

PROYECTO FIN DE GRADO

TÍTULO: Diseño y Validación de un Modelo Geométrico para el Estudio Acústico del Auditorio de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

AUTOR/A: Manuela Oyamburu Benoit

TITULACIÓN: Ingeniería de 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: Mario Vega Barbas

TUTOR/A: Juan José Gómez Alfageme

SECRETARIO/A: Marta Gil Barba

Fecha de lectura:

Calificación:

El Secretario/La Secretaria,

Agradecimientos

Quiero agradecer principalmente al tutor de este proyecto, Juan José Gómez Alfageme, por toda su orientación, ayuda y dedicación en este Trabajo de Fin de Grado. Su gran experiencia y su disposición para responder mis dudas en cualquier momento de estos meses han sido clave para el desarrollo de este proyecto.

También agradecer a mi familia; a mis abus por creer siempre en mí y motivarme a superar todos los desafíos que me han ido surgiendo a lo largo de estos años, a mi madre por recordarme lo orgullosa que esta de mí siempre, a mi padre por decirme 'todo lo que valgo' todos los días del año, y a mi hermana por ser mi otro yo.

Agradecer también a todos mis amigos; a las maravillosas personas que he conocido durante estos cinco años geniales, en los que hemos compartido todo tipo de momentos que quedarán para siempre. A mis amigos del barrio de toda la vida, por apoyarme, creer en mí y ser mi mayor fuente de risas todos los fines de semana. Y como no, a mis Avantos, por ser mi lugar de refugio, desconexión y cariño de toda la vida y para toda la vida, os quiero chicas.

Finalmente, reconocer y agradecerme a mí misma, la dedicación, disciplina y compromiso durante estos años de estudio, lo fuerte que me he hecho y lo mucho que lo he disfrutado. Lo hemos conseguido Manu ;)

Resumen

La acústica arquitectónica es una rama de la física aplicada a la arquitectura que estudia el control acústico de recintos o salas, para lograr un aislamiento adecuado entre espacios, o para mejorar el acondicionamiento acústico en el interior de estos [1], que se basa en los principios de la propagación del sonido. La investigación en este campo y sus aplicaciones están en continuo desarrollo.

El propósito de este proyecto es el diseño y la validación de un modelo geométrico para el estudio acústico del Auditorio de la Escuela Superior Técnica de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid. Este estudio acústico permite explicar los fenómenos sonoros que ocurren en su interior y mejorar la acústica mediante la simulación de posibles escenarios reales. Simulaciones que es posible realizar mediante la selección e incorporación al modelo de materiales absorbentes y reflectores acústicos para conseguir la mejor calidad del sonido controlando la reverberación en el interior del recinto.

Este documento recoge todo el proceso de creación y validación del modelo, dividido en tres fases principales:

1. Mediciones *in situ* en el auditorio con el software DIRAC, siguiendo la Norma UNE-EN ISO 3382 – Parte 1: Salas de espectáculos, generando la señal emitida y registrando los resultados. Los equipos de medida utilizados son prestados por la Universidad Politécnica de Madrid. Los datos obtenidos se procesan y filtran en Excel para trabajar con el método de precisión establecido en la norma. Se diseña la métrica JND (*Just Noticeable Difference*) como herramienta para posteriormente la comparación de valores.
2. Creación del modelo arquitectónico simplificado con el software Sketch-Up para representar con precisión el recinto de estudio. El día de las mediciones *in situ* se realiza un estudio arquitectónico del recinto, tomando cotas y medidas de todos los elementos que forman parte del auditorio. Al no poder contar con planos del recinto, ha sido necesario realizar un modelo desde cero, creando primero los planos en 2D y posteriormente levantando el modelo en 3D.
3. Importación del modelo al software de simulación acústica EASE, para crear el modelo geométrico y realizar las simulaciones de las que extrae la información necesaria para la posterior comparación de datos simulados y datos medidos *in situ*. En el programa, se escogen los materiales de los elementos constructivos del modelo, se ajusta su configuración y se realizan las modificaciones necesarias hasta conseguir parámetros similares a los parámetros medidos *in situ*. Para la validación se utilizan las aproximaciones acústicas estadística y geométrica. Finalmente, los valores simulados y medidos se comparan mediante la mencionada métrica JND.

Durante todo el proyecto se utiliza la aplicación informática MS Excel para procesar datos, analizarlos, validar el modelo y extraer conclusiones. Los resultados muestran que la acústica del recinto es buena, con un tiempo de reverberación adecuado y valores energéticos correctos mayoritariamente. Esto asegura una inteligibilidad óptima del recinto.

Tras la validación del modelo, se concluye que el modelo del auditorio refleja suficientemente la realidad, siendo apto para cualquier estudio acústico futuro. Además, permite evaluar y realizar mejoras acústicas, garantizando una experiencia auditiva agradable y de calidad para los oyentes.

Abstract

Architectural acoustics is a branch of physics applied to architecture that studies the acoustic control of rooms or spaces to achieve proper isolation between areas or to improve the acoustic conditioning within these spaces [1], based on the principles of sound propagation. Research in this field and its applications are continuously evolving.

The purpose of this project is the design and validation of a geometric model for the acoustic study of the Auditorium of the Higher Technical School of Civil Engineering of the Polytechnic University of Madrid. This acoustic study aims to explain the sound phenomena occurring inside and improve acoustics by simulating possible real scenarios. Simulations can be conducted by selecting and incorporating sound-absorbing and reflecting materials into the model to achieve the best sound quality by controlling reverberation within the space.

This document encompasses the entire process of creating and validating the model, divided into three main phases:

1. On-site measurements in the auditorium using DIRAC software, following the UNE-EN ISO 3382 Standard – Part 1: Performance spaces, generating the emitted signal and recording the results. The measurement equipment used is provided by the Polytechnic University of Madrid. The obtained data is processed and filtered in Excel to work with the precision method established in the standard. The JND (Just Noticeable Difference) metric is designed as a tool for later value comparison.
2. Creation of the simplified Architectural model using Sketch-Up software to accurately represent the study area. On the day of the on-site measurements, an architectural study of the space is conducted, taking dimensions and measurements of all the elements that are part of the auditorium. Since there were no existing plans of the space, it was necessary to create a model from scratch, first creating 2D plans and then developing the 3D model.
3. Importing the model into the acoustic simulation software EASE, to create the geometric model and conduct simulations to extract the necessary information for the subsequent comparison of simulated data and on-site measurements. In the program, the materials for the construction elements of the model are chosen, their configuration is adjusted, and necessary modifications are made to achieve parameters similar to those measured on-site. For validation, both statistical and geometric acoustic approximations are used. Finally, the simulated and measured values are compared using the aforementioned JND metric.

Throughout the project, the MS Excel application is used to process data, analyze it, validate the model, and draw conclusions. The results show that the acoustics of the space are good, with an appropriate reverberation time and mostly correct energy values. This ensures optimal intelligibility of the space.

After validating the model, it is concluded that the auditorium model sufficiently reflects reality, making it suitable for any future acoustic studies. Additionally, it allows for the evaluation and implementation of acoustic improvements, ensuring a pleasant and quality auditory experience for listeners.

Índice de contenidos

Agradecimientos	i
Resumen	i
Abstract	iii
Índice de figuras	vii
Índice de tablas	xi
Lista de acrónimos.....	xv
1. Introducción.....	1
2. Objetivos.....	1
3. Especificaciones y Restricciones de Diseño.....	3
4. Introducción Teórica.....	5
4.1 Aproximaciones Acústicas	6
4.1.1 Acústica estadística	6
4.1.2 Acústica geométrica	6
4.2 Parámetros Acústicos	6
4.2.1 Parámetros temporales	6
4.2.2 Parámetros energéticos.....	8
4.2.3 Parámetros espaciales	10
4.2.4 Parámetros de inteligibilidad.....	10
4.3 Métrica JND	12
5. Mediciones <i>In Situ</i>	15
5.1 Norma UNE-EN ISO 3382-1.....	15
5.2 Equipos de Medida	16
5.3 Procedimiento de medida	19
5.4 Procesado de datos	25
5.4.1 Criterios de procesamiento.....	25
5.4.2 Resultados.....	29
6. Diseño 3D del Modelo Arquitectónico y Geométrico del Auditorio	43
6.1 Diseño del modelo arquitectónico en Sketch-Up.....	43
6.2 Importación y Configuración del Modelo Geométrico a EASE.....	60
7. Validación del Modelo.....	65
7.1 Fase 1. Ajuste del Tiempo de reverberación inicial	65
7.2 Fase 2. Ajuste de materiales y simulaciones en baja resolución.....	67
7.2.1 Modificación 1.....	68
7.2.2 Modificación 2.....	71
7.2.3 Modificación 3.....	73
7.3 Fase 3. Simulación en alta resolución de todos los parámetros acústicos	74
7.4 Resultado de la Validación.....	77
7.5 Simetría del auditorio	91

8.	Presupuesto	95
9.	Impacto del proyecto	97
10.	Conclusiones	99
11.	Referencias	101
	Anexo I: Ruido de fondo	103
	Anexo II: Estudio acústico en octavas	105
	Anexo III: Datos Simulados en EASE en octavas.....	117
	Anexo IV: Materiales Modelo Geométrico EASE.....	135

Índice de figuras

Figura 1. Campo directo y campo reverberante	5
Figura 2. Cálculo del tiempo de reverberación	7
Figura 3. Ejemplos estimadores EDT T20 y T30.....	8
Figura 4. Gráfico de Peutz para la obtención del parámetro Alcons.....	11
Figura 5. Fuente AVM DO-12.....	16
Figura 6. Micrófono omnidireccional AKG CK 92.....	16
Figura 7. Micrófono bidireccional AKG CK 94.....	17
Figura 8. Preamplificador AKG SE-300B.....	17
Figura 9. Sonómetro Bruel & Kjaer 2260.....	17
Figura 10. Portátil ASUS	18
Figura 11. Motu UltraLite MK3	18
Figura 12. Amplificador de potencia Crown XLS 2002 DriveCore	18
Figura 13. Calibrador Brüel & Kjaer 4231	19
Figura 14. Diagrama de bloques de los equipos utilizados en las mediciones	19
Figura 15. Posiciones de fuente en el plano del recinto	20
Figura 16. Posiciones de micrófono en platea.....	22
Figura 17. Posiciones de micrófono en planta 1	22
Figura 18. Fotografía del auditorio desde el escenario.....	24
Figura 19. Fotografía del auditorio desde la platea.....	24
Figura 20. Distribución estadística de Gauss	27
Figura 21. Promedio y desviación de las medidas del parámetro EDT	30
Figura 22. Promedio y desviación de las medidas del parámetro T20.....	31
Figura 23. Promedio y desviación de las medidas del parámetro T30.....	32
Figura 24. Promedio y desviación de las medidas del parámetro RT.....	33
Figura 25. Comparación curvas tiempo de reverberación.....	34
Figura 26. Promedio y desviación de las medidas del parámetro C50	35
Figura 27. Promedio y desviación de las medidas del parámetro C80	36
Figura 28. Promedio y desviación de las medidas del parámetro D50	37
Figura 29. Promedio y desviación de las medidas del parámetro Ts	38
Figura 30. Promedio y desviación de las medidas del parámetro LF	39
Figura 31. Promedio y desviación de las medidas del parámetro LFC.....	40
Figura 32. Promedio Alcons por zonas	41
Figura 33. Promedio STI por zonas.....	42
Figura 34. Plano en planta proporcionado por la escuela	43
Figura 35. Diseño del suelo, escaleras y escenario	45
Figura 36. Diseño del suelo, escaleras y escenario a color	45
Figura 37. Diseño pared escenario.....	46
Figura 38. Diseño paredes – Vista exterior	46
Figura 39. Diseño paredes – Vista interior	47
Figura 40. Diseño planta 1.....	47
Figura 41. Diseño de telón y cortinas.....	48

