependencias, así como varias salas de ensayo.

Este proyecto se centra en el estudio de la Sala de Ensayo de Coro, la cual se puede apreciar en la Figura 3. Dicha sala se encuentra situada en la séptima planta del teatro y consta de una plataforma en forma de herradura con cuatro gradas. En el centro se encuentra la plataforma del director.

Esta sala es obra del arquitecto González-Valcárcel, y pasó a formar parte del Teatro Real tras las obras de ampliación que se llevaron a cabo en 1925, con motivo del hundimiento mencionado anteriormente.

Las paredes laterales de la sala no son paralelas entre sí para evitar de esta forma la reflexión del sonido. Puesto que, cuando las paredes son paralelas, el sonido tiende a rebotar de un lado a otro de manera continua, lo que resulta en reforzamiento de frecuencias, pudiendo dar lugar a problemas de calidad acústica.

Las paredes delantera y trasera de la grada están revestidas con estructuras de madera perforadas que contienen material absorbente. Esto mejora la absorción de la sala y evita reflexiones no deseadas.

La Sala de Ensayo de Coro tiene capacidad para 250 personas y es un espacio imprescindible para la preparación de las óperas y obras musicales que se representan en este prestigioso teatro, contribuyendo significativamente a la excelencia artística que caracteriza al Teatro Real de Madrid.



Figura 3. Imagen de la Sala de Ensayo de Coro.

4. Introducción Teórica

En este apartado se presentan los conceptos utilizados a lo largo de este proyecto. Se explican las medidas necesarias para definir las características acústicas de una sala de conciertos, así como otros conceptos relevantes para la comprensión del proyecto. También se presentan las aproximaciones acústicas utilizadas para los cálculos.

4.1 Aproximaciones Acústicas

Para estudiar la propagación de ondas sonoras pueden aplicarse diferentes aproximaciones acústicas. En este proyecto se utilizan la acústica estadística y la acústica geométrica.

La **acústica estadística** se emplea para determinar los parámetros acústicos. Su cálculo es más sencillo en comparación con la acústica geométrica.

Para aplicar la acústica estadística se requiere una fuente omnidireccional que emita en todas las direcciones. Esta metodología considera el campo sonoro como difuso, lo que significa que la energía es uniforme en cada punto del recinto y es la suma de todas las energías de las ondas incidentes. [3]

El análisis de las reflexiones se aborda estadísticamente, donde el valor de su energía se obtiene promediando todos los rayos que alcanzan el punto, y se supone que las fases de las ondas que llegan siguen una distribución aleatoria. En EASE el cálculo según la acústica estadística se realiza mediante de Standard Mapping.

La **acústica geométrica** estudia la trayectoria de los rayos. En lugar de considerar las ondas sonoras como fenómenos ondulatorios complejos, utiliza la aproximación de rayos acústicos. Estos rayos representan la dirección y la velocidad de propagación de la energía sonora. Es más fiable que la acústica estadística debido a su complejidad.

La acústica geométrica se centra en el estudio de la reflexión y la difracción de los rayos sonoros cuando chocan contra obstáculos o superficies. Se basa en la ley de la reflexión y en principios geométricos para predecir cómo se comportarán los rayos en estas situaciones, teniendo en cuenta las propiedades absorbentes de los materiales de acondicionamiento. [4]

Una de las ventajas de la acústica geométrica es que permite realizar cálculos más eficientes en comparación con modelos de ondas más complejos. Sin embargo, tiene un mayor coste computacional. En EASE, el cálculo según la acústica geométrica se realiza a través de AURA.

Este método resulta beneficioso para identificar y corregir características de reflexión acústica desfavorables. En este proyecto, se emplea al seleccionar materiales construcción específicos para garantizar que las superficies del espacio tengan una absorción adecuada.

4.2 Respuesta al impulso

La respuesta al impulso es el comportamiento de una sala en respuesta a un impulso ideal, es decir, un impulso de Dirac. Un impulso de Dirac se utiliza para describir un estímulo instantáneo, de amplitud infinita y duración infinitesimal. En la práctica, es imposible tener

una señal física que sea un verdadero impulso de Dirac, ya que tendría una amplitud infinita y requeriría un ancho de banda infinito. Sin embargo, se utiliza una aproximación a este impulso para la evaluación de las características acústicas de una sala.

La respuesta al impulso contiene toda la información de la sala en la posición de medición. Para diferentes posiciones del micrófono o de la fuente sonora se obtendrán respuestas al impulso distintas. Entonces, para adquirir los parámetros que caracterizan el recinto, se registran las respuestas al impulso en distintas posiciones de la fuente y del micrófono para hacer el promedio de dichas características en todo el recinto.

En este proyecto se utiliza el método de la respuesta impulsiva integrada, que permite calcular una aproximación a la respuesta al impulso de Dirac sumando las contribuciones de la respuesta al impulso a lo largo del tiempo.

4.3 Parámetros Acústicos

Se pueden utilizar diferentes parámetros para definir las características acústicas de una sala, en este proyecto se obtienen diferentes parámetros acústicos para conseguir una imagen más completa de las condiciones acústicas de la sala. [5]

4.3.1 Parámetros temporales

El **tiempo de reverberación** es una descripción fundamental del carácter acústico de una sala, que varía con la frecuencia. Este parámetro se mide en segundos y se define como la duración requerida para que la densidad de la energía acústica media en un recinto decrezca en 60 dB una vez que la emisión de la fuente ha cesado. Entonces, cuanto más absorbentes sean las superficies del recinto, menor será el tiempo de reverberación.

Para lograr una caída del nivel de la señal de 60 dB se necesita una gran cantidad de potencia, lo que dificulta su aplicación a la práctica. Por lo tanto, para calcular el tiempo de reverberación se calculan los valores T30 o T20, la caída de energía de 30 dB o 20 dB respectivamente, y se extrapolan para obtener el valor del tiempo de reverberación. Según la norma, la pendiente que se debe elegir para la determinación del tiempo de reverberación debe estar comprendida entre los niveles -5 dB a -35 dB, para T30, y -5 dB a -25 dB, para T20, del proceso de decaimiento del sonido.

Los valores aceptables de tiempo de reverberación para salas de espectáculos oscilan entre 1 y 3 segundos, para las frecuencias de 500 a 1000 Hz, dependiendo de la función del espacio y las preferencias específicas.

Una de las fórmulas más utilizadas para calcular el tiempo de reverberación es la **fórmula de Sabine**. Tal y como se aprecia en la Ecuación 1. Esta ecuación se basa en la relación entre la absorción del material en el espacio y el volumen del recinto.

$$RT [s] = \frac{0,16 V}{S \bar{\alpha}} \quad (1)$$

Siendo V el volumen de la sala, S la superficie de la sala y $\bar{\alpha}$ el coeficiente de absorción sonora medio, que se obtiene como enseñado en la Ecuación 2.

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_k \cdot S_k}{\sum S_k} \quad (2)$$

Donde α_k es el coeficiente de absorción de la superficie k y S_k es el área de dicha superficie.

La **fórmula de Eyring** puede proporcionar resultados más precisos en situaciones específicas, ya que considera más factores. Esta fórmula, representada en la Ecuación 3, ofrece una aproximación más completa que la fórmula de Sabine, especialmente en espacios con geometrías más complejas.

$$RT [s] = \frac{0,16 V}{-S \cdot \ln(1-\bar{\alpha})} \quad (3)$$

Otro método que puede utilizarse para calcular el tiempo de reverberación es el **método de Schroeder**. Se utiliza para obtener información detallada sobre la respuesta acústica de un recinto.

El **tiempo de reverberación inicial**, EDT, al igual que el tiempo de reverberación, se evalúa a partir de la pendiente de las curvas de respuesta impulsiva integrada. La pendiente se determina a través de los primeros 10 dB de decrecimiento, es decir del 0 dB a 10 dB, extrapolando para obtener el valor para una caída de 60 dB.

El tiempo de reverberación inicial se distingue del tiempo de reverberación, porque el primero se caracteriza por el cálculo del tiempo de reverberación de las primeras reflexiones del recinto. Entonces el EDT indica la reverberación percibida.

4.3.2 Parámetros Energéticos

La **definición**, D o D_{50} , indica la relación entre la energía precoz y la energía total para los 50 ms iniciales, en valores entre el 40 % y el 60%.

Un valor alto de definición indica que la energía reflejada que se produce en los primeros 50 ms es una gran parte de la energía total, es decir, que gran parte de la energía llega en los 50 ms iniciales. Esto resulta en una sala más preparada para expresión hablada.

Para un recinto dedicado a conciertos se buscan valores de definición menores que 50 %. En la Ecuación 4 se puede observar como se calcula la definición de una sala.

$$D_{50} = \left| \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \right| [-] \quad (4)$$

Siendo $p(t)$ el valor de la presión sonora instantánea en el punto receptor producido por un sonido impulsivo emitido desde una fuente sonora.

Existen diferentes medidas de claridad, siendo una de ellas **claridad de la voz**, o C_{50} .

La claridad de la voz se cuantifica a través de la relación entre la energía precoz y la energía tardía, en este caso la energía precoz se considera la energía existente hasta los 50 ms y la energía tardía, toda la que llega después. La Ecuación 6 indica la sonoridad del lenguaje, donde $p(t)$ es la presión acústica instantánea de la respuesta impulsiva en la posición del receptor, y debe tener valores mayores que -1,5 dB.

$$C_{50} = 10 \log \left| \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{50ms}^{\infty} p^2(t) dt} \right| [dB] \quad (5)$$

También se puede calcular la **claridad musical**, C80, que es similar a la claridad de la voz pero con un tiempo de referencia de 80 ms. La claridad musical informa de la cantidad de energía sonora inmediata producida dentro de los primeros 80 ms respecto a la energía sonora tardía que producida después de 80 ms. Tal y como se aprecia en la Ecuación 5, donde $p(t)$ es la presión acústica instantánea de la respuesta impulsiva en la posición del receptor.

$$C_{80} = 10 \log \left| \frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt} \right| [dB] \quad (6)$$

Esta expresión indica la capacidad de distinguir los diferentes elementos de una composición musical. Así, si C80 es alto, significa que la energía sonora inmediata es muy superior a la tardía, lo que resulta en un sonido muy nítido. Según la norma para sala de espectáculos se deben obtener valores entre -5 y 5 dB para las frecuencias de 500 a 1000 Hz.

El **tiempo central**, T_s , es el tiempo que tarda la curva de decaimiento energético entre el origen y el centro de gravedad de la respuesta impulsiva cuadrática. El valor máximo recomendado son 140 ms y refleja la nitidez de la sala. Se calcula según la Ecuación 7.

$$T_s = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} [ms] \quad (7)$$

4.3.3 Parámetros espaciales

Estos parámetros espaciales se obtienen a partir del micrófono bidireccional y ofrecen información acerca de la espacialidad de la sala a partir de las reflexiones laterales que se producen en el recinto.

La **energía lateral precoz**, LF, se refiere a los componentes sonoros que llegan a los oyentes desde direcciones laterales antes de que se produzca la llegada directa del sonido desde la fuente sonora principal.

Se mide la respuesta impulsiva en los 80 ms iniciales de un micrófono omnidireccional y de un micrófono bi-direccional de respuesta en ocho y se aplica la siguiente Ecuación 8.

El micrófono bidireccional se coloca con el cero apuntando para la dirección de la fuente, ya que el objetivo es que este micrófono capte la energía lateral.

Como alternativa, se puede calcular LFC, Ecuación 9, para obtener las fracciones de energía lateral. Este parámetro se considera subjetivamente más preciso porque las contribuciones varían únicamente con el coseno del ángulo.

$$LF = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_L^2(t) dt}{\int_0^{80ms} p^2(t) dt} [-] \quad (8)$$

$$LFC = \frac{\int_{5ms}^{80ms} |p_L(t) \cdot p(t)| dt}{\int_0^{80ms} p^2(t) dt} [-] \quad (9)$$

Donde $p(t)$ es el valor de la presión sonora instantánea en el punto receptor captado por el micrófono omnidireccional y $p_L(t)$ es el valor de la presión sonora instantánea en el punto receptor captado por el micrófono bidireccional

4.3.4 Parámetros de inteligibilidad

El **STI** (Speech Transmission Index) es uno de los parámetros utilizados para medir la inteligibilidad. Este parámetro evalúa la pérdida de modulación de la intensidad acústica. Los valores de STI se clasifican según la Tabla 1.

Tabla 1. Tabla de valoración del criterio STI.

Valor STI	Valoración
0,00 – 0,30	Malo
0,30 – 0,45	Pobre
0,45 – 0,60	Regular
0,60 – 0,75	Bueno
0,75 – 1,00	Excelente

Otro de los parámetros utilizados para la clasificación de la inteligibilidad es el **AlCons** o pérdida de articulación de consonantes. El AlCons evalúa el porcentaje de consonantes no entendidas entre todas las consonantes que se han transmitido, según la Ecuación 10.

Los valores de AlCons se evalúan conforme la Tabla 2.

$$AlCons [\%] = \frac{N^{\circ} \text{ de consonantes no entendidas}}{N^{\circ} \text{ de consonantes emitidas}} \times 100 \quad (10)$$

Tabla 2. Tabla de valoración del criterio Alcons%.

Valor Alcons [%]	Valoración
0 – 3	Excelente
5 – 7	Bueno
7 – 15	Regular
15 – 33	Pobre
33 – 100	Inaceptable

4.3.5 Métrica JND

Para comparar los resultados simulados con los medidos *in situ* se emplea el índice JND, (Just Noticeable Difference o umbral diferencial). Este índice señala la “distancia” entre dos medidas, teniendo en consideración la desviación estándar de dichas medidas, y se utiliza para

expresar la percepción de un cambio en una magnitud específica. La desviación se expresa en escalones. El cálculo de cada escalón varía según el parámetro en cuestión. En la Figura 4 se pueden observar los diferentes escalones JND clasificados según colores.

Si la diferencia existente entre los parámetros medidos y los simulados no pasa del primer escalón, la diferencia entre ambos valores no será notable en los resultados finales. Si se está entre los escalones 2-5, la diferencia es algo perceptible, pero se considera aceptable. Si el valor del escalón JND alcanza un valor mayor a 6, la desviación entre el valor objetivo y el simulado es muy grande y no es considerada como un resultado válido. A continuación, se explica como se calculan los escalones para los parámetros explicados arriba.

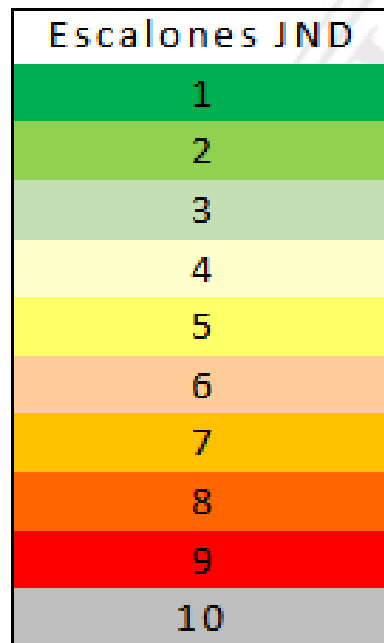


Figura 4. Formato de los escalones JND.

Para los parámetros temporales, RT, EDT, T20 y T30, la forma de obtener el escalón JND es la misma. Se calcula el valor porcentual del valor medido respecto del simulado según la Ecuación 11.

Cada escalón se corresponde con un intervalo del 5 % del valor obtenido. Si la diferencia entre ambos valores está entre el 0 % y el 5 % se corresponde con el escalón 1, si está en entre el 5 % y el 10 % con el escalón 2, etc.

A partir del resultado porcentual, se halla el valor del escalón dividiendo el resultado entre 5 y redondeando al entero superior, Ecuación 12.

$$JND [\%] = \frac{|Valor\ medido - Valor\ simulado|}{Valor\ medido} \cdot 100 \quad (11)$$

$$Escalón_{JND} = \frac{JND [\%]}{5} \quad (12)$$

El escalón JND para C50 y C80 se obtiene según la Ecuación 13, que representa una comparación entre los valores medidos con los simulados. El resultado obtenido se redondea

al entero superior, y nos indica el valor del escalón. Cada 1 dB se corresponde con 1 escalón, como se observa en la Ecuación 14. Por lo que, si la diferencia entre los valores está entre 0 y 1 pertenece al escalón 1, entre 1 y 2 al escalón 2, etc.

$$JND [dB] = |Valor medido - Valor simulado| \quad (13)$$

$$Escalón_{JND} = \frac{JND [dB]}{1 dB} \quad (14)$$

El escalón JND para D50, LF y LFC se obtiene también como una comparación entre los valores medidos con los simulados, y se redondea este valor al número entero superior, tal y como se aprecia en la Ecuación 15. Para estos dos parámetros, el escalón JND se corresponde con un intervalo de 0,05 unidades, estando el primer escalón entre 0 y 0,05, el segundo entre 0,05 y 0,1, etc. Para obtener el valor del escalón JND se divide el valor obtenido de la comparación por 0,05, según la Ecuación 16.

$$JND [-] = |Valor medido - Valor simulado| \quad (15)$$

$$Escalón_{JND} = \frac{JND [-]}{0,05} \quad (16)$$

El escalón JND para el tiempo central T_s se obtiene como una comparación entre los valores medidos con los simulados, redondeando el valor al entero superior, Ecuación 17. El escalón JND de este parámetro se corresponde con un intervalo de 10 ms en la diferencia entre los valores medido y simulado, estando el primer escalón entre 0 y 10 ms, el segundo entre 10 y 20, etc. Entonces, según se aprecia en la Ecuación 18, se divide el valor obtenido de la comparación por 10 ms.

$$JND [ms] = |Valor medido - Valor simulado| \quad (17)$$

$$Escalón_{JND} = \frac{JND [ms]}{10 [ms]} \quad (18)$$

El escalón JND para el STI se obtiene como una comparación entre los valores medidos con los simulados, y se redondea este valor al entero superior, como se representa en la Ecuación 19. El parámetro STI presenta un escalón cada intervalo de 0,03 unidades en la diferencia entre el valor medido y simulado, estando entre 0 y 0,03 el escalón 1; entre 0,03 y 0,06 el escalón 2, etc. Para calcular el valor del escalón se utiliza la Ecuación 20.

$$JND [-] = |Valor medido - Valor simulado| \quad (19)$$

$$Escalón_{JND} = \frac{JND [-]}{0,03} \quad (20)$$

El escalón JND para AICons [%] se obtiene como una comparación entre los valores medidos con los simulados, y se redondea este valor al entero superior, Ecuación 21.

El parámetro AlCons presenta un escalón cada intervalo 2 unidades porcentuales en la diferencia entre el valor medido y el simulado, se calcula a través de la Ecuación 22. Por lo tanto, el primer escalón esta entre 0 y 2, el segundo entre 2 y 4, etc.

$$JND [-] = |\text{Valor medido} - \text{Valor simulado}| \quad (21)$$

$$\text{Escalón}_{JND} = \frac{JND [-]}{2} \quad (22)$$

5. Obtención de las Medidas *In situ*

En este apartado se va a analizar en detalle la Norma UNE-EN ISO 3382-1, y las medidas necesarias a tomar para el análisis acústico de la sala de ensayo de coro del Teatro Real. Estas medidas se utilizarán posteriormente para la comparación con la simulación realizada en el programa EASE.

5.1 Norma UNE-EN ISO 3382-1

La Norma ISO 3382 establece un método para obtener tiempos de reverberación a partir de respuestas impulsivas y del ruido interrumpido. Además, presenta los conceptos y detalles de los procedimientos de medición de algunas mediciones más recientes. El objetivo es poder comparar las mediciones de los tiempos de reverberación con mayor precisión y llegar a un consenso con respecto al uso de métodos de medición.

Para realizar las mediciones se debe empezar determinando las condiciones regulables que hacen variar las características acústicas del recinto. Se mide la temperatura y la humedad relativa del aire del recinto con una precisión de ± 1 °C y ± 5 %, respectivamente.

Además, es necesario indicar el estado de ocupación del recinto y la presencia de elementos variables como mobiliario.

La norma define tres estados de ocupación: estado de inocupación, estado tipo estudio y estado de ocupación. En el estado de inocupación, el recinto se encuentra preparado para ser utilizado, pero sin personas presentes. En el estado tipo estudio la sala se encuentra ocupada únicamente por los músicos u oradores, sin el público. Por último, el estado de ocupación es cuando entre el 80 % y el 100 % de los asientos del recinto están ocupados. La ocupación influye en el valor del tiempo de reverberación, entonces es importante determinar el estado de ocupación del recinto.

En cuanto a la instrumentación indicada por la norma, se recomienda que la fuente sea lo más omnidireccional posible, con un nivel de mínimo 45 dB por encima del nivel de ruido de fondo en la banda de frecuencias correspondiente.

Para detectar la presión acústica se utilizarán micrófonos omnidireccionales. Estos deberán cumplir los requisitos de un sonómetro de tipo 1, de acuerdo con la Norma IEC 61672-1 [6]. Los filtros de octava o de un tercio de octava también deben cumplir con la Norma IEC 61260. El micrófono debe ser lo más pequeño posible y tener un diámetro de diafragma máximo de 13 mm.

La fuente se coloca en las posiciones en las que generalmente se situarían las fuentes sonoras naturales en el recinto, es decir, los músicos o los oradores. Deben utilizarse al menos dos posiciones de la fuente y la altura del centro acústico de la misma debe situarse a 1,5 m por encima del suelo. La distancia mínima entre la fuente y el micrófono debe ser también de 1,5 m, para evitar una influencia demasiado fuerte del sonido directo.

Las posiciones de micrófono deben colocarse en locales representativos de las posiciones donde se encuentran habitualmente los oyentes, a una altura de aproximadamente 1,2 m por encima del suelo, lo que corresponde a la altura de los oídos del oyente medio sentado en el asiento.

Para medir del tiempo de reverberación, es importante que las posiciones de medición sean representativas de la totalidad del espacio, es decir, que se cubra por igual todo el área del recinto. Las posiciones de micrófono deben de estar alejadas unas de otras al menos una media longitud de onda, esto es, a una distancia de aproximadamente 2 m para el rango de frecuencias utilizadas. Los micrófonos deben colocarse a, al menos, un cuarto de longitud de onda, aproximadamente 1 m, de la superficie reflectante más cercana.

La Norma ISO 3382-1 indica también el procedimiento de medición con dos métodos distintos: el método del ruido interrumpido y el método de respuesta impulsiva integrada. Además, explica como realizar la evaluación de las curvas de decrecimiento y el cálculo de la incertidumbre de medición para cada uno de estos métodos.

5.2 Instrumentación

Para realizar las mediciones *in situ* se han utilizado los materiales indicados a continuación que cumplen las condiciones de la norma indicadas anteriormente.

La fuente sonora utilizada es una fuente omnidireccional AVM DO-12, que tiene el formato de un dodecaedro. Tal y como se aprecia en la Figura 5. En cada cara del dodecaedro se encuentra un altavoz, es decir hay un total de 12 altavoces. La potencia máxima de entrada de 600 W, una impedancia de 10 Ohm y una potencia sonora de emisión de 120 dB con máxima eficiencia entre 80 Hz y 6,3 kHz. Genera un campo sonoro difuso esférico.



Figura 5. Fuente omnidireccional AVM DO-12.

Se han utilizado dos micrófonos de condensador de la marca AKG, uno omnidireccional y otro bidireccional. La cápsula del micrófono omnidireccional es CK 92. Tiene una sensibilidad de 13 mV/Pa. Y cuenta con 77 dBA de relación señal a ruido, una impedancia de 200 Ohm y la respuesta en frecuencia se corresponde con el rango completo de frecuencia audible (20 Hz – 20 kHz). Como se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Micrófono omnidireccional, CK 92.

La cápsula del micrófono bidireccional es CK 94, representado en la Figura 7. Su sensibilidad es de 10 mV/Pa, su relación señal a ruido es de 72 dBA y su impedancia de 200 Ohm. El rango de respuesta en frecuencia va de 20 Hz a 20 kHz.

Las cápsulas se conectan a un preamplificador, AKG SE 300 B, Figura 8. Este tiene una relación señal a ruido de 77 dBA y cuenta con un switch de atenuación y un filtro paso alto. En este proyecto se utiliza en modo respuesta plana.



Figura 7. Micrófono bidireccional, AKG CK 92.



Figura 8. Preamplificador, AKG SE 300 B.

Para realizar el registro de los datos se utilizan los siguientes equipos.

Primero un ordenador portátil ASUS, el cual se utiliza como generador y analizador de señal. Este controla el hardware que guiará todo el procedimiento y contiene el software DIRAC 6.0, desarrollado por Brüel & Kjaer. El software DIRAC 6.0 genera las señales y realiza la integración para obtener la respuesta al impulso a partir de la captación del micrófono. Con este software se obtienen todos los parámetros de estudio para este proyecto.

Segundo, se utiliza una tarjeta de sonido, MOTU Ultra Lite MK3, con una frecuencia de muestreo configurada a 48 kHz. Este dispositivo, que se puede observar en la Figura 9 se conecta al ordenador para entrada y salida de audio, es decir envía la señal de audio al amplificador y recibe la señal de entrada de los micrófonos.



Figura 9. Tarjeta de sonido, MOTU Ultra Lite MK3.

El amplificador de potencia seleccionado para la realización del proyecto es el Crown XLS2002 Drive Core, ilustrado en la Figura 10. Este amplificador cuenta con dos canales de 650W/40hm o un canal de 1300W/80hm si se utiliza el modo bridge.



Figura 10. Amplificador, Crown XLS2002 Drive Core.

En la Figura 11 se puede observar un esquema de las conexiones realizadas para obtener el registro de los datos.

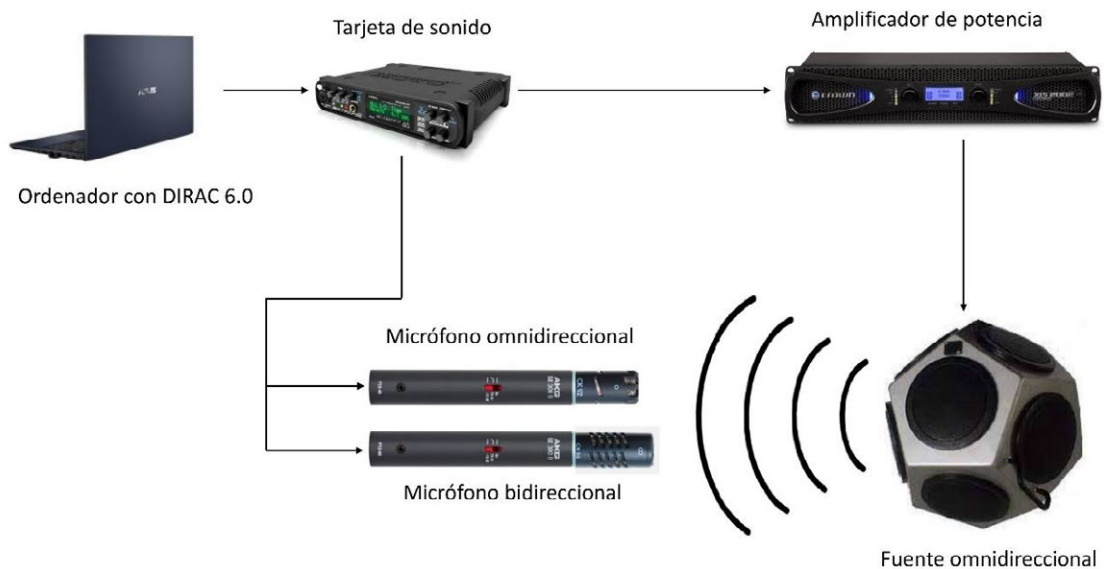


Figura 11. Diagrama de bloques de las medidas realizadas in situ.

Para realizar la medida del ruido de fondo y calibrar las medidas de los micrófonos, se utiliza el sonómetro Brüel & Kjaer 2260. Es un sonómetro de tipo 1 según la norma UNE-EN 61672-1. Tal y como se aprecia en la Figura 12.



Figura 12. Sonómetro Brüel & Kjaer 2260.

5.3 Procedimiento de Medida

A continuación, se describe como se ha realizado la medición de la sala, siguiendo la Norma UNE-EN ISO 3382-1. Se detallan las señales utilizadas, así como los métodos de procesamiento de datos. Además, se exponen las posiciones de la fuente y del micrófono.

Se utiliza el método de la respuesta impulsiva integrada para obtener las curvas de decrecimiento de la sala.

La norma indica que en el método de ingeniería y precisión se debe cubrir el rango de frecuencia de al menos 125 a Hz a 4000 Hz en bandas de octava y de 100 Hz a 5000 Hz en bandas de tercio de octava. Se considera una medida como válida cuando el índice impulso a ruido, INR, es mayor a 35 dB. En la medición se utiliza un barrido sinusoidal entre las frecuencias de 20 Hz a 20 kHz.

Las mediciones se realizaron el día 18 de febrero de 2024. La sala se encontraba en estado de inocupación, es decir, se encontraba mueblada con las sillas del coro y el piano, pero sin personas presentes. El estado de ocupación de la sala se puede observar en la Figura 13.

Cuando se empezó la realización de las medidas, a las 10:35, la temperatura en la sala era de 22,4 °C y la humedad 43,1 %. Al finalizar las medidas, 12:50, la temperatura era de 23,5 °C y la humedad de 40,6 %. Estos datos permiten concluir que las condiciones ambientales no influyen en la realización de las medidas.



Figura 13. Detalle de la ocupación de la Sala de Ensayo de Coro.

Para realizar las medidas se ha dividido la sala en dos posiciones, Coro 1 y Coro 2. En el Coro 1 se ha colocado la fuente en el púlpito y el micrófono en el coro. En el Coro 2 se ha colocado la fuente donde el coro y el micrófono donde los oyentes y el maestro. Así se pueden simular las medidas de como se escucharía el coro.

Se ha utilizado el centro de la sala como referencial. Como se puede observar en la Figura siguiente.

Las posiciones utilizadas para cada una de las sesiones, Coro 1 y Coro 2, se pueden observar en la Figuras 14 y 15, respectivamente. Para las fuentes se ha aplicado la nomenclatura F01 cambiando el numero de la fuente. Para los micrófonos se ha utilizado la nomenclatura M01 cambiando el número de los micrófonos y MST04, en el coro 2, para los micrófonos de escenario, colocados en las posiciones de la fuente. Los detalles de cada posición se pueden encontrar en la Tabla 3.

Tabla 3. Posiciones utilizadas durante las mediciones.

COORDENADAS				
PLANTA	Fuente/Micro	X	Y	Z
Coro 1	F01	8,55	-4,50	0,00
	F02	-1,00	-3,00	0,00
	F03	-5,30	-1,50	0,00
	M01	9,48	-0,61	0,00
	M02	7,63	1,70	0,80
	M03	2,14	-3,88	0,00
	M04	0,70	1,40	0,40
	M05	-3,50	0,30	0,20
Coro 2	M06	-8,13	-4,22	0,00
	F04	-6,90	1,00	0,60
	F05	-3,50	0,30	0,20
	F06	2,45	1,40	0,40
	F07	7,63	1,70	0,80
	M07	0,00	-3,00	0,00
	M08	8,55	-4,50	0,00
	M09	2,14	-3,88	0,00
	M10	-3,55	-3,75	0,00
	M11	-8,13	-4,22	0,00
	MST04	-6,90	1,00	0,60
	MST05	-3,50	0,30	0,20
	MST06	2,45	1,40	0,40
	MST07	7,63	1,70	0,80

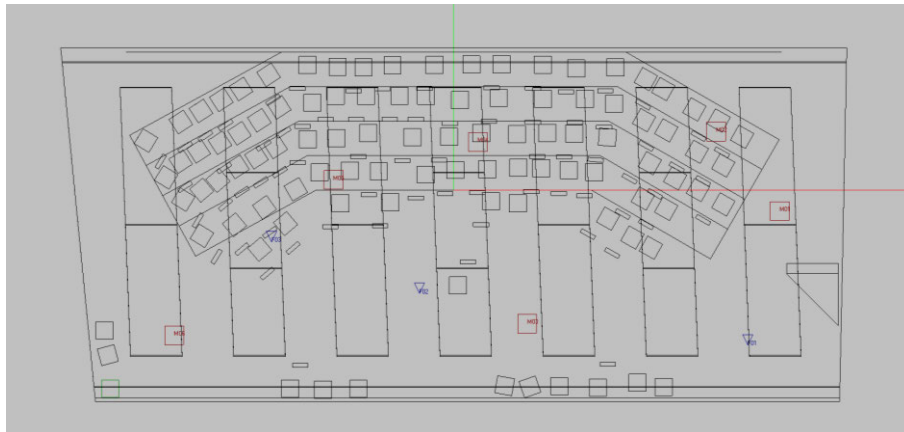


Figura 14. Detalle de la ocupación de la Sala de Ensayo de Coro, Coro 1.

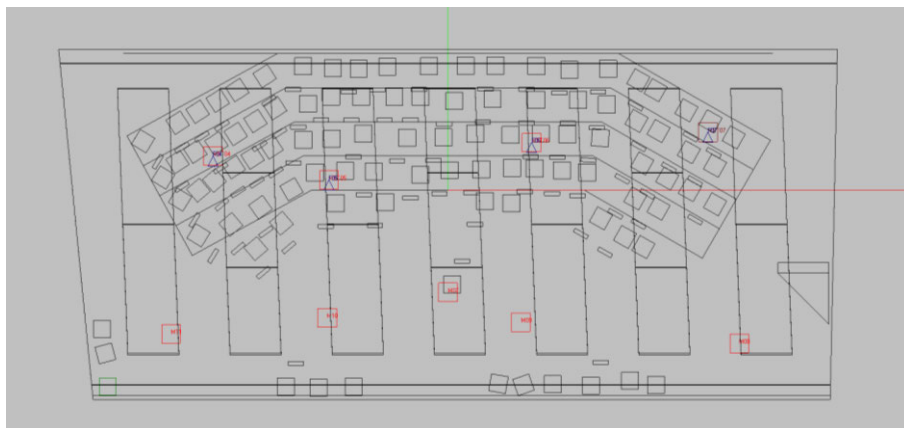


Figura 15. Detalle de la ocupación de la Sala de Ensayo de Coro, Coro 2.

Para empezar las medidas se colocan la fuente y los micrófonos, omnidireccional y bidireccional, en las posiciones iniciales.

A continuación, se reproduce el barrido sinusoidal entre 20 Hz y 20 kHz, generado por el ordenador con el software DIRAC. Se realiza la medida dos veces en cada posición para tener redundancia en caso de error. Una vez hechas las dos medidas, se cambia la fuente a su siguiente posición y se repite el proceso hasta que se han completado todas las posiciones de la fuente por cada una de micrófono.

Tras acabar con una posición de micrófono se pasa a la siguiente, repitiendo el proceso hasta finalizar todas las posiciones de micrófono.

Para cada medida realizada se confirma que el valor de INR es mayor que 35dB, para que se considere una medida valida.

Por último, se toma la medida del ruido de fondo.

6. Procesado de los Datos Medidos

Para la realización del procesamiento de datos se empezó por transferir los datos obtenidos en las medidas para dos ficheros de Excel, uno con las medidas de octavas y otro con las medidas de tercios de octavas.

Se filtran los datos según los parámetros: medida, posición de fuente, posición de micrófono, canal, punto, distancia y zona.

En la Figura 16, se puede observar un ejemplo de como se han organizado los datos para la medida EDT en el fichero de Excel de octavas.