Figura 42. Diseño de techo.....	48
Figura 43. Diseño de pasillos de primera planta.....	49
Figura 44. Diseño de butacas 1.....	50
Figura 45. Diseño de butacas 2.....	50
Figura 46. Auditorio completo 1.....	51
Figura 47. Auditorio completo 2.....	51
Figura 48. Sección auditorio completo.....	52
Figura 49. Capas creadas en SketchUp.....	53
Figura 50. Vista desde el escenario del modelo.....	55
Figura 51. Vista desde el escenario del auditorio real.....	55
Figura 52. Vista desde el escenario lateral del modelo.....	56
Figura 53. Vista desde el escenario lateral del auditorio real.....	56
Figura 54. Cabinas y techos del modelo.....	57
Figura 55. Cabinas y techos del auditorio real.....	57
Figura 56. Vista desde platea hacia el escenario del modelo.....	58
Figura 57. Vista desde platea hacia el escenario del auditorio real.....	58
Figura 58. Vista de las butacas de planta 1 del modelo.....	59
Figura 59. Vista de las butacas de planta 1 del auditorio real.....	59
Figura 60. Asignación inicial de materiales a las capas en EASE.....	60
Figura 61. Modelo geométrico 3D en EASE.....	61
Figura 62. Alzado lateral del modelo geométrico en EASE.....	62
Figura 63. Sección Transversal del modelo geométrico en EASE.....	62
Figura 64. Vista en planta del modelo geométrico en EASE.....	63
Figura 65. Asignación de Materiales en las Caras.....	64
Figura 66. Tiempo de Reverberación con materiales iniciales.....	65
Figura 67. Comparación del tiempo de reverberación inicial.....	66
Figura 68. Valores del tiempo de reverberación inicial.....	66
Figura 69. Comparación Resultados TR – Modificación 0.....	68
Figura 70. Material Inicial y Modificado Paredes Madera.....	69
Figura 71. Curva Tiempo de Reverberación – Modificación 1.....	69
Figura 72. Comparación del tiempo de reverberación final.....	70
Figura 73. Valores del tiempo de reverberación final.....	70
Figura 74. Comparación Resultados TR – Modificación 1.....	71
Figura 75. Material Inicial y Modificado de Moqueta Suelo.....	72
Figura 76. Herramienta de mapping en EASE.....	75
Figura 77. Selección de Fuentes y Micrófonos para el cálculo de mapas.....	75
Figura 78. Parámetros Resolución de <i>Standard Mapping</i> y <i>AURA Mapping</i>	75
Figura 79. Comparación datos medidos y datos simulados en 1/3 de octava parámetro EDT.....	78
Figura 80. Comparación datos medidos y datos simulados en 1/3 de octava parámetro T2079.....	
Figura 81. Comparación datos medidos y datos simulados en 1/3 de octava parámetro T3080.....	

Figura 82. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en tercios de octava Parámetro RT	81
Figura 83. Comparación datos medidos y datos simulados en 1/3 de octava parámetro C50	82
Figura 84. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en tercios de octava Parámetro C80	83
Figura 85. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en tercios de octava Parámetro D50.....	84
Figura 86. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en tercios de octava Parámetro Ts	85
Figura 87. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en tercios de octava Parámetro LF	86
Figura 88. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en tercios de octava Parámetro LFC.....	87
Figura 89. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en tercios de octava Parámetro STI.....	88
Figura 90. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en tercios de octava Parámetro ALCONS.....	89
Figura 91. Comparación Simetría valores C50 de micrófonos normales y de control.....	92
Figura 92. Comparación Simetría valores EDT de micrófonos normales y de control.....	92
Figura 93. Comparación Simetría valores RT de micrófonos normales y de control	93
Figura 94. Valores de ruido de fondo	104
Figura 95. Promedios por Zonas en Octavas EDT.....	106
Figura 96. Promedio y Desviación Total Octavas EDT	106
Figura 97. Promedios por Zonas en Octavas RT	107
Figura 98. Promedio y Desviación Total Octavas RT.....	107
Figura 99. Promedios por Zonas en Octavas T20	108
Figura 100. Promedio y Desviación Total Octavas T20	108
Figura 101. Promedios por Zonas en Octavas T30.....	109
Figura 102. Promedio y Desviación Total Octavas T30	109
Figura 103. Promedios por Zonas en Octavas C50.....	110
Figura 104. Promedio y Desviación Total Octavas C50	110
Figura 105. Promedios por Zonas en Octavas C80.....	111
Figura 106. Promedio y Desviación Total Octavas C80	111
Figura 107. Promedios por Zonas en Octavas D50	112
Figura 108. Promedio y Desviación Total Octavas D50	112
Figura 109. Promedios por Zonas en Octavas Ts	113
Figura 110. Promedio y Desviación Total Octavas Ts	113
Figura 111. Promedios por Zonas en Octavas LF	114
Figura 112. Promedio y Desviación Total Octavas LF	114
Figura 113. Promedios por Zonas en Octavas LFC	115
Figura 114. Promedio y Desviación Total Octavas LFC.....	115

Figura 115. Promedio Alcons por Zonas	116
Figura 116. Promedio STI por Zonas	116
Figura 117. Datos Simulados en octavas EDT sin procesar	118
Figura 118. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro EDT	118
Figura 119. Datos Simulados en octavas Parámetro T20 sin procesar.....	119
Figura 120. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro T20	119
Figura 121. Datos Simulados en octavas Parámetro T30 sin procesar.....	120
Figura 122. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro T30	120
Figura 123. Datos Simulados en octavas Parámetro C50 STD sin procesar.....	121
Figura 124. Datos Simulados en octavas Parámetro C50 AURA sin procesar	122
Figura 125. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro C50	122
Figura 126. Datos Simulados en octavas Parámetro C80 STD sin procesar.....	123
Figura 127. Datos Simulados en octavas Parámetro C50 AURA sin procesar	124
Figura 128. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro C80	124
Figura 129. Datos Simulados en octavas Parámetro D50 sin procesar	125
Figura 130. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro D50	125
Figura 131. Datos Simulados en octavas Parámetro TS sin procesar	126
Figura 132. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro Ts .	126
Figura 133. Datos Simulados en octavas Parámetro LF sin procesar	127
Figura 134. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro LF .	127
Figura 135. Datos Simulados en octavas Parámetro LFC sin procesar	128
Figura 136. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro LFC	128
Figura 137. Datos Simulados en octavas Parámetro ALCONS STD	129
Figura 138. Datos Simulados en octavas Parámetro ALCONS AURA.....	130
Figura 139. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro ALCONS.....	130
Figura 140. Datos Simulados en octavas Parámetro STI STD	131
Figura 141. Datos Simulados en octavas Parámetro STI AURA	132
Figura 142. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro STI	132

Índice de tablas

Tabla 1. Criterio de valoración parámetro Alcons %	11
Tabla 2. Criterio de valoración parámetro STI	12
Tabla 3. Umbral escalones JND	13
Tabla 4. Escalones JND	14
Tabla 5. Coordenadas de las posiciones de fuente	20
Tabla 6. Coordenadas posiciones de micrófonos	21
Tabla 7. Condiciones meteorológicas	23
Tabla 8. Datos procesados en el fichero Excel	25
Tabla 9. Máscara INR	26
Tabla 10. Porcentaje de muestras eliminadas tras filtrado de máscara INR	26
Tabla 11. Ejemplo muestras eliminadas tras filtrado de Chauvenet	28
Tabla 12. Resultado de filtrado de Chauvenet para zona audiencia	28
Tabla 13. Resultado de filtrado de Chauvenet para zona escenario	29
Tabla 14. Promedio y desviación de las medidas del parámetro EDT [s]	30
Tabla 15. Promedio y desviación de las medidas del parámetro T20 [s]	31
Tabla 16. Promedio y desviación de las medidas del parámetro T30 [s]	32
Tabla 17. Promedio y desviación de las medidas del parámetro RT[s]	33
Tabla 18. Promedio y desviación de las medidas del parámetro C50 [dB]	35
Tabla 19. Promedio y desviación de las medidas del parámetro C80 [dB]	36
Tabla 20. Promedio y desviación de las medidas del parámetro D50[-]	37
Tabla 21. Promedio y desviación de las medidas del parámetro Ts [ms]	38
Tabla 22. Promedio y desviación de las medidas del parámetro LF [-]	39
Tabla 23. Promedio y desviación de las medidas del parámetro LFC [-]	40
Tabla 24. Promedio y desviación Alcons por zonas	41
Tabla 25. Promedio y desviación STI por zonas	42
Tabla 26. Materiales importados a EASE	60
Tabla 27. Asignación inicial de materiales a las capas en EASE	61
Tabla 28. Métrica JND con los materiales iniciales – Modificación 0	67
Tabla 29. Métrica JND con los materiales iniciales – Modificación 1	71
Tabla 30. Métrica JND con los materiales iniciales – Modificación 2	73
Tabla 31. Métrica JND con los materiales iniciales – Modificación 3	74
Tabla 32. Ejemplo Estructura de Procesado de Datos Simulados	76
Tabla 33. Ejemplo Estructura de Procesado de Datos Simulados tras aplicar Chauvenet	76
Tabla 34. Comparación datos medidos y datos simulados en 1/3 de octava parámetro EDT [s]	78
Tabla 35. Comparación datos medidos y datos simulados en 1/3 de octava parámetro T20 [s]	79
Tabla 36. Comparación datos medidos y datos simulados en 1/3 de octava parámetro T30 [s]	80
Tabla 37. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en tercios de octava Parámetro RT [s]	81

Tabla 38. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados STD en tercios de octava Parámetro C50 [dB]	82
Tabla 39. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados AURA en tercios de octava Parámetro C50 [dB]	82
Tabla 40. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados STD en tercios de octava Parámetro C80 [dB]	83
Tabla 41. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados AURA en tercios de octava Parámetro C80 [dB]	83
Tabla 42. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en tercios de octava Parámetro D50 [-]	84
Tabla 43. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en tercios de octava Parámetro Ts [ms]	85
Tabla 44. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en tercios de octava Parámetro LF [-]	86
Tabla 45. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en tercios de octava Parámetro LFC	87
Tabla 46. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados STD en tercios de octava Parámetro STI [-]	88
Tabla 47. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados AURA en tercios de octava Parámetro STI [-]	88
Tabla 48. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados STD en tercios de octava Parámetro ALCONS [%]	89
Tabla 49. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados AURA en tercios de octava Parámetro ALCONS	89
Tabla 50. Resultados datos procesados tercios	90
Tabla 51. Micrófonos normales y de control	91
Tabla 52. Comparación Simetría valores C50 de micrófonos normales y de control	91
Tabla 53. Comparación Simetría valores EDT de micrófonos normales y de control	92
Tabla 54. Comparación Simetría valores RT de micrófonos normales y de control	93
Tabla 55. Valores de ruido de fondo	103
Tabla 56. Promedios y Desviación por Zonas en Octavas EDT [s]	106
Tabla 57. Promedios y Desviación por Zonas en Octavas RT [s]	107
Tabla 58. Promedios y Desviación por Zonas en Octavas T20 [s]	108
Tabla 59. Promedios y Desviación por Zonas en Octavas T30 [s]	109
Tabla 60. Promedios y Desviación por Zonas en Octavas C50[dB]	110
Tabla 61. Promedios y Desviación por Zonas en Octavas C80 [dB]	111
Tabla 62. Promedios y Desviación por Zonas en Octavas D50[-]	112
Tabla 63. Promedios y Desviación por Zonas en Octavas Ts [s]	113
Tabla 64. Promedios y Desviación por Zonas en Octavas LF [-]	114
Tabla 65. Promedios y Desviación por Zonas en Octavas LFC[-]	115
Tabla 66. Promedios y Desviación por Zonas en Octavas Alcons [%]	116
Tabla 67. Promedios y Desviación por Zonas en Octavas STI [-]	116

Tabla 68. Datos Simulados en octavas EDT [s] sin procesar	118
Tabla 69. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas EDT	118
Tabla 70. Datos Simulados en octavas Parámetro T20 [s] sin procesar	119
Tabla 71. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro T20.....	119
Tabla 72. Datos Simulados en octavas Parámetro T30 [s] sin procesar	120
Tabla 73. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro T30.....	120
Tabla 74. Datos Simulados en octavas Parámetro C50 [dB] sin procesar	121
Tabla 75. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro C50 STD	121
Tabla 76. Datos Simulados en octavas Parámetro C50 [dB] AURA sin procesar	122
Tabla 77. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro C50 AURA.....	122
Tabla 78. Datos Simulados en octavas Parámetro C80 [dB] STD sin procesar.....	123
Tabla 79. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro C80 STD	123
Tabla 80. Datos Simulados en octavas Parámetro C80 [dB] AURA sin procesar	124
Tabla 81. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro C80 AURA.....	124
Tabla 82. Datos Simulados en octavas Parámetro D50 [dB] sin procesar	125
Tabla 83. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro D50 ...	125
Tabla 84. Datos Simulados en octavas Parámetro Ts [ms] sin procesar.....	126
Tabla 85. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro Ts	126
Tabla 86. Datos Simulados en octavas Parámetro LF [-] sin procesar.....	127
Tabla 87. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro LF	127
Tabla 88. Datos Simulados en octavas Parámetro LFC[-] sin procesar	128
Tabla 89. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro LFC	128
Tabla 90. Datos Simulados en octavas Parámetro ALCONS [%] STD.....	129
Tabla 91. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro ALCONS STD	129
Tabla 92. Datos Simulados en octavas Parámetro ALCONS AURA	130
Tabla 93. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro ALCONS AURA.....	130
Tabla 94. Datos Simulados en octavas Parámetro STI STD.....	131
Tabla 95. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro STI STD	131
Tabla 96. Datos Simulados en octavas Parámetro STI AURA	132
Tabla 97. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro STI AURA	132



Lista de acrónimos

	Significado	Meaning
ALCONS	Pérdida de Inteligibilidad de Consonantes	Percentage Loss of Consonants
C	Claridad	Clarity
COITT	Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos de Telecomunicación	Official College of Telecommunications Technical Engineers.
D	Definición	Definition
EDT	Tiempo de Reverberación Temprano	Early Decay Time
ETSICCP	Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos	Higher Technical School of Roads, Canals and Ports
INR	Relación Impulso Ruido	Impulse Response to Noise Ratio
JND	Diferencia Mínima Notable	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
XLR	Línea de Retorno Externa	External Line Return

1. Introducción

El presente documento aborda un Proyecto de Fin de Grado del Grado de Ingeniería de Sonido e Imagen de la Universidad Politécnica de Madrid centrado en el campo de la acústica arquitectónica.