Medida	IT	Fuente	Micror	Frecuenc	Canal	Punto	Distancia R	Zona	Directorio	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
EDT [s]	F01	M01	Octavas	1	F01M01	4,000	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F01M01_1.wav	0,937	0,461	1,211	0,571	0,525	0,870	0,662	0,656	0,454	0,410	
EDT [s]	F01	M01	Octavas	1	F01M01	4,000	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F01M01_2.wav	0,959	0,429	1,256	0,593	0,557	0,872	0,646	0,661	0,455	0,404	
EDT [s]	F01	M02	Octavas	1	F01M02	6,319	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F01M02_1.wav	0,996	0,782	0,915	0,689	0,651	0,831	0,723	0,634	0,483	0,333	
EDT [s]	F01	M02	Octavas	1	F01M02	6,319	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F01M02_2.wav	0,929	0,570	0,911	0,681	0,633	0,858	0,731	0,652	0,478	0,330	
EDT [s]	F01	M03	Octavas	1	F01M03	6,440	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F01M03_1.wav	0,752	0,683	0,831	0,905	0,799	0,882	0,892	0,825	0,750	0,578	
EDT [s]	F01	M03	Octavas	1	F01M03	6,440	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F01M03_2.wav	0,775	0,675	0,802	0,891	0,782	0,891	0,907	0,799	0,736	0,573	
EDT [s]	F01	M04	Octavas	1	F01M04	9,828	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F01M04_1.wav	0,997	1,062	1,028	0,799	0,931	0,818	0,912	0,873	0,600	0,518	
EDT [s]	F01	M04	Octavas	1	F01M04	9,828	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F01M04_2.wav	1,019	1,059	1,040	0,797	0,928	0,822	0,904	0,866	0,596	0,529	
EDT [s]	F01	M05	Octavas	1	F01M05	12,972	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F01M05_1.wav	2,212	1,713	1,359	0,839	0,726	0,747	0,947	0,843	0,667	0,596	
EDT [s]	F01	M05	Octavas	1	F01M05	12,972	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F01M05_2.wav	2,196	1,712	1,421	0,874	0,716	0,770	0,950	0,852	0,673	0,597	
EDT [s]	F01	M06	Octavas	1	F01M06	16,682	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F01M06_1.wav	1,463	1,401	0,619	0,941	1,002	0,854	0,849	0,756	0,699	0,534	
EDT [s]	F01	M06	Octavas	1	F01M06	16,682	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F01M06_2.wav	1,421	1,413	0,622	0,926	0,969	0,842	0,852	0,766	0,721	0,547	
EDT [s]	F02	M01	Octavas	1	F02M01	10,749	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F02M01_1.wav	0,977	0,857	0,496	0,793	0,779	0,954	0,902	0,978	0,690	0,614	
EDT [s]	F02	M01	Octavas	1	F02M01	10,749	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F02M01_2.wav	0,930	0,861	0,488	0,785	0,797	0,935	0,887	0,972	0,693	0,609	
EDT [s]	F02	M02	Octavas	1	F02M02	9,859	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F02M02_1.wav	0,995	0,709	0,859	0,870	0,885	0,921	0,994	0,882	0,659	0,578	
EDT [s]	F02	M02	Octavas	1	F02M02	9,859	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F02M02_2.wav	1,000	0,821	0,857	0,875	0,882	0,919	1,000	0,887	0,670	0,574	
EDT [s]	F02	M03	Octavas	1	F02M03	3,261	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F02M03_1.wav	1,200	1,218	0,986	1,095	0,832	0,786	0,718	0,829	0,654	0,579	
EDT [s]	F02	M03	Octavas	1	F02M03	3,261	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F02M03_2.wav	1,159	1,199	1,006	1,109	0,819	0,765	0,710	0,822	0,655	0,584	
EDT [s]	F02	M04	Octavas	1	F02M04	4,734	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F02M04_1.wav	0,691	1,132	1,153	0,852	0,856	0,781	0,815	0,742	0,541	0,378	
EDT [s]	F02	M04	Octavas	1	F02M04	4,734	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F02M04_2.wav	0,654	1,143	1,200	0,848	0,842	0,775	0,837	0,747	0,535	0,376	
EDT [s]	F02	M05	Octavas	1	F02M05	4,145	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F02M05_1.wav	0,557	1,130	1,371	0,810	0,725	0,737	0,796	0,801	0,560	0,446	
EDT [s]	F02	M05	Octavas	1	F02M05	4,145	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F02M05_2.wav	0,542	1,136	1,377	0,824	0,741	0,746	0,794	0,808	0,559	0,451	
EDT [s]	F02	M06	Octavas	1	F02M06	7,234	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F02M06_1.wav	0,565	0,690	1,015	0,884	0,901	0,950	0,790	0,707	0,611	0,500	
EDT [s]	F02	M06	Octavas	1	F02M06	7,234	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F02M06_2.wav	0,723	0,657	1,013	0,885	0,888	0,948	0,782	0,720	0,613	0,502	
EDT [s]	F03	M01	Octavas	1	F03M01	14,807	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F03M01_1.wav	0,568	1,159	1,127	1,073	1,010	1,044	0,898	0,898	0,775	0,624	
EDT [s]	F03	M01	Octavas	1	F03M01	14,807	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F03M01_2.wav	0,508	1,130	1,064	1,063	1,003	1,046	0,881	0,908	0,781	0,621	
EDT [s]	F03	M02	Octavas	1	F03M02	13,344	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F03M02_1.wav	1,208	1,383	0,670	0,603	1,084	0,953	0,960	0,916	0,727	0,625	
EDT [s]	F03	M02	Octavas	1	F03M02	13,344	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F03M02_2.wav	1,118	1,382	0,683	0,603	1,080	0,963	0,939	0,904	0,721	0,628	
EDT [s]	F03	M03	Octavas	1	F03M03	7,811	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F03M03_1.wav	1,074	1,415	1,059	0,787	0,869	0,792	0,802	0,825	0,707	0,553	
EDT [s]	F03	M03	Octavas	1	F03M03	7,811	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F03M03_2.wav	1,122	1,417	1,060	0,784	0,839	0,790	0,808	0,830	0,697	0,551	
EDT [s]	F03	M04	Octavas	1	F03M04	6,676	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F03M04_1.wav	1,170	0,942	0,784	1,098	0,960	0,904	1,022	0,976	0,688	0,519	
EDT [s]	F03	M04	Octavas	1	F03M04	6,676	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F03M04_2.wav	1,194	0,955	0,795	1,089	0,974	0,915	1,025	0,990	0,692	0,515	
EDT [s]	F03	M05	Octavas	1	F03M05	2,553	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F03M05_1.wav	0,861	0,868	0,947	0,844	0,816	0,810	0,775	0,770	0,566	0,450	
EDT [s]	F03	M05	Octavas	1	F03M05	2,553	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F03M05_2.wav	0,972	0,877	0,946	0,837	0,819	0,816	0,775	0,763	0,557	0,449	
EDT [s]	F03	M06	Octavas	1	F03M06	3,925	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F03M06_1.wav	0,733	0,860	1,040	0,757	0,595	0,585	0,734	0,731	0,515	0,438	
EDT [s]	F03	M06	Octavas	1	F03M06	3,925	Coro 1	C:\Users\AA-01\Desktop\PF6 JIGA\PF6 ROSARIO GONÁALVEZ NUNES\F03M06_2.wav	0,740	0,890	0,986	0,785	0,578	0,558	0,710	0,742	0,531	0,450	

Figura 16. Ejemplo de los datos EDT filtrados en el fichero de Excel de octavas.

Después, se calcula el promedio y la desviación para cada uno de los parámetros obtenidos. A partir de estos valores se obtiene el escalón JND. Para el cálculo de estos valores se utiliza apenas los resultados obtenidos del canal 1, ya que este canal contiene las medidas del micrófono omnidireccional, mientras el canal 2 contiene las medidas del micrófono bidireccional.

En seguida, se filtran los valores obtenidos según su validez, se consideran válidos los valores cuyo el INR sea mayor o igual a 35 dB. Se calcula la máscara INR, esta máscara elimina todos los valores que no cumplan el criterio. Se aplica esta máscara a los diferentes parámetros: EDT, C50, C80, D50, D80, T20, T30, Ts y RT; eliminando así los valores donde el INR es menor que el deseado.

Como se observa en la Figura 17 se rellenan las celdas eliminadas con rojo. Normalmente se eliminan los valores de las frecuencias más bajas y de las más altas, debido a que la fuente sonora utilizada no es capaz de excitar la sala con suficiente energía en estas bandas de frecuencia.

Diseño y validación de un modelo geométrico para el estudio acústico de la Sala de Ensayo del Coro del Teatro Real de Madrid

Medida	Fuente	Micro	Frecuenc	Canal	Punto	Distancia	Zona	Directorio	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	
INR [dB]	F01	M01	Octavas	1	F01M01	4	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F01M01_1.wav	35	51	60	56	54	56	56	56	56	56	48
INR [dB]	F01	M01	Octavas	1	F01M01	4	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F01M01_2.wav	35	53	59	56	54	57	58	59	59	59	49
INR [dB]	F01	M02	Octavas	1	F01M02	6,319	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F01M02_1.wav	49	60	57	55	57	59	59	60	51	51	51
INR [dB]	F01	M02	Octavas	1	F01M02	6,319	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F01M02_2.wav	55	60	56	56	57	59	59	60	51	51	51
INR [dB]	F01	M03	Octavas	1	F01M03	6,44	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F01M03_1.wav	41	54	58	58	58	57	58	57	58	40	40
INR [dB]	F01	M03	Octavas	1	F01M03	6,44	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F01M03_2.wav	38	53	59	58	58	57	58	57	57	40	40
INR [dB]	F01	M04	Octavas	1	F01M04	9,828	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F01M04_1.wav	36	55	61	57	53	57	58	58	59	46	46
INR [dB]	F01	M04	Octavas	1	F01M04	9,828	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F01M04_2.wav	53	60	57	53	57	57	58	58	46	46	46
INR [dB]	F01	M05	Octavas	1	F01M05	12,972	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F01M05_1.wav	47	59	56	53	57	58	58	58	44	44	44
INR [dB]	F01	M05	Octavas	1	F01M05	12,972	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F01M05_2.wav	47	59	56	53	57	58	58	58	44	44	44
INR [dB]	F01	M06	Octavas	1	F01M06	16,682	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F01M06_1.wav	42	61	56	53	57	58	57	57	42	42	42
INR [dB]	F01	M06	Octavas	1	F01M06	16,682	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F01M06_2.wav	42	61	56	53	57	58	57	57	42	42	42
INR [dB]	F02	M01	Octavas	1	F02M01	10,749	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F02M01_1.wav	35	50	60	58	53	57	57	57	43	43	43
INR [dB]	F02	M01	Octavas	1	F02M01	10,749	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F02M01_2.wav	49	60	58	52	57	58	58	59	43	43	43
INR [dB]	F02	M02	Octavas	1	F02M02	9,859	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F02M02_1.wav	36	52	59	57	55	57	57	57	45	45	45
INR [dB]	F02	M02	Octavas	1	F02M02	9,859	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F02M02_2.wav	35	53	59	57	54	57	57	58	45	45	45
INR [dB]	F02	M03	Octavas	1	F02M03	3,261	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F02M03_1.wav	37	55	60	58	58	58	58	59	50	50	50
INR [dB]	F02	M03	Octavas	1	F02M03	3,261	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F02M03_2.wav	37	55	60	58	58	59	58	58	50	50	50
INR [dB]	F02	M04	Octavas	1	F02M04	4,734	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F02M04_1.wav	40	56	60	57	56	58	57	58	49	49	49
INR [dB]	F02	M04	Octavas	1	F02M04	4,734	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F02M04_2.wav	37	55	60	57	56	58	58	58	49	49	49
INR [dB]	F02	M05	Octavas	1	F02M05	4,145	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F02M05_1.wav	35	49	59	56	55	58	56	57	49	49	49
INR [dB]	F02	M05	Octavas	1	F02M05	4,145	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F02M05_2.wav	47	60	55	55	58	57	57	59	49	49	49
INR [dB]	F02	M06	Octavas	1	F02M06	7,234	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F02M06_1.wav	41	60	57	57	58	58	58	59	47	47	47
INR [dB]	F02	M06	Octavas	1	F02M06	7,234	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F02M06_2.wav	39	60	58	57	58	57	57	58	47	47	47
INR [dB]	F03	M01	Octavas	1	F03M01	14,807	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F03M01_1.wav	40	49	59	56	51	56	58	58	40	40	40
INR [dB]	F03	M01	Octavas	1	F03M01	14,807	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F03M01_2.wav	37	45	59	56	51	56	58	58	40	40	40
INR [dB]	F03	M02	Octavas	1	F03M02	13,344	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F03M02_1.wav	42	59	56	50	56	57	57	57	41	41	41
INR [dB]	F03	M02	Octavas	1	F03M02	13,344	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F03M02_2.wav	48	59	56	50	56	57	58	58	42	42	42
INR [dB]	F03	M03	Octavas	1	F03M03	7,811	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F03M03_1.wav	52	61	55	53	58	58	59	59	47	47	47
INR [dB]	F03	M03	Octavas	1	F03M03	7,811	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F03M03_2.wav	51	61	55	54	57	58	59	59	47	47	47
INR [dB]	F03	M04	Octavas	1	F03M04	6,676	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F03M04_1.wav	39	52	61	53	54	56	57	58	48	48	48
INR [dB]	F03	M04	Octavas	1	F03M04	6,676	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F03M04_2.wav	41	61	53	54	56	57	58	59	48	48	48
INR [dB]	F03	M05	Octavas	1	F03M05	2,553	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F03M05_1.wav	41	52	62	57	54	57	56	58	51	51	51
INR [dB]	F03	M05	Octavas	1	F03M05	2,553	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F03M05_2.wav	42	54	62	57	54	57	56	58	52	52	52
INR [dB]	F03	M06	Octavas	1	F03M06	3,925	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F03M06_1.wav	35	52	61	54	56	58	57	57	59	48	48
INR [dB]	F03	M06	Octavas	1	F03M06	3,925	Coro1	C:\Users\AAA-01\Desktop\FPG JJG\A\FPG ROSARIO GONÁHALVEZ NUNES\F03M06_2.wav	35	52	61	54	56	58	58	58	60	48	48

Figura 17. Ejemplo de la máscara INR para los resultados medidos en octavas.

A continuación, se aplica el criterio de Chauvenet a los datos obtenidos. El objetivo de aplicar este criterio es, a través cálculos estadísticos, excluir las medidas que no son representativas del conjunto de resultados obtenidos.

Este criterio asume que la distribución de los datos medidos es de tipo gaussiana. Tal y como se aprecia en la Figura 18. La desviación estándar en una distribución gaussiana representa un intervalo de confianza del 72%.

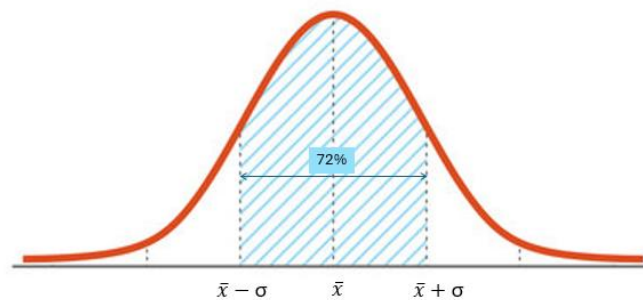


Figura 18. Distribución de Gauss.

El criterio de Chauvenet establece un intervalo de confianza entre el 90 y el 98%, en función del número de muestras, para esto multiplica la desviación estándar, σ , por un valor kn . El valor kn depende del número de muestras existentes y se calcula según la Ecuación 12.

$$K_n = 0,3704 \cdot \ln(n) + 1,06903 \quad (12)$$

Siendo n el número de muestras.

A continuación, se eliminan todas las muestras que se encuentran fuera de este intervalo, según la Ecuación 13.

$$|\bar{X} - X_i| > K_n \cdot \sigma \quad (13)$$

Donde:

\bar{X} : Media de los valores en una determinada banda

X_i : Cada una de las muestras a evaluar

Para esto se calculan el promedio, la desviación típica y, también el valor de kn para cada una de las medidas.

Se aplica este criterio a los nuevos valores obtenidos y se va repitiendo este proceso hasta que todos los valores se encuentren en el intervalo de confianza del 90 al 98%, es decir hasta que se dejen de eliminar valores.

En la Figura 19 se puede ver un ejemplo de EDT después de la aplicación del criterio de Chauvenet, con las celdas eliminadas marcadas a verde.

	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
		0,461	1,211	0,571	0,525	0,870	0,662	0,656	0,464	0,410
0,959		0,429	1,256	0,593	0,557	0,872	0,646	0,661	0,455	0,404
		0,782	0,915	0,689	0,651	0,831	0,723	0,634	0,483	0,333
		0,570	0,911	0,681	0,633	0,858	0,731	0,652	0,478	0,330
0,752		0,683	0,831	0,905	0,799	0,882	0,892	0,825	0,750	0,578
0,775		0,675	0,802	0,891	0,782	0,891	0,907	0,799	0,736	0,573
0,997		1,062	1,028	0,799	0,931	0,818	0,912	0,873	0,600	0,518
		1,059	1,040	0,797	0,928	0,822	0,904	0,866	0,596	0,529
		1,713	1,359	0,829	0,726	0,747	0,947	0,843	0,667	0,596
		1,712	1,421	0,874	0,716	0,770	0,950	0,852	0,673	0,597
		1,401	0,619	0,941	1,002	0,854	0,849	0,756	0,699	0,534
		1,413	0,622	0,926	0,969	0,842	0,852	0,766	0,721	0,547
0,977		0,857	0,496	0,793	0,779	0,954	0,902	0,978	0,690	0,614
		0,861	0,488	0,785	0,797	0,935	0,887	0,972	0,693	0,609
0,995		0,709	0,859	0,870	0,885	0,921	0,994	0,882	0,659	0,578
1,000		0,821	0,857	0,875	0,882	0,919	1,000	0,887	0,670	0,574
1,200		1,218	0,986	1,095	0,832	0,786	0,718	0,829	0,654	0,579
1,159		1,199	1,006	1,109	0,819	0,765	0,710	0,822	0,655	0,584
0,691		1,132	1,153	0,852	0,856	0,781	0,815	0,742	0,541	0,378
0,654		1,143	1,200	0,848	0,842	0,775	0,837	0,747	0,535	0,376
0,557		1,130	1,371	0,810	0,725	0,737	0,796	0,801	0,560	0,446
		1,136	1,377	0,824	0,741	0,746	0,794	0,808	0,559	0,451
		0,690	1,015	0,884	0,901	0,950	0,790	0,707	0,611	0,500
		0,657	1,013	0,885	0,888	0,948	0,782	0,720	0,613	0,502
0,568		1,159	1,127	1,073	1,010	1,044	0,898	0,898	0,775	0,624
0,508		1,130	1,064	1,063	1,003	1,046	0,881	0,908	0,781	0,621
		1,383	0,670	0,603	1,084	0,953	0,960	0,916	0,727	0,625
		1,382	0,683	0,603	1,080	0,963	0,939	0,904	0,721	0,628
		1,415	1,059	0,787	0,869	0,792	0,802	0,825	0,707	0,553
		1,417	1,060	0,784	0,839	0,790	0,808	0,830	0,697	0,551
1,170		0,942	0,784	1,098	0,960	0,904	1,022	0,976	0,688	0,519
		0,955	0,795	1,089	0,974	0,915	1,025	0,990	0,692	0,515
0,861		0,868	0,947	0,844	0,816	0,810	0,775	0,770	0,566	0,450
0,972		0,877	0,946	0,837	0,819	0,816	0,775	0,763	0,557	0,449
0,733		0,860	1,040	0,757	0,595		0,734	0,731	0,515	0,438
0,740		0,890	0,986	0,785	0,578		0,710	0,742	0,531	0,450

Figura 19. Ejemplo de los datos de EDT, después de aplicado el criterio de Chauvenet.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada una de las medidas de promedio, desviación típica y escalón JND, según la frecuencia de los valores medidos en bandas de tercios de octava. Se presentan los valores en un rango de 100 a 10 000 Hz, ya que el análisis en EASE se realiza en este intervalo. Estos resultados serán, posteriormente, utilizados para la comparación con los valores simulados en el modelo realizado en EASE.

En las siguientes tablas y gráficas pueden observar los valores promedios y de desviación típica de los diferentes parámetros acústicos medidos *in situ* en la sala, para el Coro 1, Coro 2 y los valores totales.

EDT

Tabla 4. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro EDT.

	Promedios de los datos por zonas				Desviaciones de los datos por zonas			Escalón JND
	Frecuencias	Coro 1	Coro 2		TOTAL	Coro 1	Coro 2	
100 Hz	0,97	1,09	1,05	0,46	0,36	0,40	8	
125 Hz	1,10	1,10	1,10	0,35	0,30	0,32	6	
160 Hz	0,91	0,93	0,92	0,28	0,31	0,30	7	
200 Hz	0,91	0,91	0,91	0,26	0,30	0,29	7	
250 Hz	0,84	0,90	0,88	0,17	0,22	0,21	5	
315 Hz	0,86	0,92	0,90	0,18	0,20	0,19	5	
400 Hz	0,83	0,88	0,86	0,22	0,15	0,18	5	
500 Hz	0,82	0,82	0,82	0,17	0,17	0,17	5	
630 Hz	0,88	0,91	0,90	0,21	0,21	0,20	5	
800 Hz	0,83	0,89	0,87	0,15	0,11	0,13	3	
1000 Hz	0,91	0,92	0,92	0,12	0,11	0,11	3	
1250 Hz	0,86	0,89	0,88	0,11	0,11	0,11	3	
1600 Hz	0,83	0,91	0,88	0,14	0,12	0,14	4	
2000 Hz	0,86	0,92	0,90	0,12	0,12	0,12	3	
2500 Hz	0,85	0,93	0,90	0,11	0,12	0,12	3	
3150 Hz	0,85	0,91	0,89	0,10	0,12	0,12	3	
4000 Hz	0,83	0,85	0,84	0,10	0,11	0,11	3	
5000 Hz	0,74	0,77	0,76	0,11	0,11	0,11	3	
6300 Hz	0,65	0,67	0,67	0,10	0,11	0,11	4	
8000 Hz	0,58	0,58	0,58	0,08	0,08	0,08	3	
10000 Hz	0,50	0,52	0,51	0,09	0,09	0,09	4	

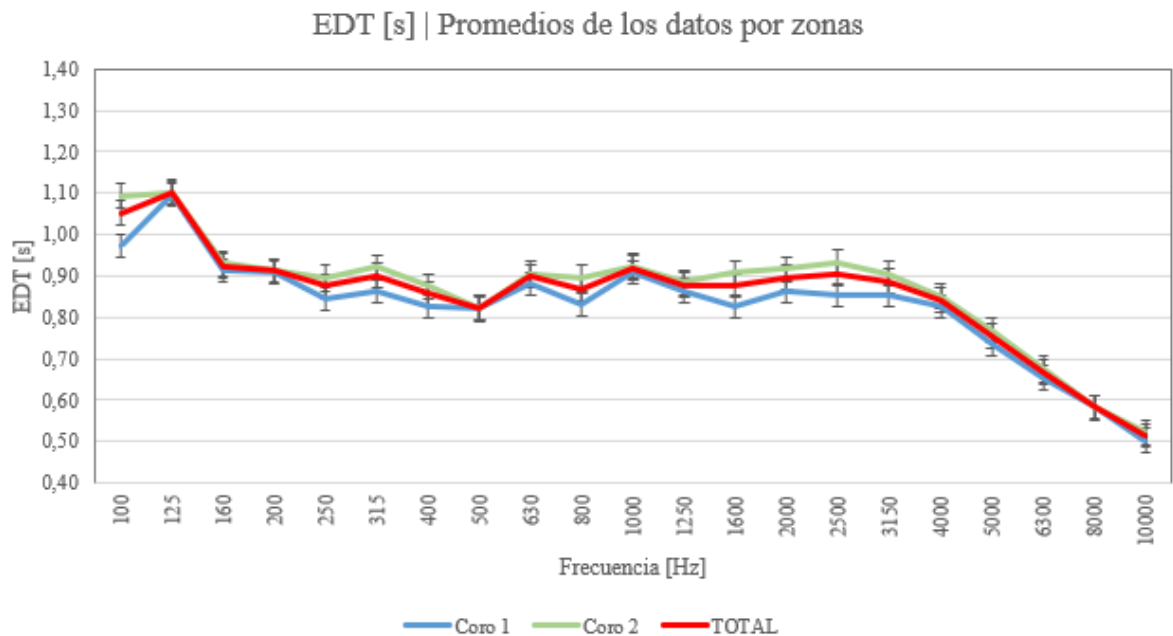


Figura 20. Gráfica de los valores promedios de EDT, por zonas.

T20

Tabla 5. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro T20

Frecuencias	Coro 1			Coro 2			TOTAL			ESCALÓN JND
	Coro 1	Coro 2	TOTAL	Coro 1	Coro 2	TOTAL	Coro 1	Coro 2	TOTAL	
100 Hz	1,23	1,21	1,22	0,20	0,20	0,20	4			
125 Hz	1,19	1,18	1,19	0,13	0,18	0,17	3			
160 Hz	1,14	1,17	1,16	0,14	0,15	0,15	3			
200 Hz	1,08	1,05	1,06	0,11	0,13	0,12	3			
250 Hz	0,94	0,96	0,95	0,13	0,12	0,12	3			
315 Hz	0,87	0,85	0,85	0,10	0,11	0,10	3			
400 Hz	0,85	0,87	0,87	0,06	0,09	0,08	2			
500 Hz	0,87	0,91	0,90	0,10	0,08	0,09	2			
630 Hz	0,92	0,96	0,95	0,07	0,08	0,08	2			
800 Hz	0,97	0,97	0,97	0,06	0,07	0,07	2			
1000 Hz	0,99	0,97	0,98	0,06	0,06	0,06	2			
1250 Hz	0,94	0,96	0,95	0,05	0,07	0,06	2			
1600 Hz	0,95	0,96	0,96	0,05	0,04	0,04	1			
2000 Hz	0,96	0,99	0,98	0,06	0,05	0,05	2			
2500 Hz	0,96	0,95	0,96	0,03	0,04	0,04	1			
3150 Hz	0,93	0,94	0,93	0,03	0,03	0,03	1			
4000 Hz	0,88	0,90	0,89	0,05	0,03	0,04	1			
5000 Hz	0,79	0,79	0,79	0,03	0,03	0,03	1			
6300 Hz	0,70	0,71	0,70	0,04	0,03	0,03	1			
8000 Hz	0,59	0,62	0,61	0,03	0,03	0,03	2			
10000 Hz	0,50	0,52	0,52	0,03	0,03	0,03	2			

T20 [s] | Promedios de los datos por zonas

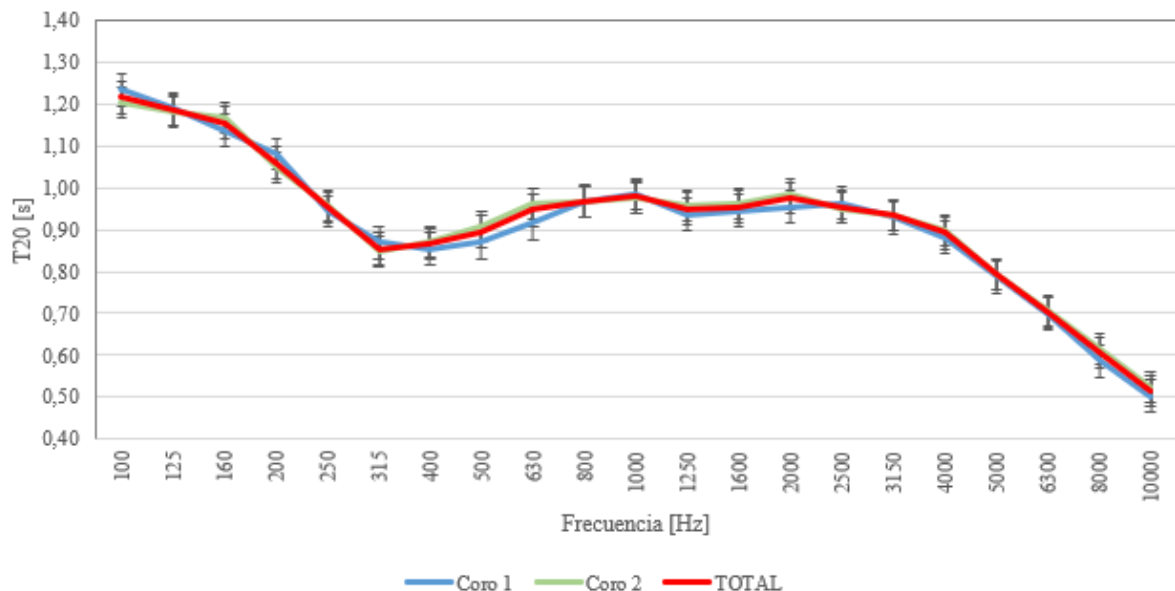


Figura 21. Gráfica de los valores promedios de T20, por zonas.

T30

Tabla 6. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro T30.

	Frecuencias	T30 [s] Promedios de los datos por zonas				T30 [s] Desviaciones de los datos por zonas			ESCALÓN JND
		Coro 1	Coro 2	TOTAL		Coro 1	Coro 2	TOTAL	
	100 Hz	1,46	1,38	1,41		0,22	0,22	0,22	4
	125 Hz	1,30	1,28	1,29		0,14	0,15	0,15	3
	160 Hz	1,25	1,22	1,23		0,11	0,09	0,10	2
	200 Hz	1,07	1,05	1,06		0,07	0,10	0,09	2
	250 Hz	0,93	0,95	0,94		0,08	0,07	0,07	2
	315 Hz	0,86	0,87	0,87		0,08	0,06	0,07	2
	400 Hz	0,87	0,89	0,88		0,06	0,06	0,06	2
	500 Hz	0,88	0,93	0,91		0,05	0,04	0,05	2
	630 Hz	0,95	0,97	0,97		0,04	0,06	0,06	2
	800 Hz	0,96	0,97	0,97		0,05	0,04	0,05	1
	1000 Hz	0,98	0,98	0,98		0,04	0,04	0,04	1
	1250 Hz	0,94	0,97	0,96		0,04	0,05	0,05	1
	1600 Hz	0,98	0,99	0,99		0,04	0,04	0,04	1
	2000 Hz	1,00	1,01	1,01		0,05	0,04	0,04	1
	2500 Hz	1,00	0,99	0,99		0,03	0,03	0,03	1
	3150 Hz	0,95	0,95	0,95		0,02	0,02	0,02	1
	4000 Hz	0,90	0,91	0,91		0,03	0,02	0,03	1
	5000 Hz	0,80	0,81	0,81		0,03	0,02	0,02	1
	6300 Hz	0,71	0,71	0,71		0,02	0,02	0,02	1
	8000 Hz	0,60	0,62	0,61		0,02	0,02	0,02	1
	10000 Hz	0,51	0,53	0,52		0,02	0,02	0,02	1

T30 [s] | Promedios de los datos por zonas

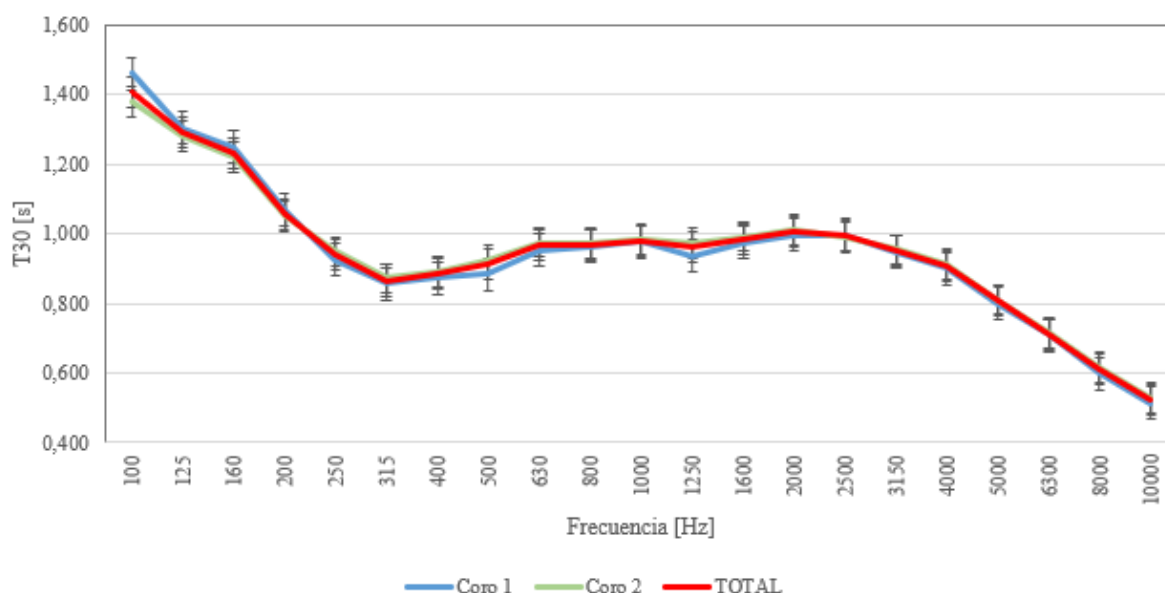


Figura 22. Gráfica de los valores promedios de T30, por zonas.

RT

Tabla 7. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro RT.

	Promedios de los datos por zonas				Desviaciones de los datos por zonas			ESCALÓN JND
	Frecuencias	Coro 1	Coro 2		TOTAL	Coro 1	Coro 2	
100 Hz	1,28	1,25	1,26	0,22	0,21	0,21	4	
125 Hz	1,25	1,19	1,21	0,16	0,18	0,17	3	
160 Hz	1,22	1,20	1,21	0,13	0,10	0,11	2	
200 Hz	1,08	1,06	1,06	0,08	0,10	0,09	2	
250 Hz	0,93	0,95	0,95	0,09	0,09	0,09	2	
315 Hz	0,85	0,86	0,86	0,10	0,09	0,09	3	
400 Hz	0,87	0,88	0,87	0,06	0,06	0,06	2	
500 Hz	0,89	0,92	0,91	0,05	0,05	0,05	2	
630 Hz	0,94	0,98	0,96	0,05	0,07	0,06	2	
800 Hz	0,97	0,97	0,97	0,06	0,05	0,05	2	
1000 Hz	0,98	0,98	0,98	0,04	0,04	0,04	1	
1250 Hz	0,94	0,97	0,96	0,04	0,05	0,05	2	
1600 Hz	0,97	0,99	0,98	0,04	0,04	0,04	1	
2000 Hz	0,98	1,00	0,99	0,05	0,05	0,05	2	
2500 Hz	0,98	0,97	0,97	0,04	0,04	0,04	1	
3150 Hz	0,94	0,94	0,94	0,02	0,03	0,03	1	
4000 Hz	0,90	0,91	0,91	0,03	0,03	0,03	1	
5000 Hz	0,79	0,81	0,80	0,03	0,02	0,02	1	
6300 Hz	0,71	0,72	0,71	0,02	0,02	0,02	1	
8000 Hz	0,60	0,62	0,61	0,02	0,02	0,02	1	
10000 Hz	0,51	0,53	0,52	0,02	0,02	0,02	1	

RT [s] | Promedios de los datos por zonas

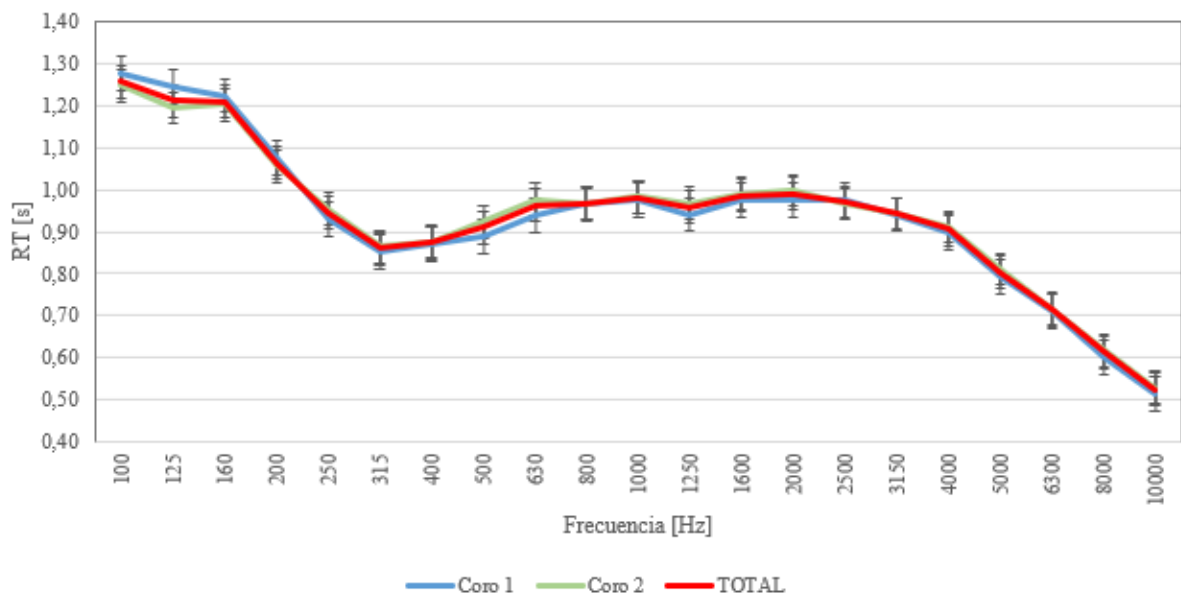


Figura 23. Gráfica de los valores promedios de RT, por zonas.

En la Tabla 4 se pueden observar los valores promedios y de desviación típica de EDT, para el Coro 1, Coro 2 y los valores totales. El valor del escalón JND en la frecuencia de 100, 160 y 200 Hz no se encuentran debajo del valor esperado, es decir menor o igual a 6, siendo que a bajas frecuencias es más complicado tener potencia suficiente para obtener una respuesta con calidad de la sala. Los restantes valores de JND obtenidos están de acorde con el esperado.

Observando la gráfica de la Figura 20, se puede ver el comportamiento de la sala, con menor absorción en baja frecuencia y mayor absorción en alta frecuencia. En las bajas frecuencias, el tiempo de reverberación tiende a ser más elevado debido a que la mayoría de los materiales son poco absorbentes en este rango de frecuencias. También se observa que hay un resonador a 500 Hz, que aumenta la absorción a esta frecuencia, bajando el tiempo de reverberación.

Se puede observar en la gráfica de la Figura 20 que los valores obtenidos en ambas las posiciones, Coro 1 y Coro 2, son similares.

La Tabla 5 muestra los valores medios y la desviación estándar de parámetro T20 para el Coro 1, Coro 2 y el conjunto total. Los valores obtenidos para la JND coinciden con lo esperado.

En la gráfica de la Figura 21 se aprecia que los resultados en las posiciones del Coro 1 y Coro 2 son comparables entre sí. Se puede observar que la gráfica de la Figura 21 tiene la misma forma que la gráfica de los valores de EDT, aunque la primera tenga un mayor rango de valores, especialmente a bajas y altas frecuencias.

El parámetro temporal T30 viene representado por sus valores medios, la desviación estándar y el escalón JND asociado a cada banda de tercio de octava. Esto aparece en la Tabla 6, y representado gráficamente en la Figura 22. El valor máximo de escalón JND obtenido en este parámetro es 4, entonces, los valores del escalón JND obtenidos están de acorde con el esperado. La forma de la gráfica de la Figura 20 es muy semejante a la gráfica de los promedios por zona de T20, como esperado-

En la Tabla 7 y en la gráfica de la Figura 23 se representan los valores para el tiempo de reverberación óptimo de la sala o RT, que calcula DIRAC a partir del EDT, T10, T20 y T30 y escoge el que cree que es más representativo de la sala.

En la Figura 23 se observa como la gráfica del RT es semejante a los restantes parámetros temporales, EDT, T20 y T30. Como se mencionó en el apartado 4, los métodos para calcular estos parámetros son distintos. T20 y T30 ofrecen mayor precisión para calcular el tiempo de reverberación, ya que incluyen un margen en la caída de energía para determinar sus valores, a diferencia del EDT. Con lo cual, la gráfica del RT se aproxima más a las gráficas de T20 y el T30 representadas.

Pese a que los parámetros temporales, EDT, T20, T30 y RT, se calculan con métodos ligeramente distintos, en todos ellos se pueden observar las características acústicas de la sala, ya que sus comportamientos por frecuencia son los mismos. Los valores más elevados en baja frecuencia, un pico de bajada en los 500 Hz y valores bajos en alta frecuencia.

C50

Tabla 8. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro C50.

Frecuencias	Coro 1			Coro 2			TOTAL	ESCALÓN JND
	Coro 1	Coro 2	TOTAL	Coro 1	Coro 2	TOTAL		
100 Hz	3,17	2,62	2,82	4,23	4,28	4,25	5	
125 Hz	1,52	1,29	1,38	2,90	3,09	3,01	4	
160 Hz	-0,07	0,87	0,53	4,16	3,79	3,93	4	
200 Hz	2,18	1,09	1,48	3,36	3,05	3,19	4	
250 Hz	1,82	0,83	1,17	1,90	2,81	2,57	3	
315 Hz	1,59	0,52	0,90	3,17	3,33	3,30	4	
400 Hz	2,79	1,90	2,22	3,23	2,82	2,99	3	
500 Hz	2,77	2,49	2,59	3,07	2,68	2,82	3	
630 Hz	2,53	1,87	2,11	2,41	2,10	2,23	3	
800 Hz	1,61	1,98	1,85	2,51	1,90	2,13	3	
1000 Hz	2,26	1,62	1,85	2,56	1,69	2,06	3	
1250 Hz	1,94	1,22	1,48	2,17	2,25	2,24	3	
1600 Hz	1,63	1,24	1,38	2,17	1,73	1,89	2	
2000 Hz	1,21	1,19	1,20	1,62	1,57	1,58	2	
2500 Hz	1,35	1,19	1,25	1,98	1,50	1,68	2	
3150 Hz	1,19	1,07	1,12	1,94	1,51	1,67	2	
4000 Hz	1,55	1,47	1,50	1,73	1,31	1,47	2	
5000 Hz	2,53	2,75	2,67	2,01	1,83	1,89	2	
6300 Hz	3,79	4,00	3,92	2,60	2,12	2,29	3	
8000 Hz	4,91	4,99	4,96	2,43	1,53	1,89	2	
10000 Hz	5,91	5,70	5,78	2,38	1,70	1,96	2	

C50 [dB] | Promedios de los datos por zonas

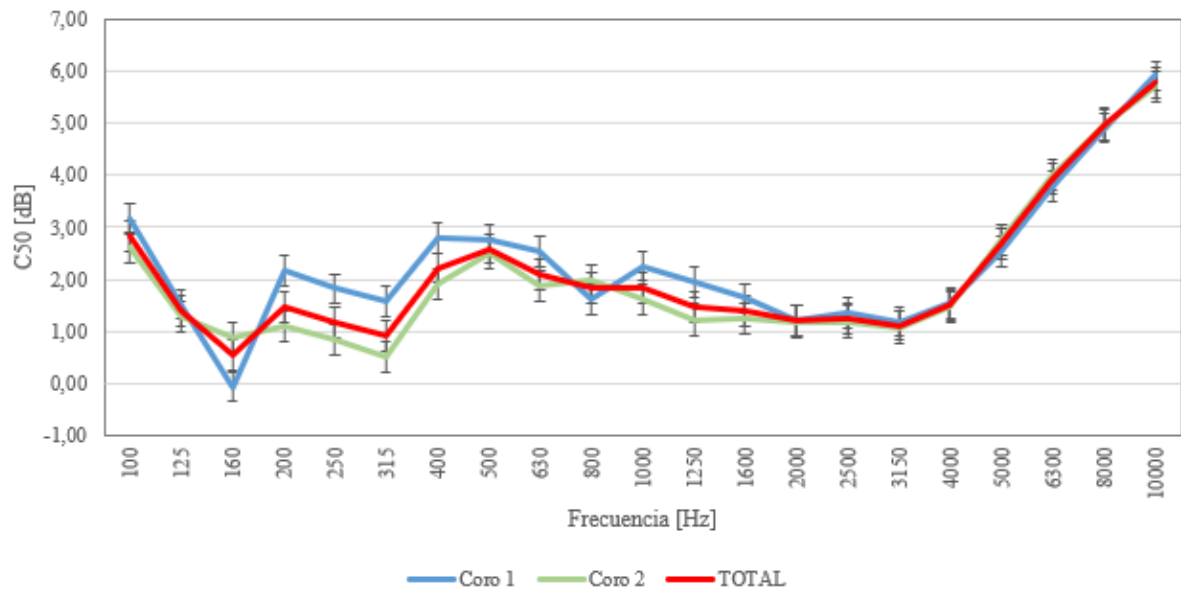


Figura 24. Gráfica de los valores promedios de D50, por zonas.

C80

Tabla 9. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro C80.

	Frecuencias	Coro 1	Coro 2	TOTAL		Coro 1	Coro 2	TOTAL	ESCALÓN JND
	C80 [dB] Promedios de los datos por zonas	100 Hz	5,85	5,02		5,33	C80 [dB] Desviaciones de los datos por zonas	4,04	3,24
125 Hz		4,67	3,80	4,12	2,10	3,15		2,83	3
160 Hz		3,34	3,98	3,75	3,86	3,87		3,86	4
200 Hz		4,27	4,15	4,19	2,82	2,74		2,75	3
250 Hz		4,87	4,03	4,32	1,97	2,43		2,31	3
315 Hz		5,12	4,22	4,55	2,35	2,71		2,61	3
400 Hz		5,84	5,31	5,50	2,64	2,24		2,40	3
500 Hz		5,81	5,63	5,69	2,69	2,30		2,44	3
630 Hz		5,45	4,99	5,16	2,47	2,02		2,19	3
800 Hz		5,39	5,08	5,19	2,44	1,77		2,03	3
1000 Hz		5,12	4,51	4,72	1,91	1,50		1,67	2
1250 Hz		5,04	4,43	4,65	1,74	2,06		1,96	2
1600 Hz		5,45	4,38	4,76	2,09	1,57		1,84	2
2000 Hz		4,83	4,38	4,54	1,67	1,52		1,58	2
2500 Hz		4,82	4,20	4,42	1,49	1,47		1,50	2
3150 Hz		4,55	4,24	4,35	1,69	1,27		1,43	2
4000 Hz		4,88	4,81	4,83	1,39	1,33		1,35	2
5000 Hz		6,19	6,10	6,13	1,94	1,71		1,78	2
6300 Hz		7,52	7,42	7,46	2,25	2,12		2,16	3
8000 Hz	9,01	8,65	8,78	1,96	1,38	1,62	2		
10000 Hz	10,28	9,75	9,94	2,28	1,74	1,96	2		

C80 [dB] | Promedios de los datos por zonas

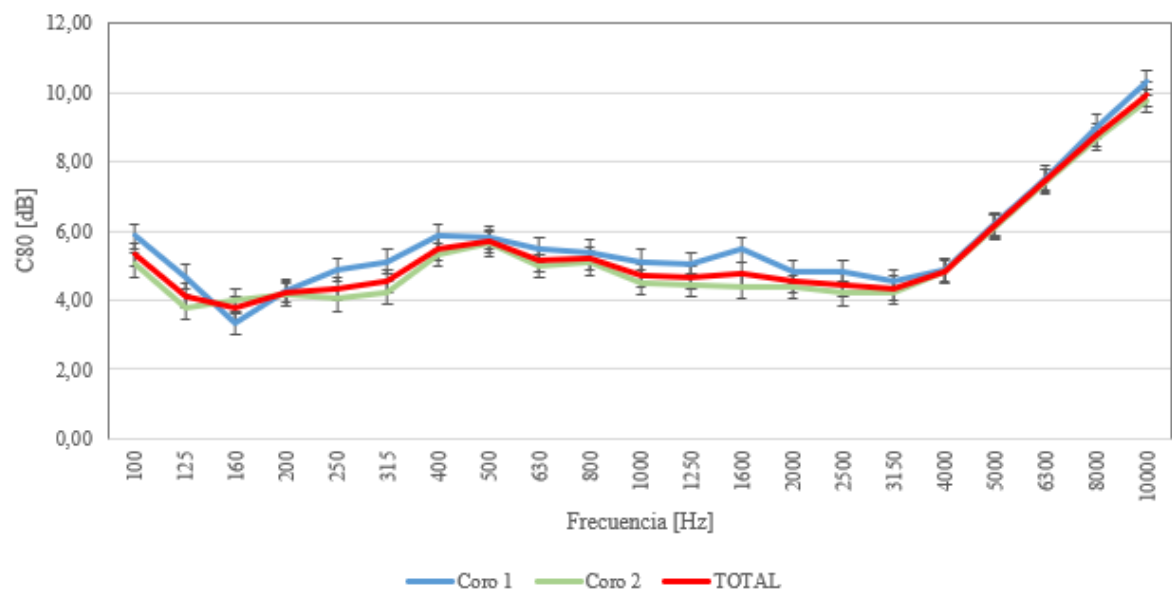


Figura 25. Gráfica de los valores promedios de C80, por zonas.

D50

Tabla 10. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro D50.

	Frecuencias	Coro 1	Coro 2	TOTAL		Coro 1	Coro 2	TOTAL	ESCALÓN JND
	D50 [-] Promedios de los datos por zonas								
100 Hz		0,65	0,63	0,63		0,20	0,21	0,20	7
125 Hz		0,58	0,57	0,57		0,15	0,16	0,15	6
160 Hz		0,50	0,54	0,53		0,20	0,19	0,19	8
200 Hz		0,61	0,56	0,58		0,17	0,16	0,16	6
250 Hz		0,62	0,54	0,57		0,12	0,15	0,15	6
315 Hz		0,58	0,53	0,55		0,16	0,17	0,17	7
400 Hz		0,64	0,60	0,61		0,16	0,15	0,15	5
500 Hz		0,64	0,63	0,63		0,15	0,14	0,14	5
630 Hz		0,63	0,60	0,61		0,13	0,11	0,12	4
800 Hz		0,59	0,61	0,60		0,13	0,10	0,11	4
1000 Hz		0,62	0,59	0,60		0,13	0,09	0,11	4
1250 Hz		0,60	0,57	0,58		0,12	0,12	0,12	5
1600 Hz		0,60	0,57	0,58		0,13	0,09	0,11	4
2000 Hz		0,57	0,57	0,57		0,09	0,09	0,09	4
2500 Hz		0,57	0,57	0,57		0,11	0,08	0,09	4
3150 Hz		0,57	0,56	0,56		0,11	0,08	0,09	4
4000 Hz		0,59	0,58	0,58		0,10	0,07	0,08	3
5000 Hz		0,64	0,65	0,64		0,11	0,09	0,10	4
6300 Hz		0,69	0,71	0,70		0,12	0,10	0,11	4
8000 Hz		0,76	0,75	0,75		0,09	0,06	0,07	2
10000 Hz		0,78	0,78	0,78		0,09	0,06	0,08	2
D50 [-] Desviaciones de los datos por zonas									

D50 [-] | Promedios de los datos por zonas

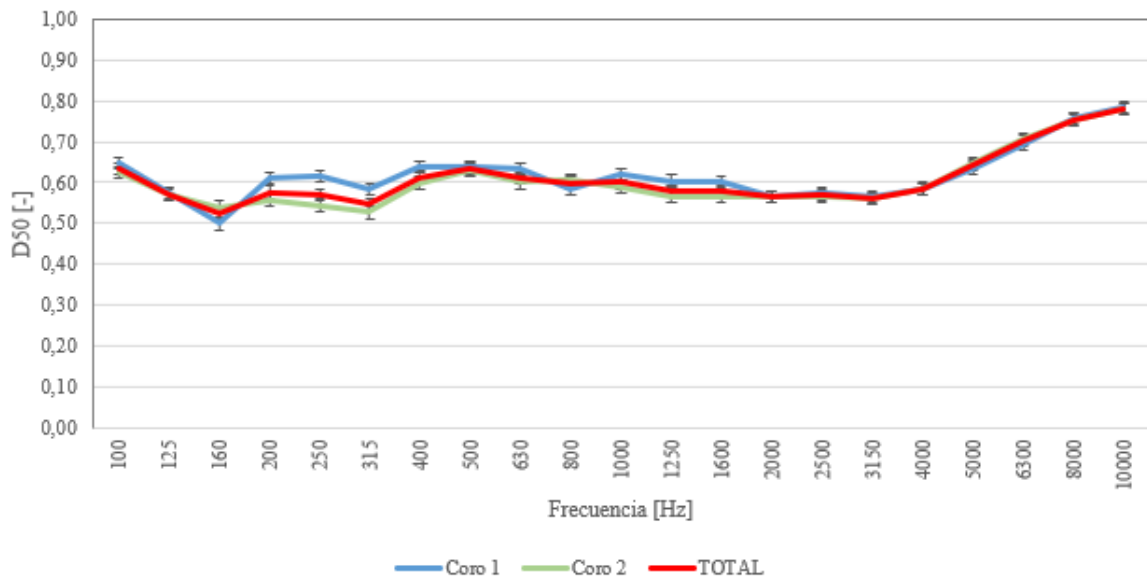


Figura 26. Gráfica de los valores promedios de D50, por zonas.

Ts

Tabla 11. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro Ts.

	Frecuencias	Coro 1	Coro 2	TOTAL		Coro 1	Coro 2	TOTAL	ESCALÓN JND
	Ts [ms] Promedios de los datos por zonas	100 Hz	87,31	91,20		89,80	Ts [ms] Desviaciones de los datos por zonas	26,24	24,81
125 Hz		90,25	92,21	91,46	12,81	14,43		13,79	2
160 Hz		89,35	91,58	90,81	18,13	23,36		21,62	3
200 Hz		78,96	83,80	82,05	20,00	13,96		16,46	2
250 Hz		72,88	78,37	76,42	10,98	12,45		12,18	2
315 Hz		67,41	75,80	72,78	16,59	19,46		18,83	2
400 Hz		59,77	63,77	62,33	17,53	17,84		17,75	2
500 Hz		57,19	59,56	58,71	15,94	15,34		15,52	2
630 Hz		59,29	63,81	62,18	17,00	13,05		14,67	2
800 Hz		60,79	59,69	60,09	16,23	12,05		13,63	2
1000 Hz		57,17	61,90	60,19	15,59	9,67		12,27	2
1250 Hz		58,15	62,85	61,16	13,67	14,81		14,52	2
1600 Hz		57,13	62,89	60,81	14,47	10,98		12,59	2
2000 Hz		61,71	62,29	62,08	12,05	10,17		10,83	2
2500 Hz		60,33	63,11	62,11	12,49	10,47		11,26	2
3150 Hz		62,18	62,79	62,57	12,22	10,08		10,84	2
4000 Hz		58,51	58,32	58,39	10,56	8,90		9,48	1
5000 Hz	49,95	49,07	49,39	12,79	11,46	11,89	2		
6300 Hz	41,88	41,09	41,37	13,74	11,79	12,46	2		
8000 Hz	34,37	35,14	34,86	11,13	7,09	8,71	1		
10000 Hz	30,11	30,87	30,59	9,98	7,35	8,35	1		

Ts [ms] | Promedios de los datos por zonas

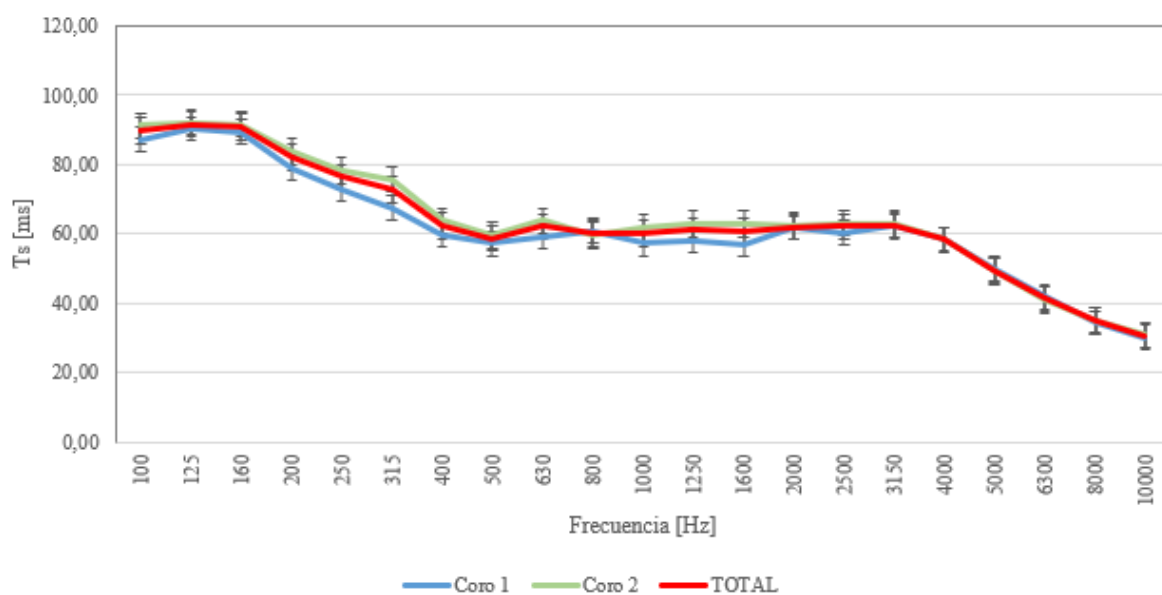


Figura 27. Gráfica de los valores promedio de Ts, por zonas.

En la Tabla 8 se pueden observar los valores promedios y de desviación típica de C50, para el Coro 1, Coro 2 y los valores totales. El valor máximo de escalón JND obtenido en este parámetro es 4, entonces, los valores del escalón JND obtenidos están de acorde con el esperado. La gráfica de la Figura 24 representa los valores obtenidos en ambas las posiciones, Coro 1 y Coro 2, así como el promedio total.

En la Tabla 9 aparecen los valores medios de C80 por banda de frecuencia acompañados de su desviación estándar y escalón JND. En la Figura 25 se representan los mismos en formato gráfico para poder estudiar mejor el comportamiento de este parámetro en el recinto.

El parámetro D50 se representa en la Tabla 10 y en la gráfica de la Figura 26 mediante su valor medio y su desviación estándar por banda de tercio de octava. Los valores de escalón JND a bajas frecuencias son mayores que el esperado.

Se presenta el parámetro Ts en la Tabla 11 y una representación gráfica en la Figura 27 a partir de los valores medios de las medidas por cada banda de tercio de octava acompañados de su desviación estándar y del escalón JND.

Como se ha comentado en el apartado 3, este parámetro es un indicativo de la nitidez y se consideran los resultados validos hasta 140 ms. Así, se puede observar en la Tabla 11 que los valores obtenidos son adecuados.

LF

Tabla 12. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro LF.

Frecuencias	Coro 1		TOTAL	Frecuencias	Coro 1		TOTAL	ESCALÓN JND
	100 Hz	0,01	0,01		0,01	100 Hz	0,01	0,01
125 Hz	0,01	0,01	0,01	125 Hz	0,01	0,01	0,01	1
160 Hz	0,01	0,01	0,01	160 Hz	0,01	0,01	0,01	1
200 Hz	0,04	0,04	0,04	200 Hz	0,03	0,03	0,03	1
250 Hz	0,04	0,04	0,04	250 Hz	0,02	0,02	0,02	1
315 Hz	0,06	0,06	0,06	315 Hz	0,04	0,04	0,04	1
400 Hz	0,06	0,06	0,06	400 Hz	0,04	0,04	0,04	1
500 Hz	0,07	0,07	0,07	500 Hz	0,04	0,04	0,04	1
630 Hz	0,09	0,09	0,09	630 Hz	0,05	0,05	0,05	1
800 Hz	0,11	0,11	0,11	800 Hz	0,06	0,06	0,06	2
1000 Hz	0,12	0,12	0,12	1000 Hz	0,06	0,06	0,06	2
1250 Hz	0,15	0,15	0,15	1250 Hz	0,07	0,07	0,07	2
1600 Hz	0,13	0,13	0,13	1600 Hz	0,05	0,05	0,05	2
2000 Hz	0,16	0,16	0,16	2000 Hz	0,06	0,06	0,06	2
2500 Hz	0,17	0,17	0,17	2500 Hz	0,07	0,07	0,07	2
3150 Hz	0,18	0,18	0,18	3150 Hz	0,07	0,07	0,07	2
4000 Hz	0,21	0,21	0,21	4000 Hz	0,10	0,10	0,10	3
5000 Hz	0,17	0,17	0,17	5000 Hz	0,08	0,08	0,08	2
6300 Hz	0,10	0,10	0,10	6300 Hz	0,04	0,04	0,04	1
8000 Hz	0,13	0,13	0,13	8000 Hz	0,05	0,05	0,05	1
10000 Hz	0,25	0,25	0,25	10000 Hz	0,14	0,14	0,14	3

LF [-] | Promedio de los datos por zonas

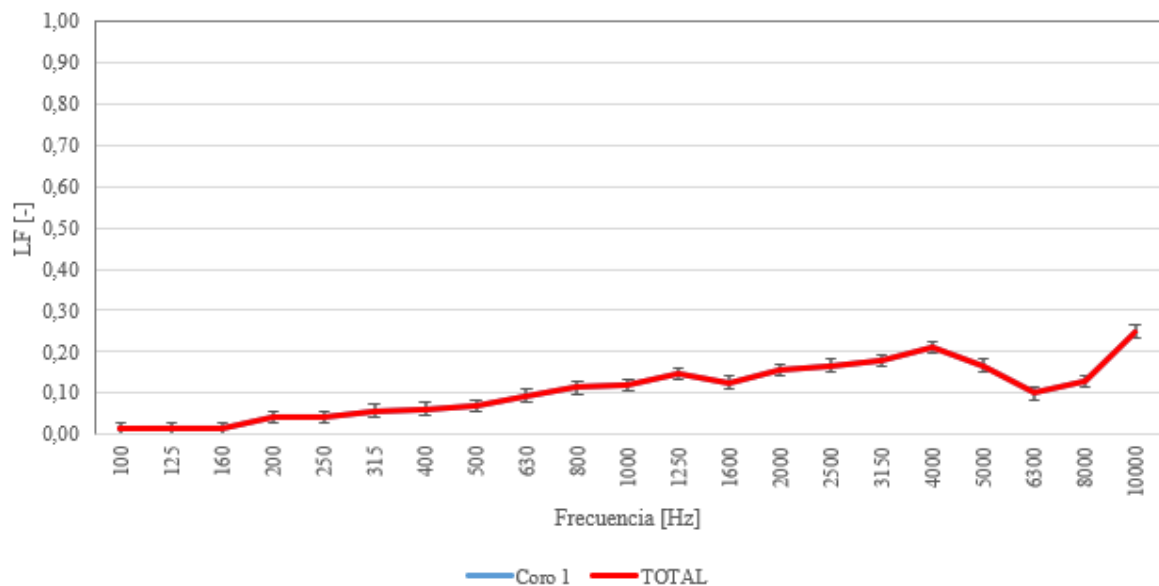


Figura 28. Gráfica de los valores promedio de LF, por zonas.

LFC

Tabla 13. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro LFC.

Frecuencias	Coro 1		TOTAL	Frecuencias	Coro 1		TOTAL	ESCALÓN JND
	100 Hz					100 Hz		
125 Hz		0,51	0,51	125 Hz	0,27	0,27		6
160 Hz		0,25	0,25	160 Hz	0,17	0,17		4
200 Hz		0,23	0,23	200 Hz	0,18	0,18		4
250 Hz		0,14	0,14	250 Hz	0,06	0,06		2
315 Hz		0,15	0,15	315 Hz	0,08	0,08		2
400 Hz		0,15	0,15	400 Hz	0,09	0,09		2
500 Hz		0,15	0,15	500 Hz	0,07	0,07		2
630 Hz		0,18	0,18	630 Hz	0,09	0,09		2
800 Hz		0,35	0,35	800 Hz	0,16	0,16		4
1000 Hz		0,42	0,42	1000 Hz	0,19	0,19		4
1250 Hz		0,42	0,42	1250 Hz	0,20	0,20		5
1600 Hz		0,20	0,20	1600 Hz	0,06	0,06		2
2000 Hz		0,12	0,12	2000 Hz	0,04	0,04		1
2500 Hz		0,09	0,09	2500 Hz	0,02	0,02		1
3150 Hz		0,14	0,14	3150 Hz	0,04	0,04		1
4000 Hz		0,09	0,09	4000 Hz	0,02	0,02		1
5000 Hz		0,02	0,02	5000 Hz	0,01	0,01		1
6300 Hz				6300 Hz				
8000 Hz				8000 Hz				
10000 Hz				10000 Hz				

LFC [-] | Promedios de los datos por zonas

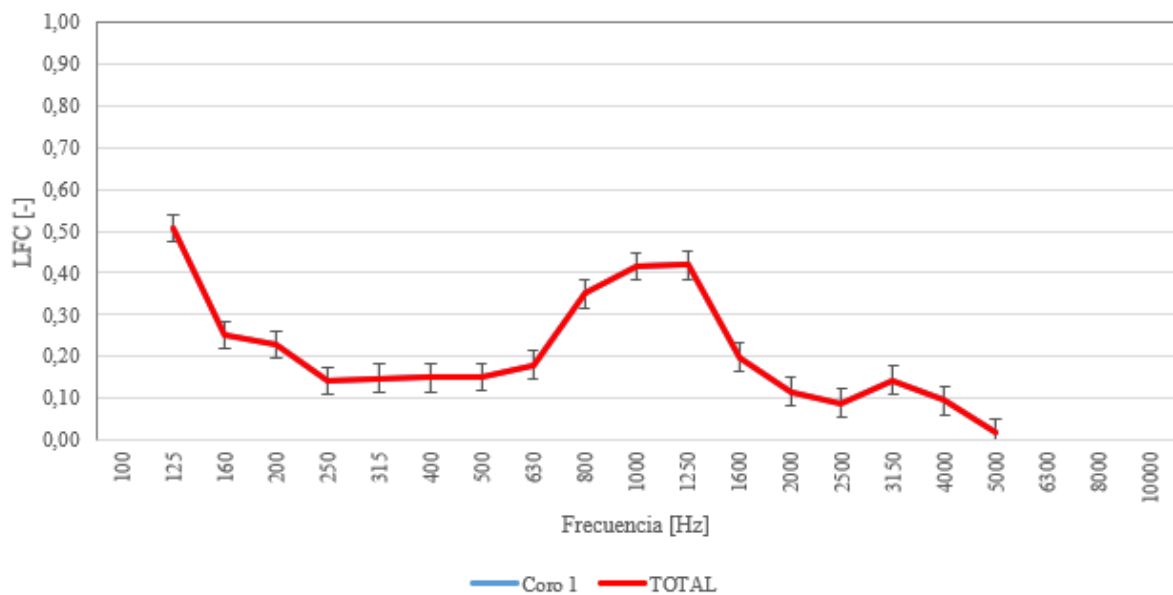


Figura 29. Gráfica de los valores promedios de LFC, por zonas.

En la Tabla 12 se pueden observar los valores promedios y de desviación típica de LF, para el Coro 1 y los valores totales, que coinciden con el valor del Coro 1. Esto poque para este parámetro no se realizó el análisis del Coro 2, debido a un error que ocurrió durante la medición. La gráfica de la Figura 28 representa los valores obtenidos en el Coro 1, así como el promedio total.

Para el parámetro LFC, también se realizarán los análisis apenas del Coro 1. Estos se pueden observar en la Tabla 13 o en formato de gráfica en la Figura 29. Sin embargo, hubo un error en la realización de las mediciones del LFC y, por eso, se obtiene cero en algunos de los valores de LFC a altas y bajas frecuencias.

STI

Tabla 14. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro STI.

STI female [-] Promedios de los datos por zonas	Frecuencias	Coro 1	Coro 2	TOTAL	STI female [-] Desviaciones de los datos por zonas	Coro 1	Coro 2	TOTAL	ESCALÓN JND
	-	0,65	0,64	0,64		0,04	0,03	0,03	2

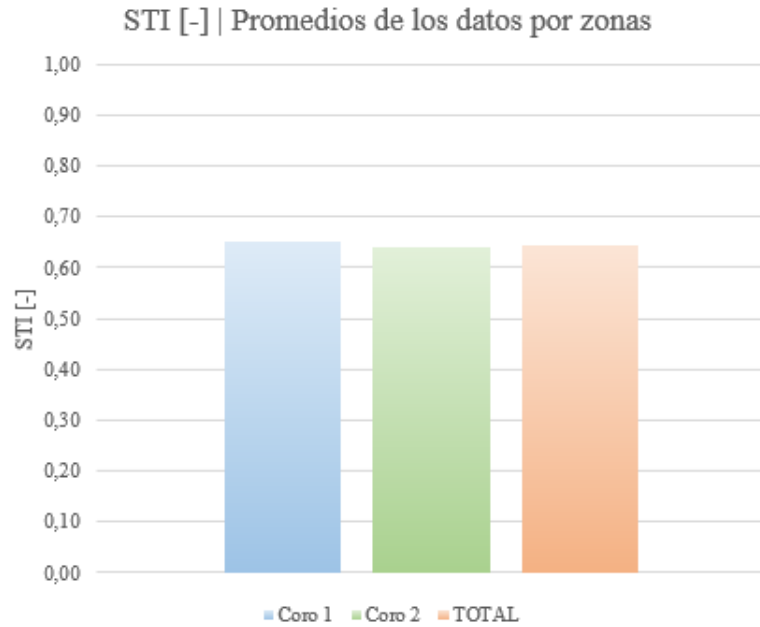


Figura 30. Gráfica de los valores promedios de STI, por zonas.

Alcons

Tabla 15. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro Alcons.

ALC STI female [%] Promedios de los datos por zonas	Frecuencias	Coro 1	Coro 2	TOTAL	ALC STI female [%] Desviaciones de los datos por zonas	Coro 1	Coro 2	TOTAL	ESCALÓN JND
	-	5,11	5,34	5,26		1,01	0,96	0,98	1



Figura 31. Gráfica de los valores promedios de Alcons, por zonas.

Por último, se presentan los valores promedio de STI y Alcons. Se expone, en la Tabla 14, los valores de STI female por zonas. Los valores STI femeninos y masculinos no presentan una diferencia considerable, siendo indiferente cuales se seleccionan. Así tanto para el STI como para el AlCons se utiliza los valores femeninos.

Se puede observar que ambos los valores del escalón JND de STI, Tabla 14, y de AlCons, Tabla 15, obtenidos son considerados válidos.

7. Diseño 3D del modelo arquitectónico simplificado

Para la realización del modelo arquitectónico simplificado 3D de la Sala de Ensayo del Coro se ha utilizado el programa Sketch Up. Se ha creado en este programa la estructura base de las cuatro paredes con techo y suelo según las medidas realizadas en la sala. Se empezó por crear el suelo de la sala teniendo en consideración que las paredes laterales no son paralelas y tienen dimensiones diferentes, como se puede observar en la Figura 32. En seguida, se crean las paredes, Figura 33. La pared frontal una dimensión menor que la pared de verso, ya que el techo es inclinado. En la Figura 34 se puede observar la estructura compuesta por el suelo y las paredes.



Figura 32. Suelo, visto desde arriba.

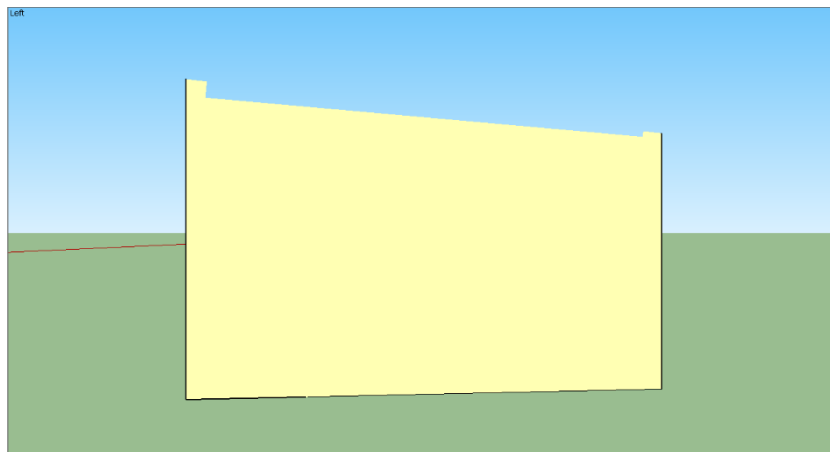


Figura 33. Pared del lado izquierdo, vista lateral.

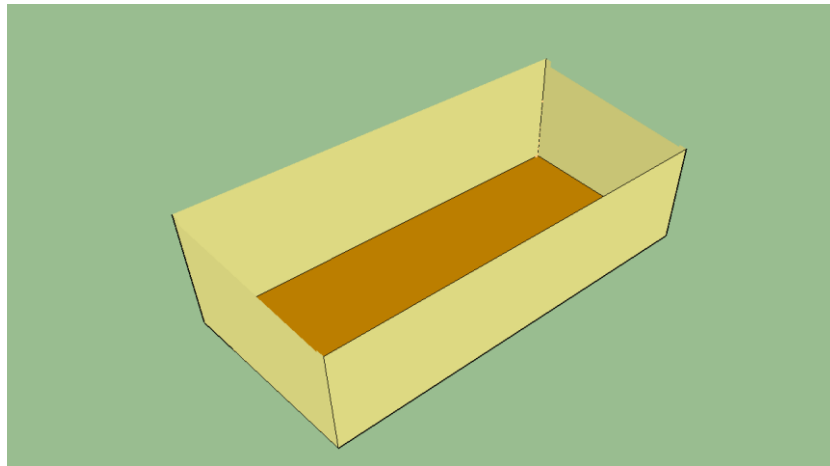


Figura 34. Suelo y paredes de la sala.

El techo se puede observar en la Figura 35. Para obtener esta estructura e incluir las conductas de aire acondicionado se ha empezado por crear una superficie de tamaño e inclinación deseada, teniendo en cuenta que el techo baja con una inclinación diferente al techo original. Después, se han hecho las extorsiones para las conductas de aire acondicionado, borrando el volumen de estas estructuras, manteniendo la cara hacia el interior de la sala, tal y como se aprecia en la Figura 36.

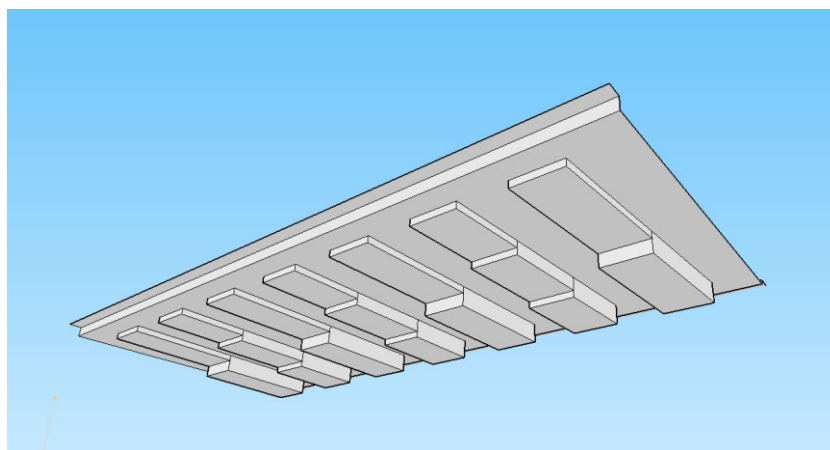


Figura 35. Techo, detalle, vista de abajo.