Desde los antiguos teatros griegos y romanos, pasando por los orientales o medievales, hasta los actuales, la preocupación por la calidad del sonido en los recintos dedicados al espectáculo y el entretenimiento ha sido constante. En todos estos espacios la acústica desempeña un papel crucial, influyendo directamente en la experiencia del espectador durante el evento al que asiste. Por ello, modelar adecuadamente la acústica de un recinto es fundamental para adaptarlo a su función específica, ya que las necesidades acústicas varían según el tipo de espacio. La acústica está moldeada principalmente por la geometría de la sala y los materiales utilizados en su construcción.

El proyecto forma parte de un programa de investigación que tiene el objetivo de recopilar en una base de datos modelos virtuales de teatros y auditorios principalmente, junto con sus propiedades acústicas y configuraciones arquitectónicas. Esta base de datos tiene el propósito de facilitar la realización de nuevos estudios acústicos, configurando la acústica y el sistema de sonido de cada recinto según las necesidades del evento o función a realizar, sin necesidad de acceder físicamente a ellos, lo cual en algunos casos puede estar condicionado por diversos motivos: restricciones de acceso, desplazamientos, etc.

Este proyecto se centra en el estudio acústico del Auditorio de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid, con el fin de conocer su comportamiento acústico, basado en las simulaciones del modelo geométrico diseñado y en las mediciones acústicas realizadas *in situ*.

El desarrollo del proyecto se divide en tres fases principales: medición *in situ* de parámetros acústicos y procesamiento de datos, modelado arquitectónico simplificado en 3D del auditorio y validación del modelo geométrico con los datos obtenidos durante las mediciones *in situ*, teniendo en cuenta las simulaciones realizadas en un software específico de simulación acústica.

Todas estas etapas se detallan en la siguiente memoria que también incluye los resultados de la validación del modelo y su comparación con los valores reales medidos. Además, se presenta el diseño 3D del auditorio ajustado para garantizar su realismo dentro de los límites necesarios para su aplicación práctica.

2. Objetivos

El objetivo de este proyecto es la creación de un modelo acústico geométrico del auditorio de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid, y su posterior validación, comparando los datos simulados con los medidos *in situ* en el auditorio, según la norma UNE-EN ISO 3382 – Parte 1: Sala de Espectáculos [2].

Para conseguir este objetivo se han seguido las siguientes fases:

- Estudio del recinto, recopilación de la historia del auditorio y de sus características arquitectónicas.
- Realización de mediciones *in situ* conforme a la norma mencionada.
- Procesamiento de datos a partir de las mediciones *in situ* para la obtención de los parámetros acústicos necesarios para la validación del modelo.
- Diseño del modelo geométrico en 3D mediante la aplicación SketchUp.
- Ajuste del modelo acústico utilizando el software EASE. Una vez importado se escogen los materiales correspondientes y se realiza la simulación.
- Validación del modelo comparando los datos medidos *in situ* y los obtenidos tras la simulación en EASE.
- Redacción de la memoria del proyecto, describiendo todo el proceso.

Una vez concluido, el proyecto pasará a formar parte de la base de datos del grupo de investigación GAMMA, la cual cuenta con información de numerosos auditorios y teatros de España.

3. Especificaciones y Restricciones de Diseño

Para cumplir con todos los objetivos descritos en el apartado anterior, se han tenido en cuenta las siguientes especificaciones y restricciones de diseño:

ESPECIFICACIONES

- **Diseño de planos del recinto en 2D:** Se ha llevado a cabo utilizando herramientas de representación gráfica 2D, lo que ha proporcionado una vista bidimensional del diseño del recinto.
- **Modelo arquitectónico en 3D:** Se ha creado utilizando herramientas de representación gráfica 3D. Este modelo ofrece una representación tridimensional básica del diseño arquitectónico del recinto.
- **Modelo geométrico y análisis acústico:** Se ha realizado utilizando un software específico de simulación acústica. Este software ha permitido la creación de un modelo geométrico detallado del recinto y la realización de un análisis acústico exhaustivo.
- **Medidas in situ según norma UNE-EN ISO 3382:** Las medidas se han llevado a cabo siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE-EN ISO 3382, que es la norma internacional para la medición de parámetros acústicos en recintos, lo que ha garantizado la precisión y la consistencia de los datos recopilados.
- **Validación del modelo según medidas in situ:** El modelo geométrico generado ha sido validado comparando sus resultados con las medidas in situ realizadas según la norma UNE-EN ISO 3382. Esta validación ha asegurado que el modelo simulado refleja con precisión las características acústicas reales del recinto.

RESTRICCIONES

- **Simplificaciones en el modelo 3D:** El modelo geométrico en 3D contiene simplificaciones específicas para cumplir con los criterios acústicos y minimizar el número de caras del modelo, lo que ha facilitado su procesamiento en el software de simulación.
- **Rango de frecuencia del software de simulación:** El software de simulación acústica solo permite trabajar con bandas de frecuencia entre 100 Hz y 10 kHz. Esto significa que la información de los parámetros acústicos fuera de este rango no está disponible.
- **Adaptación de la norma a la geometría del auditorio:** Ha sido necesario adaptar los requisitos de la norma UNE-EN ISO 3382 a la geometría y disposición específica del auditorio en el momento de la toma de medidas in situ, para garantizar la coherencia y relevancia de los resultados.
- **Validación del modelo con respecto a medidas in situ:** La validación del modelo se ha realizado comparando sus resultados con los valores promedio de los parámetros acústicos medidos *in situ* en el auditorio, lo que ha asegurado su fiabilidad y precisión en la simulación acústica del recinto.

Para realizar el proyecto se han utilizado las siguientes aplicaciones informáticas:

- MS Excel y MS Word para el procesado y análisis de datos y la redacción de la memoria respectivamente.
- DIRAC para la realización de mediciones *In situ*.
- SketchUp para diseñar y levantar el modelo, obteniendo el recinto en 3D.
- EASE para realizar la simulación acústica del auditorio.

4. Introducción Teórica

El sonido se define como la propagación de ondas mecánicas audibles a través de un medio específico. La psicoacústica se encarga de estudiar la percepción del sonido por parte del ser humano, considerando tanto los fundamentos físicos del sonido como los aspectos fisiológicos del oído.

El Nivel de Presión Sonora, conocido en inglés como Sound Pressure Level (SPL), representa la presión sonora en un punto y momento determinados, expresada en unidades logarítmicas. Este parámetro influye en las mediciones realizadas y está directamente relacionado con la percepción de sonoridad por parte del oyente y se calcula con la siguiente fórmula:

$$SPL = 20 \times \log \left(\frac{p_{rms}}{p_{ref}} \right) \text{ [dB]} \quad (1)$$

donde:

p_{rms} = presión sonora RMS

p_{ref} = presión sonora de referencia 20 μPa

En espacios cerrados las ondas sonoras se propagan a través del aire rebotando en las superficies circundantes generando reflexiones, por lo que es posible distinguir entre lo que se denomina como campo directo y campo reverberante.

El **campo directo** consiste en las ondas sonoras que alcanzan al oyente directamente desde la fuente sin sufrir reflexiones en su trayectoria. Estas ondas son de orden 0, es decir, no han interactuado con ningún elemento antes de llegar al oyente.

Por otro lado, el **campo reverberante** comprende todas las ondas sonoras que llegan al oyente después de haber experimentado una o varias reflexiones en su trayectoria. Estas reflexiones pueden ser de orden bajo, implicando pocos rebotes, o de orden alto, implicando alguno más.

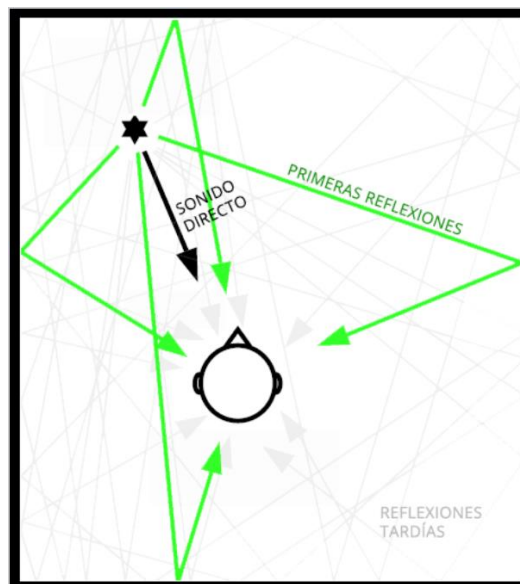


Figura 1. Campo directo y campo reverberante

La distancia crítica o punto frontera es la distancia a la que la energía aportada por el campo directo y el campo reverberante son iguales. Esta distancia se calcula de la siguiente forma:

$$r_c = \frac{1}{4} \times \sqrt{\frac{R \times Q}{\pi}} \text{ [m]} \quad (2)$$

donde:

R = constante de la sala (equivalente a la absorción de los materiales de la sala [m²])

Q = factor de directividad de la fuente

4.1 Aproximaciones Acústicas

Cuando se analiza el comportamiento acústico de una sala, hay varias aproximaciones que describen diferentes métodos para determinar sus características. En este proyecto, el estudio del recinto se lleva a cabo utilizando dos enfoques: la acústica estadística y la acústica geométrica.

4.1.1 Acústica estadística

La acústica estadística se emplea para calcular parámetros acústicos de manera más simple y sencilla que la acústica geométrica utilizando el tiempo de reverberación. En el caso del software de EASE, se usa la fórmula de Eyring para calcular este tiempo.

La acústica estadística parte de que el sonido se dispersa de manera uniforme en todas las direcciones, creándose un campo sonoro difuso. Este enfoque implica un componente de aleatoriedad en el proceso, en el que no se tienen en cuenta las fases de las ondas. La energía total en un punto específico es la suma de todas las ondas que llegan a este punto.

4.1.2 Acústica geométrica

A diferencia de la acústica estadística, la acústica geométrica analiza las reflexiones de manera individual, distinguiendo entre la señal directa y las señales reflejadas, evaluándolas según su orden, trayectoria y pérdidas para obtener resultados más precisos, ya que esta teoría tiene en cuenta la pérdida de energía que sufren las ondas, debido a las propiedades absorbentes de los materiales de acondicionamiento en los que son reflejadas.

Esta aproximación utiliza técnicas como el trazado de rayos o fuentes imagen, teniendo en cuenta que la distribución de energía no es uniforme en los primeros intervalos de tiempo. Además, el trazado de rayos varía dependiendo de si el sonido incide en superficies planas o curvas. Cuanto menor es la longitud de onda del rayo respecto las superficies del recinto, los resultados son más fiables. Este método es útil para identificar y corregir aspectos desfavorables de las reflexiones sonoras.

La acústica geométrica proporciona resultados más detallados, mientras que la acústica estadística ofrece resultados más generales y simplificados.

4.2 Parámetros Acústicos

Para estudiar un recinto se deben conocer y estudiar los parámetros acústicos con los que se va a trabajar. Estos parámetros nos proporcionan la información necesaria para conocer las características de la sala en diferentes campos y conocer su comportamiento acústico ante una excitación sonora. Los parámetros acústicos se dividen en los siguientes cuatro ámbitos:

4.2.1 Parámetros temporales

Los parámetros temporales están relacionados con el tiempo que tarda la energía sonora en extinguirse dentro de una sala.