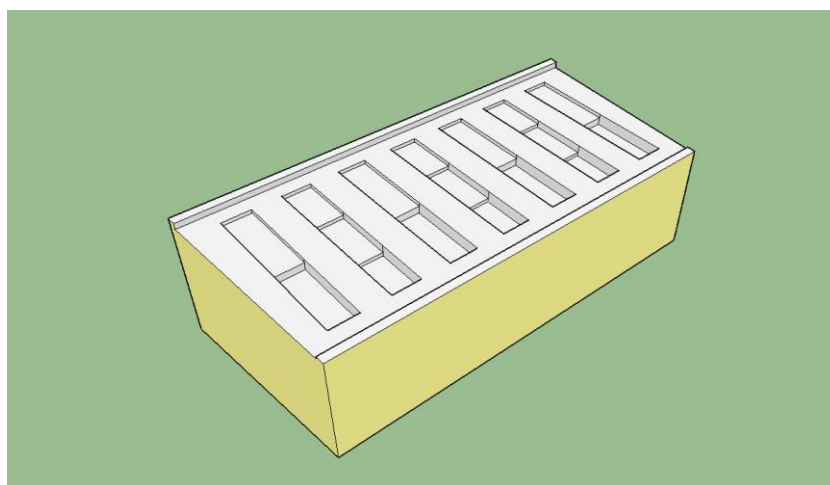


Figura 36. Sala con techo, vista desde arriba.

Se añaden también a la pared las zonas con diferentes materiales, es decir las puertas y la zona con ventanas. Tal y como se observa en la Figura 37, estos elementos tienen un color distinto para que se pueda diferenciar que tienen características acústicas diferentes.

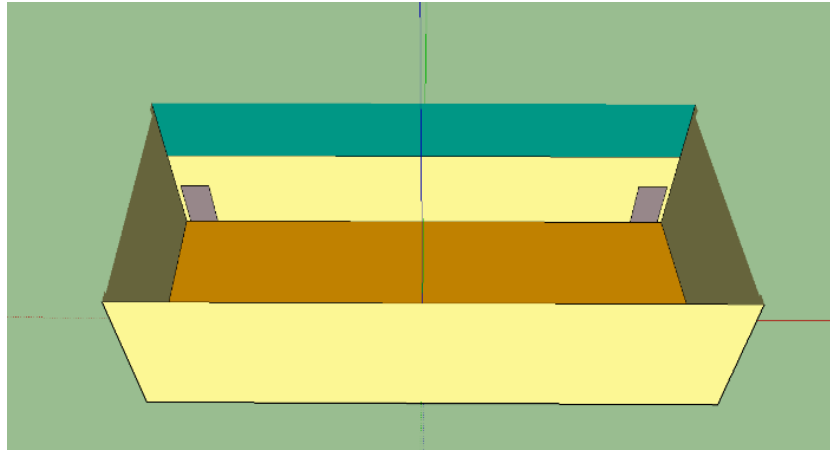


Figura 37. Pared con ventanas y puertas.

A continuación, se crean las superficies de doble cara: la tarima del coro; las lamas de madera que se encuentran cerca de la pared; el piano; las sillas; los atriles. Estas superficies son huecas, es decir, no tienen volumen, para evitar problemas en la simulación en EASE.

Se colocan las lamas de madera con una separación de la pared, igual que se encontraban en la sala. La tarima del coro no tiene volumen en la parte inferior, como se puede observar en la Figura 38. En esta Figura se puede observar también el espacio entre las lamas de madera y la pared. Para representar el piano se crea una forma aproximada, utilizando un triángulo y se sitúa en la posición que se encontraba cuando se realizaran las medidas.

Por último, se coloca un número aproximado de sillas y atriles en la sala. Colocando una en el centro para simular el asiento del director del coro. En las Figuras 39 y 40 se puede observar la sala completa con mobiliario.

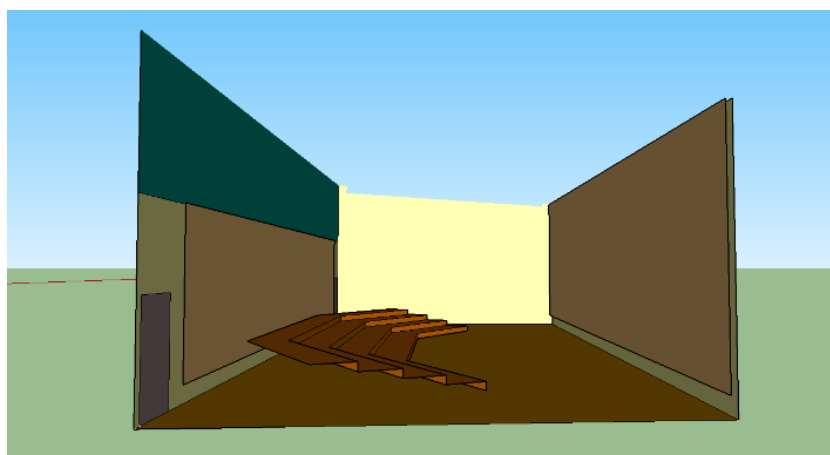


Figura 38. Superficies huecas: tarima del coro y lamas de madera, vista lateral.

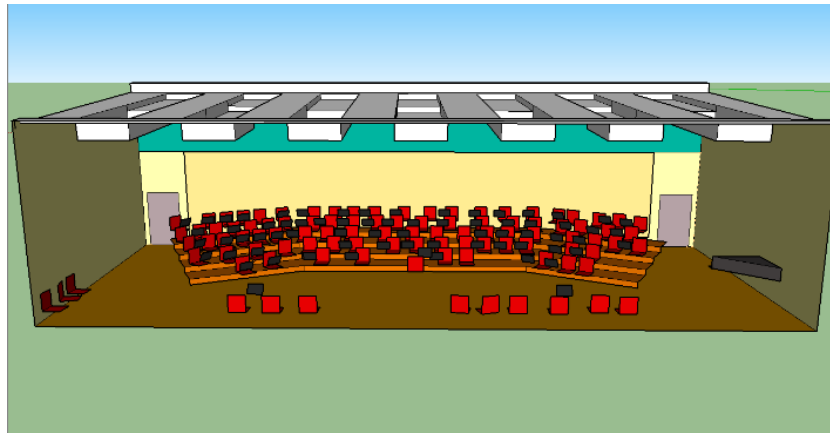


Figura 39. Sala amueblada, vista frontal.

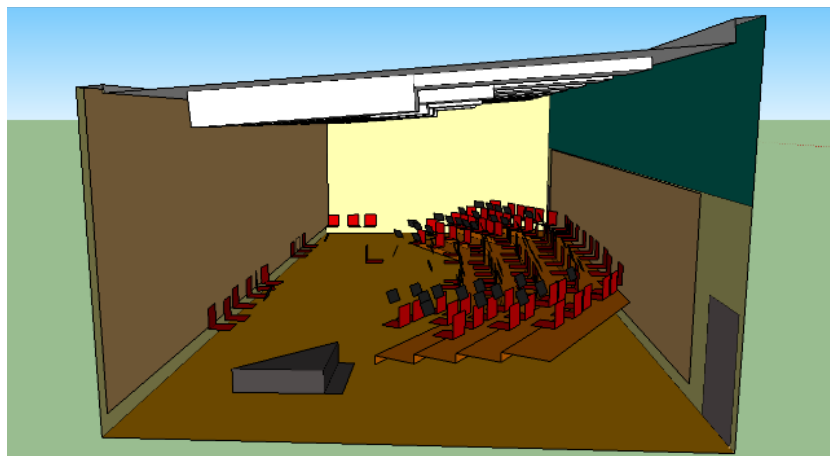


Figura 40. Sala amueblada, vista lateral.

A continuación, se observa la comparación del modelo 3D de la sala con las fotos realizadas en la misma. Se verifica que el aspecto del modelo se acerca al aspecto real de la sala.

En la Figura 41 se puede observar el color rojo de las sillas, ya que es gran parte de las sillas de la sala son de color rojo. Para los atriles se ha seleccionado un color gris oscuro.

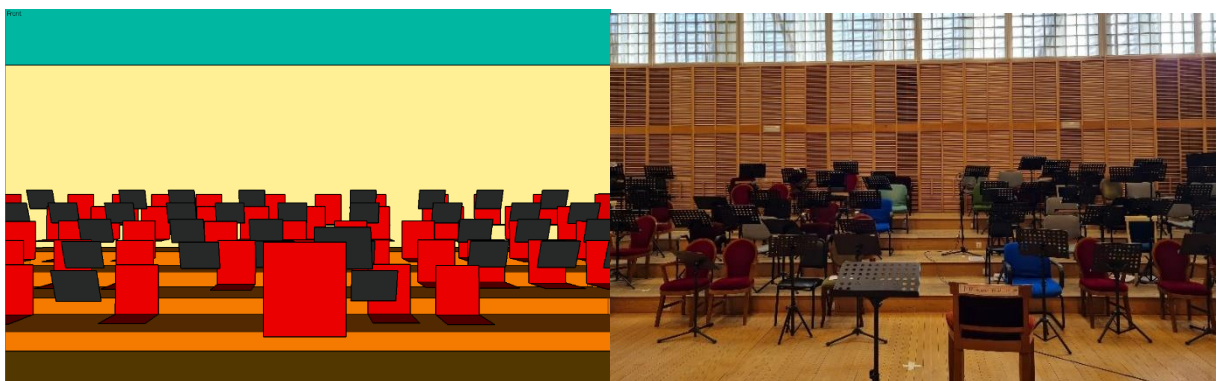


Figura 41. Vista frontal en el interior de la sala comparación, arriba: Sketch up; abajo: Real.

Para el techo se ha utilizado blanco, igual que el techo de la sala, Figura 42.

Las ventanas son de color azul para simular el azul del cielo que se ve por las mismas. Y el suelo y la tarima del coro son naranja claro para simular el color de la madera, siendo la tonalidad del suelo un naranja con un tono amarillado para distinguir esta superficie de la tarima del coro. Esto se aprecia en la Figura 43.

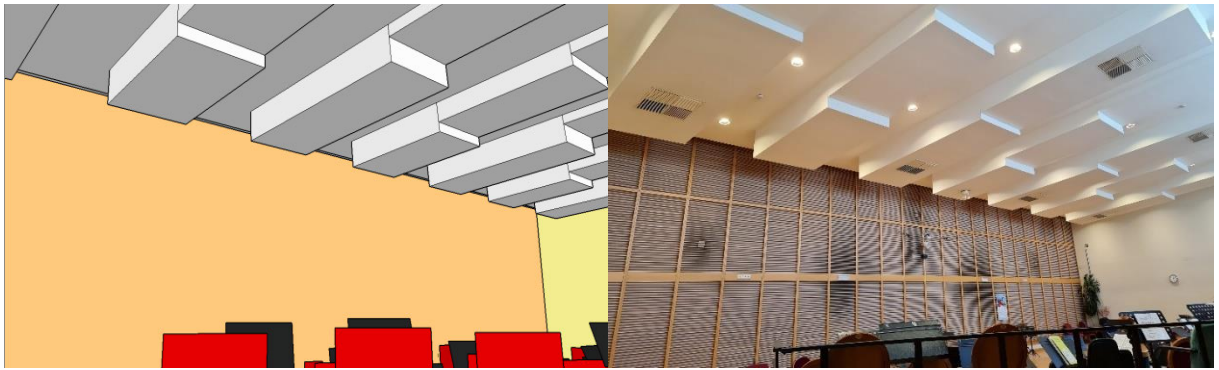


Figura 42. Vista lateral en el interior de la sala comparación, arriba: Sketch up; abajo: Real.

También en la Figura 43 se puede observar el color elegido para las paredes, un amarillo claro, así como el color de las lamas de madera un beige para que se distinga de la pared.

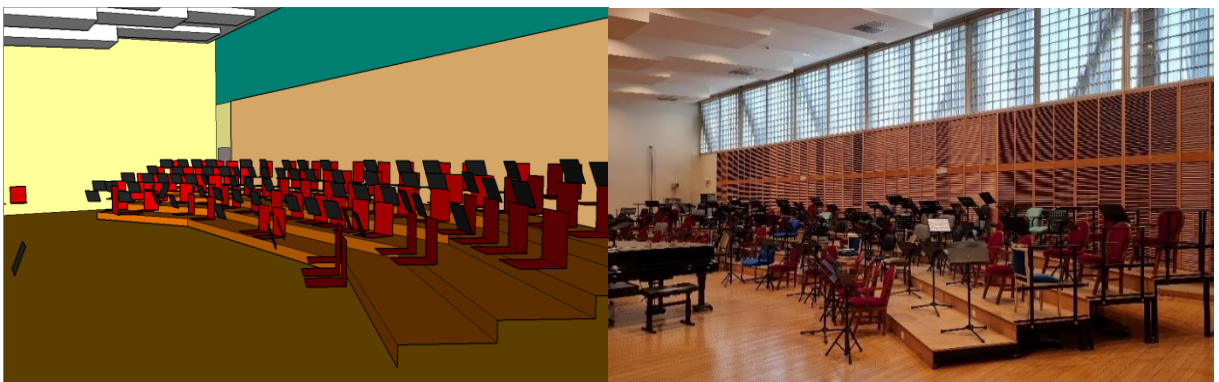


Figura 43. Vista lateral en el interior de la sala comparación, arriba: Sketch up; abajo: Real.

8. Configuración del modelo geométrico en EASE

Tras haber terminado el modelo arquitectónico simplificado 3D de la sala hay que transferir el modelo a EASE, asignar materiales a las superficies y verificar si EASE detecta huecos en el modelo y cerrarlos. Así se obtiene el modelo geométrico.

Se guarda el proyecto de Sketch Up como versión 8, para transferir para EASE. Al exportar el proyecto a EASE se abre el asignan los materiales, tal y como se aprecia en la Figura 44.

Para las superficies de doble cara, las sillas, los atriles, la tarima del coro, las lamas de madera y el piano, se debe poner el parámetro 2-Fold en Yes. De esta forma, el programa detecta que son superficies de doble cara y permite seleccionar el material de ambas las caras del objeto.

A continuación, se desarrolla la selección de cada uno de los materiales. Se asigna a cada una de las superficies del proyecto un material de la base de datos ya existente.

Para los atriles se selecciona el material 309 STEEL, es decir una representación de acero. Para las lamas de madera se busca un revestimiento de madera, eligiendo el material 180 revestimiento de madera 1. Para las paredes se asigna un material que simule Ladrillo enfoscado y pintado, 061 Concrete or Cinder Block, Painted, Generic.

En el piano se coloca un revestimiento de madera, 182 Revestimiento de madera ligero. Las portas son de acero, entonces se selecciona el material 331 Puertas de Acero. Para las sillas, como estas son tapizadas, se elige el material 100 Silla semitapizada. El suelo es de madera, por eso se asigna a esta superficie el material 131 suelo madera tarima. En la tarima del coro se elige el material 183 Revestimiento de madera pesado, ya que esta superficie es compuesta por madera.

El techo es de pladur, entonces se coloca en esta superficie el material 274 Placa de Yeso. Por último, para las ventanas se elige un material que simule el efecto de ventanas de cristal, el 360 ventana cristal doble Glass, Window, Double Strength.

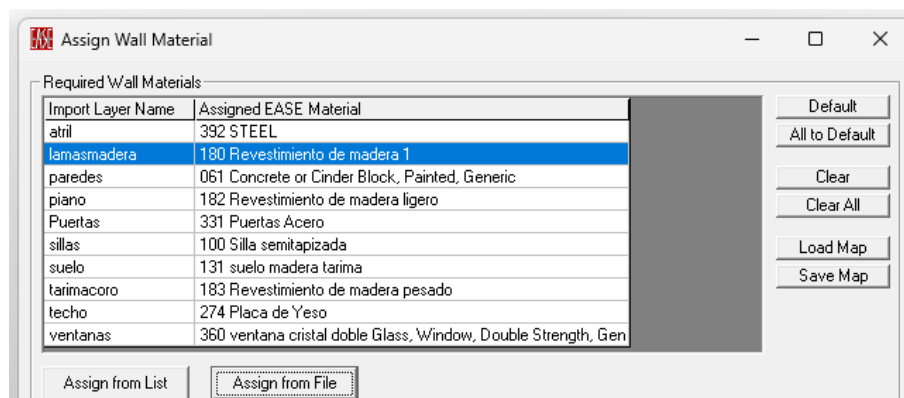


Figura 44. Selección de materiales para cada una de las superficies del proyecto.

A continuación, se elimina cualquier superficie, línea o vértice extra que detecte EASE. Se confirma que la sala es un volumen cerrado con la funcionalidad de EASE *Check Holes*, Figura 45.

En la Figura 46 se puede observar la sala con sus materiales en EASE con sus materiales ya asignado, según el color.

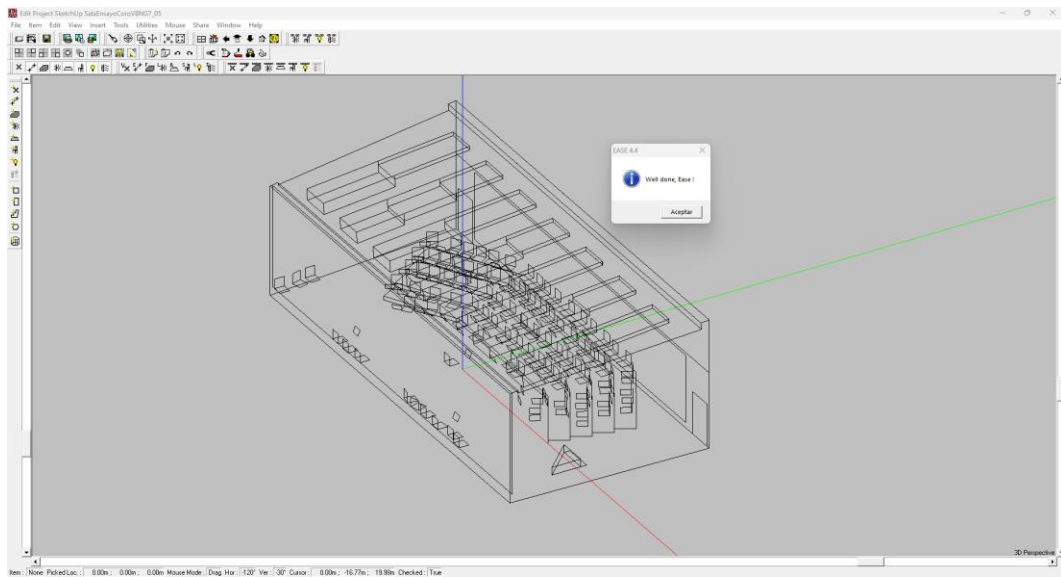


Figura 45. Sala en EASE, con volumen cerrado.

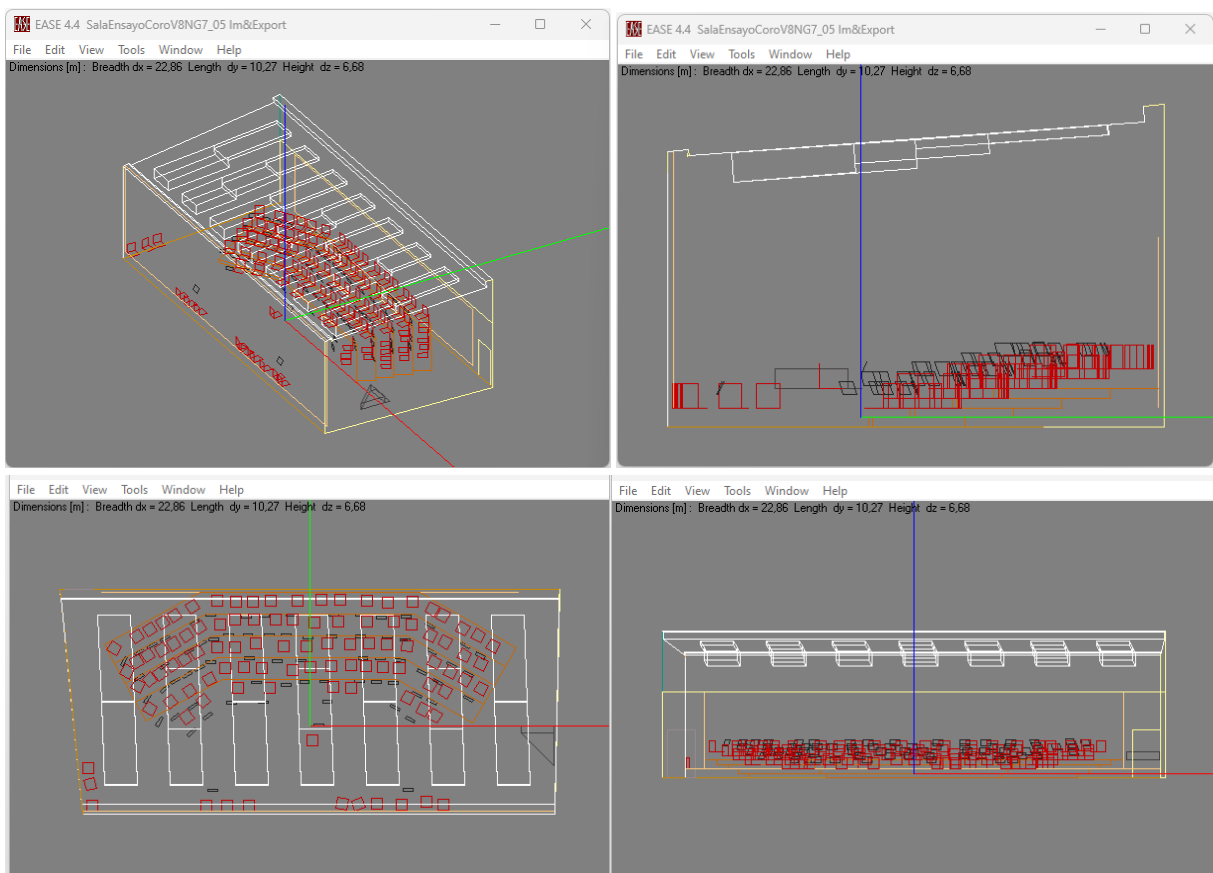


Figura 46. Sala en EASE con materiales asignados, arriba izquierda: Vista 3D; arriba derecha: Vista alzado longitudinal; abajo izquierda: Vista planta; abajo derecha: Vista sección transversal.

9. Validación del Modelo en EASE

En este apartado se detallan las acciones realizadas para ajustar la respuesta del modelo en EASE y lograr que se aproxime lo más posible a la respuesta real de la sala. Y se exponen los resultados finales obtenidos de los parámetros acústicos que se obtienen a través de la respuesta del modelo en EASE.

9.1 Ajuste del Tiempo de Reverberación

Para ajustar el modelo en EASE se empieza por comparar el tiempo de reverberación, RT, del modelo en EASE con el tiempo de reverberación medido en la sala. En EASE, el tiempo de reverberación se calcula utilizando la expresión del tiempo de reverberación de Eyring, mediante el método Standard Mapping del programa.

Para eso se colocan los valores de tiempo de reverberación medidos en la sala en EASE. Estos se pueden observar en la gráfica inferior de la Figura 47 representados por el color gris. El color azul representa los valores de tiempo de reverberación calculados por EASE.

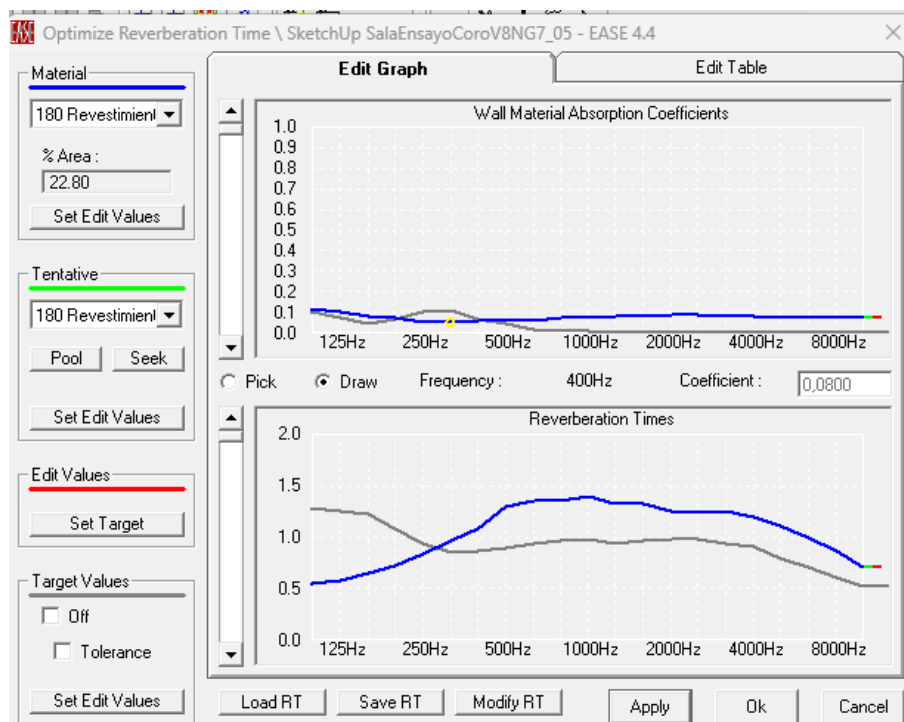


Figura 47. Comparación del valor RT en EASE con los valores reales.

Como los valores representados de RT en EASE y RT real son distintos se realizan cambios en los materiales seleccionados según sus características. Los valores medidos y los calculados por EASE se encuentran más apartados a bajas frecuencias. Entonces, para elegir que materiales cambiar se busca entre los materiales que tienen mayor superficie seleccionados en EASE, porque van a tener mayor influencia en la respuesta de la sala, cuales tienen elevada absorción a bajas frecuencias. Y se busca sustituir estos materiales por otros que tengan menor absorción en esta banda de frecuencia.

Se cambia el material de las paredes, 061 concrete or cinder block, painted, generic, por el material 060. Esto tiene como objetivo acercar los valores de tiempo de reverberación simulados en EASE con los deseados. Entonces se aumenta la absorción a altas frecuencias y por consecuencia disminuye la reverberación en estas mismas bandas. Como se puede observar en la Figura 48 el material 060 tiene una absorción más elevada a altas frecuencias cuando comparado con el material 061.

Además, se crea una placa de yeso partiendo del material 274 con baja absorción por debajo de 315 Hz, como se puede observar en la Figura 49. Este nuevo material se denomina 275 y sustituye la placa de yeso anterior, 274, y tiene una absorción prácticamente nula para frecuencias de bajo de los 315Hz. Se puede observar también que hay un resonador entre 250 y 500 Hz, porque hay un aumento en la absorción. Entonces, se cambia el material de la tarima del coro, 183, por un resonador a 500Hz, 040, cuyos valores de absorción se pueden observar en la Figura 50. Se define esta modificación de la sala como la modificación 1.

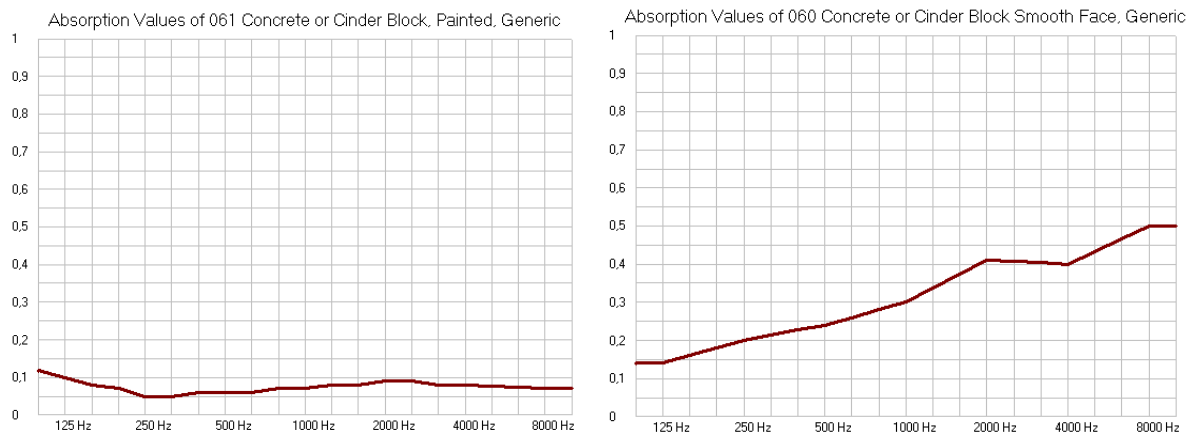


Figura 48. Comparación entre los valores de absorción de los materiales 061 y 060.

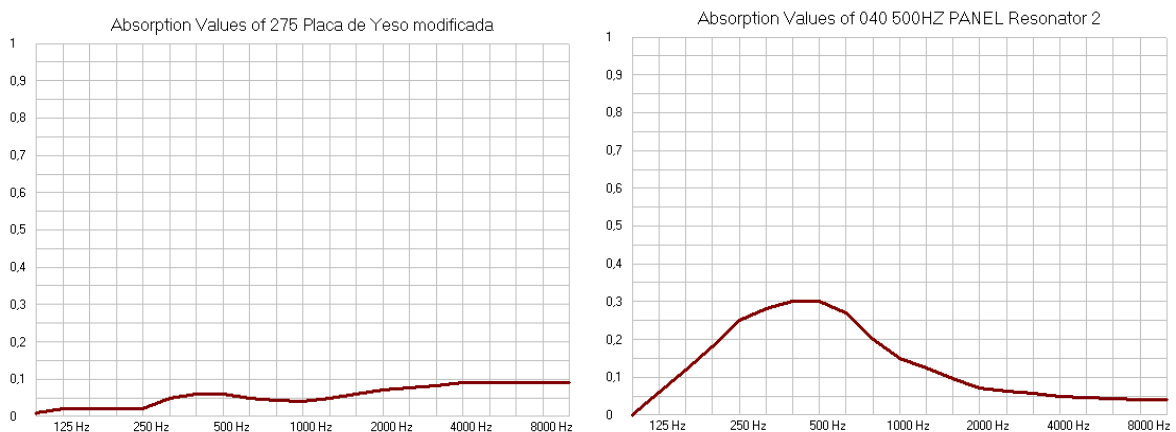


Figura 49. Valores de absorción del material 275.

Figura 50. Valores de absorción del material 040.

Después de aplicar estos cambios se obtiene el resultado, que se puede observar en la Figura 51, concluyendo que los valores medidos por EASE del tiempo de reverberación se aproximan más al valor real. Entonces, se calculan los restantes parámetros acústicos para obtener una representación más completa del comportamiento acústico de la sala.

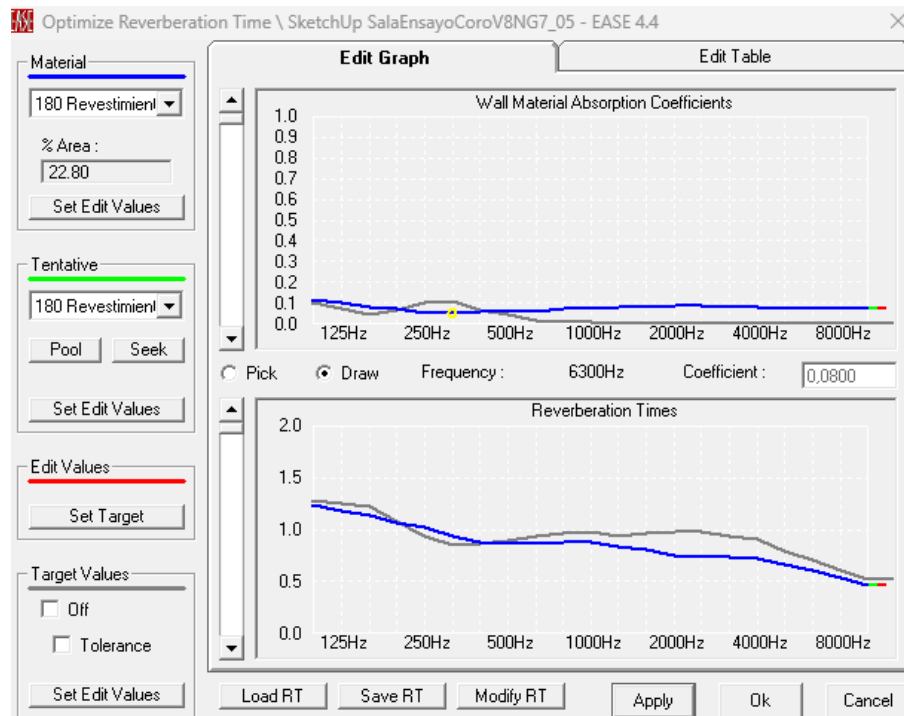


Figura 51. Comparación del valor RT en EASE con los valores reales, modificación 1.

9.2 Ajuste de los Parámetros Acústicos

Se realizan los cálculos de los parámetros C50, C80 y RT a través del método de Standard Mapping de EASE. Se calculan también los parámetros C50, C80 y T30 utilizando el método AURA con baja resolución para que este cálculo se haga rápidamente. Para cada uno de estos parámetros se calcula el valor de JND. Estos cálculos se realizan apenas para el Coro 1 ya que el objetivo es apenas ajustar la respuesta de la sala.

Los valores obtenidos en los cálculos realizados a través del método AURA sobrepasan los valores de los escalones JND que se consideran aceptables, especialmente en bajas frecuencias. Tal y como se aprecia en la Tabla 16.

Tabla 16. Valores de los escalones JND modificación 1.

MODIFICACIÓN 1						
Frecuencias [Hz]	C50 Standard	C50 Aura	C80 Standard	C80 Aura	T30 Aura	RT Standard
100 Hz	4	6	4	6	4	1
125 Hz	2	4	3	5	6	2
160 Hz	1	2	1	3	6	2
200 Hz	2	4	2	4	10	1
250 Hz	2	4	2	5	14	2
315 Hz	1	3	2	4	14	3
400 Hz	2	4	2	5	12	1
500 Hz	2	4	2	5	12	1
630 Hz	2	4	1	4	9	2
800 Hz	1	3	1	4	9	2
1000 Hz	1	3	1	4	8	3
1250 Hz	1	3	1	3	8	3
1600 Hz	1	2	1	3	6	4
2000 Hz	2	1	1	2	4	5
2500 Hz	2	1	2	2	3	5
3150 Hz	2	1	2	2	4	5
4000 Hz	2	1	2	2	4	4
5000 Hz	1	1	1	2	5	4
6300 Hz	1	2	1	3	4	4
8000 Hz	1	2	1	3	5	3
10000 Hz	1	2	1	2	4	3

Los valores obtenidos a través del método Standard Mapping son muy buenos en comparación con los resultados de AURA, porque mientras el Standard Mapping utiliza el método estadístico y, por eso, no valora la parte trasera de las superficies de doble cara, el método AURA considera la trayectoria de los rayos. Así es relevante para este método la absorción de los materiales ambas las superficies de los objetos de doble cara.

Entonces se realiza un cambio en las lamas de madera, una de las superficies compuesta por dos caras, que ocupa grande parte del área de la sala. Se coloca un material absorbente un 50% en la parte de tras, 005, y un 30% en la parte delante, 003.

Tras aplicar este cambio, los resultados del escalón JND obtenidos a través del método AURA mejoran, y se pueden considerar aceptables. Sin embargo, los valores del tiempo de reverberación suben a valores no aceptables. Esto se puede observar en la Tabla 17.

Tabla 17. Valores de los escalones JND modificación 2.

MODIFICACIÓN 2						
Frecuencias [Hz]	C50 Standard	C50 Aura	C80 Standard	C80 Aura	T30 Aura	RT Standard
100 Hz	1	4	1	4	4	9
125 Hz	2	2	2	3	2	9
160 Hz	4	1	4	1	2	10
200 Hz	2	2	4	2	2	9
250 Hz	3	2	4	2	4	8
315 Hz	4	1	4	2	5	7
400 Hz	3	2	4	3	4	8
500 Hz	3	2	4	3	4	8
630 Hz	3	2	4	2	2	9
800 Hz	4	1	4	2	2	9
1000 Hz	3	2	4	2	1	9
1250 Hz	4	1	5	2	2	9
1600 Hz	4	1	4	2	1	10
2000 Hz	5	1	5	1	2	10
2500 Hz	5	1	5	1	2	10
3150 Hz	5	1	6	1	2	10
4000 Hz	5	1	6	1	2	10
5000 Hz	4	1	5	1	1	10
6300 Hz	4	1	5	1	1	10
8000 Hz	3	1	4	1	1	9
10000 Hz	3	1	4	1	1	7

Los valores de tiempo de reverberación simulado son menores que los valores medidos. Entonces, para bajar la absorción en el método estadístico, Standard Mapping se cambia el material de la parte de tras de las lamas de madera, 005 (absorbente de 50%) por un revestimiento de madera, 180. El objetivo es aumentar el tiempo de reverberación, es decir bajar la absorción, especialmente a altas frecuencias donde se puede observar escalones más elevados de JND. Entonces, se selecciona el material 180 que, como se puede observar en la Figura 52 tiene valores de absorción casi nulos, mientras la absorción del material anterior era de un 50%.

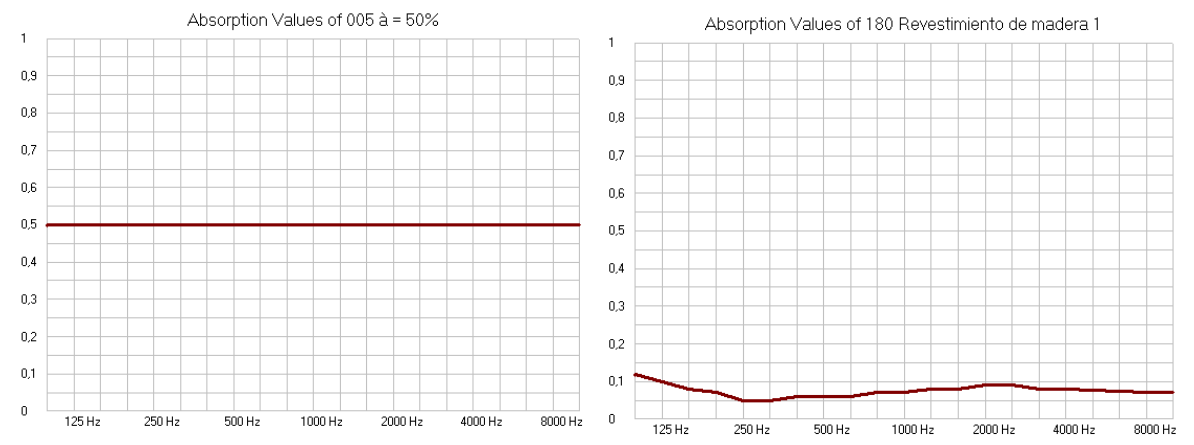


Figura 52. Comparación entre los valores de absorción de los materiales 005 y 180.

Como se puede observar en la Tabla 18, los valores calculados por el método Standard Mapping mejoran. Sin embargo, los valores de JND a altas frecuencias del tiempo de reverberación son elevados y es necesario bajar la absorción. Por lo tanto, se cambia el material 003 (absorbente de 30%), de la parte delante de las lamas de madera abiertas por un material absorbente con efecto resonador a 400Hz. Se crea el material 189 que a altas

frecuencias tiene menor absorción que el material anterior, 030, y tiene efecto resonador a 400Hz, como se puede observar en la Figura 53.

Tabla 18. Valores de los escalones JND modificación 3.

MODIFICACIÓN 3						
Frecuencias [Hz]	C50 Standard	C50 Aura	C80 Standard	C80 Aura	T30 Aura	RT Standard
100 Hz	3	4	3	5	2	5
125 Hz	1	3	1	3	1	5
160 Hz	2	1	1	1	1	5
200 Hz	1	2	1	2	3	5
250 Hz	1	2	1	2	5	3
315 Hz	1	1	1	2	6	3
400 Hz	1	2	1	3	4	4
500 Hz	1	3	1	3	4	4
630 Hz	1	2	1	2	2	5
800 Hz	2	1	1	2	2	5
1000 Hz	1	2	1	2	2	6
1250 Hz	2	1	2	1	2	6
1600 Hz	2	1	2	2	1	6
2000 Hz	3	1	3	1	2	7
2500 Hz	3	1	3	1	2	7
3150 Hz	3	1	3	1	2	7
4000 Hz	3	1	3	1	2	7
5000 Hz	2	1	3	1	1	6
6300 Hz	2	1	2	1	1	6
8000 Hz	2	1	2	1	1	5
10000 Hz	1	1	2	1	1	4

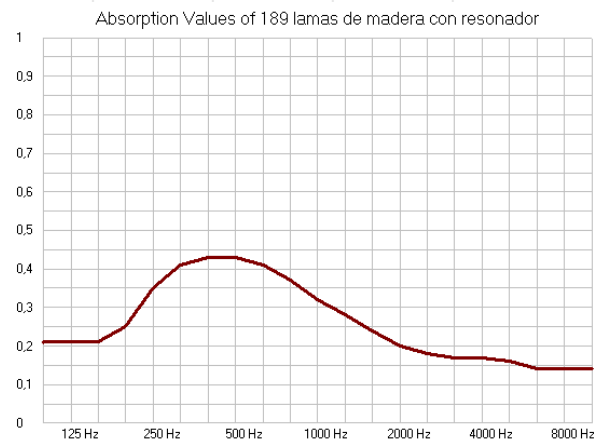
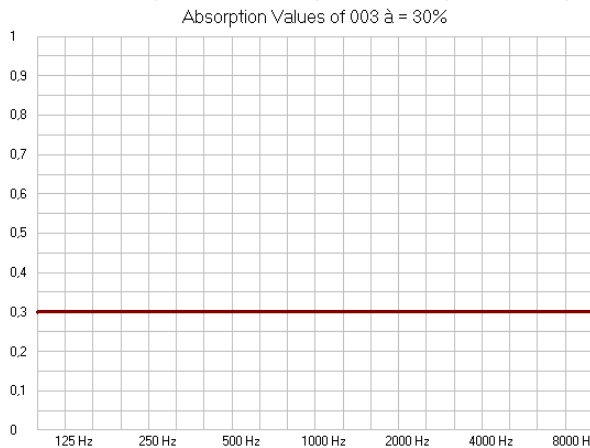


Figura 53. Comparación entre los valores de absorción de los materiales 003 y 189.

Se considera los valores obtenidos con este cambio satisfactorios. Tal y como se observa, en la Tabla 19, ningún de los valores de los escalones JND es superior a 6.

Tabla 19. Valores del escalón JND después de realizar la modificación 4.

MODIFICACIÓN 4						
Frecuencias [Hz]	C50 Standard	C50 Aura	C80 Standard	C80 Aura	T30 Aura	RT Standard
100 Hz	3	4	3	4	2	3
125 Hz	1	2	1	3	1	4
160 Hz	2	1	1	1	1	4
200 Hz	1	3	1	2	3	4
250 Hz	1	2	1	2	5	4
315 Hz	1	1	1	2	6	4
400 Hz	1	2	1	3	5	5
500 Hz	1	2	1	2	4	6
630 Hz	1	2	1	2	2	6
800 Hz	1	1	1	2	2	6
1000 Hz	1	1	1	2	2	6
1250 Hz	1	1	2	1	2	5
1600 Hz	2	1	2	2	1	6
2000 Hz	3	1	3	1	2	6
2500 Hz	3	1	3	1	2	6
3150 Hz	3	1	3	1	2	6
4000 Hz	3	1	3	1	1	5
5000 Hz	2	1	2	1	1	5
6300 Hz	2	1	2	1	1	4
8000 Hz	1	1	2	1	1	3
10000 Hz	1	1	2	1	1	3

9.3 Estudio de los Resultados

Para obtener los valores finales de la respuesta de la sala en EASE repiten los cálculos de los parámetros en EASE con mayor detalle. Se realizan estos cálculos primero para Coro 1, con el objetivo de confirmar que los valores obtenidos de la simulación en EASE son válidos. Y, posteriormente se realizan los mismos cálculos para el Coro 2 para verificar si la respuesta de la sala en EASE es válida, es decir se acerca a la respuesta real, para diferentes posiciones.

Este procedimiento tiene como objetivo verificar que los ajustes de los materiales de la sala realizados con la configuración Coro 1, se adaptan fielmente a diferentes posiciones de fuente y micrófono, como es Coro 2.

Se usa una mayor resolución para calcular los parámetros en AURA para obtener una respuesta de mayor calidad, detallados en la Figura 54.

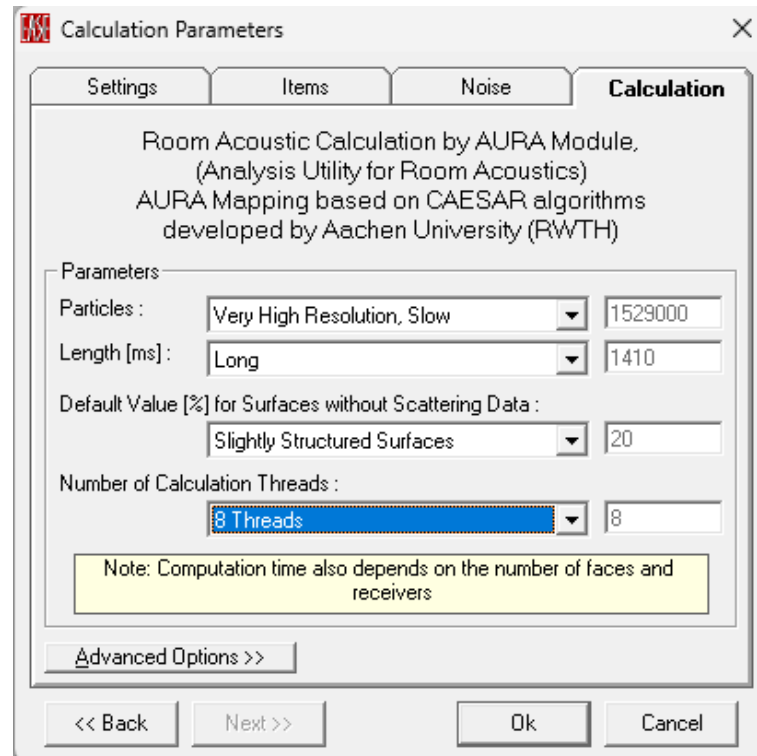


Figura 54. Parámetros los cálculos realizados en AURA.

Se transfieren los valores obtenidos en EASE a una hoja de Excel, donde se calcula el promedio de cada parámetro acústico. Posteriormente se comparan los valores obtenidos con los valores medidos, calculando el valor JND de entre estos dos valores para determinar si los resultados obtenidos son válidos o no.

A continuación, se muestran la comparación de los parámetros en el Coro 1.

Los valores de EDT obtenidos en la simulación de EASE para el Coro 1 son considerados válidos. En la Tabla 20, se verifica que a bajas frecuencias los valores de escalón JND son más elevados que en las restantes bandas, sin embargo, ningún valor es mayor que 6.

Para T20 y T30 se consigue una aproximación bastante buena, como se puede observar por los valores de los escalones JND de las Figuras 56 y 57 y también en las Tablas 21 y 22.

Los valores de escalón JND obtenidos para RT, aunque siendo un poco más elevados que los valores de los escalones de T20 y T30, siguen estando dentro del rango de valores esperado. Tal y como se demuestra en la Tabla 23 y en la Figura 58.

En las Figuras 59 y 60 se aprecian las gráficas de comparación medidos y simulados de los valores C50 y C80, respectivamente. Estos valores se consideran válidos y se pueden analizar con mayor detalle en las Tablas 24 y 25, siendo que los resultados obtenidos a bajas frecuencias difieren un poco más en comparación que los restantes. También se observa que los resultados obtenidos son mejores en el método STD que en AURA, tanto para C50 como para C80.

En los parámetros D50 y LF, representados en las Figuras 61 y 62, respectivamente, ocurre lo mismo. Se observa que la curva simulada se ajusta bastante bien excepto en bajas frecuencias,

donde se ajusta un poco peor, pero sigue siendo aceptable. Esto se encuentra reflejado en las Tablas 26 y 27.

Los valores de escalón JND del parámetro LFC a bajas y altas frecuencias no son considerados válidos. Esto debido al error de medición que ocurrió durante la toma de las medidas. Tal y como se aprecia en la Tabla 28 y Figura 63.

El parámetro Ts simulado, tal y como se puede observar en la Tabla 29 y la Figura 64, se ajusta muy bien a la curva medida *in situ*.

Por último, para los parámetros de inteligibilidad, STI y Alcons, los cuales se encuentran representados en las Figuras, 65 y 66, respectivamente, los valores de escalón JND son considerados válidos. Tal y como se aprecia en las Tablas 30 y 31.

Tabla 20. Comparación de valores medidos y simulados de EDT, Coro 1.

EDT [s] AURA						
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND	
100	0,97	0,46	1,54	0,58	6	
125	1,10	0,35	1,44	0,31	4	
160	0,91	0,28	1,39	0,52	6	
200	0,91	0,26	1,27	0,39	4	
250	0,84	0,17	1,09	0,30	3	
315	0,86	0,18	0,97	0,13	2	
400	0,83	0,22	0,93	0,12	2	
500	0,82	0,17	0,92	0,12	2	
630	0,88	0,21	0,94	0,06	1	
800	0,83	0,15	0,98	0,18	2	
1000	0,91	0,12	1,02	0,12	2	
1250	0,86	0,11	1,02	0,18	2	
1600	0,83	0,14	1,03	0,25	3	
2000	0,86	0,12	1,03	0,20	2	
2500	0,85	0,11	1,03	0,21	3	
3150	0,85	0,10	1,01	0,18	2	
4000	0,83	0,10	0,97	0,17	2	
5000	0,74	0,11	0,88	0,20	2	
6300	0,65	0,10	0,79	0,21	3	
8000	0,58	0,08	0,69	0,18	2	
10000	0,50	0,09	0,56	0,11	2	

EDT [s] | Comparación Real - Simulado | AURA

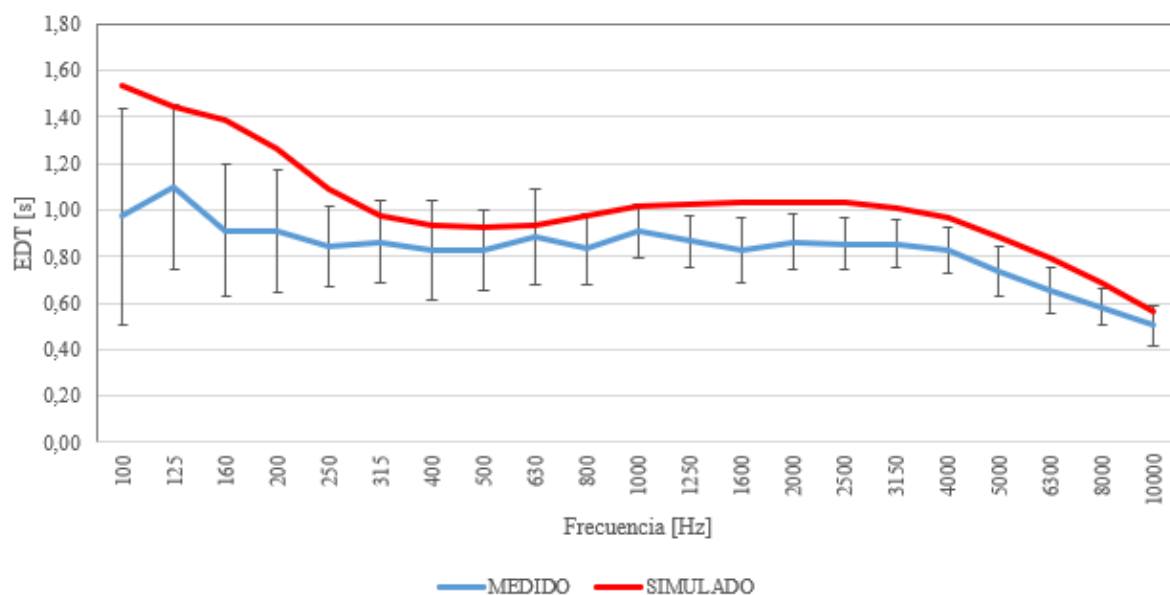


Figura 55. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de EDT, Coro 1.

Tabla 21. Comparación de valores medidos y simulados de T20, Coro 1.

T20 [s] AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
100	1,23	0,20	1,55	0,25	3
125	1,19	0,13	1,45	0,22	3
160	1,14	0,14	1,39	0,23	3
200	1,08	0,11	1,27	0,18	2
250	0,94	0,13	1,10	0,17	2
315	0,87	0,10	0,99	0,13	2
400	0,85	0,06	0,94	0,10	2
500	0,87	0,10	0,93	0,07	1
630	0,92	0,07	0,94	0,03	1
800	0,97	0,06	0,98	0,01	1
1000	0,99	0,06	1,02	0,03	1
1250	0,94	0,05	1,02	0,09	1
1600	0,95	0,05	1,03	0,09	1
2000	0,96	0,06	1,03	0,08	1
2500	0,96	0,03	1,03	0,07	1
3150	0,93	0,03	1,01	0,09	1
4000	0,88	0,05	0,97	0,10	1
5000	0,79	0,03	0,88	0,12	2
6300	0,70	0,04	0,80	0,14	2
8000	0,59	0,03	0,68	0,17	2
10000	0,50	0,03	0,58	0,15	2

T20 [s] | Comparación Real - Simulado | AURA

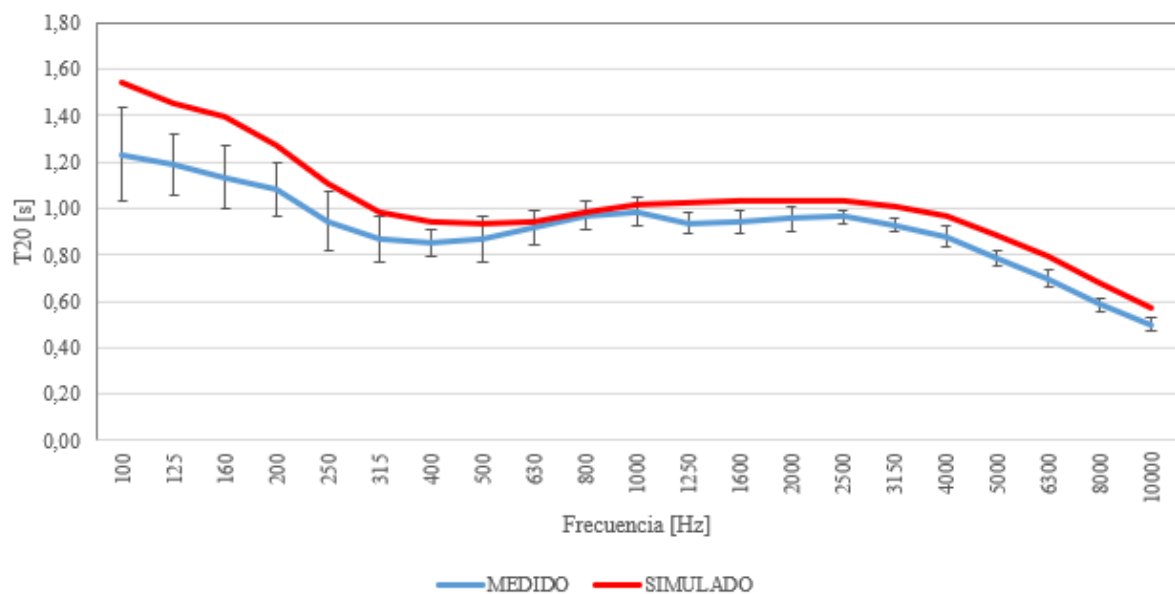


Figura 56. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de T20, Coro 1.

Tabla 22. Comparación de valores medidos y simulados de T30, Coro 1.

T30 [s] AURA						
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND	
100	1,46	0,22	1,55	0,06	1	
125	1,30	0,14	1,46	0,12	2	
160	1,25	0,11	1,40	0,12	2	
200	1,07	0,07	1,28	0,19	2	
250	0,93	0,08	1,11	0,20	2	
315	0,86	0,08	0,99	0,16	2	
400	0,87	0,06	0,95	0,09	1	
500	0,88	0,05	0,94	0,07	1	
630	0,95	0,04	0,95	0,01	1	
800	0,96	0,05	0,98	0,02	1	
1000	0,98	0,04	1,02	0,05	1	
1250	0,94	0,04	1,02	0,09	1	
1600	0,98	0,04	1,03	0,06	1	
2000	1,00	0,05	1,03	0,03	1	
2500	1,00	0,03	1,03	0,04	1	
3150	0,95	0,02	1,01	0,07	1	
4000	0,90	0,03	0,97	0,07	1	
5000	0,80	0,03	0,89	0,11	2	
6300	0,71	0,02	0,80	0,13	2	
8000	0,60	0,02	0,68	0,14	2	
10000	0,51	0,02	0,57	0,12	2	

T30 [s] | Comparación Real - Simulado | AURA

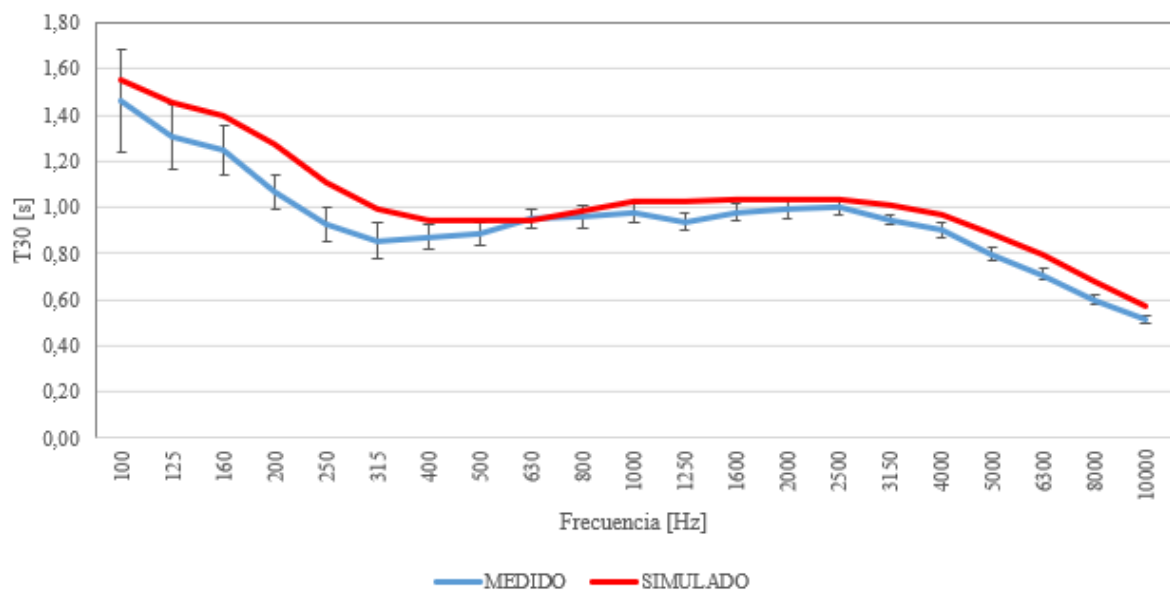


Figura 57. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de T30, Coro 1.

Tabla 23. Comparación de valores medidos y simulados de RT, Coro 1.

RT [s] STD					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
100	1,28	0,22	1,11	0,17	2
125	1,25	0,16	1,05	0,20	2
160	1,22	0,13	1,00	0,22	3
200	1,08	0,08	0,90	0,18	2
250	0,93	0,09	0,79	0,14	2
315	0,85	0,10	0,70	0,15	2
400	0,87	0,06	0,66	0,21	3
500	0,89	0,05	0,66	0,23	3
630	0,94	0,05	0,66	0,28	3
800	0,97	0,06	0,69	0,28	3
1000	0,98	0,04	0,72	0,26	3
1250	0,94	0,04	0,71	0,23	3
1600	0,97	0,04	0,71	0,26	3
2000	0,98	0,05	0,69	0,29	3
2500	0,98	0,04	0,70	0,28	3
3150	0,94	0,02	0,70	0,24	3
4000	0,90	0,03	0,68	0,22	3
5000	0,79	0,03	0,63	0,16	2
6300	0,71	0,02	0,58	0,13	2
8000	0,60	0,02	0,51	0,09	1
10000	0,51	0,02	0,45	0,06	1

RT [s] | Comparación Real - Simulado | STD

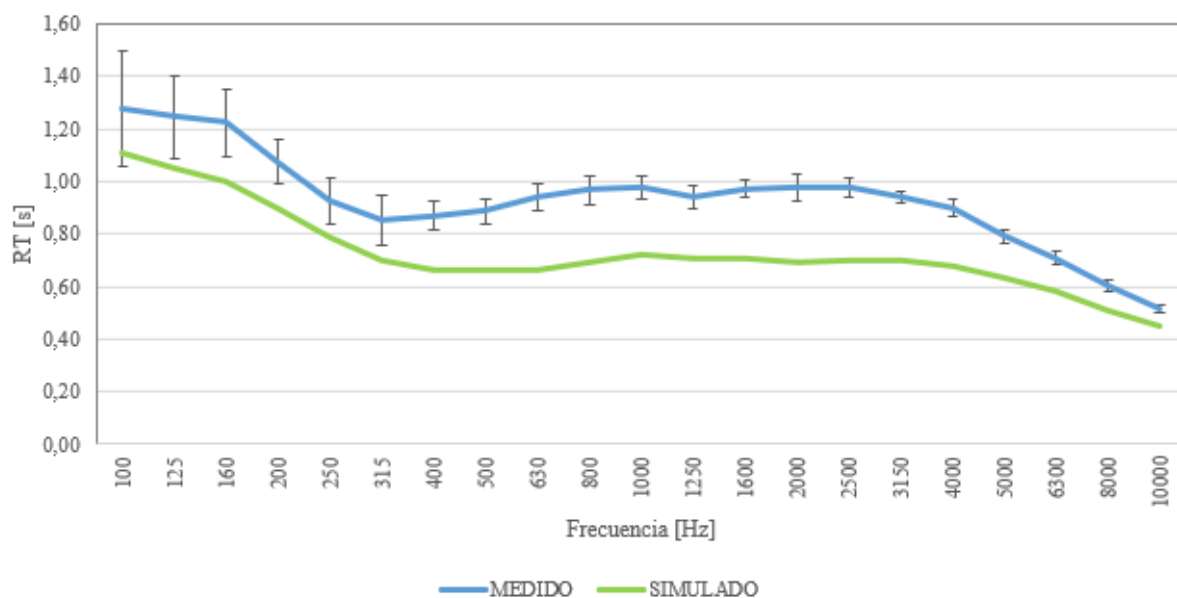


Figura 58. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de RT, Coro 1.

Diseño y validación de un modelo geométrico para el estudio acústico de la Sala de Ensayo del Coro del Teatro Real de Madrid

Tabla 24. Comparación de valores medidos y simulados de C50, Coro 1.

Frecuencias [Hz]	C50 [dB] STD					C50 [dB] AURA				
	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
100	3,17	4,23	-0,36	3,53	4	3,17	4,23	-1,35	4,52	5
125	1,52	2,90	-0,03	1,55	2	1,52	2,90	-0,98	2,50	3
160	-0,07	4,16	0,30	0,37	1	-0,07	4,16	-0,78	0,72	1
200	2,18	3,36	0,93	1,24	2	2,18	3,36	-0,25	2,43	3
250	1,82	1,90	1,82	0,00	1	1,82	1,90	0,63	1,18	2
315	1,59	3,17	2,60	1,02	2	1,59	3,17	1,41	0,18	1
400	2,79	3,23	3,00	0,21	1	2,79	3,23	1,72	1,07	2
500	2,77	3,07	3,08	0,31	1	2,77	3,07	1,75	1,02	2
630	2,53	2,41	3,00	0,48	1	2,53	2,41	1,63	0,89	1
800	1,61	2,51	2,69	1,08	2	1,61	2,51	1,32	0,29	1
1000	2,26	2,56	2,43	0,17	1	2,26	2,56	1,01	1,24	2
1250	1,94	2,17	2,53	0,59	1	1,94	2,17	0,98	0,96	1
1600	1,63	2,17	2,56	0,93	1	1,63	2,17	0,93	0,70	1
2000	1,21	1,62	2,69	1,48	2	1,21	1,62	0,93	0,28	1
2500	1,35	1,98	2,65	1,29	2	1,35	1,98	0,93	0,42	1
3150	1,19	1,94	2,65	1,46	2	1,19	1,94	1,06	0,13	1
4000	1,55	1,73	2,81	1,27	2	1,55	1,73	1,35	0,20	1
5000	2,53	2,01	3,35	0,82	1	2,53	2,01	1,93	0,59	1
6300	3,79	2,60	3,97	0,18	1	3,79	2,60	2,62	1,17	2
8000	4,91	2,43	4,89	0,02	1	4,91	2,43	3,72	1,19	2
10000	5,91	2,38	5,86	0,05	1	5,91	2,38	5,00	0,91	1

C50 [dB] | Comparación Real - Simulado | STD + AURA

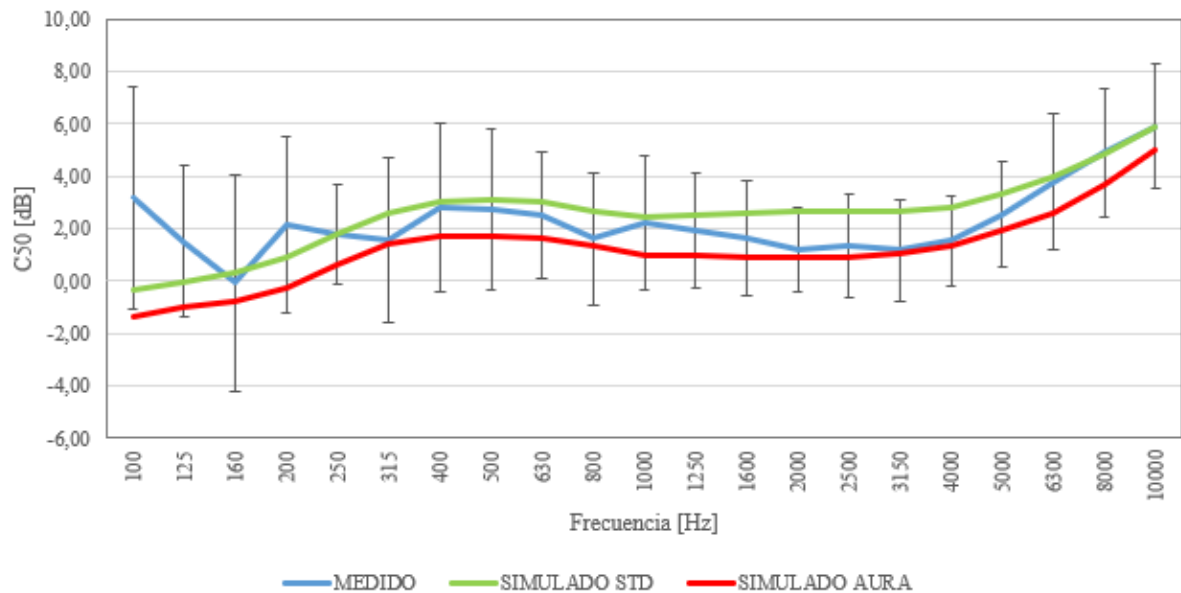


Figura 59. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de C50, Coro 1.

Diseño y validación de un modelo geométrico para el estudio acústico de la Sala de Ensayo del Coro del Teatro Real de Madrid

Tabla 25. Comparación de valores medidos y simulados de C80, Coro 1.

Frecuencias [Hz]	C80 [dB] STD					C80 [dB] AURA				
	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
100	5,85	4,04	2,53	3,32	4	5,85	4,04	1,12	4,73	5
125	4,67	2,10	2,92	1,75	2	4,67	2,10	1,55	3,12	4
160	3,34	3,86	3,31	0,03	1	3,34	3,86	1,79	1,55	2
200	4,27	2,82	4,06	0,21	1	4,27	2,82	2,39	1,89	2
250	4,87	1,97	5,15	0,28	1	4,87	1,97	3,42	1,45	2
315	5,12	2,35	6,12	1,00	2	5,12	2,35	4,33	0,79	1
400	5,84	2,64	6,62	0,78	1	5,84	2,64	4,69	1,15	2
500	5,81	2,69	6,72	0,91	1	5,81	2,69	4,74	1,07	2
630	5,45	2,47	6,62	1,17	2	5,45	2,47	4,60	0,86	1
800	5,39	2,44	6,23	0,84	1	5,39	2,44	4,22	1,17	2
1000	5,12	1,91	5,90	0,78	1	5,12	1,91	3,89	1,24	2
1250	5,04	1,74	6,03	0,99	1	5,04	1,74	3,85	1,19	2
1600	5,45	2,09	6,07	0,62	1	5,45	2,09	3,80	1,66	2
2000	4,83	1,67	6,24	1,41	2	4,83	1,67	3,79	1,04	2
2500	4,82	1,49	6,18	1,36	2	4,82	1,49	3,79	1,03	2
3150	4,55	1,69	6,19	1,64	2	4,55	1,69	3,95	0,59	1
4000	4,88	1,39	6,41	1,53	2	4,88	1,39	4,30	0,58	1
5000	6,19	1,94	7,10	0,91	1	6,19	1,94	5,00	1,19	2
6300	7,52	2,25	7,92	0,40	1	7,52	2,25	5,85	1,67	2
8000	9,01	1,96	9,16	0,15	1	9,01	1,96	7,23	1,78	2
10000	10,28	2,28	10,51	0,23	1	10,28	2,28	8,91	1,37	2

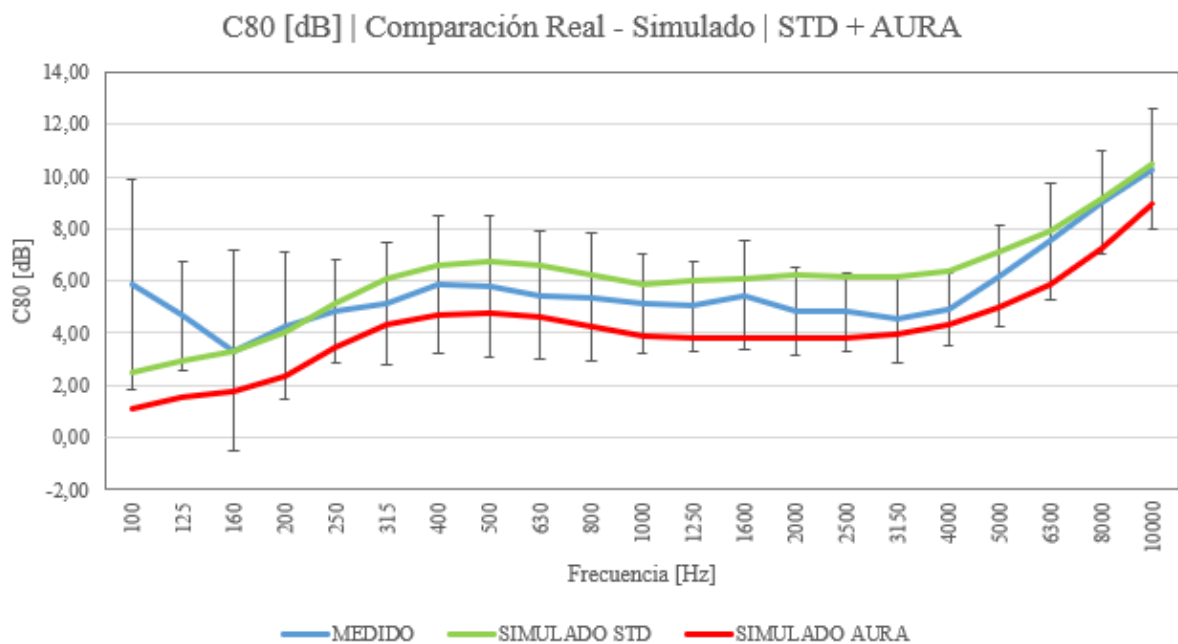


Figura 60. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de C80, Coro 1.

Tabla 26. Comparación de valores medidos y simulados de D50, Coro 1.