- Tiempo de reverberación

Desde que comienza la emisión de una fuente hasta que cesa es posible distinguir tres fases: la fase de crecimiento, la fase estacionaria (puede no ocurrir) y la fase de decrecimiento. Esta última fase es la que se utiliza para examinar el tiempo de reverberación.

Se define el tiempo de reverberación como el tiempo que transcurre desde que una excitación sonora finaliza hasta que el nivel de presión sonora disminuye 60dB. La energía acústica del recinto debe disminuir una millonésima parte de su valor inicial. Su valor influye en el resto de los parámetros.

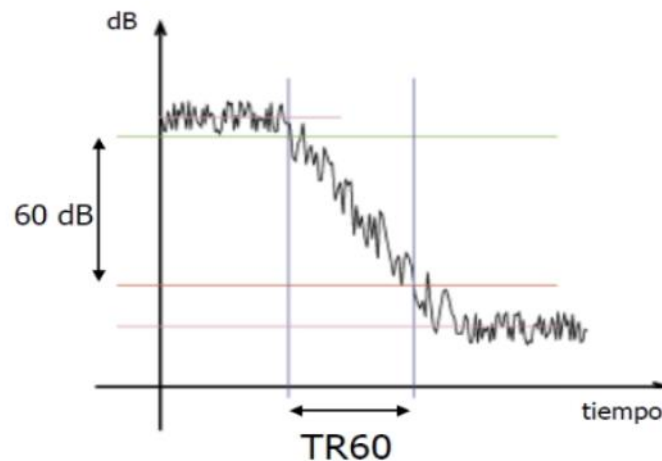


Figura 2. Cálculo del tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación se puede calcular, dentro de la aproximación estadística, mediante la fórmula de Sabine (1) o la fórmula de Eyring (2):

$$RT = \frac{0,161 \times V}{A} = \frac{0,161 \times V}{S \times \alpha} \quad [s] \quad (3)$$

$$RT = \frac{0,161 \times V}{-S \times \ln(1-\alpha)} \quad [s] \quad (4)$$

donde:

V = volumen del recinto [m³]

A = área de absorción sonora equivalente [m²]

S = superficie del recinto [m²]

α = coeficiente medio de absorción del recinto [-]

Dependiendo del volumen de la sala, el tiempo de reverberación óptimo se encuentra entre 0.5s y 2s.

- Estimadores T20 y T30

Medir una disminución de 60 dB puede resultar difícil en ciertos entornos, sobre todo en aquellos casos en los que la fuente no tiene el nivel suficiente o por la presencia de ruido de fondo. En estos casos se utilizan los estimadores del tiempo de reverberación T20 y T30 para estimar el tiempo de caída en un intervalo de 20 dB y 30 dB respectivamente (ΔT20 y ΔT30), en lugar de la caída de 60 dB que utiliza el tiempo de reverberación.

Estos estimadores proporcionan una aproximación al tiempo de reverberación sin requerir una caída completa. En este caso, se multiplica por 3 y por 2 respectivamente para igualar la caída de 60 dB.

Además, estos estimadores permiten dejar un margen de 5dB desde el cese de ruido, teniendo en cuenta posibles fluctuaciones ocasionadas por las interferencias constructivas o destructivas entre ondas.

- Tiempo de reverberación temprano (EDT)

El tiempo de reverberación temprano (EDT) es el tiempo que tardan en disminuir los primeros 10 dB multiplicado por 6. A diferencia de los estimadores T_{20} y T_{30} , no se deja un margen de 5 dB desde el cese de ruido.

Este parámetro está relacionado con la percepción humana de la reverberación en la sala. Proporciona indicios de si la sala tiene una reverberación alta con un EDT similar al tiempo de reverberación RT, o es más seca con una reverberación baja y un EDT bastante menor que el RT.

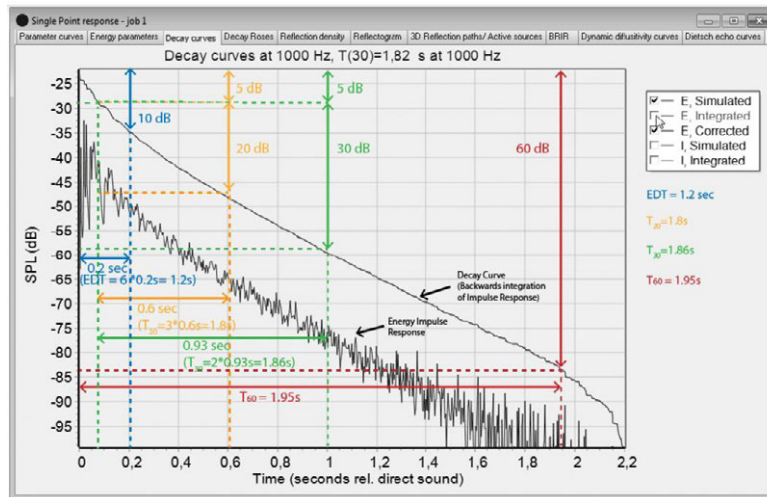


Figura 3. Ejemplos estimadores EDT T20 y T30.

4.2.2 Parámetros energéticos

Los parámetros energéticos son aquellos que establecen una relación entre dos valores de presión sonora. A continuación, se explican los parámetros más destacables:

- Claridad de voz C50

Este parámetro se calcula teniendo en cuenta la energía captada por el oyente durante los primeros 50 milisegundos, en relación con la energía a partir de ese momento. Este límite temporal se fundamenta en las reflexiones iniciales.

$$C50 = \frac{\text{Energía en los primeros 50ms}}{\text{Energía tras los primeros 50ms}} \text{ [dB]} \quad (5)$$

$$C50 = 10 \times \log \left(\frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_{50}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \text{ [dB]} \quad (6)$$

Siendo $p(t)$ el nivel de presión sonora instantánea.

Cuando el valor de C50 es superior a 2dB en cada punto de medida, el parámetro es óptimo. A mayor claridad, más fácil será distinguir la voz.

- Claridad musical C80

Este índice evalúa la capacidad de percibir la música en condiciones específicas de sonido. Se calcula teniendo en cuenta la energía captada en los primeros 80 milisegundos en comparación con la energía a partir de ese momento:

$$C80 = \frac{\text{Energía en los primeros 80ms}}{\text{Energía tras los primeros 80ms}} \text{ [dB]} \quad (7)$$

$$C80 = 10 \times \log \left(\frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \text{ [dB]} \quad (8)$$

Siendo p(t) el nivel de presión sonora instantánea.

Cuanto mayor sea la claridad, más perceptibles serán la música. El parámetro es óptimo cuando se encuentra en un rango de -2dB y 6dB (según la sala y su uso).

- Definición D50

Este parámetro evalúa la definición del habla, es decir, la claridad de su percepción en un espacio. Se calcula evaluando la relación entre la energía percibida en los primeros 50 milisegundos y la energía total de la señal:

$$D50 = \frac{\text{Energía en los primeros 50ms}}{\text{Energía total}} \text{ [-]} \quad (9)$$

$$D50 = \left(\frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_{50}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \text{ [-]} \quad (10)$$

Valores más altos de D50 indican que una mayor proporción de la energía del sonido llega al oyente en los primeros 50 milisegundos, lo que se asocia con una mejor claridad del sonido. Se considera una definición óptima cuando este parámetro es superior a 0.5. Este parámetro está íntimamente relacionado con C50.

- Definición D80

Al igual que el parámetro D50, se puede calcular el D80, relacionando la energía total con la transcurrida en los primeros 80ms:

$$D80 = \frac{\text{Energía en los primeros 80ms}}{\text{Energía total}} \text{ [-]} \quad (11)$$

$$D80 = \left(\frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \text{ [-]} \quad (12)$$

- Tiempo central Ts

El tiempo central o centro de gravedad representa la nitidez de la sala. Es aquel instante de tiempo en el que la energía acumulada alcanza la mitad de la energía total:

$$Ts = \left(\frac{\int_0^{\infty} t \times p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \right) \text{ [ms]} \quad (13)$$

Un tiempo central corto provee una mayor claridad. Cuanto mayor sea, existirá más reverberación. En torno a los 130ms se encuentra el valor óptimo.

4.2.3 Parámetros espaciales

Los parámetros espaciales se calculan a partir de la proporción de energía lateral que llega a los oyentes del recinto. Para obtenerlos se necesita un micrófono bidireccional.

- Eficiencia lateral LF

Este parámetro relaciona la energía captada lateralmente por los oyentes en el intervalo de tiempo de 5 a 80 ms, con la presión proveniente de todas las direcciones en el intervalo de 0 a 80 ms. Se necesita un micrófono bidireccional y otro omnidireccional.

$$LF = \frac{\text{Energía lateral de los 5ms a los 80ms primeros}}{\text{Energía total antes de los 80ms primeros}} [-] \quad (14)$$

$$LF = \left(\frac{\int_5^{80} p_l^2(t) dt}{\int_0^{80} p^2(t) dt} \right) [-] \quad (15)$$

Siendo p_l la presión captada por el micrófono bidireccional.

- Eficiencia Lateral Coseno o LFC

Se trata de una mejora del parámetro LF, al que se le añade el coseno del ángulo con el que incide el sonido en el micrófono. El valor obtenido se asemeja más a la señal que capta el oído.

$$LFC = \left(\frac{\int_5^{80} |p_L(t) \cdot p(t)| dt}{\int_0^{80} p^2(t) dt} \right) [-] \quad (16)$$

4.2.4 Parámetros de inteligibilidad

Los parámetros de inteligibilidad definen la calidad por la que el sonido puede ser entendido sin dificultad, es decir, la medida en la que un mensaje puede ser captado de manera inteligible por los oyentes en una sala cerrada. Se tienen en cuenta dos parámetros que se presentan a continuación: Alcons y STI.

- Alcons

El parámetro Alcons (Pérdida de Articulación de Consonantes o *Articulation Loss of Consonants* en inglés) define el porcentaje de consonantes perdidas en un mensaje emitido.

$$Alcons = \left(\frac{n^{\circ} \text{ consonantes entendidas}}{n^{\circ} \text{ consonantes emitidas}} \right) [\%] \quad (17)$$

Este parámetro se obtiene con el tiempo de reverberación de la sala y la diferencia de niveles de presión sonora entre el campo directo y el reverberante en un punto específico. Para el cálculo del parámetro se utiliza el gráfico de Peutz que se representa en la siguiente figura:

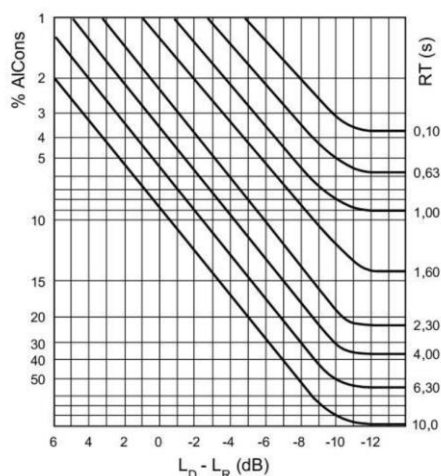


Figura 4. Gráfico de Peutz para la obtención del parámetro Alcons

$$LD - LR = 10 \times \log \left(\frac{Q \times R}{r^2} \right) - 17 \text{ [dB]} \quad (18)$$

$$R = \left(\frac{S \times \alpha}{1 - \alpha} \right) \text{ [-]} \quad (19)$$

donde:

LD = nivel de presión sonora del campo directo [dB]

LR = nivel de presión sonora del campo reverberante [dB]

Q = factor de directividad de la fuente [-]

R = constante acústica de la sala [m²]

r = distancia desde la fuente al punto específico [m]

S = superficie de la sala [m²]

α = coeficiente de absorción medio del recinto [-]

Un tiempo de reverberación elevado da lugar a que el porcentaje del Alcons sea alto. La presencia de un elevado ruido de fondo afecta negativamente al parámetro. Cuando la distancia fuente-receptor es pequeña mejora la inteligibilidad. Cuanto menor sea el porcentaje de pérdidas, mejor será la inteligibilidad y por tanto la calidad acústica.

Tabla 1. Criterio de valoración parámetro Alcons %

ALCONS [%]	INTELIGIBILIDAD
0% - 3%	EXCELENTE
3% - 8%	MUY BUENA
8% - 11%	BUENA
11% - 15%	ADECUADO
15% - 18%	MALA
> 18%	INADMISIBLE

- STI

El parámetro STI (índice que evalúa la inteligibilidad del habla o *Speech Transmission Index* en inglés) también se utiliza para conocer la inteligibilidad de la palabra. Se caracteriza por medir las pérdidas de inteligibilidad a partir de la propia señal vocal, analizando su degradación. Depende de la reverberación, del ruido de fondo, de la

distorsión y de los ecos. Se calcula midiendo la degradación de la envolvente de la intensidad acústica con la siguiente fórmula:

$$m = \left(\frac{I_{max} - I_0}{I_0} \right) [-] \quad (20)$$

donde:

I_{max} = valor máximo de la envolvente

I_0 = valor promedio de la envolvente

Cuanto más pequeño es el valor m recibido, mayor es su degradación y menor su inteligibilidad. Los valores para evaluar el STI se encuentran en el rango de 0 a 1, correspondiéndose el 0 con una inteligibilidad nula y el 1 con una excelente.

Tabla 2. Criterio de valoración parámetro STI

STI	INTELIGIBILIDAD
0,75 - 1	EXCELENTE
0,6 – 0,75	MUY BUENA
0,45 – 0,6	BUENA
0,3 - 0,45	ADECUADO
0,25 – 0,3	MALA
< 0,25	INADMISIBLE

4.3 Métrica JND

El Umbral Diferencial o índice JND (*Just Noticeable Difference*) se utiliza para comparar los resultados simulados con los medidos *in situ*. También se puede utilizar para expresar en una métrica única diferentes características de los parámetros acústicos (p.e. la desviación estándar de cada parámetro se expresa en sus propias unidades, pero También se puede hacer en métrica JND). Proporciona una estimación de la “distancia” entre los dos tipos de resultados y sirve para expresar la percepción de un cambio en una magnitud específica. Gracias a él se puede catalogar el grado de variación de un parámetro perceptible por el oyente. La fórmula utilizada para calcular el JND depende del parámetro acústico analizado.

- **RT, EDT, T20 y T30**

En los parámetros temporales el escalón JND se calcula con la misma fórmula:

$$JND [\%] = \frac{|Valor\ medido - Valor\ simulado|}{Valor\ medido} \times 100 \quad (21)$$

$$Escalón\ JND = \frac{JND\ \%}{5} \quad (22)$$

Cada escalón se corresponde con un intervalo del 5%, es decir, si la distancia entre los resultados se encuentra entre 0% y 5%, se corresponde con el escalón 1. Si se encuentra entre el 5% y el 10% con el escalón 2, y así sucesivamente.

- **C50 y C80**

Para estos parámetros energéticos, simplemente se comparan los valores medidos y los simulados y se redondea el resultado al entero superior.

$$JND [dB] = |Valor\ medido - Valor\ simulado| \quad (23)$$

$$\text{Escalón JND} = \frac{JND [dB]}{1 dB} \quad (24)$$

Un escalón se corresponde con 1dB de diferencia, por lo que si la diferencia se encuentra entre el 1 y el 2 se corresponde con el escalón 2.

- **D50, LF y LFC**

En este caso, el escalón se corresponde con un intervalo de 0,05 unidades. Es decir, si el resultado se encuentra entre 0 y 0,05, se trata del primer escalón. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$JND [-] = |\text{Valor medido} - \text{Valor simulado}| \quad (25)$$

$$\text{Escalón JND} = \frac{|\text{Valor medido} - \text{Valor simulado}|}{0.05} \quad (26)$$

- **Ts**

Se calcula igual que el anterior, pero con la diferencia de que el escalón se corresponde con un intervalo de 10ms. Si la diferencia esta entre 0 y 10ms, el resultado pertenece al primer escalón:

$$JND [ms] = |\text{Valor medido} - \text{Valor simulado}| \quad (27)$$

$$\text{Escalón JND} = \frac{|\text{Valor medido} - \text{Valor simulado}|}{10 ms} \quad (28)$$

- **Alcons**

Respecto al cálculo del escalón JND para el índice Alcons, cada escalón abarca un intervalo de 2 unidades porcentuales:

$$JND [-] = |\text{Valor medido} - \text{Valor simulado}| \quad (29)$$

$$\text{Escalón JND} = \frac{|\text{Valor medido} - \text{Valor simulado}|}{2} \quad (30)$$

- **STI**

Por último, para el parámetro de inteligibilidad STI, el escalón tiene un valor de 0,03:

$$JND [-] = |\text{Valor medido} - \text{Valor simulado}| \quad (31)$$

$$\text{Escalón JND} = \frac{|\text{Valor medido} - \text{Valor simulado}|}{0.03} \quad (32)$$

En la siguiente tabla se presenta una recopilación del umbral de diferencia JND de cada parámetro acústico:

Tabla 3. Umbral escalones JND

PARÁMETROS ACÚSTICO	UMBRAL JND
TR, EDT, T20 Y T30	5%
C50, C80	1dB
D50, LF Y LFC	0.05
Ts	10ms
Alcons	2
STI	0.03

En la tabla 4, se muestra una escala referenciada creada para el proyecto con los niveles de escalón JND, basados en la mínima diferencia perceptible de cada parámetro.

Tabla 4. Escalones JND

ESCALONES JND
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

Si el resultado no pasa del primer escalón, la diferencia entre el valor medido y el simulado no será perceptible. Si se encuentra entre los escalones 2 y 3 se comenzará a notar levemente la diferencia. Si se encuentra en el cuarto escalón, se podría justificar la variación de percepción para algún parámetro. En cuanto el escalón sea mayor de 4, la variación será tan grande que no se considerará como resultado válido.

5. Mediciones In Situ

Para comenzar con este proyecto, se ha llevado a cabo la medición in situ de los parámetros acústicos necesarios en el auditorio de la Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid. Estas mediciones servirán como referencia para la posterior simulación y validación del modelo geométrico diseñado. Dichas mediciones han seguido las pautas establecidas por la norma UNE-EN ISO 3382-1, que especifica las condiciones bajo las cuales se deben realizarse.

A continuación, se describe detalladamente todo el proceso de medición conforme a la norma, incluyendo la instrumentación empleada y la selección de las posiciones de los micrófonos y las fuentes de sonido en el auditorio.

5.1 Norma UNE-EN ISO 3382-1

La parte 1 de la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010 proporciona los detalles de los procedimientos, requisitos y equipos necesarios para la realización de mediciones acústicas in situ en salas de espectáculos. Se emplea para obtener el Tiempo de Reverberación y el resto de los parámetros acústicos descritos en el apartado 4, utilizando los métodos de respuesta impulsiva y ruido interrumpido.

Las condiciones establecidas por la norma para realizar las mediciones son:

- Medir la temperatura ambiente y la humedad relativa con precisión de ± 1 °C y ± 5 %, respectivamente, antes de comenzar las mediciones y al finalizar.
- La fente de ruido que emitirá el sonido debe ser lo más omnidireccional posible, cubriendo todas las bandas de octava desde 100Hz a 5.000Hz. La fuente debe generar el nivel suficiente para conseguir una Relación Impulso a Ruido (INR) superior a 45 dB y una Relación Señal a Ruido (SNR) mayor a 50 dB en todas las bandas.

En cuanto a la desviación de directividad, respecto a un ángulo de 30°, se acepta como máximo 1dB de desviación en las bandas de 125Hz, 250 Hz y 500Hz, 3dB de desviación en la banda de 1.000Hz, 5dB de desviación en la de 2.000Hz y 6 dB de desviación máxima para la banda de 4.000Hz.

- El micrófono que se utiliza para medir todos los parámetros debe ser omnidireccional y lo más pequeño posible, con un diafragma máximo de 13mm (en el caso de que el micrófono sea de repuesta de presión o esté campo libre, el diafragma puede ser de hasta 26mm). Para los parámetros LF y LFC se utiliza también un micrófono bidireccional de respuesta en ocho.
- El sonómetro de medida debe cumplir con las condiciones de Clase 1.
- Respecto a las posiciones de la fuente y los micrófonos en el recinto:
 - Se miden 2 posiciones de fuente a 1,5m de altura en las que se ubicarían las fuentes reales.
 - Los micrófonos se distribuyen de manera uniforme en aquellos lugares donde se ubique el público, simulando ser la audiencia del recinto. Deben estar a 1,2m de altura del suelo y la distancia entre ellos debe ser igual o superior a 2m.

- La distancia mínima entre las posiciones del micrófono y cualquier superficie reflectante será de 1m.
- La distancia fuente-micrófono siempre será superior a 1,5m.
- No se admite sobresaturación en ninguna fase de los equipos de medida.
- Por último, se debe describir el estado de ocupación del auditorio en el momento de las mediciones, teniendo en cuenta el mobiliario existente y los acabados materiales de todos los elementos, para posteriormente evaluar los resultados obtenidos. En el caso de este proyecto, el día de las mediciones se realizaron numerosas fotografías para su poder analizar todo posteriormente con detalle.

5.2 Equipos de Medida

Para realizar las mediciones acústicas in situ en el auditorio estudiado, se han empleado los instrumentos de medida y equipos de registro y análisis de datos descritos a continuación. Todos los equipos han sido proporcionados por la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sistemas de Telecomunicaciones y cumplen con la norma UNE EN-ISO 3382-1.

Fuente sonora omnidireccional AVM DO-12

Se trata de una fuente dodecaédrica con 12 altavoces, uno en cada cara, de 5 pulgadas cada uno. Al ser omnidireccional radia igual en todas las direcciones generando un campo difuso esférico. De todas formas, se utiliza una cara de referencia como eje de máxima radiación. Está diseñada con una potencia máxima de entrada de 600 W, una impedancia de 10 Ohm y una potencia sonora de emisión de 120 dB, en el rango entre 80 Hz y 6.300 Hz. Cumple con la norma UNE-EN-ISO 140 y se utiliza un trípode para situarla a 1,5m del suelo.



Figura 5. Fuente AVM DO-12.

Micrófono AKG CK 92

Este micrófono es de tipo condensador omnidireccional con una sensibilidad de 13 mV/Pa. Presenta una relación señal a ruido de 77 dBA, una impedancia de 200 Ohm y su respuesta en frecuencia abarca todo el rango audible, de 20Hz a 20kHz.



Figura 6. Micrófono omnidireccional AKG CK 92.

Micrófono AKG CK 94

Para las mediciones de los parámetros energéticos también se utiliza este micrófono de tipo condensador bidireccional con una sensibilidad de 10mV/Pa y una SNR es de 72dB. Su impedancia y su respuesta en frecuencia coincide con la del micrófono omnidireccional.

Ambos micrófonos se conectan al trípode mediante un adaptador y se deben calibrar a 94dB.

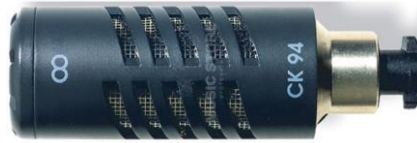


Figura 7. Micrófono bidireccional AKG CK 94.

Preamplificador AKG SE-300B

Para poder adaptar la señal del micrófono a la de la línea y procesarla más fácilmente, se conecta un preamplificador a la cápsula microfónica de cada uno de los micrófonos. El preamplificador presenta 3 filtros: paso alto y frecuencia de corte de 75Hz, respuesta en frecuencia plana y respuesta en frecuencia con atenuación de 10dB; en este proyecto se utiliza en modo respuesta plana. Tiene una SNR de 77 dBA. Con un conector XLR hembra se conecta a la MOTU.



Figura 8. Preamplificador AKG SE-300B.

Sonómetro Brüel & Kjaer 2260

El sonómetro se utiliza para la medición del ruido de fondo del auditorio. Este equipo es de Clase 1 y cumple con la norma UNE-EN 61672-1 Sonómetros. Parte 1: Especificaciones [3]. El propio sonómetro cuenta con micrófono, sistema de filtros, convertor y analizador.



Figura 9. Sonómetro Bruel & Kjaer 2260.

Ordenador portátil

El ordenador funciona como generador y analizador de señales gracias al software instalado DIRAC 6.0, desarrollado por Brüel & Kjaer. Una vez captadas las señales por los micrófonos, el

software realiza la integración, obteniendo la respuesta al impulso. De esta manera se consiguen todos los parámetros acústicos necesarios.



Figura 10. Portátil ASUS

Interfaz de sonido Motu UltraLite MK3

Este dispositivo facilita la transmisión de señales digitalizadas al ordenador. La interfaz dispone de 2 preamplificadores para entradas de micro/línea y 8 salidas analógicas. Se selecciona la frecuencia de muestreo a 48kHz y la ganancia de salida a 0dB. A través de este equipo, se envía la señal de excitación del recinto al amplificador de potencia y se registra la señal captada por los micrófonos en el ordenador.