D50 [-] AURA						
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND	
100	0,65	0,20	0,43	0,34	4	
125	0,58	0,15	0,45	0,23	3	
160	0,50	0,20	0,46	0,09	1	
200	0,61	0,17	0,49	0,21	3	
250	0,62	0,12	0,53	0,13	2	
315	0,58	0,16	0,58	0,01	1	
400	0,64	0,16	0,59	0,07	1	
500	0,64	0,15	0,60	0,07	1	
630	0,63	0,13	0,59	0,07	1	
800	0,59	0,13	0,57	0,02	1	
1000	0,62	0,13	0,56	0,10	2	
1250	0,60	0,12	0,55	0,08	1	
1600	0,60	0,13	0,55	0,09	1	
2000	0,57	0,09	0,55	0,03	1	
2500	0,57	0,11	0,55	0,04	1	
3150	0,57	0,11	0,56	0,01	1	
4000	0,59	0,10	0,57	0,02	1	
5000	0,64	0,11	0,61	0,05	1	
6300	0,69	0,12	0,64	0,07	1	
8000	0,76	0,09	0,70	0,08	1	
10000	0,78	0,09	0,75	0,04	1	

D50 [-] | Comparación Real - Simulado | AURA

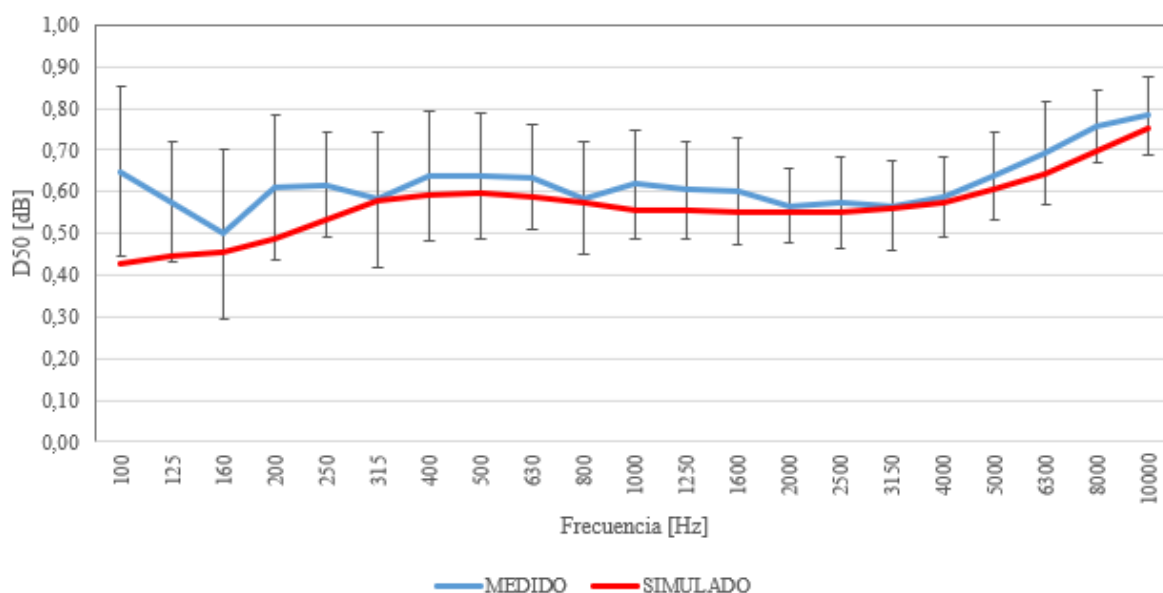


Figura 61. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de D50, Coro 1.

Tabla 27. Comparación de valores medidos y simulados de T_s , Coro 1.

Ts [ms] AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
100	87,31	26,24	100,50	13,19	2
125	90,25	12,81	93,72	3,47	1
160	89,35	18,13	89,87	0,52	1
200	78,96	20,00	81,46	2,50	1
250	72,88	10,98	69,42	3,45	1
315	67,41	16,59	60,66	6,75	1
400	59,77	17,53	57,57	2,20	1
500	57,19	15,94	57,23	0,03	1
630	59,29	17,00	58,24	1,04	1
800	60,79	16,23	61,37	0,58	1
1000	57,17	15,59	64,44	7,27	1
1250	58,15	13,67	64,77	6,62	1
1600	57,13	14,47	65,33	8,20	1
2000	61,71	12,05	65,44	3,73	1
2500	60,33	12,49	65,42	5,09	1
3150	62,18	12,22	63,94	1,76	1
4000	58,51	10,56	60,79	2,28	1
5000	49,95	12,79	55,12	5,17	1
6300	41,88	13,74	49,07	7,19	1
8000	34,37	11,13	41,25	6,88	1
10000	30,11	9,98	34,05	3,94	1

Ts [ms] | Comparación Real - Simulado | AURA

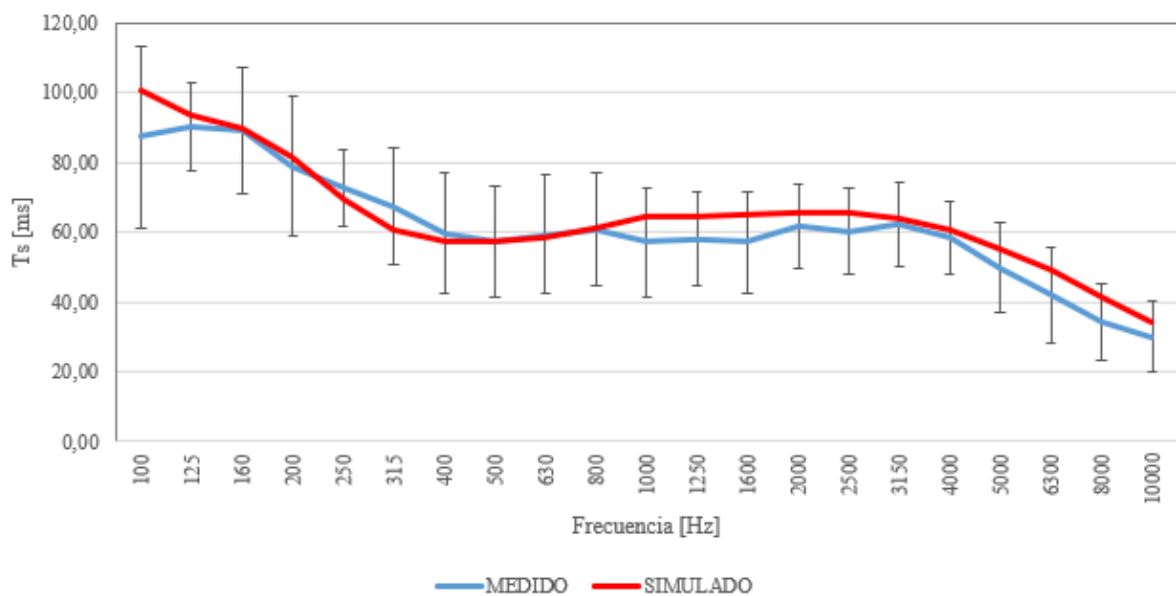


Figura 62. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de T_s , Coro 1.

Tabla 28. Comparación de valores medidos y simulados de LF, Coro 1.

LF [-] AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
100	0,01	0,01	0,23	0,22	5
125	0,01	0,01	0,23	0,22	5
160	0,01	0,01	0,23	0,22	5
200	0,04	0,03	0,23	0,18	4
250	0,04	0,02	0,22	0,17	4
315	0,06	0,04	0,21	0,15	4
400	0,06	0,04	0,21	0,15	3
500	0,07	0,04	0,21	0,14	3
630	0,09	0,05	0,21	0,11	3
800	0,11	0,06	0,21	0,10	2
1000	0,12	0,06	0,22	0,10	2
1250	0,15	0,07	0,22	0,07	2
1600	0,13	0,05	0,22	0,10	2
2000	0,16	0,06	0,23	0,07	2
2500	0,17	0,07	0,23	0,06	2
3150	0,18	0,07	0,23	0,05	1
4000	0,21	0,10	0,23	0,01	1
5000	0,17	0,08	0,23	0,06	2
6300	0,10	0,04	0,22	0,12	3
8000	0,13	0,05	0,22	0,09	2
10000	0,25	0,14	0,21	0,04	1

LF [-] | Comparación Real - Simulado | AURA

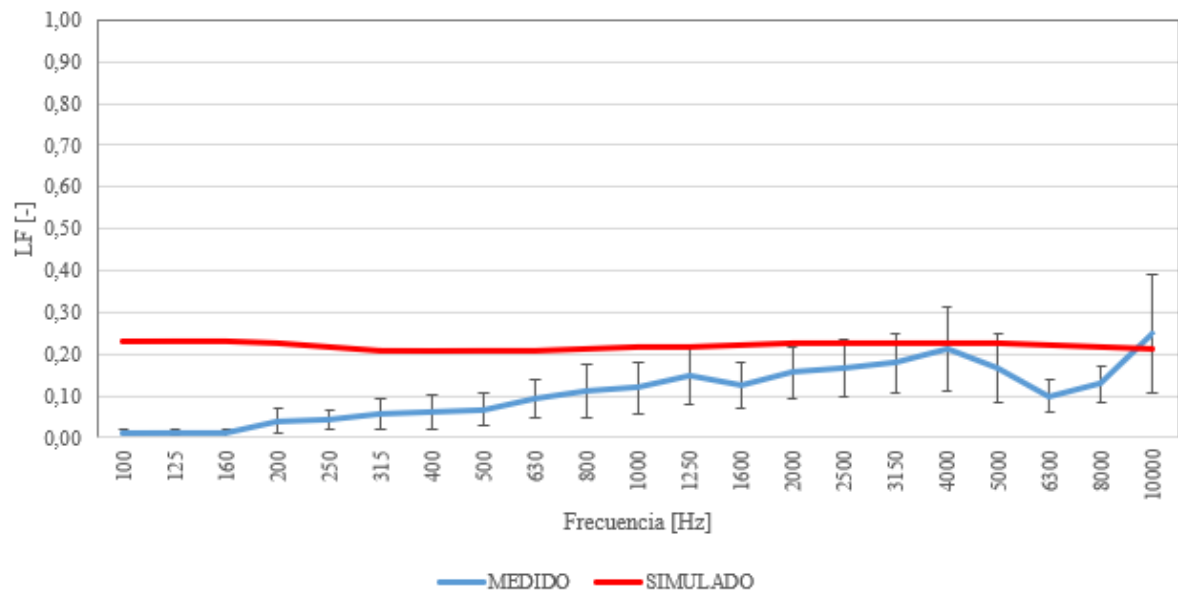


Figura 63. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de LF, Coro 1.

Tabla 29. Comparación de valores medidos y simulados de LFC, Coro 1.

LFC [-] AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
100			0,37		
125	0,51	0,27	0,37	0,14	3
160	0,25	0,17	0,37	0,12	3
200	0,23	0,18	0,37	0,14	3
250	0,14	0,06	0,35	0,21	5
315	0,15	0,08	0,35	0,20	4
400	0,15	0,09	0,34	0,19	4
500	0,15	0,07	0,34	0,19	4
630	0,18	0,09	0,34	0,16	4
800	0,35	0,16	0,35	0,00	1
1000	0,42	0,19	0,35	0,06	2
1250	0,42	0,20	0,36	0,06	2
1600	0,20	0,06	0,36	0,16	4
2000	0,12	0,04	0,36	0,25	5
2500	0,09	0,02	0,36	0,28	6
3150	0,14	0,04	0,36	0,22	5
4000	0,09	0,02	0,36	0,27	6
5000	0,02	0,01	0,36	0,34	7
6300			0,35		
8000			0,34		
10000			0,33		

LFC [-] | Comparación Real - Simulado | AURA

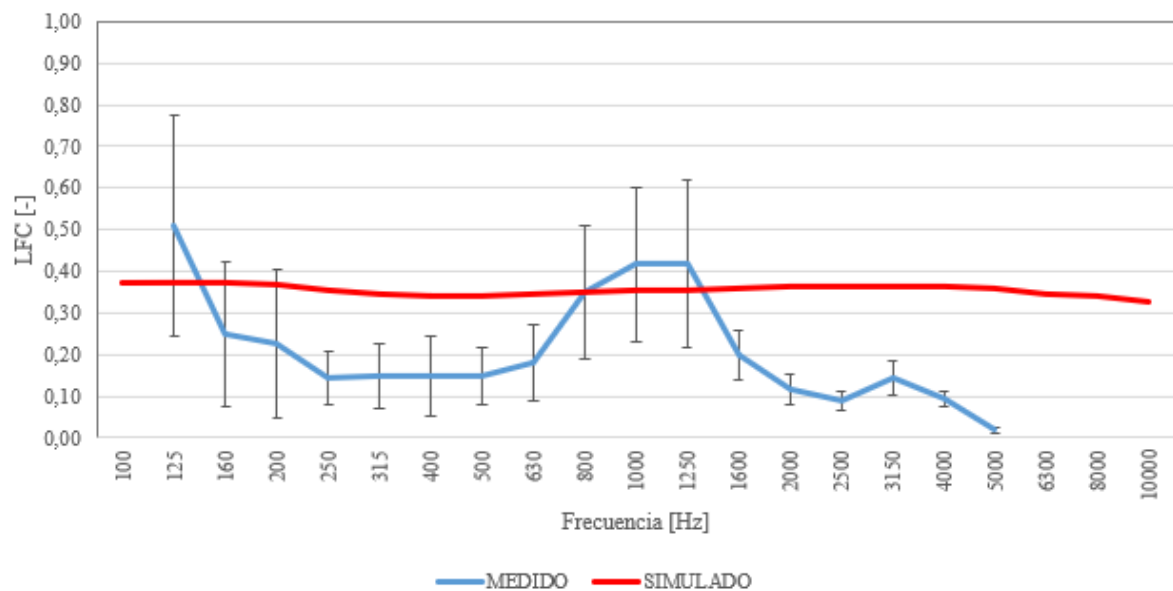


Figura 64. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de LFC, Coro 1.

Tabla 30. Comparación de valores medidos y simulados de STI, Coro 1.

Frecuencias [Hz]	STI [-] STD					STI [-] AURA				
	MEDIDO	DESVIACIÓN	IMULADO ST	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO AURA	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
-	0,65	0,04	0,70	0,05	2	0,65	0,04	0,62	0,03	2

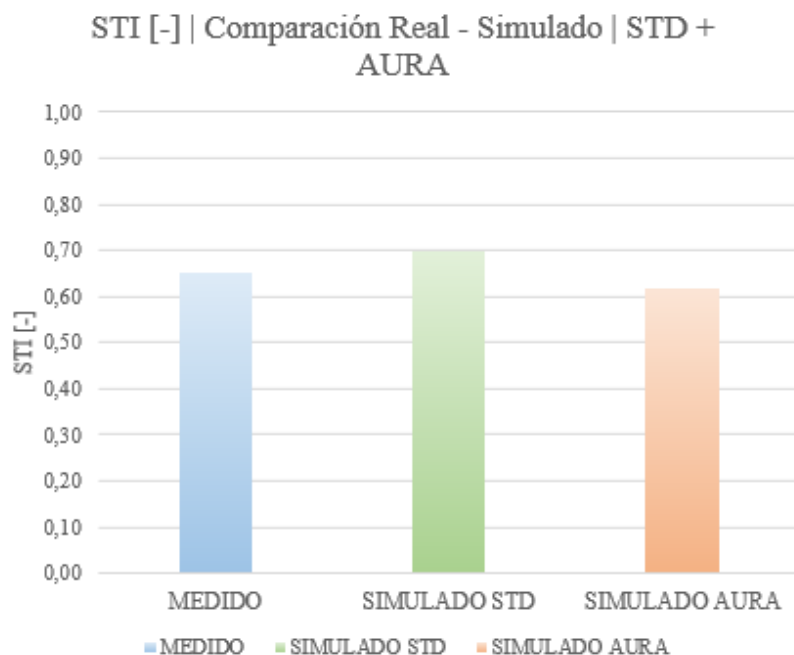


Figura 65. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de STI, Coro 1.

Tabla 31. Comparación de valores medidos y simulados de Alcons, Coro 1.

Frecuencias [Hz]	ALCONS [%] STD					ALCONS [%] AURA				
	MEDIDO	DESVIACIÓN	IMULADO ST	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO AURA	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
-	5,11	1,01	3,88	1,23	1	5,11	1,01	6,13	1,02	1

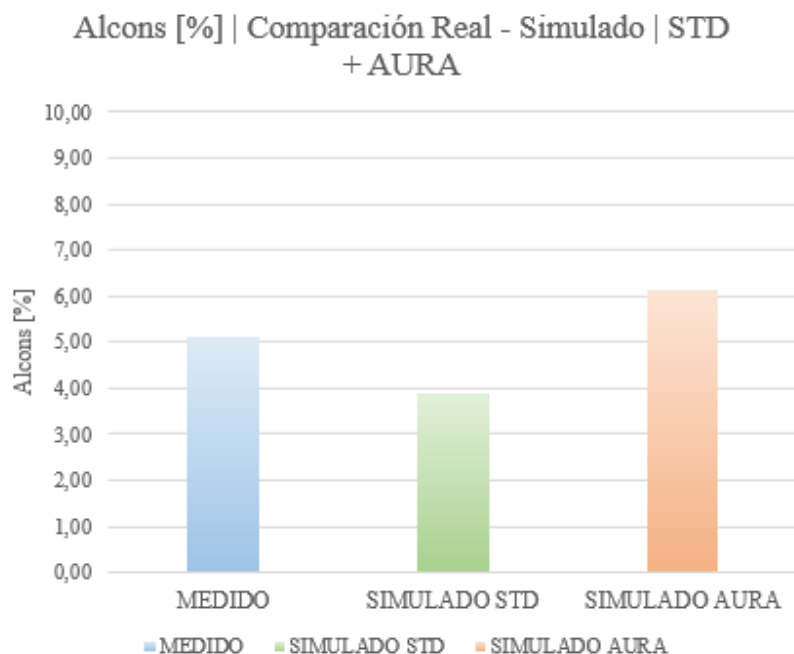


Figura 66. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de Alcons, Coro 1.

En la Tabla 32 se presentan los valores de los escalones JND de los diferentes parámetros acústicos, con el objetivo de obtener una visión más completa de la respuesta de la simulación de la sala en EASE en comparación con los valores medidos *in situ*.

Se puede concluir, entonces, que los resultados obtenidos de la simulación en EASE para el Coro 1 son satisfactorios. Teniendo en consideración que su respuesta a bajas frecuencias se aleja un poco de la respuesta real, pero se sigue considerando válida. Como se puede observar en la Tabla 33 que representa los porcentajes de los escalones JND el único valor mayor que 6 es del parámetro LFC, esto ocurre debido a un problema en la medición que se había comentado previamente.

Tabla 32. Escalones JND de los diferentes parámetros acústicos, Coro 1.

Frecuencia	EDT AURA	T20 AURA	T30 AURA	RT STD	C50 STD	C50 AURA	C80 STD	C80 AURA	D50 AURA	Ts AURA	LF AURA	LFC AURA	STI STD	STI AURA	AICons STD	AICons AURA
100 Hz	6	3	1	2	4	5	4	5	4	2	5					
125 Hz	4	3	2	2	2	3	2	4	3	1	5	3				
160 Hz	6	3	2	3	1	1	1	2	1	1	5	3				
200 Hz	4	2	2	2	2	3	1	2	3	1	4	3				
250 Hz	3	2	2	2	1	2	1	2	2	1	4	5				
315 Hz	2	2	2	2	2	1	2	1	1	1	4	4				
400 Hz	2	2	1	3	1	2	1	2	1	1	3	4				
500 Hz	2	1	1	3	1	2	1	2	1	1	3	4				
630 Hz	1	1	1	3	1	1	2	1	1	1	3	4				
800 Hz	2	1	1	3	2	1	1	2	1	1	2	1				
1000 Hz	2	1	1	3	1	2	1	2	2	1	2	2				1
1250 Hz	2	1	1	3	1	1	1	2	1	1	2	2				
1600 Hz	3	1	1	3	1	1	1	2	1	1	2	4				
2000 Hz	2	1	1	3	2	1	2	2	1	1	2	5				
2500 Hz	3	1	1	3	2	1	2	2	1	1	2	6				
3150 Hz	2	1	1	3	2	1	2	1	1	1	1	5				
4000 Hz	2	1	1	3	2	1	2	1	1	1	1	6				
5000 Hz	2	2	2	2	1	1	1	2	1	1	2	7				
6300 Hz	3	2	2	2	1	2	1	2	1	1	3					
8000 Hz	2	2	2	1	1	2	1	2	1	1	2					
10000 Hz	2	2	2	1	1	1	1	2	1	1	1					

Tabla 33. Porcentajes de los escalones JND, Coro 1.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TOTAL
Cantidad por escalón	108	87	30	14	8	4	1	0	0	0	252
% sobre Total	43%	35%	12%	6%	3%	2%	0%	0%	0%	0%	
% acumulado	43%	77%	89%	95%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	

A continuación, se muestran la comparación de los parámetros simulados y medidos en el Coro 2.

Los valores de EDT obtenidos en la simulación de EASE para el Coro 2 se consideran válidos. En la Tabla 34, se observa que, a bajas frecuencias, los valores del escalón JND son más altos que en las demás bandas. Sin embargo, estos valores no ultrapasan el valor mínimo considerado válido, 6.

En las Figuras 68 y 69 se aprecian las gráficas de comparación medidos y simulados de los valores T20 y T30, respectivamente. Estos valores se consideran válidos y se pueden analizar con mayor detalle en las Tablas 35 y 36.

Los valores de RT simulados son los mismos para el Coro 1 y el Coro 2, porque se calculan según la fórmula de Eyring. Se puede observar en la Tabla 37, y también en la Figura 70, que los valores de RT calculados por EASE se ajustan correctamente a los valores de RT medidos en el Coro 2.

Para C50 y C80 se consigue una aproximación bastante buena, como se puede observar por los valores de los escalones JND de las Tablas 38 y 39, y por la similitud de ambos los gráficos representados en las Figuras 71 y 72. Sin embargo, los resultados obtenidos a bajas frecuencias difieren un poco más en comparación que los restantes. También se observa que los resultados obtenidos son mejores en el método STD que en AURA, tanto para C50 como para C80.

En el parámetro D50, representado en la Figuras 73, ocurre lo mismo. Se observa que la curva simulada se ajusta bastante bien con una pequeña discrepancia a bajas frecuencias, pero sigue siendo aceptable. Esto se encuentra reflejado en la Tablas 40.

El parámetro Ts simulado, tal y como se puede observar en la Figura 74 y la Tabla 41, se ajusta muy bien a la curva medida *in situ*.

Por último, para los parámetros de inteligibilidad, STI y Alcons, representados en las Figuras, 75 y 76, respectivamente, los escalones JND se consideran válidos. Tal y como se muestra en las Tablas 42 y 43.

Por otro lado, no se realiza la comparación de los parámetros acústicos LF y LFC porque, debido al problema durante la toma de las medidas *in situ* no se han obtenido los datos de estos parámetros, así que no es posible realizar la comparación.

Tabla 34. Comparación de valores medidos y simulados de EDT, Coro 2.

EDT [s] AURA						
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND	
100	1,09	0,36	1,55	0,42	5	
125	1,10	0,30	1,45	0,32	4	
160	0,93	0,31	1,39	0,50	5	
200	0,91	0,30	1,27	0,40	4	
250	0,90	0,22	1,10	0,23	3	
315	0,92	0,20	0,97	0,05	1	
400	0,88	0,15	0,92	0,06	1	
500	0,82	0,17	0,93	0,13	2	
630	0,91	0,21	0,93	0,03	1	
800	0,89	0,11	0,98	0,10	1	
1000	0,92	0,11	1,03	0,11	2	
1250	0,89	0,11	1,03	0,16	2	
1600	0,91	0,12	1,04	0,14	2	
2000	0,92	0,12	1,04	0,14	2	
2500	0,93	0,12	1,04	0,12	2	
3150	0,91	0,12	1,02	0,13	2	
4000	0,85	0,11	0,97	0,14	2	
5000	0,77	0,11	0,89	0,16	2	
6300	0,67	0,11	0,80	0,18	2	
8000	0,58	0,08	0,68	0,17	2	
10000	0,52	0,09	0,57	0,09	1	

EDT [s] | Comparación Real - Simulado | AURA

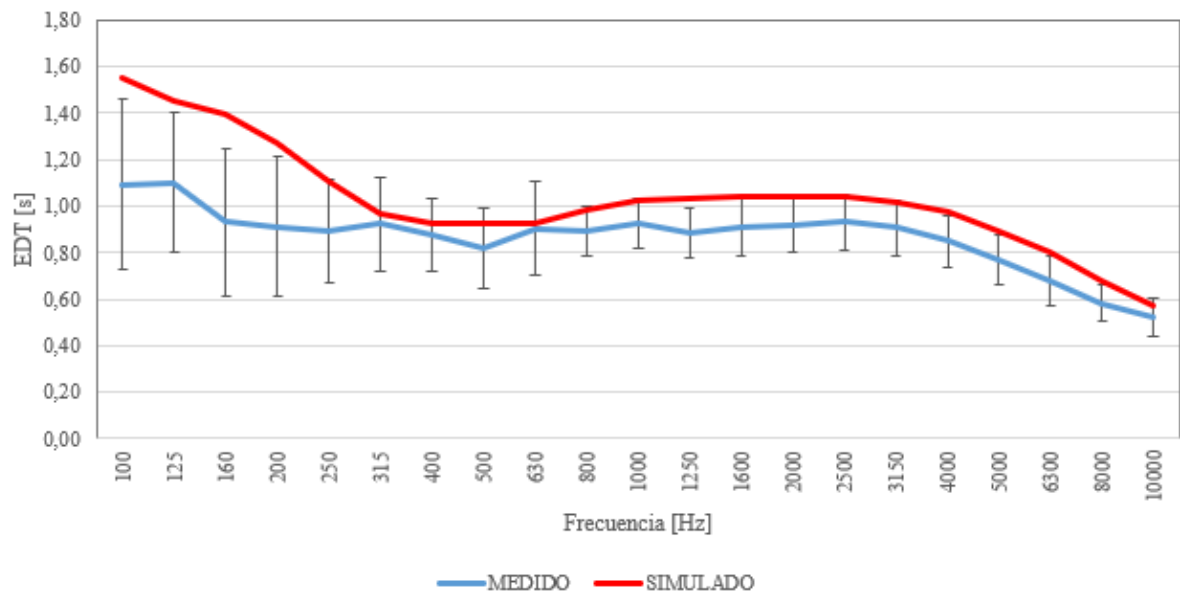


Figura 67. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de EDT, Coro 2.

Tabla 35. Comparación de valores medidos y simulados de T20, Coro 2.

T20 [s] AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
100	1,21	0,20	1,55	0,28	3
125	1,18	0,18	1,45	0,23	3
160	1,17	0,15	1,39	0,19	2
200	1,05	0,13	1,28	0,22	3
250	0,96	0,12	1,11	0,16	2
315	0,85	0,11	0,99	0,17	2
400	0,87	0,09	0,95	0,09	1
500	0,91	0,08	0,94	0,03	1
630	0,96	0,08	0,95	0,02	1
800	0,97	0,07	0,98	0,02	1
1000	0,97	0,06	1,02	0,05	1
1250	0,96	0,07	1,03	0,07	1
1600	0,96	0,04	1,03	0,07	1
2000	0,99	0,05	1,03	0,05	1
2500	0,95	0,04	1,03	0,09	1
3150	0,94	0,03	1,01	0,08	1
4000	0,90	0,03	0,97	0,08	1
5000	0,79	0,03	0,88	0,11	2
6300	0,71	0,03	0,80	0,13	2
8000	0,62	0,03	0,68	0,11	2
10000	0,52	0,03	0,58	0,10	2

T20 [s] | Comparación Real - Simulado | AURA

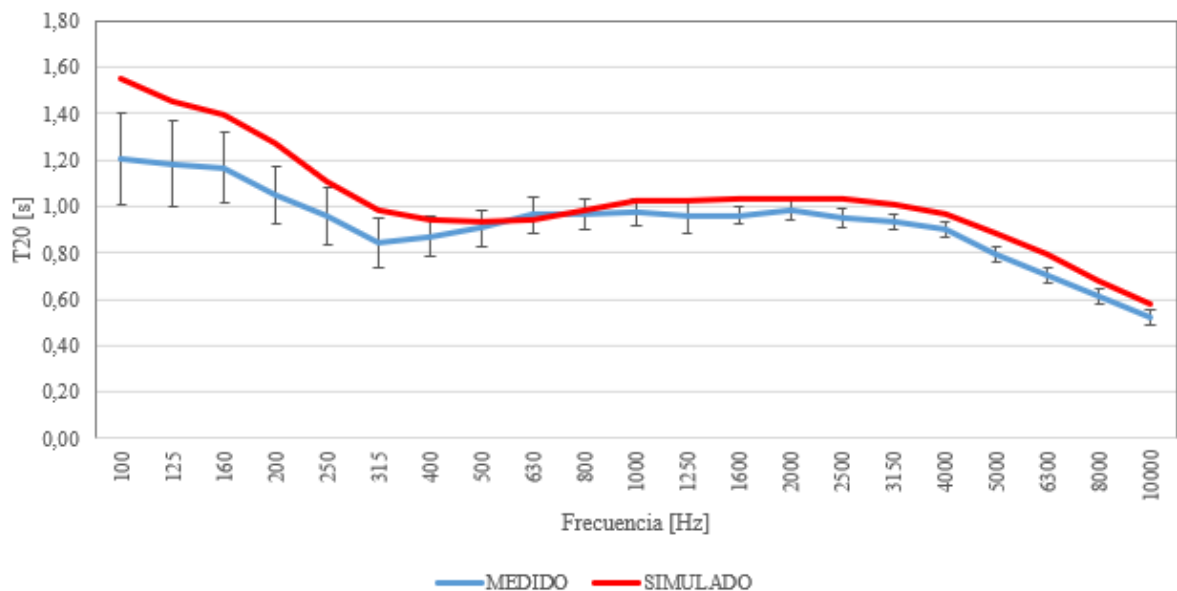


Figura 68. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de T20, Coro 2.

Tabla 36. Comparación de valores medidos y simulados de T30, Coro 2.

T30 [s] AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
100	1,38	0,22	1,55	0,12	2
125	1,28	0,15	1,46	0,14	2
160	1,22	0,09	1,40	0,14	2
200	1,05	0,10	1,28	0,22	3
250	0,95	0,07	1,11	0,17	2
315	0,87	0,06	0,99	0,14	2
400	0,89	0,06	0,95	0,07	1
500	0,93	0,04	0,94	0,02	1
630	0,97	0,06	0,95	0,02	1
800	0,97	0,04	0,99	0,01	1
1000	0,98	0,04	1,02	0,04	1
1250	0,97	0,05	1,03	0,05	1
1600	0,99	0,04	1,03	0,04	1
2000	1,01	0,04	1,03	0,02	1
2500	0,99	0,03	1,03	0,04	1
3150	0,95	0,02	1,01	0,06	1
4000	0,91	0,02	0,97	0,06	1
5000	0,81	0,02	0,89	0,09	1
6300	0,71	0,02	0,80	0,12	2
8000	0,62	0,02	0,68	0,11	2
10000	0,53	0,02	0,58	0,09	1

T30 [s] | Comparación Real - Simulado | AURA

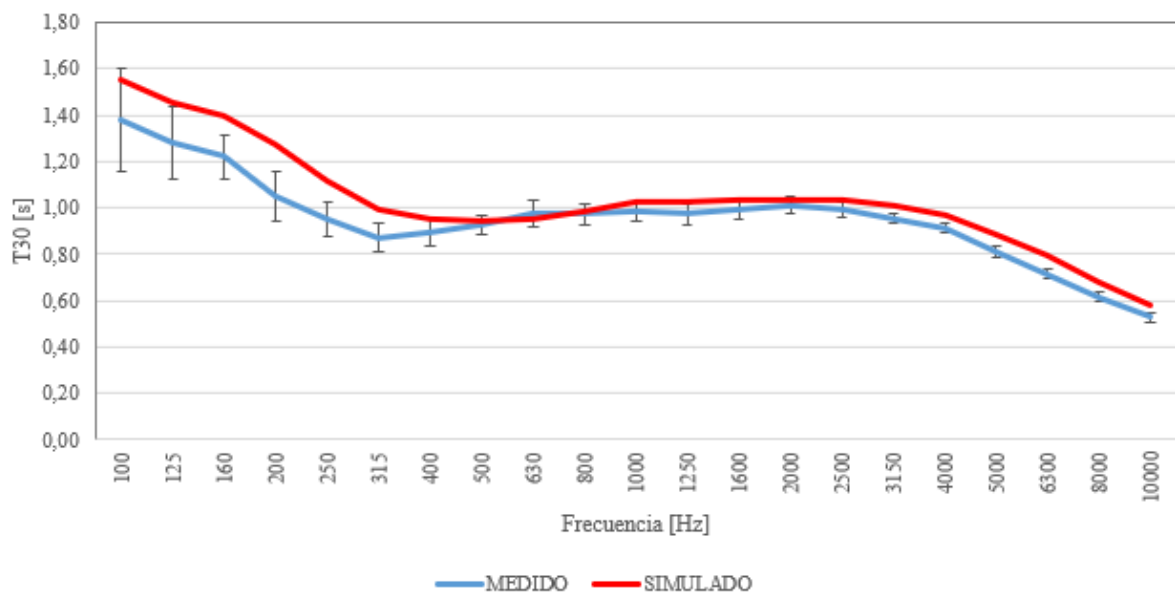


Figura 69. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de T30, Coro 2.

Tabla 37. Comparación de valores medidos y simulados de RT, Coro 2.

RT [s] STD					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
100	1,25	0,21	1,11	0,14	2
125	1,19	0,18	1,05	0,14	2
160	1,20	0,10	1,00	0,20	3
200	1,06	0,10	0,90	0,16	2
250	0,95	0,09	0,79	0,16	2
315	0,86	0,09	0,70	0,16	2
400	0,88	0,06	0,66	0,22	3
500	0,92	0,05	0,66	0,26	3
630	0,98	0,07	0,66	0,32	4
800	0,97	0,05	0,69	0,28	3
1000	0,98	0,04	0,72	0,26	3
1250	0,97	0,05	0,71	0,26	3
1600	0,99	0,04	0,71	0,28	3
2000	1,00	0,05	0,69	0,31	4
2500	0,97	0,04	0,70	0,27	3
3150	0,94	0,03	0,70	0,24	3
4000	0,91	0,03	0,68	0,23	3
5000	0,81	0,02	0,63	0,18	2
6300	0,72	0,02	0,58	0,14	2
8000	0,62	0,02	0,51	0,11	2
10000	0,53	0,02	0,45	0,08	1

RT [s] | Comparación Real - Simulado | STD

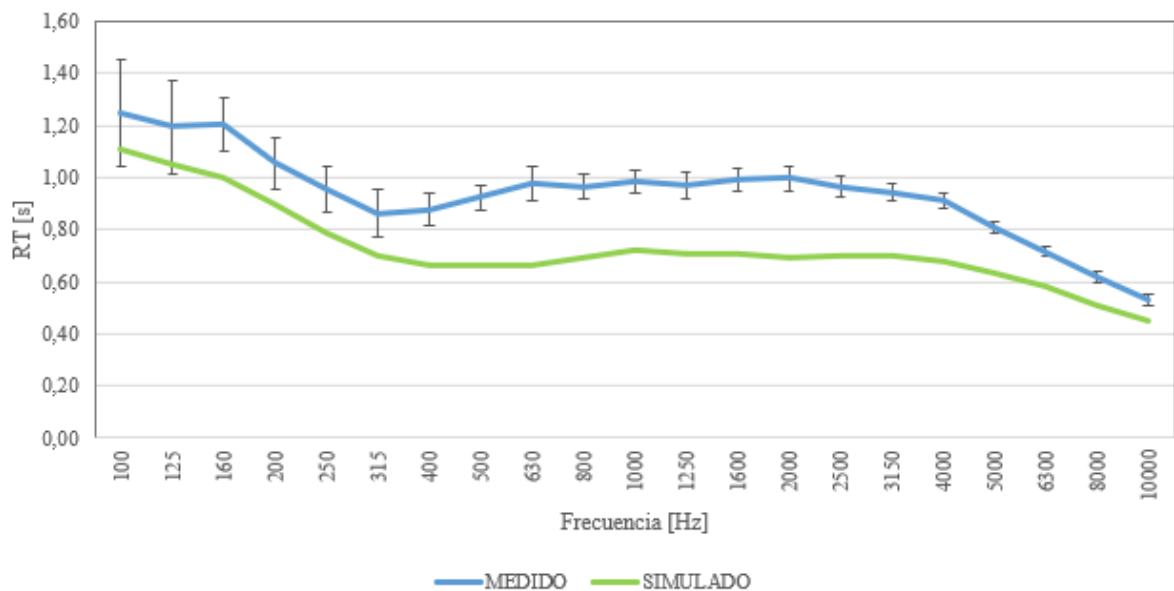


Figura 70. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de RT, Coro 2.

Tabla 38. Comparación de valores medidos y simulados de C50, Coro 2.