Figura 11. Motu UltraLite MK3

Amplificador de potencia Crown XLS 2002 DriveCore

El amplificador de potencia es necesario para llegar a un nivel de emisión suficiente. En el proyecto se ha utilizado este modelo que dispone de 2 canales, aunque en este estudio solo se ha utilizado el de 1300W, modo bridge. Tras amplificar la señal de excitación se envía a la fuente omnidireccional.



Figura 12. Amplificador de potencia Crown XLS 2002 DriveCore

Calibrador Brüel & Kjaer 4231

Se ha utilizado para la verificación de la calibración de los equipos utilizados. Con el calibrador, nunca se calibra, únicamente se verifica. Se ha utilizado antes y después de realizar las mediciones. Es un calibrador de Clase 1 que cumple con la norma UNE-EN 60942:2019[4].



Figura 13. Calibrador Brüel & Kjaer 4231

Estación meteorológica

Se ha utilizado para medir la temperatura, presión y humedad relativa del aire antes y después de realizar las mediciones.

Metro laser

Se ha utilizado para medir todas las cotas y dimensiones del auditorio. Estas medidas se han utilizado en el posterior diseño en SketchUp.

A continuación, se presenta un diagrama de bloques con todos los equipos utilizados en las mediciones in situ:

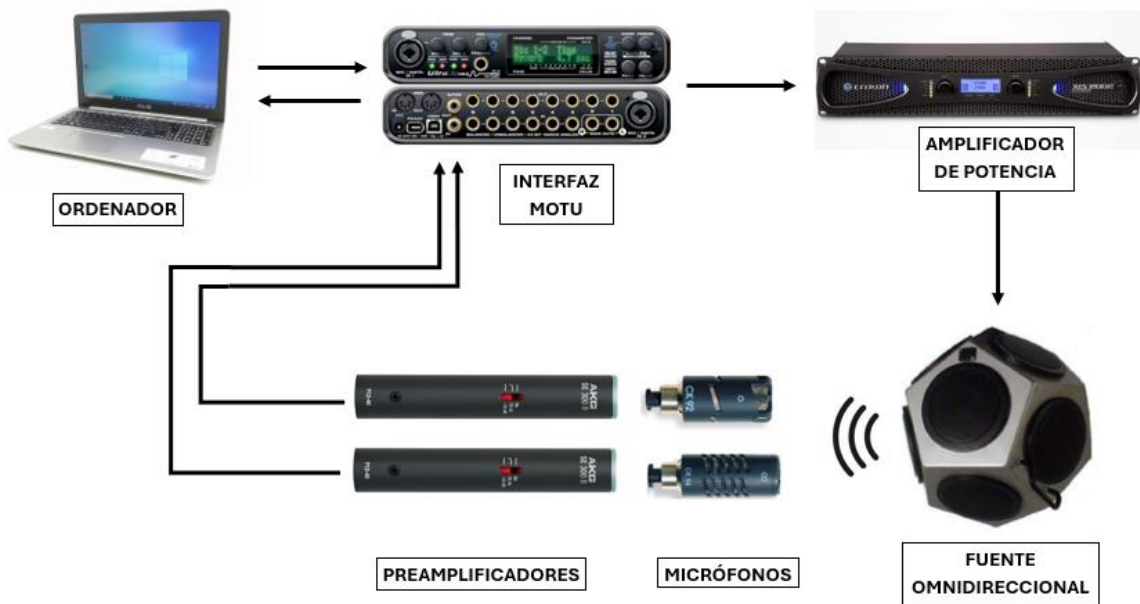


Figura 14. Diagrama de bloques de los equipos utilizados en las mediciones

5.3 Procedimiento de medida

Antes de comenzar las mediciones, se han seleccionado las posiciones de fuente y de micrófono respetando las pautas de la norma UNE-EN ISO 33821-1:2020. Lo ideal sería acudir al recinto con las posiciones ya elegidas de forma aproximada en un plano del auditorio. En este caso, al no disponer previamente de planos actuales, se eligieron el mismo día de las mediciones.

Los ensayos se realizaron el 30 de enero de 2024. A lo largo de todo el proceso, se fueron tomando medidas y cotas de todo el recinto para poder dibujarlo posteriormente, al igual que

se hicieron numerosas fotos para poder observar todo con detalle a posteriori. Se trasladaron todos los equipos desde Campus Sur en coche, la misma mañana de las mediciones.

Según las especificaciones de la norma, las posiciones de fuente y micrófono deben cubrir toda la superficie del auditorio. Se eligió una nomenclatura específica, explicada a continuación, para que el análisis posterior resultara más sencillo.

- o Posiciones de **fuente** → F01 y F02. Ambas colocadas en el escenario. Se ha elegido el punto medio del límite del escenario como coordenada origen del recinto (0, 0, 0).

Tabla 5. Coordenadas de las posiciones de fuente

UBICACIÓN POSICIONES FUENTE				
PLANTA	NOMBRE FUENTE	X	Y	Z
ESCENARIO	F01	0,00	-1,50	1,20
	F02	5,60	-2,25	1,20

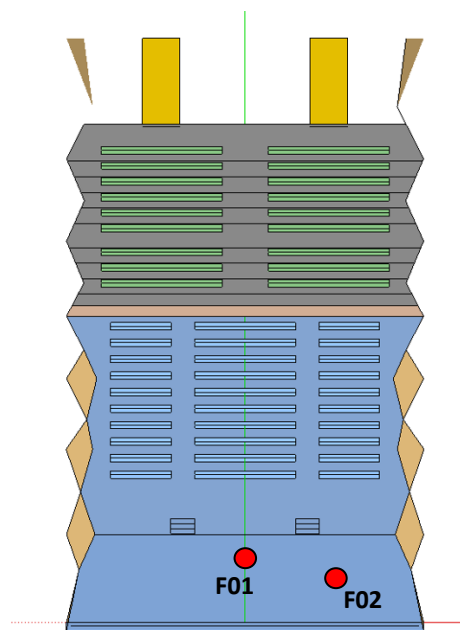


Figura 15. Posiciones de fuente en el plano del recinto

Debido a que la sala en estudio es simétrica con respecto al eje axial, podemos dividirla en dos mitades para que el estudio y el diseño del modelo resulte más sencillo. Nos centraremos en la mitad derecha del auditorio vista desde el escenario. Dependiendo de la ubicación de los micrófonos, las posiciones reciben distintos tipos de nombres:

- o Posiciones de **Micrófonos Normales** → M01, M02, etc. Estos micrófonos se encuentran distribuidos por toda la parte derecha de la audiencia.
- o Posiciones de **Micrófono del Eje** → ME01, ME02, etc. Estos micrófonos se sitúan a lo largo del eje del auditorio. Los cuatro primeros en la platea y otros tres en la planta primera.
- o Posiciones de **Micrófonos de Control** → MC01, MC02, etc. Estos micrófonos se ubican en la parte izquierda de la sala vista desde el escenario, siendo los simétricos de algunos micrófonos de la parte derecha. Sirven para comprobar la hipótesis de simetría del campo acústico de la sala y verificar que las medidas realizadas por sus simétricos del lado derecho se realizan correctamente.

- Posiciones de **Micrófonos de Escenario** → MST01 y MST02. Ambos se ubican en el escenario.

En la siguiente tabla se listan los puntos de medida, sus coordenadas en metros y la fila y butaca que corresponden a cada punto de medida.

Tabla 6. Coordenadas posiciones de micrófonos

UBICACIÓN POSICIONES MICROS						
PLANTA	NOMBRE MICRO	FILA	BUTACA	X	Y	Z
ESCENARIO	MST01	-	-	0,00	-1,50	1,20
	MST02	-	-	5,60	-2,25	1,20
	MSTC02	-	-	-5,60	-2,25	1,20
PLATEA	M01	1	15	1,8	2,25	0,46
	M02	3	18	4,75	3,98	0,46
	M03	6	22	6,95	7,07	0,46
	M04	7	16	2,5	7,85	0,46
	M05	9	13	0,9	9,81	0,46
	M06	5	14	1,4	5,88	0,46
	M07	13	19	5,42	13,5	0,65
	M08	11	17	4,28	11,7	0,59
	M09	15	12	0,3	15,45	0,73
	M10	16	21	6,46	16,3	0,8
	M11	17	16	2,35	17,25	0,92
	M12	21	14	1,36	21,1	1,15
	M13	20	20	5,86	20,23	0,99
	MC01	1	8	-1,8	2,25	0,46
	MC03	6	1	-6,95	7,07	0,46
	MC05	9	10	-0,9	9,81	0,46
	MC08	11	6	-4,28	11,7	0,59
	MC11	13	7	-2,35	17,25	0,92
	MC13	20	3	-5,86	20,23	0,99
	ME01	2	-	0	2,4	0,46
ME02	6	-	0	6,2	0,46	
ME03	12	-	0	11,8	0,49	
ME04	18	-	0	17,3	0,84	
PLANTA 1	M14	1	23	6,95	13,3	4,9
	M15	3	7	2,92	15,3	5,72
	M16	5	17	5,45	17,5	6,39
	M17	6	9	3,5	18,2	6,81
	M18	7	1	1,43	19	7,26
	M19	9	13	4,5	20,5	8
	MC14	1	24	-6,95	13,3	4,9
	MC16	5	18	-5,45	17,5	6,39
	MC18	7	2	-1,43	19	7,26
	ME05	1	-	0	12,6	4,8
	ME06	4	-	0	16	6
	ME07	9	-	0	20,5	8

Las siguientes figuras representan las posiciones de medida en sobre el plano de las dos plantas de auditorio, platea y planta primera:

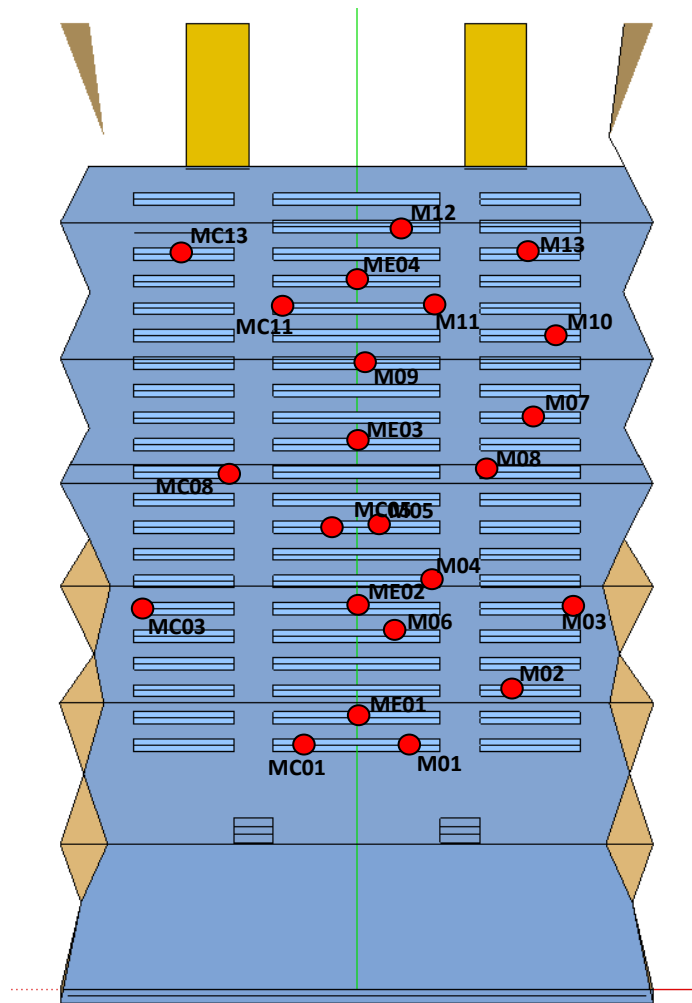


Figura 16. Posiciones de micrófono en platea

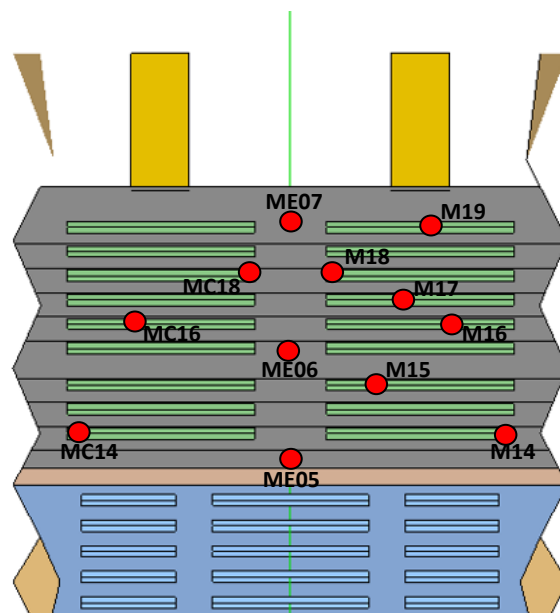


Figura 17. Posiciones de micrófono en planta 1

Para llevar a cabo las mediciones se emplea el método de ingeniería y precisión. Se obtiene la respuesta impulsiva integrada de la señal emitida y captada por los receptores. Se utiliza un barrido de frecuencias de 20 Hz a 20 kHz. La medición se considera válida cuando su INR supera los 35 dB en todas las octavas.

Antes de comenzar se debe medir el ruido de fondo del auditorio y comprobar las condiciones de temperatura, presión atmosférica y humedad relativa.

Una vez hecho esto, se coloca el par de micrófonos, omnidireccional y bidireccional, en la primera posición de micrófono, y la fuente en su primera posición en el escenario. Se reproduce la señal de barrido sinusoidal descrita anteriormente, generada con el software DIRAC instalado en nuestro ordenador, y se esperan los resultados en el programa, captados por los micrófonos. Cada medición se repite dos veces para garantizar que se ha hecho correctamente. Una vez completadas las dos mediciones en esas posiciones de micrófono y fuente, se mueve la fuente a la segunda posición de escenario y se repite el proceso, sin cambiar la posición de micrófono.

Después de terminar con esa posición de micrófono, se pasa a la siguiente, repitiendo el procedimiento hasta pasar por todas las posiciones del micrófono seleccionadas al comienzo.

Cada vez que se realiza una medición, se debe verificar que en las bandas de frecuencia más importantes (de 125 Hz a 10 kHz) el INR es superior a 35 dB. Si no se cumple esta condición, la medición debe repetirse.

Al igual que al comenzar todo el proceso, al finalizar las mediciones también se debe medir el ruido de fondo y comprobar la temperatura, la presión y la humedad relativa. El día 30 de enero las condiciones eran las siguientes:

Tabla 7. Condiciones meteorológicas

Lugar - Hora	Tª (°C)	Patm (mbar)	H.R. (%)
Auditorio – 12:05 (inicio)	16,5	1.032,9	56,0
Auditorio – 16:25 (fin)	17,1	1.030,2	57,4

Se concluye que las condiciones ambientales no han afectado a las mediciones realizadas. El ruido de fondo registrado se considera durante el procesamiento de datos.

A continuación, se presentan algunas fotografías del estado del auditorio el día de las mediciones, en el que el único mobiliario presente eran las butacas de ambas plantas y dos mesas en el escenario. El telón se encontraba extendido cubriendo toda la pared trasera del auditorio.



Figura 18. Fotografía del auditorio desde el escenario.



Figura 19. Fotografía del auditorio desde la platea.

5.4 Procesado de datos

Una vez realizadas todas las mediciones y antes de realizar las simulaciones acústicas en EASE, se lleva a cabo el procesamiento de los datos obtenidos de las mediciones in situ en el auditorio.

DIRAC genera un archivo de texto que contiene toda la información sobre los parámetros acústicos de interés. Este archivo se transfiere a dos ficheros Excel, uno de octavas (de 31,5Hz a 16kHz) y otro de tercios de octavas (de 25Hz a 20kHz). Los archivos Excel se crean de manera que se pueda filtrar por los siguientes campos, agilizando así el análisis y el procesamiento de datos:

- Zona de medición: Platea, planta 1, escenario
- Parámetro acústico
- Posición de fuente
- Posición de micrófono
- Canal: al omnidireccional se le asigna el 1, y al bidireccional el 2.
- Punto exacto de medida
- Repetición: 1 si es la primera vez que se realiza la medida, 2 si es la segunda.
- Distancia micrófono-fuente
- Directorio en el que se guardan los datos
- Bandas de frecuencia

En la captura siguiente, se muestra el resultado final de la apariencia de los ficheros Excel que contienen todos los datos a procesar.

Tabla 8. Datos procesados en el fichero Excel

Medida	Fuente	Micrófono	Frecuencias	Canal	Punto	Repetición	Distancia M-F	Zona	Directorio	25
C20 (dB)	F01	M01	Octavas	1	F01M01	1	4,23	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01M01_1.wav	5,38
C20 (dB)	F01	M01	Octavas	1	F01M01	2	4,23	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01M01_2.wav	5,71
C20 (dB)	F01	M02	Octavas	1	F01M02	1	7,29	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01M02_1.wav	3,15
C20 (dB)	F01	M02	Octavas	1	F01M02	2	7,29	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01M02_2.wav	3,37
C20 (dB)	F01	M03	Octavas	1	F01M03	1	11,06	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01M03_1.wav	0,95
C20 (dB)	F01	M03	Octavas	1	F01M03	2	11,06	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01M03_2.wav	1,13
C20 (dB)	F01	M04	Octavas	1	F01M04	1	9,71	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01M04_1.wav	-3,05
C20 (dB)	F01	M04	Octavas	1	F01M04	2	9,71	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01M04_2.wav	-3,08
C20 (dB)	F01	M05	Octavas	1	F01M05	1	11,37	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01M05_1.wav	3,3
C20 (dB)	F01	M05	Octavas	1	F01M05	2	11,37	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01M05_2.wav	3,38
C20 (dB)	F01	M06	Octavas	1	F01M06	1	7,55	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01M06_1.wav	4,5
C20 (dB)	F01	M06	Octavas	1	F01M06	2	7,55	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01M06_2.wav	4,55
C20 (dB)	F01	M07	Octavas	1	F01M07	1	15,96	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01M07_1.wav	-2,49
C20 (dB)	F01	M07	Octavas	1	F01M07	2	15,96	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01M07_2.wav	-1,8
C20 (dB)	F01	M08	Octavas	1	F01M08	1	13,89	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01M08_1.wav	2,58
C20 (dB)	F01	M08	Octavas	1	F01M08	2	13,89	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01M08_2.wav	1,95
C20 (dB)	F01	M09	Octavas	1	F01M09	1	16,96	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01M09_1.wav	3,08
C20 (dB)	F01	M09	Octavas	1	F01M09	2	16,96	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01M09_2.wav	3
C20 (dB)	F01	M10	Octavas	1	F01M10	1	18,94	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01M10_1.wav	1,3
C20 (dB)	F01	M10	Octavas	1	F01M10	2	18,94	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01M10_2.wav	1,23
C20 (dB)	F01	M11	Octavas	1	F01M11	1	18,90	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01M11_1.wav	-1,21
C20 (dB)	F01	M11	Octavas	1	F01M11	2	18,90	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01M11_2.wav	-1,25
C20 (dB)	F01	M12	Octavas	1	F01M12	1	22,64	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01M12_1.wav	1,76
C20 (dB)	F01	M12	Octavas	1	F01M12	2	22,64	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01M12_2.wav	-1,06
C20 (dB)	F01	M13	Octavas	1	F01M13	1	22,51	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01M13_1.wav	0,83
C20 (dB)	F01	M13	Octavas	1	F01M13	2	22,51	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01M13_2.wav	0,9
C20 (dB)	F01	MC01	Octavas	1	F01MC01	1	4,23	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01MC01_1.wav	5,77
C20 (dB)	F01	MC01	Octavas	1	F01MC01	2	4,23	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01MC01_2.wav	5,54
C20 (dB)	F01	MC03	Octavas	1	F01MC03	1	11,06	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01MC03_1.wav	0,32
C20 (dB)	F01	MC03	Octavas	1	F01MC03	2	11,06	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01MC03_2.wav	0,53
C20 (dB)	F01	MC05	Octavas	1	F01MC05	1	11,37	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01MC05_1.wav	4,39
C20 (dB)	F01	MC05	Octavas	1	F01MC05	2	11,37	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01MC05_2.wav	5,99
C20 (dB)	F01	MC08	Octavas	1	F01MC08	1	13,89	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01MC08_1.wav	0,85
C20 (dB)	F01	MC08	Octavas	1	F01MC08	2	13,89	PLATEA	C:\Users\AA-01\Desktop\PF GIGA\PF G MANUELA OYAMBURU BENETTI\PLATEA\F01MC08_2.wav	0,96

Para explicar el procesamiento de las mediciones, todos los ejemplos siguientes serán en tercios de octava, ya que la validación del modelo se realizará con ellos. Se ha realizado el mismo procesado con los datos en bandas de octava, que se detallan en el anexo II.

5.4.1 Criterios de procesamiento

Una vez preparados los archivos de Excel se han realizado dos filtrados en ambos ficheros. El primero de ellos basado en la máscara INR y el segundo en el criterio estadístico de Chauvenet.

Máscara INR

El parámetro INR es un parámetro fundamental, ya que es un indicador de calidad del nivel de presión sonora obtenido en cada punto de medida, respecto al ruido de fondo del recinto en estudio. Por ello se filtran todos los datos de todos los parámetros en función del INR.

Mediciones In Situ

Este filtro descarta todas las muestras de una posición, para el canal 1, cuando el INR resultante es menor de 35dB. Estos valores eliminados no se consideran válidos debido a la influencia del ruido sobre la señal emitida. Este criterio se ha adoptado según las recomendaciones realizadas por el grupo de investigación GAMMA.

Para llevarlo a cabo, se diseña una máscara con la funcionalidad formato condicional de Excel, que elimina el valor de la celda, en todos los parámetros, cuando el INR no cumple la condición de ser superior a 35dB. Una vez creada la máscara INR, se traspasa a todos los parámetros, es decir, se eliminan los valores de cualquier parámetro cuando el INR para esa frecuencia sea menor de 35dB.

El porcentaje total de los valores eliminados debe ser inferior al 20% de las muestras totales. En caso contrario no se consideraría una medición válida y no se podría continuar con el procesamiento. La mayoría de los datos eliminados pertenecen a bandas inferiores a 50Hz, ya que la fuente no emite con suficiente energía a bajas frecuencias, y por encima de 12.5kHz debido a la propia respuesta en frecuencia de la fuente. La pérdida de estos valores no supone ningún problema, ya que no afectan a la posterior validación del modelo en EASE.

La tabla siguiente muestra la apariencia de la máscara INR resultante y de los parámetros eliminados por este filtrado:

Tabla 9. Máscara INR

En la siguiente tabla, se presenta un resumen de las muestras eliminadas en el Excel de tercios de octava, aplicando el filtrado a todos los valores medidos del auditorio, a los valores medidos del escenario únicamente, y a los valores de la audiencia (platea y planta 1). Se comprueba en los tres casos que estamos por debajo del límite del 20% de muestras eliminadas permitidas, y se confirma así que es posible continuar con el procesamiento:

Tabla 10. Porcentaje de muestras eliminadas tras filtrado de máscara INR

ZONA	Nº MUESTRAS	Nº MUESTRAS TRAS FILTRADO	% PÉRDIDAS
AUDITORIO COMPLETO	4320	4032	6,70%
ESCENARIO	240	225	6,30%
PLATEA + PLANTA 1	4200	3807	9,30%

Criterio estadístico de Chauvenet

El segundo filtrado con el que hay que proceder se basa en la distribución normal de Gauss. Este método se utiliza para eliminar los datos que se consideran estadísticamente no representativos de un parámetro específico.

El intervalo de confianza de la distribución Gaussiana está determinado por la desviación estándar y corresponde al área en la que se encuentra el 68% de los valores obtenidos. Lo que se pretende con este criterio estadístico es ampliar el intervalo de confianza (en función del número de muestras) intentando descartar solamente aquellos valores estadísticamente poco significativos (que no van a alterar el valor medio de la muestra, pero que si pueden alterar considerablemente el valor de la desviación estándar de la muestra).