Frecuencias [Hz]	C50 [dB] STD					C50 [dB] AURA				
	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
100	2,62	4,28	-0,53	3,15	4	2,62	4,28	-1,88	4,50	5
125	1,29	3,09	-0,20	1,49	2	1,29	3,09	-1,50	2,79	3
160	0,87	3,79	0,12	0,75	1	0,87	3,79	-1,26	2,13	3
200	1,09	3,05	0,74	0,34	1	1,09	3,05	-0,70	1,79	2
250	0,83	2,81	1,63	0,80	1	0,83	2,81	0,22	0,61	1
315	0,52	3,33	2,40	1,88	2	0,52	3,33	1,03	0,52	1
400	1,90	2,82	2,80	0,90	1	1,90	2,82	1,34	0,56	1
500	2,49	2,68	2,87	0,38	1	2,49	2,68	1,41	1,08	2
630	1,87	2,10	2,79	0,92	1	1,87	2,10	1,30	0,57	1
800	1,98	1,90	2,48	0,50	1	1,98	1,90	0,97	1,01	2
1000	1,62	1,69	2,22	0,61	1	1,62	1,69	0,69	0,93	1
1250	1,22	2,25	2,32	1,10	2	1,22	2,25	0,66	0,57	1
1600	1,24	1,73	2,36	1,12	2	1,24	1,73	0,59	0,65	1
2000	1,19	1,57	2,49	1,30	2	1,19	1,57	0,58	0,61	1
2500	1,19	1,50	2,44	1,25	2	1,19	1,50	0,58	0,61	1
3150	1,07	1,51	2,44	1,37	2	1,07	1,51	0,70	0,37	1
4000	1,47	1,31	2,61	1,14	2	1,47	1,31	1,00	0,48	1
5000	2,75	1,83	3,14	0,39	1	2,75	1,83	1,57	1,18	2
6300	4,00	2,12	3,76	0,24	1	4,00	2,12	2,27	1,73	2
8000	4,99	1,53	4,67	0,31	1	4,99	1,53	3,37	1,62	2
10000	5,70	1,70	5,64	0,07	1	5,70	1,70	4,67	1,04	2

C50 [dB] | Comparación Real - Simulado | STD + AURA

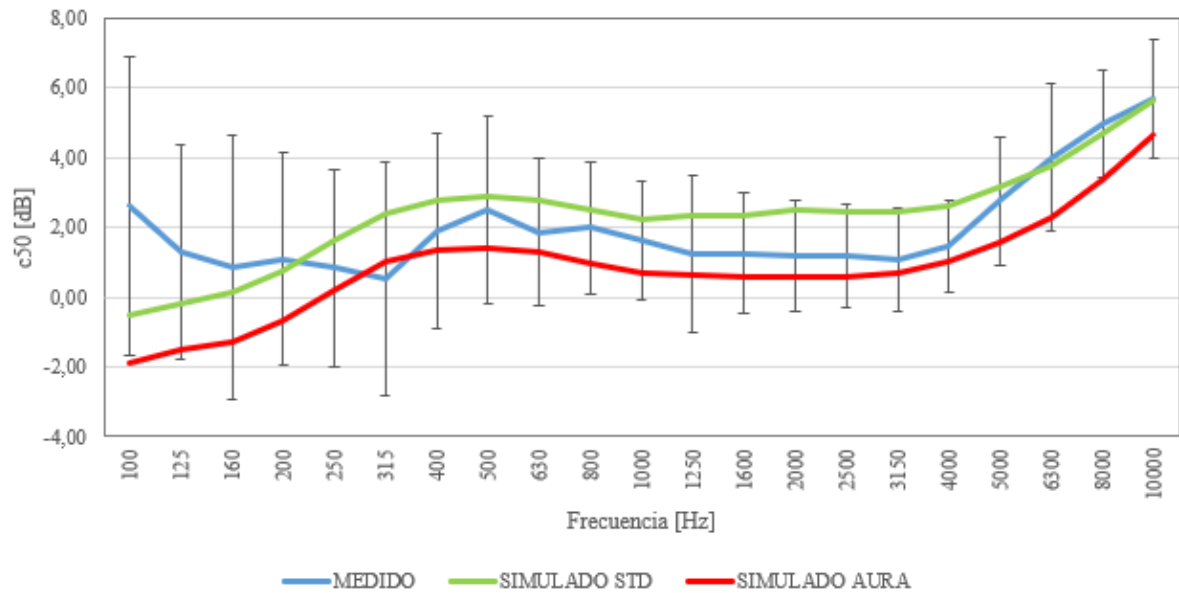


Figura 71. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de C50, Coro 2.

Diseño y validación de un modelo geométrico para el estudio acústico de la Sala de Ensayo del Coro del Teatro Real de Madrid

Tabla 39. Comparación de valores medidos y simulados de C80, Coro 2.

Frecuencias [Hz]	C80 [dB] STD					C80 [dB] AURA				
	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
100	5,02	3,24	2,40	2,63	3	5,02	3,24	0,69	4,34	5
125	3,80	3,15	2,79	1,02	2	3,80	3,15	1,11	2,69	3
160	3,98	3,87	3,17	0,81	1	3,98	3,87	1,38	2,60	3
200	4,15	2,74	3,92	0,23	1	4,15	2,74	2,00	2,15	3
250	4,03	2,43	4,99	0,96	1	4,03	2,43	3,04	0,99	1
315	4,22	2,71	5,95	1,73	2	4,22	2,71	3,98	0,24	1
400	5,31	2,24	6,45	1,14	2	5,31	2,24	4,34	0,97	1
500	5,63	2,30	6,55	0,92	1	5,63	2,30	4,42	1,21	2
630	4,99	2,02	6,45	1,46	2	4,99	2,02	4,29	0,70	1
800	5,08	1,77	6,06	0,98	1	5,08	1,77	3,92	1,16	2
1000	4,51	1,50	5,74	1,23	2	4,51	1,50	3,58	0,93	1
1250	4,43	2,06	5,86	1,44	2	4,43	2,06	3,54	0,89	1
1600	4,38	1,57	5,91	1,53	2	4,38	1,57	3,47	0,91	1
2000	4,38	1,52	6,07	1,69	2	4,38	1,52	3,45	0,93	1
2500	4,20	1,47	6,02	1,82	2	4,20	1,47	3,46	0,74	1
3150	4,24	1,27	6,02	1,78	2	4,24	1,27	3,60	0,64	1
4000	4,81	1,33	6,24	1,43	2	4,81	1,33	3,95	0,85	1
5000	6,10	1,71	6,93	0,83	1	6,10	1,71	4,63	1,47	2
6300	7,42	2,12	7,74	0,32	1	7,42	2,12	5,51	1,91	2
8000	8,65	1,38	8,97	0,32	1	8,65	1,38	6,85	1,79	2
10000	9,75	1,74	10,31	0,56	1	9,75	1,74	8,51	1,24	2

C80 [dB] | Comparación Real - Simulado | STD + AURA

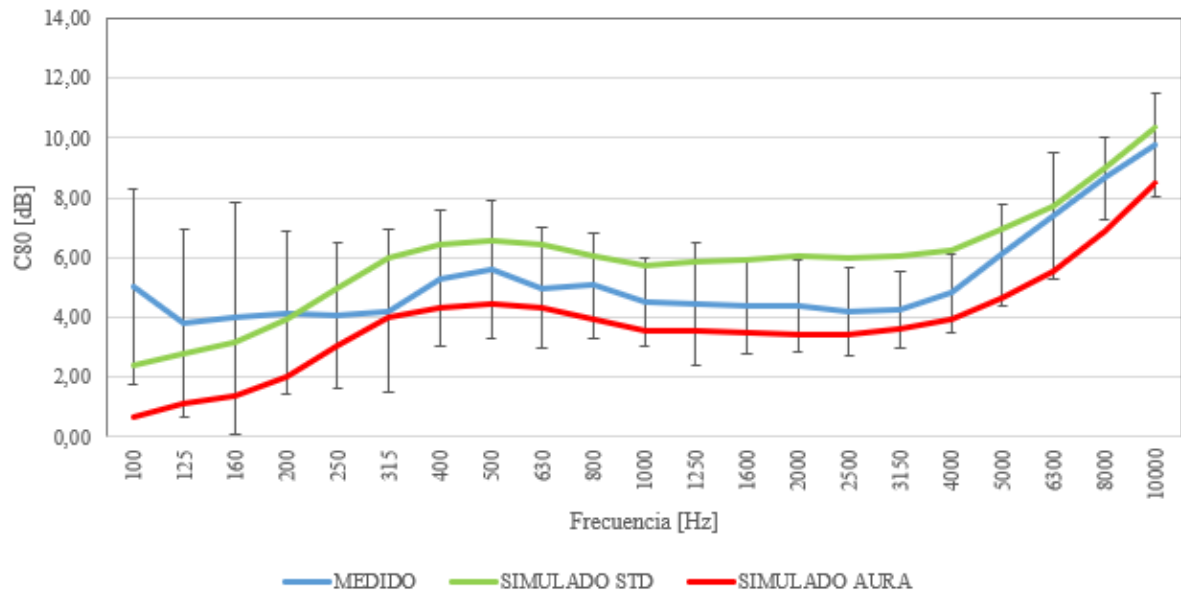


Figura 72. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de C80, Coro 2.

Tabla 40. Comparación de valores medidos y simulados de D50, Coro 2.

D50 [-] AURA						
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND	
100	0,63	0,21	0,40	0,37	4	
125	0,57	0,16	0,42	0,27	3	
160	0,54	0,19	0,43	0,21	3	
200	0,56	0,16	0,46	0,17	2	
250	0,54	0,15	0,51	0,06	1	
315	0,53	0,17	0,56	0,06	1	
400	0,60	0,15	0,58	0,04	1	
500	0,63	0,14	0,58	0,08	1	
630	0,60	0,11	0,57	0,04	1	
800	0,61	0,10	0,55	0,09	1	
1000	0,59	0,09	0,54	0,09	1	
1250	0,57	0,12	0,54	0,05	1	
1600	0,57	0,09	0,53	0,06	1	
2000	0,57	0,09	0,53	0,06	1	
2500	0,57	0,08	0,53	0,06	1	
3150	0,56	0,08	0,54	0,04	1	
4000	0,58	0,07	0,56	0,05	1	
5000	0,65	0,09	0,59	0,09	1	
6300	0,71	0,10	0,63	0,11	2	
8000	0,75	0,06	0,68	0,10	1	
10000	0,78	0,06	0,74	0,05	1	

D50 [-] | Comparación Real - Simulado | AURA

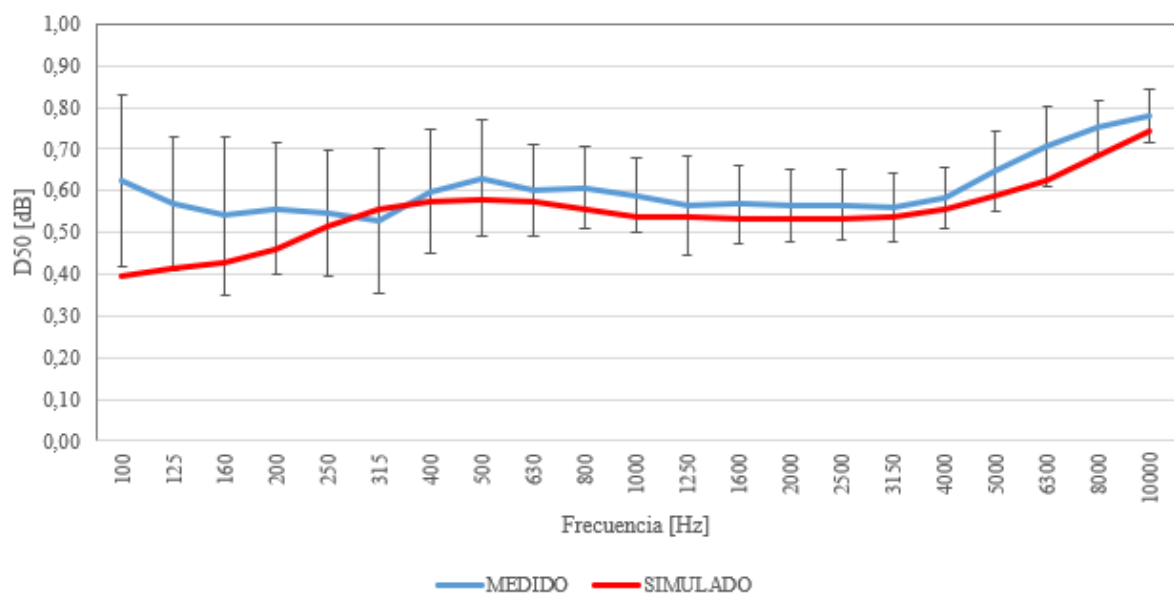


Figura 73. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de D50, Coro 2.

Tabla 41. Comparación de valores medidos y simulados de T_s , Coro 2.

Ts [ms] AURA						
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND	
100	91,20	24,81	105,50	14,30	2	
125	92,21	14,43	98,45	6,25	1	
160	91,58	23,36	94,19	2,61	1	
200	83,80	13,96	85,29	1,49	1	
250	78,37	12,45	72,67	5,70	1	
315	75,80	19,46	63,41	12,39	2	
400	63,77	17,84	60,19	3,58	1	
500	59,56	15,34	59,60	0,03	1	
630	63,81	13,05	60,54	3,28	1	
800	59,69	12,05	63,84	4,15	1	
1000	61,90	9,67	66,87	4,97	1	
1250	62,85	14,81	67,26	4,40	1	
1600	62,89	10,98	67,92	5,03	1	
2000	62,29	10,17	68,05	5,76	1	
2500	63,11	10,47	68,06	4,96	1	
3150	62,79	10,08	66,60	3,81	1	
4000	58,32	8,90	63,31	4,99	1	
5000	49,07	11,46	57,50	8,43	1	
6300	41,09	11,79	51,18	10,09	2	
8000	35,14	7,09	43,07	7,93	1	
10000	30,87	7,35	35,57	4,70	1	

Ts [ms] | Comparación Real - Simulado | AURA

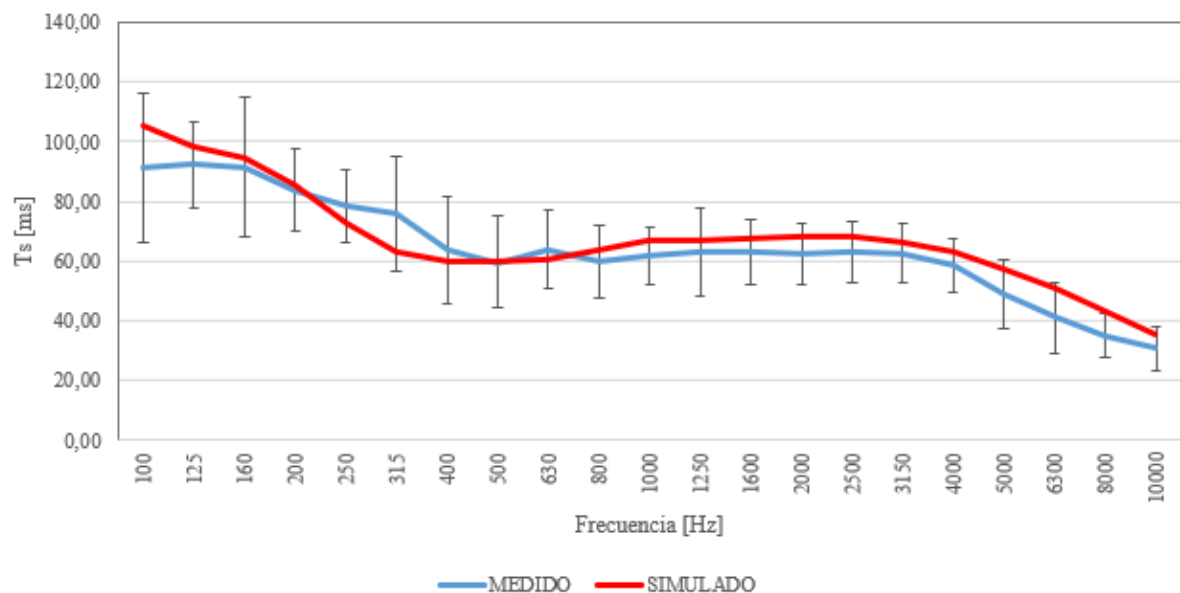


Figura 74. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de T_s , Coro 2.

Tabla 42. Comparación de valores medidos y simulados de STI, Coro 2.

STI [-] STD						STI [-] AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	STI	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO AURA	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
-	0,65	0,04	0,69	0,04	2		0,65	0,04	0,61	0,04	2

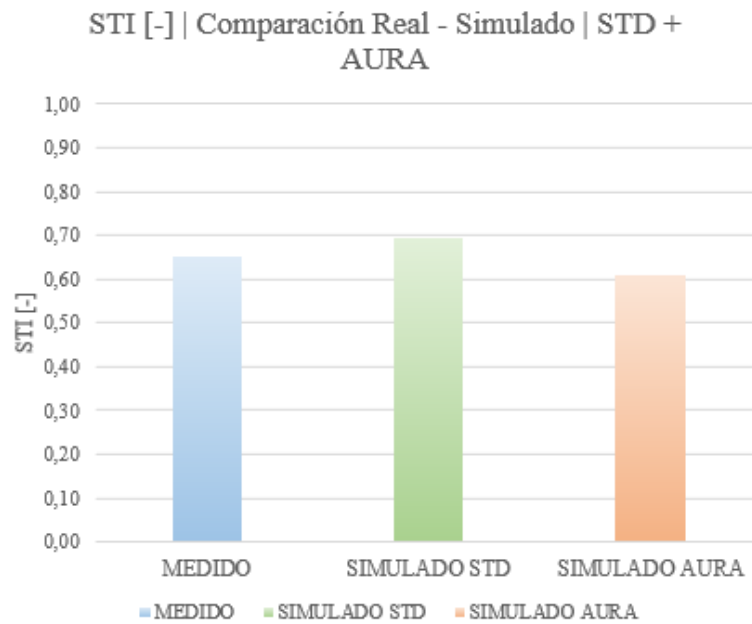


Figura 75. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de STI, Coro 2.

Tabla 43. Comparación de valores medidos y simulados de Alcons, Coro 2.

ALCONS [%] STD						ALCONS [%] AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	ALCONS	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO AURA	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
-	5,11	1,01	4,02	1,09	1		5,11	1,01	6,40	1,29	1

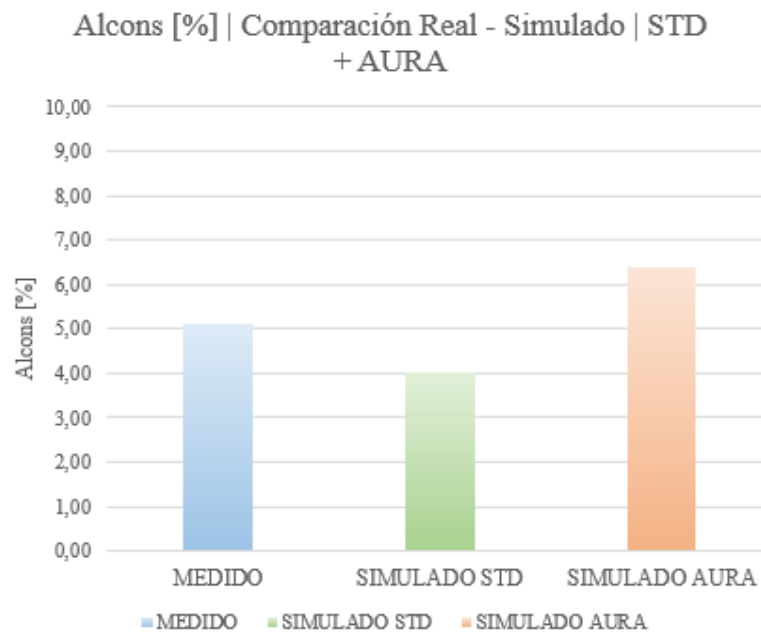


Figura 76. Grafica de comparación de valores medidos y simulados de Alcons, Coro 2.

Para obtener una visión más completa de la respuesta de la simulación de la sala en EASE en comparación con los valores medidos *in situ*. Se presentan en la Tabla 44 los valores de los escalones JND de los diferentes parámetros acústicos para el Coro 2.

Se puede concluir, que los resultados obtenidos de la simulación en EASE para el Coro 2 son satisfactorios. Igual que para Coro 1, la respuesta de la sala simulada a bajas frecuencias se aleja un poco de la respuesta real, pero se sigue considerando válida. Además, se puede observar que la respuesta de la simulación mejora en Coro 2 cuando comparada con Coro 1. Así, se verifica que los ajustes de materiales realizados para Coro 1 se adaptan fielmente a diferentes posiciones de fuente y micrófono.

Como se puede observar en la Tabla 45, ningún valor de escalón JND es superior a 6 y el porcentaje de valores de escalón JND altos es muy baja.

Tabla 44. Escalones JND de los diferentes parámetros acústicos, Coro 2.

Frecuencia	EDT AURA	T20 AURA	T30 AURA	RT STD	C50 STD	C50 AURA	C80 STD	C80 AURA	D50 AURA	Ts AURA	STI STD	STI AURA	AiCons STD	AiCons AURA
100 Hz	5	3	2	2	4	5	3	5	4	2				
125 Hz	4	3	2	2	2	3	2	3	3	1				
160 Hz	5	2	2	3	1	3	1	3	3	1				
200 Hz	4	3	3	2	1	2	1	3	2	1				
250 Hz	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1				
315 Hz	1	2	2	2	2	1	2	1	1	2				
400 Hz	1	1	1	3	1	1	2	1	1	1				
500 Hz	2	1	1	3	1	2	1	2	1	1				
630 Hz	1	1	1	3	1	1	2	1	1	1				
800 Hz	1	1	1	3	1	2	1	2	1	1				
1000 Hz	2	1	1	3	1	1	2	1	1	1				
1250 Hz	2	1	1	3	2	1	2	1	1	1				
1600 Hz	2	1	1	3	2	1	2	1	1	1				
2000 Hz	2	1	1	3	2	1	2	1	1	1				
2500 Hz	2	1	1	3	2	1	2	1	1	1				
3150 Hz	2	1	1	3	2	1	2	1	1	1				
4000 Hz	2	1	1	3	2	1	2	1	1	1				
5000 Hz	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1				
6300 Hz	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2				
8000 Hz	2	2	2	1	1	2	1	2	1	1				
10000 Hz	1	2	1	1	1	2	1	2	1	1				

Tabla 45. Porcentajes de los escalones JND, Coro 2.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TOTAL
Cantidad por escalón	110	71	25	4	4	0	0	0	0	0	214
% sobre Total	51%	33%	12%	2%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	
% acumulado	51%	85%	96%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

10. Impacto del Proyecto

El objetivo de este proyecto además de facilitar la realización de estudios acústicos en la Sala de Ensayo de Coro del Teatro Real de Madrid es también reducir el impacto ambiental que tienen estos mismos estudios. Así, se utiliza el desarrollo tecnológico para reducir las repercusiones que pueden tener estos estudios en el ambiente.

Por otro lado, la calidad acústica de un espacio influye en la vida de las personas, mejorando su salud y bienestar.

Así se puede relacionar los resultados de este proyecto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, ODS, definidos por las Naciones Unidas con la intención de poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que para el 2030 todas las personas disfruten de paz y prosperidad.

En primer lugar, se puede concluir que al utilizar el software EASE para en un futuro se poder realizar de forma virtual simulaciones acústicas del recinto ayuda a reducir la polución del medio ambiente. Por eso, cumple con el objetivo 7 de los objetivos de desarrollo Sostenible, ODS 7, energía asequible y no contaminante.

La posibilidad de ajustar virtualmente la configuración de la sala sin necesidad de realizar mediciones presenciales permite ahorro de tiempo y dinero considerables, ya que elimina los costos relacionados con desplazamientos y alquiler de equipos. Además, la reducción de los traslados contribuye a reducir la huella de carbono, lo que resulta en menor contaminación ambiental. Esto está también relacionado con los ODS 12 y 13, producción y consumo responsables y acción por el clima. El primero indica que, para lograr el crecimiento económico y el desarrollo sostenible, es urgente reducir la huella ecológica cambiando los métodos de producción y consumo de bienes y recursos. El segundo subraya la importancia de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y el cambio climático.

Por otro lado, también se cumple también el ODS 8, trabajo decente y crecimiento económico. Esto indica que la inversión en infraestructura y la innovación son motores clave del crecimiento y el desarrollo económico. Los avances tecnológicos son esenciales para encontrar soluciones permanentes a los desafíos económicos y ambientales. Así, se utiliza la tecnología para estimular el crecimiento económico sostenible mediante el aumento de los niveles de productividad y la innovación tecnológica.

Por último, los entornos con un buen diseño acústico reducen el ruido indeseado, lo que ayuda a disminuir los niveles de estrés y ansiedad y asegura una mejor experiencia auditiva para los usuarios, como en el caso de un auditorio bien diseñado.

Aunque esta contribución pueda parecer de pequeña importancia, impacta aspectos de salud, sociales ambientales y también económicos.

Una sala con un buen diseño acústico tiene un impacto positivo en la salud y bienestar de las personas que frecuentan la misma. Puesto que la exposición constante a niveles elevados de ruido puede causar diversos problemas de salud como estrés, fatiga y otros, es importante optimizar la acústica para crear un entorno más saludable. Estos beneficios están alineados con el ODS 3, Salud y Bienestar.

11. Presupuesto

Concepto	Descripción	Cantidad	Unidad	Personas	Importe / Unidad	IMPORTE TOTAL
Herramientas	Alquiler de todas las herramientas e instrumentos: Fuente, micrófonos, cableados, tarjeta de sonido etc.	1	días	-	-	600,00 €
Software	Licencia de DIRAC 6.0	1	-	-	-	600,00 €
	Licencia de EASE.4.4	1	-	-	-	300,00 €
Desplazamiento	Desplazamiento en coche	1	-	-	-	30,00 €
Mano de obra	Obtención de documentación y estudio previo	10	horas	1	15,00 €	150,00 €
	Toma de medidas In-Situ	5	horas	4	15,00 €	300,00 €
	Procesado de medidas In-Situ	40	horas	1	15,00 €	600,00 €
	Creación del modelo geométrico.	100	horas	1	15,00 €	1.500,00 €
	Exportación a EASE y validación del modelo	100	horas	1	15,00 €	1.500,00 €
	Redacción de la memoria	40	horas	1	15,00 €	600,00 €

Horas Totales	295
Subtotal	6180,00 €
Imprevistos (10%)	618,00 €
Total	6798,00 €

12. Conclusiones

Este documento ofrece una visión detallada del análisis acústico de la Sala de Ensayo del Coro del Teatro Real de Madrid y su modelización en 3D.

El proyecto comienza con las mediciones en la Sala de Ensayo del Coro del Teatro Real. Para ello, se aplican los criterios determinados por la Norma UNE-EN ISO 3382-1 y se obtienen los parámetros acústicos que definen la respuesta acústica de la sala a través del Software Dirac. La toma de las medidas se realizó sin problemas.

En esta memoria se describen en detalle el uso de equipos específicos para las mediciones y la metodología utilizada para la realización de las mediciones.

El análisis de las mediciones se realiza en Excel. Se aplica la máscara INR a cada parámetro y se emplea el criterio de Chauvenet, eliminando las muestras indeseadas. Posteriormente, se calculan la media, la desviación típica y la métrica JND de los parámetros acústicos y se realiza una representación gráfica de los valores obtenidos. De este modo, se puede analizar la respuesta de la sala a los distintos parámetros y observar las características acústicas específicas de esta sala, como el resonador a 500 Hz.

Durante el análisis de las medidas tomadas se ha detectado un problema en los valores de los parámetros LF y LFC. En consecuencia, no se consideran relevantes los valores de estos parámetros cuando se realiza la comparación de las medidas tomadas *in situ* y de los datos simulados.

Para lograr una representación que replique con precisión el comportamiento sonoro de la sala, se realiza la configuración y validación del modelo en EASE. Esto implica la selección de materiales que se ajusten a los materiales reales existentes en la sala. A través de modificaciones de los materiales seleccionados en EASE según la respuesta del modelo a las posiciones del Coro 1, se logra optimizar el tiempo de reverberación y los restantes parámetros acústicos, asegurando que los resultados se alineen con las mediciones reales.

A continuación, se realiza el tratamiento de los datos sacados del modelo 3D en Excel tanto para el Coro 1 como para el Coro 2, de manera similar al proceso aplicado para los valores medidos *in situ*. Se comparan los valores obtenidos de las simulaciones con las mediciones *in situ*. Utilizando los parámetros del Coro 2 como verificación de que la respuesta de la sala simulada se ajusta a los valores deseados.

La validación de los resultados obtenidos después de los cálculos realizados por el programa, desarrollados en el apartado 9 de esta memoria, ha sido satisfactoria en relación con lo esperado. Se ha observado que la respuesta de la simulación a bajas frecuencias no se ajusta tan bien a la respuesta de la sala como las restantes frecuencias. Sin embargo, esto no supone un problema para el modelo 3D creado. El modelo virtual de la sala reproduce valores de

parámetros acústicos muy similares a la respuesta medida *in situ*, lo que permite concluir que las diferencias en la percepción del oyente respecto a estos parámetros son mínimas.

Se da por concluido el objetivo principal del proyecto, ya que se ha obtenido un diseño válido del modelo virtual de la Sala de Ensayo del Coro. El proyecto se ha llevado a cabo con éxito pues se ha obtenido modelo 3D de la sala apto para simular su respuesta acústica frente a diferentes sonidos, resultando en una solución sencilla para la realización estudios acústicos del recinto. Esto facilitará un uso óptimo de la sala, ya que permite analizar qué condiciones ajustar según los parámetros que se deseen mejorar.

13. Referencias

- [1] U.-E. I. 3382-1, «Medición de Parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos,» 2010.
- [2] «Historia del Teatro | Teatro Real,» Teatro Real, 2014. [En línea]. Available: <https://www.teatroreal.es/es/historia-del-teatro>.
- [3] *"Teoría Estadística", apuntes de la asignatura Acústica Arquitectónica, Departamento de Ingeniería de Audio y Comunicaciones, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Otoño, 2021.*
- [4] *"Teoría Geométrica", apuntes de la asignatura Acústica Arquitectónica, Departamento de Ingeniería de Audio y Comunicaciones, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Otoño, 2021.*
- [5] H. Arau-Puchades, *¿Es el criterio acústico el paradigma de la excelencia?*, Barcelona, 2008.
- [6] I. 61672-1, *Electroacoustics – Sound level meters – Part 1: Specifications*, 2013.

Anexo I: Ruido de fondo

En este anexo se exponen, en la Tabla 46, los valores de ruido de fondo de la Sala de Ensayo del Coro tomadas en el día de realización de las medidas *in situ*. Se muestran los valores en bandas de tercio de octava en las diferentes posiciones. Se presenta también el valor promedio y la desviación estándar que se pueden visualizar en la gráfica de la Figura 77.

Tabla 46. Medidas del Ruido de Fondo.

Frecuencia [Hz]	SPL [dB] - Posiciones de Medida					Promedio	Desviación Estandar
	1	2	3	4	5		
12,5	47,9	46,9	46,7	44,2	48,4	46,8	1,6
16	51,1	46,8	54,4	53,0	52,5	51,6	2,9
20	48,2	47,7	51,7	48,4	51,8	49,6	2,0
25	55,4	53,4	51,0	42,7	50,5	50,6	4,8
31,5	43,5	44,3	41,5	39,1	46,1	42,9	2,7
40	43,7	43,9	41,7	38,2	45,2	42,5	2,7
50	46,5	52,2	42,9	36,9	37,5	43,2	6,4
63	32,3	36,0	32,0	29,9	30,4	32,1	2,4
80	29,5	29,4	31,0	29,0	28,0	29,4	1,1
100	30,5	34,5	32,3	28,6	32,7	31,7	2,2
125	26,1	26,5	27,5	25,1	26,7	26,4	0,9
160	23,3	25,2	25,6	23,7	22,6	24,1	1,3
200	19,5	23,7	21,5	20,7	19,2	20,9	1,8
250	16,5	20,6	19,7	17,3	15,7	18,0	2,1
315	16,7	16,6	19,8	17,0	13,5	16,7	2,2
400	17,7	17,5	21,6	15,5	12,6	17,0	3,3
500	13,7	15,4	17,3	13,7	13,0	14,6	1,7
630	13,8	14,7	18,6	14,2	12,5	14,8	2,3
800	14,0	14,2	18,8	14,1	15,9	15,4	2,1
1000	12,6	12,6	18,0	13,4	14,8	14,3	2,3
1250	13,0	13,2	17,7	13,4	17,1	14,9	2,3
1600	12,1	12,5	16,3	14,0	16,4	14,3	2,0
2000	11,3	12,7	14,5	12,4	14,2	13,0	1,3
2500	11,1	12,6	14,3	13,4	13,0	12,9	1,2
3150	9,0	9,1	11,8	11,7	11,3	10,6	1,4
4000	8,1	8,0	10,1	9,2	10,3	9,1	1,1
5000	7,4	7,0	9,5	8,0	9,7	8,3	1,2
6300	7,6	7,7	8,7	7,8	8,4	8,0	0,5
8000	8,0	8,0	11,1	8,4	10,2	9,1	1,4
10000	8,2	8,1	10,3	8,4	10,5	9,1	1,2
12500	8,3	8,3	8,7	8,4	8,6	8,5	0,2
16000	8,9	9,0	8,9	8,5	9,1	8,9	0,2
20000	12,4	12,4	9,9	11,7	12,1	11,7	1,0

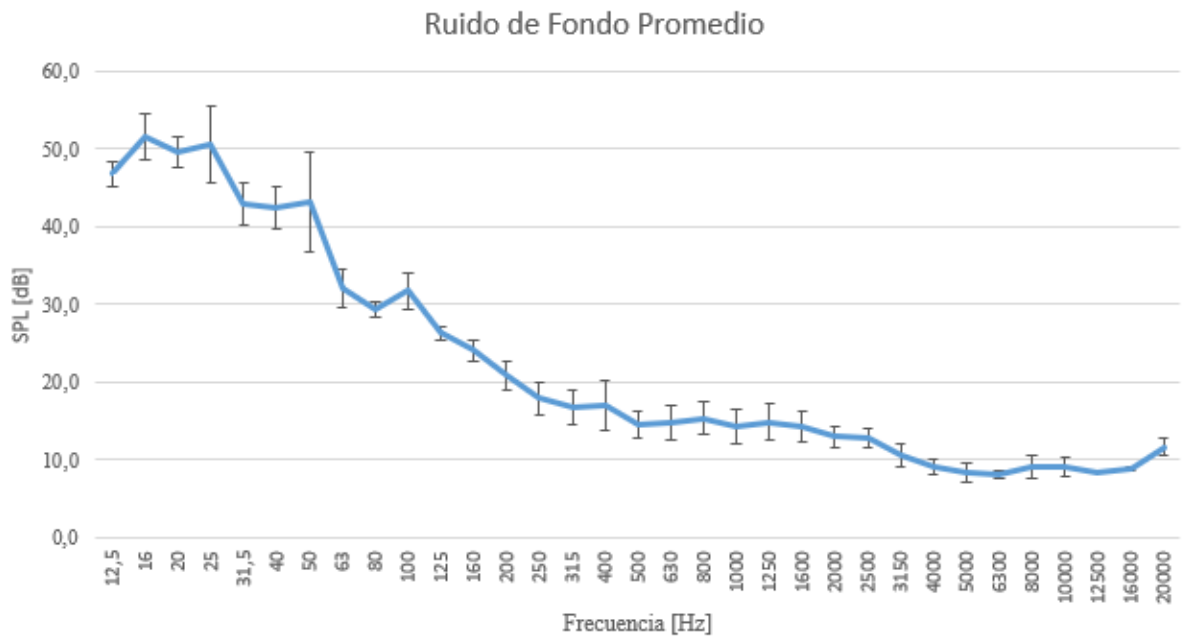


Figura 77. Gráfica del Ruido de Fondo Promedio.

Anexo II: Estudio Acústico del Teatro en Octavas

A continuación, se presentan los valores obtenidos de los parámetros acústicos medidos en el recinto en bandas de octava. Para cada uno de los parámetros se presentan los valores de promedio y desviación estándar obtenidos para Coro 1, Coro 2 y total. Así como la representación gráfica de estos valores.

RT

Tabla 47. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro RT en bandas de octava.

RT [s] Promedios de los datos por zonas	Frecuencias	Coro 1	Coro 2	TOTAL	RT [s] Desviaciones de los datos por zonas	Coro 1	Coro 2	TOTAL	ESCALÓN JND
	31,5 Hz	1,18	1,10	1,14		0,17	0,26	0,23	4
63 Hz	1,22	1,29	1,26	0,15	0,16	0,16	3		
125 Hz	1,21	1,19	1,20	0,15	0,10	0,12	3		
250 Hz	0,96	0,96	0,96	0,09	0,08	0,08	2		
500 Hz	0,89	0,93	0,91	0,02	0,04	0,04	1		
1000 Hz	0,96	0,97	0,97	0,03	0,04	0,04	1		
2000 Hz	0,97	0,98	0,98	0,04	0,04	0,04	1		
4000 Hz	0,90	0,91	0,91	0,03	0,02	0,03	1		
8000 Hz	0,69	0,70	0,70	0,03	0,03	0,03	1		
16000 Hz	0,55	0,57	0,56	0,04	0,04	0,04	2		

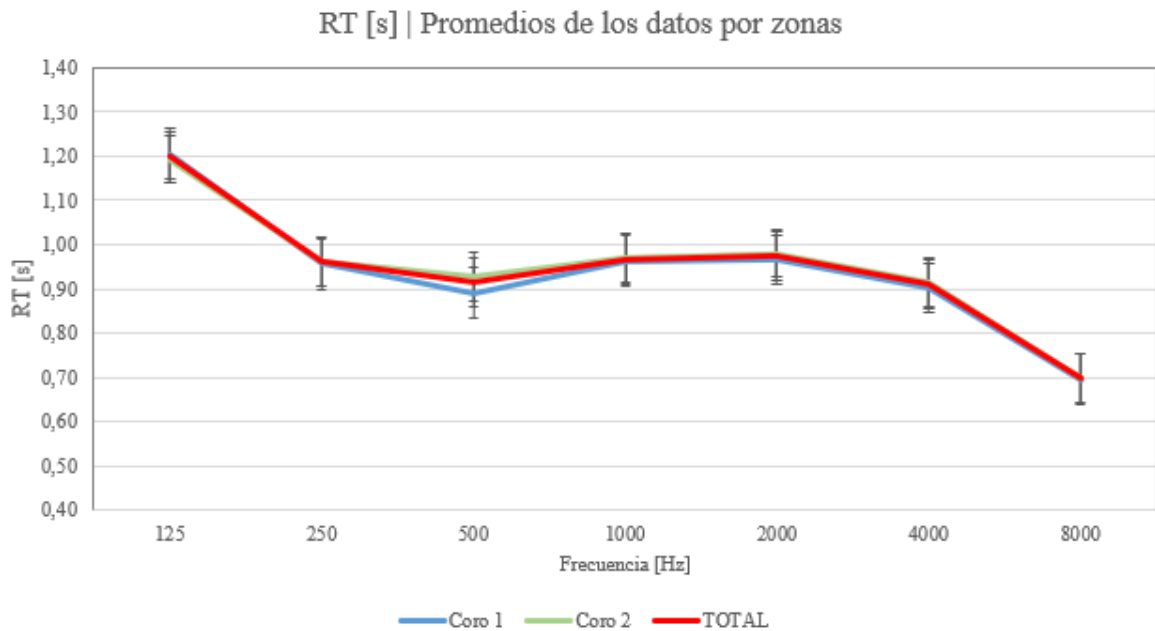


Figura 78. Gráfica de los valores promedios de RT por zonas, en bandas de octava.

EDT

Tabla 48. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro EDT en bandas de octava.

EDT [s] Promedios de los datos por zonas	Frecuencias	Coro 1	Coro 2	TOTAL	EDT [s] Desviaciones de los datos por zonas	Coro 1	Coro 2	TOTAL	ESCALÓN JND
	31,5 Hz	0,86	0,95	0,91		0,21	0,21	0,22	5
63 Hz	1,02	1,05	1,04	0,32	0,38	0,36	7		
125 Hz	0,97	0,98	0,98	0,24	0,25	0,25	6		
250 Hz	0,85	0,89	0,88	0,14	0,19	0,17	4		
500 Hz	0,83	0,86	0,85	0,14	0,13	0,14	4		
1000 Hz	0,86	0,90	0,88	0,08	0,09	0,09	2		
2000 Hz	0,84	0,91	0,89	0,10	0,10	0,11	3		
4000 Hz	0,81	0,85	0,84	0,10	0,11	0,11	3		
8000 Hz	0,63	0,65	0,64	0,09	0,10	0,10	3		
16000 Hz	0,52	0,52	0,52	0,09	0,09	0,09	4		

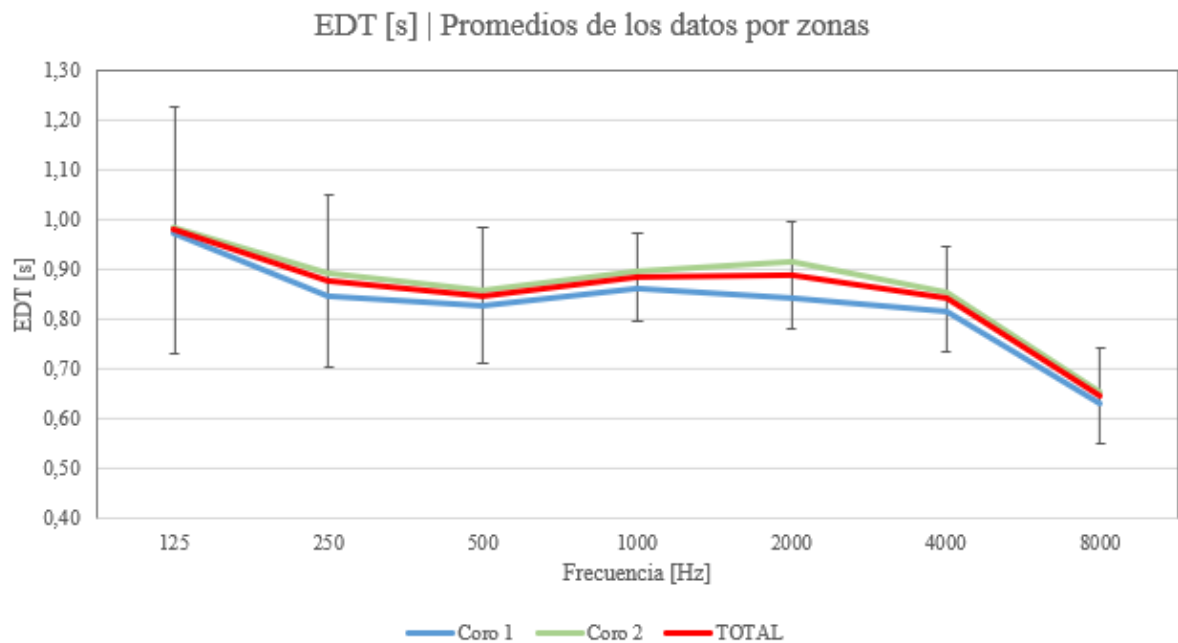


Figura 79. Gráfica de los valores promedios de EDT por zonas, en bandas de octava.

T20

Tabla 49. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro T20 en bandas de octava.

T20 [s] Promedios de los datos por zonas	Frecuencias	Coro 1	Coro 2	TOTAL	T20 [s] Desviaciones de los datos por zonas	Coro 1	Coro 2	TOTAL	ESCALÓN JND
	31,5 Hz	1,23	1,21	1,22		0,15	0,20	0,18	3
63 Hz	1,19	1,25	1,23	0,14	0,15	0,15	3		
125 Hz	1,16	1,15	1,15	0,12	0,10	0,11	2		
250 Hz	0,95	0,95	0,95	0,10	0,08	0,09	2		
500 Hz	0,87	0,90	0,89	0,05	0,06	0,06	2		
1000 Hz	0,95	0,95	0,95	0,03	0,03	0,03	1		
2000 Hz	0,95	0,96	0,96	0,04	0,03	0,03	1		
4000 Hz	0,89	0,90	0,89	0,03	0,02	0,03	1		
8000 Hz	0,68	0,69	0,69	0,03	0,03	0,03	1		
16000 Hz	0,54	0,56	0,55	0,04	0,04	0,04	2		

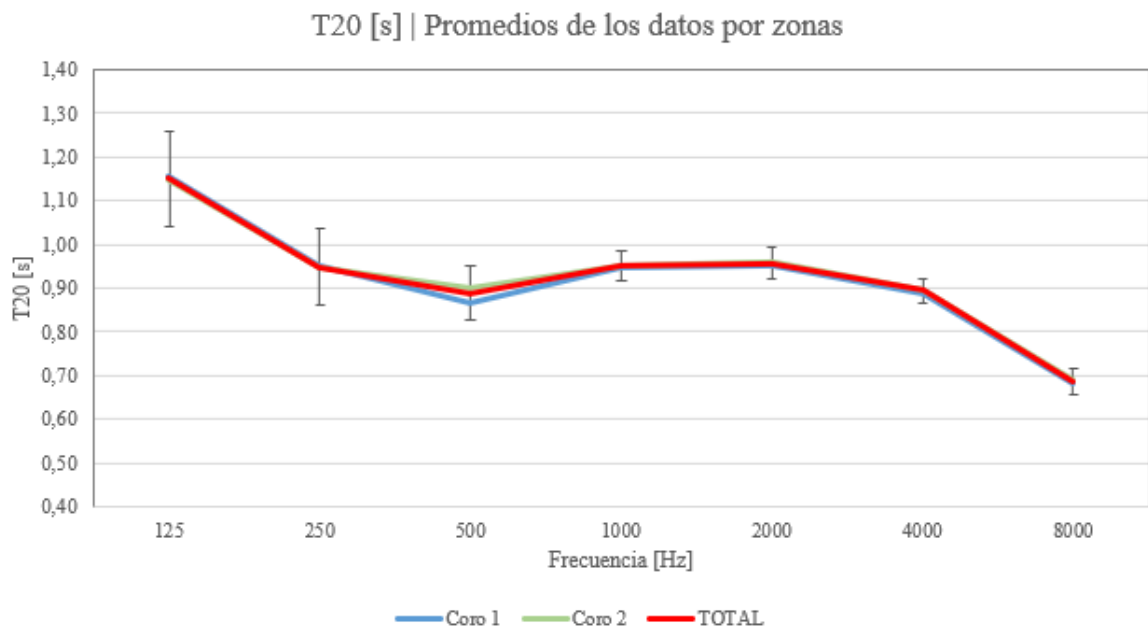


Figura 80. Gráfica de los valores promedios de T20 por zonas, en bandas de octava.

T30

Tabla 50. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro T30 en bandas de octava.

T30 [s] Promedios de los datos por zonas	Frecuencias	Coro 1	Coro 2	TOTAL	T30 [s] Desviaciones de los datos por zonas	Coro 1	Coro 2	TOTAL	ESCALÓN JND
	31,5 Hz	1,12	1,25	1,19		0,16	0,23	0,21	4
63 Hz	1,43	1,46	1,45	0,13	0,21	0,18	3		
125 Hz	1,27	1,22	1,24	0,11	0,08	0,10	2		
250 Hz	0,95	0,96	0,96	0,08	0,08	0,08	2		
500 Hz	0,90	0,93	0,92	0,03	0,03	0,04	1		
1000 Hz	0,96	0,98	0,97	0,03	0,03	0,03	1		
2000 Hz	0,99	0,98	0,98	0,03	0,03	0,03	1		
4000 Hz	0,91	0,92	0,92	0,03	0,02	0,02	1		
8000 Hz	0,69	0,70	0,70	0,03	0,02	0,03	1		
16000 Hz	0,56	0,57	0,57	0,03	0,04	0,04	2		

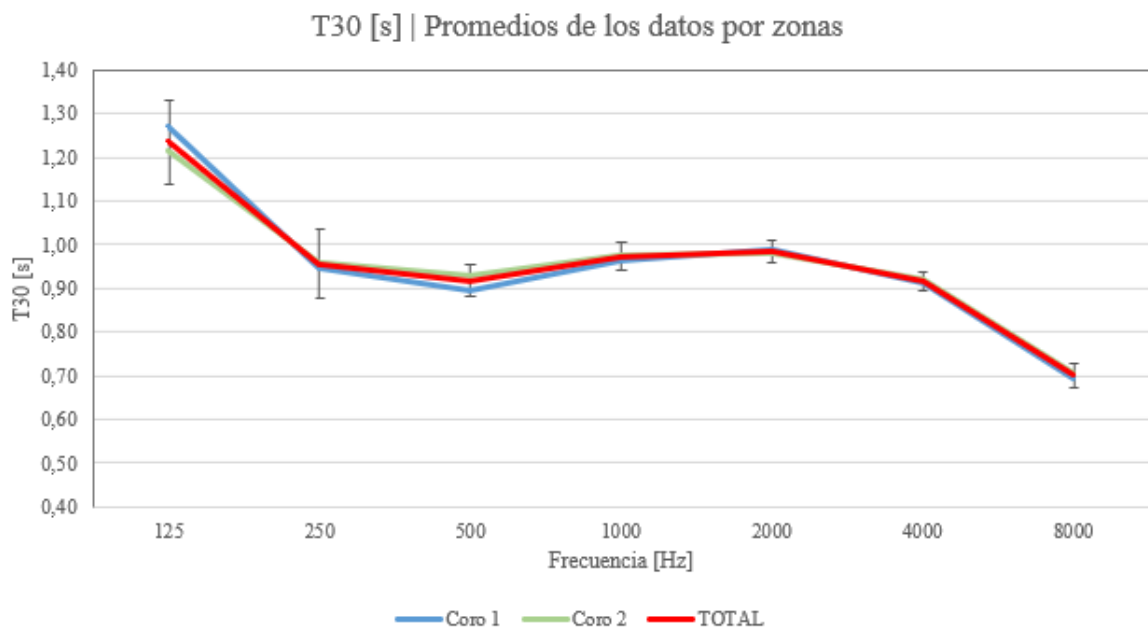


Figura 41. Gráfica de los valores promedios de T30 por zonas, en bandas de octava.

C50

Tabla 51. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro C50 en bandas de octava.

C50 [dB] Promedios de los datos por zonas	Frecuencias	Coro 1	Coro 2	TOTAL	C50 [dB] Desviaciones de los datos por zonas	Coro 1	Coro 2	TOTAL	ESCALÓN JND
	31,5 Hz	0,15	-0,68	-0,35		3,23	3,79	3,56	4
63 Hz	3,60	3,09	3,28	2,44	3,44	3,10	4		
125 Hz	0,99	1,20	1,12	2,86	2,98	2,93	3		
250 Hz	1,88	1,25	1,47	1,60	1,95	1,85	2		
500 Hz	2,65	2,15	2,33	2,57	2,03	2,24	3		
1000 Hz	2,03	1,67	1,80	2,12	1,49	1,74	2		
2000 Hz	1,53	1,23	1,34	1,76	1,38	1,53	2		
4000 Hz	1,72	1,70	1,71	1,75	1,37	1,51	2		
8000 Hz	4,14	4,26	4,21	2,42	1,86	2,07	3		
16000 Hz	5,31	5,62	5,49	2,49	2,01	2,21	3		

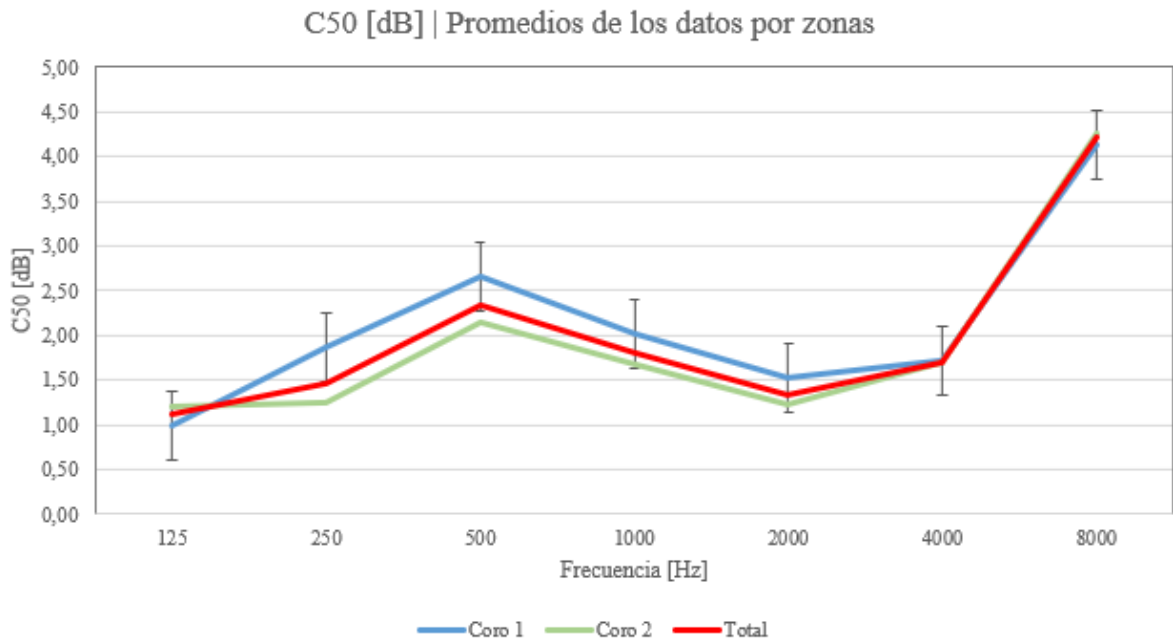


Figura 82. Gráfica de los valores promedios de C50 por zonas, en bandas de octava.

C80

Tabla 52. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro C80 en bandas de octava.

C80 [dB] Promedios de los datos por zonas	Frecuencias	Coro 1	Coro 2	TOTAL	C80 [dB] Desviaciones de los datos por zonas	Coro 1	Coro 2	TOTAL	ESCALÓN JND
	31,5 Hz	3,87	2,12	2,80		3,61	3,01	3,33	4
63 Hz	5,54	4,62	4,96	2,36	3,52	3,17	4		
125 Hz	4,10	3,99	4,03	2,31	3,07	2,81	3		
250 Hz	5,00	4,33	4,57	1,61	1,78	1,74	2		
500 Hz	5,71	5,31	5,45	2,22	1,83	1,98	2		
1000 Hz	5,34	4,69	4,93	1,92	1,42	1,64	2		
2000 Hz	5,03	4,34	4,59	1,52	1,36	1,45	2		
4000 Hz	5,11	4,90	4,98	1,51	1,32	1,39	2		
8000 Hz	7,94	7,72	7,80	2,09	1,82	1,92	2		
16000 Hz	9,26	9,49	9,40	2,42	2,08	2,21	3		

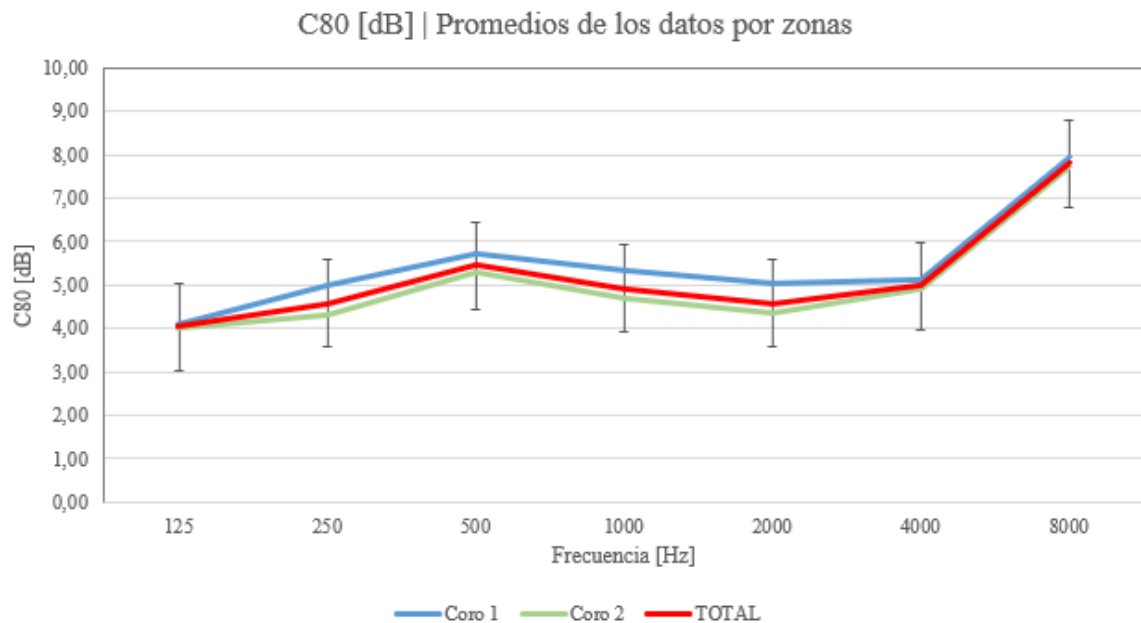


Figura 83. Gráfica de los valores promedios de C80 por zonas, en bandas de octava.

D50

Tabla 53. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro D50 en bandas de octava.

D50 [-] Promedios de los datos por zonas	Frecuencias	Coro 1	Coro 2	TOTAL	D50 [-] Desviaciones de los datos por zonas	Coro 1	Coro 2	TOTAL	ESCALÓN JND
	31,5 Hz	0,51	0,47	0,48		0,17	0,20	0,19	8
63 Hz	0,69	0,65	0,66	0,12	0,17	0,15	5		
125 Hz	0,55	0,56	0,56	0,15	0,15	0,15	6		
250 Hz	0,62	0,57	0,59	0,10	0,11	0,11	4		
500 Hz	0,64	0,62	0,62	0,13	0,11	0,12	4		
1000 Hz	0,61	0,59	0,60	0,11	0,08	0,09	4		
2000 Hz	0,59	0,57	0,57	0,10	0,08	0,08	3		
4000 Hz	0,60	0,59	0,59	0,10	0,08	0,08	3		
8000 Hz	0,71	0,72	0,72	0,11	0,08	0,09	3		
16000 Hz	0,76	0,78	0,77	0,10	0,07	0,09	3		

D50 [-] | Promedios de los datos por zonas

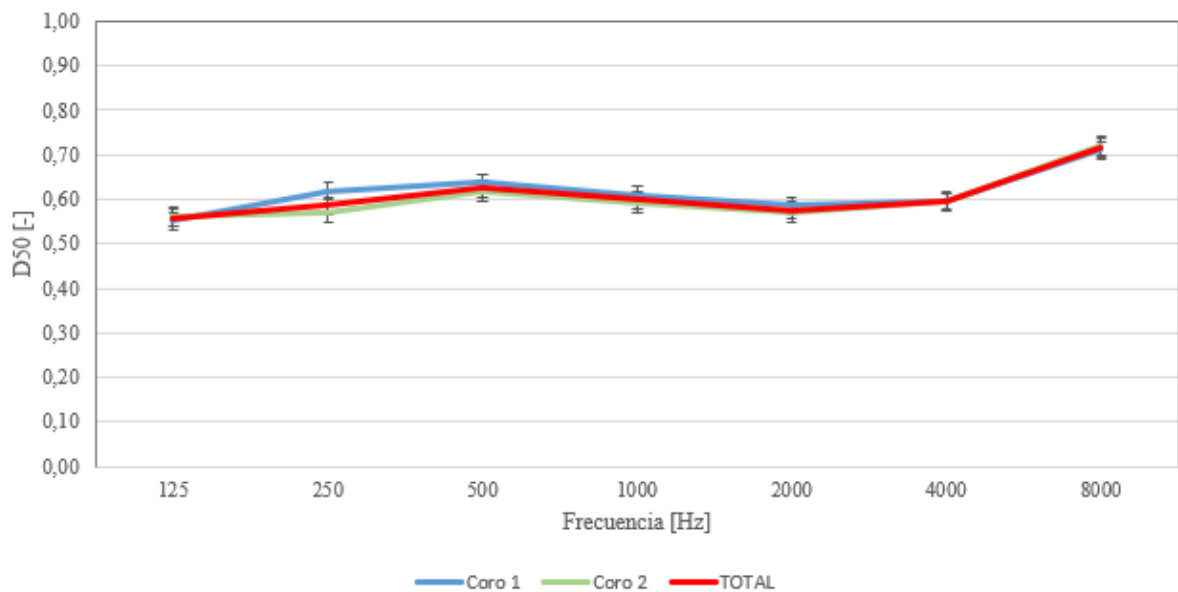


Figura 84. Gráfica de los valores promedios de D50 por zonas, en bandas de octava.

Ts

Tabla 54. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro Ts en bandas de octava.

Ts [ms] Promedios de los datos por zonas	Frecuencias	Coro 1	Coro 2	TOTAL	Ts [ms] Desviaciones de los datos por zonas	Coro 1	Coro 2	TOTAL	ESCALÓN JND
	31,5 Hz	97,57	99,52	98,73		20,70	17,23	18,52	2
63 Hz	64,26	72,39	69,40	18,16	26,17	23,77	3		
125 Hz	74,37	74,92	74,72	13,28	15,46	14,63	2		
250 Hz	63,23	68,54	66,70	9,13	10,99	10,64	2		
500 Hz	54,09	57,28	56,13	15,93	13,49	14,42	2		
1000 Hz	55,78	58,76	57,69	13,94	10,16	11,68	2		
2000 Hz	58,37	61,32	60,26	11,98	9,65	10,58	2		
4000 Hz	56,70	56,81	56,77	11,52	9,59	10,27	2		
8000 Hz	39,09	39,06	39,07	12,60	9,95	10,91	2		
16000 Hz	31,01	29,65	30,20	10,86	7,84	9,13	1		

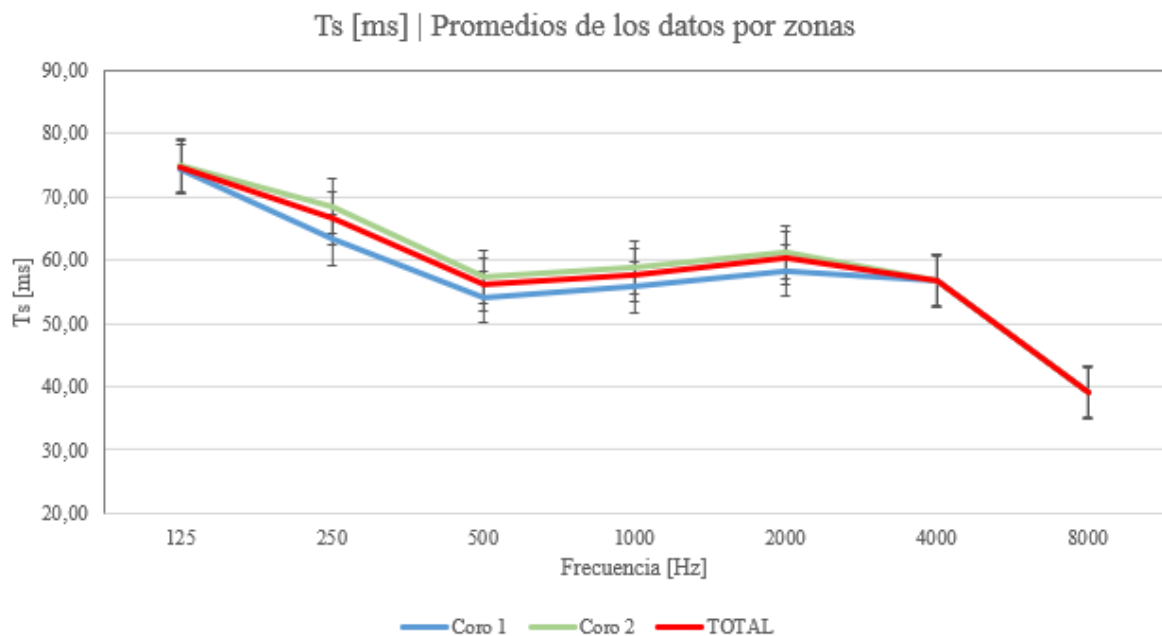


Figura 85. Gráfica de los valores promedios de Ts por zonas, en bandas de octava.

LF

Tabla 55. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro LF en bandas de octava.

LF [-] Promedios de los datos por zonas	Frecuencias	Coro 1	TOTAL	LF [-] Desviaciones de los datos por zonas	Coro 1	TOTAL	ESCALÓN JND
	31,5 Hz	0,02	0,02		0,01	0,01	1
63 Hz	0,01	0,01	0,01	0,01	1		
125 Hz	0,02	0,02	0,01	0,01	1		
250 Hz	0,04	0,04	0,01	0,01	1		
500 Hz	0,07	0,07	0,03	0,03	1		
1000 Hz	0,13	0,13	0,07	0,07	2		
2000 Hz	0,15	0,15	0,06	0,06	2		
4000 Hz	0,19	0,19	0,08	0,08	2		
8000 Hz	0,15	0,15	0,09	0,09	2		
16000 Hz	0,20	0,20	0,11	0,11	3		

LF [-] | Promedios de los datos por zonas

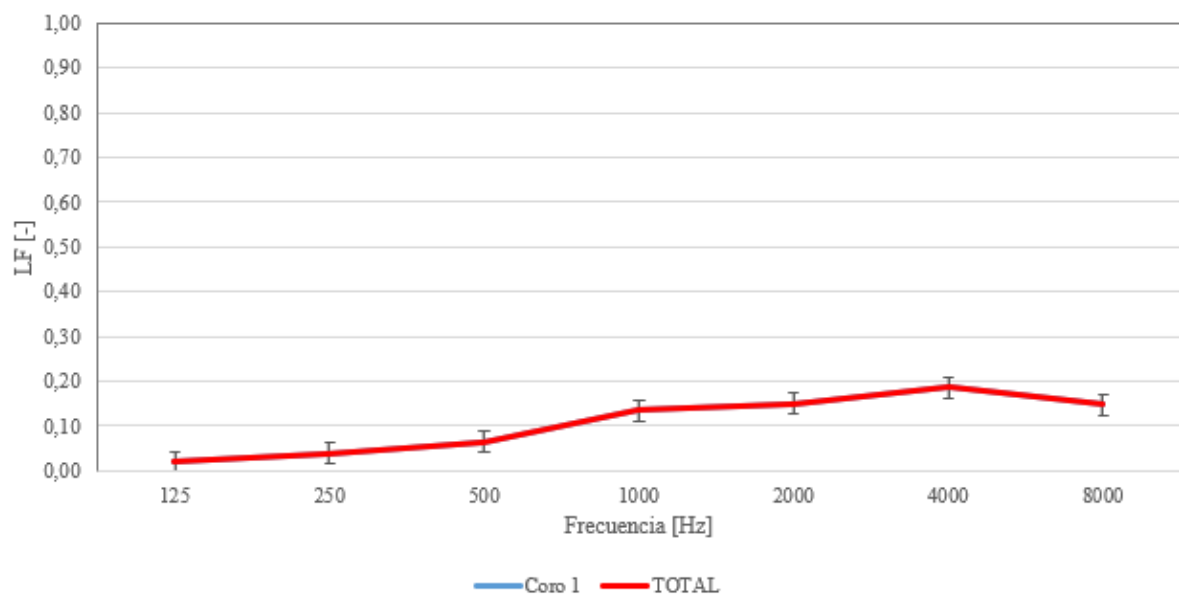


Figura 86. Gráfica de los valores promedio de LF por zonas, en bandas de octava.

LFC

Tabla 56. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro LFC en bandas de octava.

LFC [-] Promedios de los datos por zonas	Frecuencias	Coro 1	TOTAL	LFC [-] Desviaciones de los datos por zonas	Coro 1	TOTAL	ESCALÓN JND
	31,5 Hz						
63 Hz							
125 Hz		0,44	0,44		0,16	0,16	4
250 Hz		0,15	0,15		0,05	0,05	1
500 Hz		0,16	0,16		0,07	0,07	2
1000 Hz		0,38	0,38		0,15	0,15	3
2000 Hz		0,14	0,14		0,03	0,03	1
4000 Hz		0,09	0,09		0,02	0,02	1
8000 Hz							
16000 Hz							

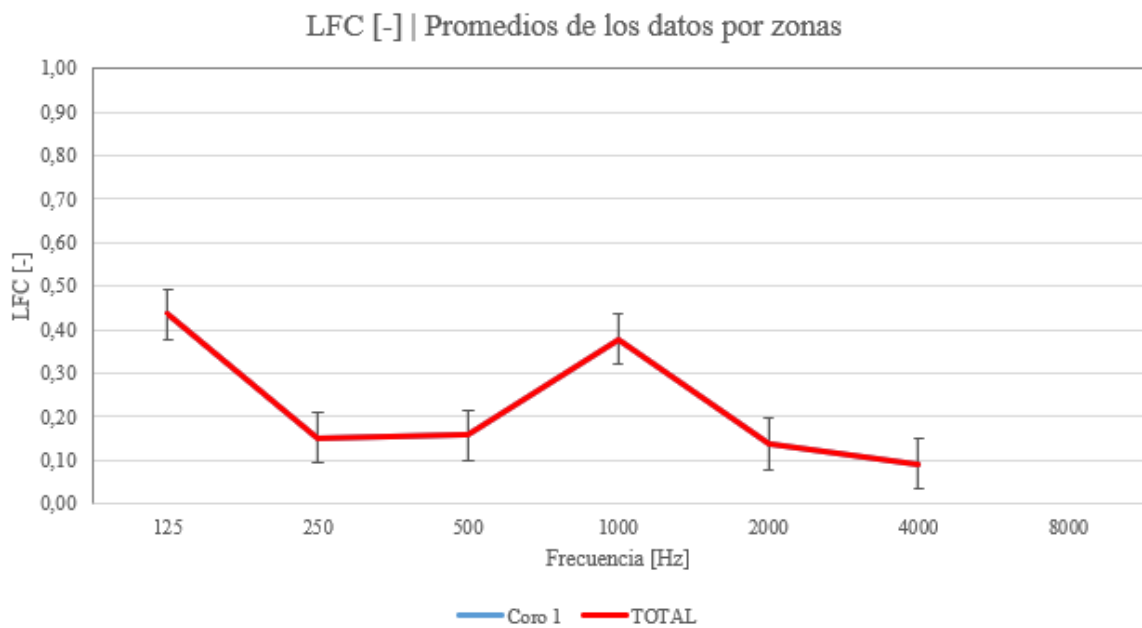


Figura 87. Gráfica de los valores promedios de LFC por zonas, en bandas de octava.

STI

Tabla 57. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro STI.

STI female [-] Promedios de los datos por zonas	Frecuencias	Coro 1	Coro 2	TOTAL	STI female [-] Desviaciones de los datos por zonas	Coro 1	Coro 2	TOTAL	ESCALÓN JND
		0,65	0,64	0,64		0,04	0,03	0,03	2

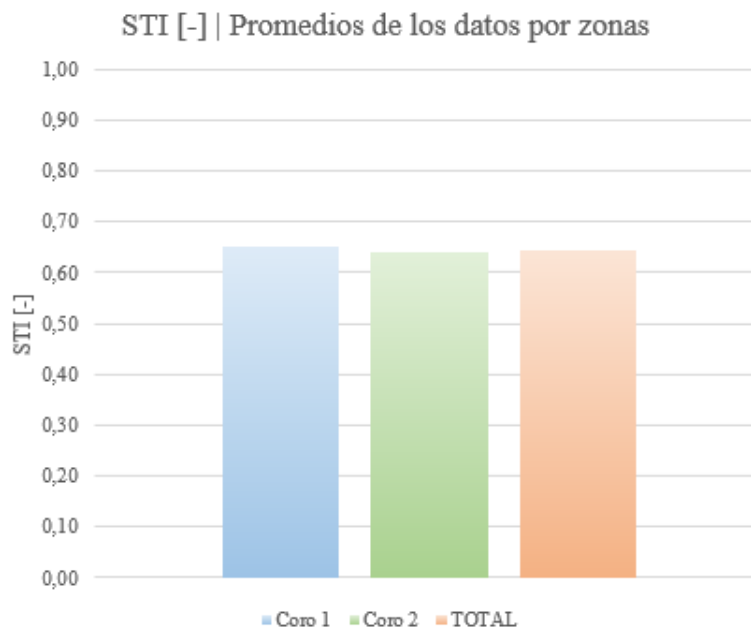


Figura 88. Gráfica de los valores promedios de STI, por zonas.

Alcons

Tabla 58. Valores promedio, desviación típica y escalón JND del parámetro Alcons.

ALC STI female [%] Promedios de los datos por zonas	Frecuencias	Coro 1	Coro 2	TOTAL	ALC STI female [%] Desviaciones de los datos por zonas	Coro 1	Coro 2	TOTAL	ESCALÓN JND
		5,11	5,34	5,26		1,01	0,96	0,98	1

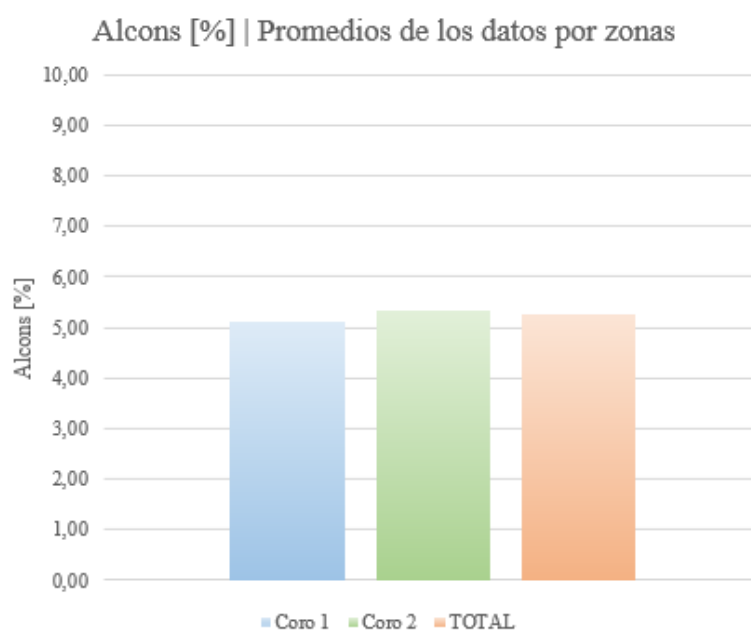


Figura 89. Gráfica de los valores promedios de Alcons, por zonas.