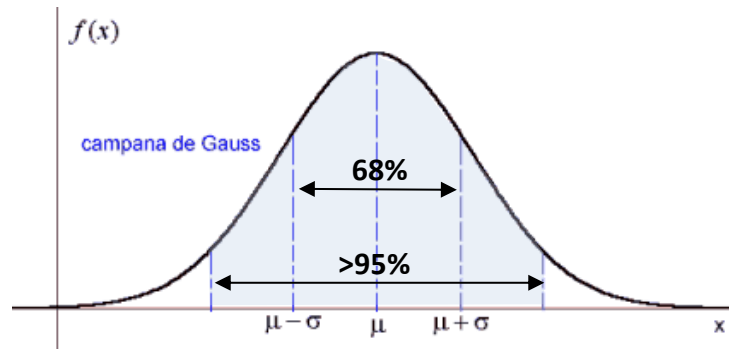


Figura 20. Distribución estadística de Gauss

donde:

- μ = media de todas las medidas
- σ = desviación estándar

Después de obtener el promedio y la desviación estándar de todos los valores de cada parámetro acústico, tras aplicar la máscara INR, se utiliza el criterio de Chauvenet para excluir los valores que se desvían significativamente del promedio (están fuera de un intervalo de confianza ampliado no inferior al 95%). Este criterio se aplica comparando cada medida con el promedio y una constante que depende del número de medidas válidas, la cual se multiplica por la desviación estándar.

$$|X_i - \bar{x}| \geq kn \times \sigma \quad (33)$$

$$kn = 0,3704 \times \ln(n) + 1,0603 \quad (34)$$

siendo:

- X_i : el dato evaluado
- \bar{x} : el valor medio de los datos
- Kn : la constante de Chauvenet
- σ : la desviación estándar
- n : número de datos válidos

Una vez aplicado el criterio, se recalculan el promedio y la desviación estándar de las muestras de cada parámetro, ya que la cantidad de valores ha disminuido, y se vuelve a aplicar el criterio de Chauvenet. Este proceso es iterativo y se repite hasta que ya no se eliminen más muestras al aplicar el criterio. Es importante que no se eliminen demasiados valores, ya que esto podría afectar la precisión de los resultados finales.

Mediciones In Situ

En la tabla siguiente, las celdas marcadas en verde corresponden a valores eliminados tras aplicar 3 veces el criterio de Chauvenet, en el caso del parámetro tiempo de reverberación.

Tabla 11. Ejemplo muestras eliminadas tras filtrado de Chauvenet

25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	12500	16000	20000	
0.406	1.394	1403	1459	0.701	1243	1256	1728	1123	1083	0.997	0.988	0.886	0.813	0.879	0.976	1.023	1.013	0.904	0.92	0.837	0.881	0.828	0.583	0.528	0.583	0.24	0.22	0.225	0.225	
0.322	0.459	1.0	1.096	1.034	0.973	1.243	1.247	1.716	1.142	1.002	1	0.951	0.864	0.967	0.986	0.972	0.904	0.95	1.071	0.950	0.91	0.942	0.863	0.623	0.569	0.623	0.269	0.257	0.255	
0.388	0.224	0.571	1.308	0.452	1.454	0.968	1.3	0.964	1.13	1.053	0.931	0.897	0.828	0.942	1.02	1.038	1.04	1.063	0.962	0.919	0.897	0.914	0.799	0.670	0.941	0.423	0.357	0.278	0.278	
0.458	0.225	0.572	1.333	0.527	1.484	0.937	1.287	0.984	1.111	1.06	0.923	0.9	0.829	0.94	1.023	1.021	1.059	1.06	0.979	0.923	0.897	0.903	0.801	0.681	0.943	0.422	0.353	0.283	0.283	
0.591	0.887	1.472	1.541	1.07	1.285	1.062	1.227	1.032	1.091	0.957	0.844	0.801	0.659	1.03	1.055	1.095	1.049	1.055	0.962	0.943	0.910	0.91	0.811	0.708	0.571	0.459	0.328	0.244	0.244	
0.956	1.473	1.61	1.475	1.027	1.313	1.095	1.331	1.054	0.954	0.854	0.824	0.691	0.567	1.047	1.071	1.067	1.033	0.957	0.942	0.955	0.924	0.952	0.843	0.710	0.578	0.469	0.318	0.284	0.284	
1.542	1.621	1.329	1.466	1.314	1.213	1.282	1.198	1.079	0.833	1.003	1.007	0.956	1.007	0.904	0.884	1.048	1.048	1.048	0.954	0.924	0.941	0.968	0.817	0.708	0.563	0.425	0.256	0.237	0.237	
1.336	1.956	1.382	1.459	1.316	1.352	1.298	1.214	1.132	0.884	0.935	1.009	0.959	1.009	0.802	0.991	1.048	1.05	0.974	0.923	0.923	0.96	0.812	0.707	0.567	0.425	0.256	0.237	0.237	0.237	
1.848	0.755	1.94	1.311	1.16	1.453	1.43	1.283	1.096	1.16	1.037	0.953	0.843	0.801	0.805	0.989	1.033	1.033	0.979	0.905	0.928	0.938	0.798	0.663	0.571	0.439	0.276	0.246	0.246	0.246	
0.996	0.689	0.762	1.288	1.234	1.17	1.055	1.294	1.063	1.095	1.072	0.928	0.936	0.832	1.01	0.997	1.13	1.025	1.03	0.974	0.91	0.928	0.909	0.794	0.657	0.567	0.48	0.257	0.258	0.258	
1.623	1.747	1.958	1.425	1.12	1.279	1.431	1.253	1.024	1.04	0.97	0.954	0.906	0.874	0.98	1.008	1.057	1.002	0.961	0.947	0.972	0.969	0.853	0.719	0.591	0.452	0.284	0.286	0.286	0.286	
1.958	1.882	1.982	1.385	1.167	1.377	1.419	1.253	1.065	1.084	1.091	0.988	0.882	1.01	0.977	0.985	1.002	1.076	1.005	0.962	0.949	0.955	0.852	0.72	0.585	0.479	0.289	0.289	0.289	0.289	
1.721	1.999	0.82	1.284	0.474	1.285	1.534	1.227	1.063	0.973	0.989	0.867	0.842	1.002	0.947	1.044	0.979	1.03	1.062	0.981	0.968	0.931	0.878	0.614	0.722	0.598	0.468	0.277	0.277	0.277	
1.703	1.992	1.203	1.385	0.475	1.387	1.535	1.222	1.077	0.971	0.906	0.842	0.892	1.012	1.038	1.042	0.977	1.029	1.078	0.998	0.987	0.949	0.876	0.638	0.73	0.598	0.468	0.282	0.282	0.282	
0.936	1.844	1.37	1.657	1.098	0.857	0.884	1.271	1.095	0.955	1.025	0.908	0.853	0.87	1.024	1.008	1.004	1.072	1.078	0.956	0.947	0.882	0.807	0.678	0.746	0.602	0.474	0.287	0.287	0.287	
0.95	1.335	1.382	1.688	1.39	0.838	1.17	1.27	1.09	0.961	1.027	0.92	0.931	0.988	1.022	1.059	1.091	1.058	1.077	0.945	0.957	0.962	0.854	0.679	0.598	0.478	0.298	0.298	0.298	0.298	
0.467	0.89	0.444	1.109	0.981	1.328	1.109	1.554	0.995	1.087	1.147	0.954	0.928	0.854	0.981	0.991	1.112	1.022	1.003	0.961	0.953	1.002	0.865	0.645	0.744	0.623	0.491	0.291	0.291	0.291	
0.472	0.677	0.636	1.35	0.981	1.237	1.042	1.553	1.075	1.094	1.142	0.955	0.924	0.893	0.977	0.966	1.093	1.029	1.009	0.944	0.957	1.002	0.866	0.658	0.758	0.621	0.497	0.297	0.297	0.297	
1.269	0.522	0.331	1.574	1.02	1.312	1.007	1.692	1.12	0.971	0.997	0.994	0.862	0.884	1.032	1.063	1.093	1.044	0.97	1.003	1.017	0.989	0.814	0.63	0.534	0.32	0.244	0.244	0.244	0.244	
1.167	0.539	0.323	1.663	0.987	1.493	1.796	1.688	1.243	1.298	0.79	0.935	0.924	0.933	0.994	1.004	1.081	1.095	1.04	0.963	0.998	1.037	0.964	0.876	0.81	0.623	0.536	0.321	0.321	0.321	
1.099	1.09	1.09	1.596	1.199	1.198	1.198	1.444	1.191	1.192	1.177	1.054	1.007	1.006	1.086	0.97	0.938	0.998	1.029	0.939	0.972	0.988	0.952	0.856	0.762	0.622	0.491	0.291	0.291	0.291	
1.369	1.369	1.369	1.422	0.924	1.235	1.39	1.621	1.394	1.173	1.093	1.095	0.981	0.945	0.951	0.986	1.044	1.102	1.07	0.993	1.099	1.094	0.979	0.977	0.868	0.691	0.572	0.227	0.227	0.227	
0.431	0.477	0.732	1.371	0.626	1.43	0.802	1.295	1.423	1.61	1.156	1.071	1.103	0.878	0.923	0.928	0.967	1.044	1.095	1.079	1.001	1.029	1.094	0.994	0.874	0.689	0.672	0.552	0.223	0.223	
0.340	0.443	0.296	0.791	1.395	0.936	1.288	0.745	1.296	1.19	0.949	1.074	0.991	0.991	1.19	1.079	0.976	1.089	0.984	1.01	0.928	0.904	0.922	0.86	0.775	0.674	0.531	0.352	0.257	0.257	
0.56	1.01	1.298	0.888	1.098	1.594	1.048	1.4	1.202	1.18	0.999	0.989	0.899	0.918	1.013	0.9	1.017	1.07	1.053	0.959	0.936	0.949	0.899	0.805	0.464	0.386	0.298	0.298	0.298	0.298	
0.882	1.148	1.681	1.453	1.233	1.395	1.298	1.453	1.252	1.035	1.125	0.954	0.943	0.958	0.882	0.994	1.095	1.032	1.028	0.97	0.924	0.958	0.887	0.798	0.670	0.595	0.438	0.259	0.235	0.235	0.235
1.148	1.193	1.847	1.457	1.228	1.501	1.225	1.467	1.389	1.028	1.122	0.939	0.943	1.002	0.863	1.002	1.062	1.032	1.034	0.967	0.921	0.97	0.872	0.794	0.682	0.562	0.436	0.259	0.259	0.259	
1.176	0.895	1.182	1.453	0.946	1.459	1.423	1.201	1.065	0.924	1.08	0.862	0.817	1.008	0.968	1.044	0.984	1.029	1.01	0.844	0.953	0.986	0.924	0.841	0.731	0.571	0.452	0.287	0.287	0.287	
0.29	0.741	1.270	1.428	1.081	1.317	1.113	1.194	1.131	0.946	0.927	0.839	0.919	0.862	0.99	1.021	1.061	0.995	0.969	0.941	0.959	0.968	0.855	0.746	0.591	0.469	0.320	0.287	0.287	0.287	
1.563	0.646	1.589	1.495	1.07	1.497	1.195	1.221	1.02	0.95	0.924	0.937	0.995	0.885	0.968	1.131	1.095	0.983	0.956	0.938	1.007	0.973	0.846	0.74	0.588	0.478	0.334	0.294	0.294	0.294	
1.461	1.28	1.057	0.853	1.995	1.346	1.861	1.288	1.083	1.049	0.988	0.846	0.914	0.866	1.027	1.084	1.072	0.989	0.975	1.011	0.925	0.911	0.747	0.615	0.491	0.362	0.294	0.294	0.294	0.294	
1.461	1.196	1.025	0.952	1.507	1.293	1.946	1.229	0.996	0.957	1.030	0.952	0.961	0.976	0.942	1.062	1.062	0.987	0.969	1.011	0.939	0.922	0.763	0.637	0.442	0.362	0.294	0.294	0.294	0.294	
0.871	1.198	1.743	0.91	1.51	1.189	1.293	1.189	1.231	0.988	0.942	1.044	1.182	0.953	0.938	0.97	1.001	1.003	1.027	0.938	0.936	0.907	0.895	0.801	0.674	0.532	0.384	0.23	0.23	0.23	
1.091	1.724	0.976	1.479	1.183	1.262	1.191	1.24	1.073	0.887	0.942	1.044	0.974	0.951	0.959	0.977	1	1.061	1.004	0.934	0.931	0.931	0.894	0.801	0.672	0.533	0.385	0.238	0.238	0.238	
1.393	1.722	0.983	1.217	0.749	0.79	1.259	0.952	1.043	1.027	1.091	0.934	0.845	0.952	0.973	0.996	1.029	1.036	0.927	0.923	0.929	0.898	0.81	0.681	0.542	0.442	0.292	0.292	0.292	0.292	
1.233	1.847	0.631	1.336	0.733	0.848	1.237	0.907	1.044	1.022	1.046	0.841	0.847	0.958	0.976	1.008	1.018	1.051	1.043	0.941	0.928	0.943	0.891	0.814	0.655	0.566	0.433	0.25	0.257	0.257	
0.946	1.32	1.296	1.593	1.498	1.51	1.355	1.45	1.245	0.982	0.988	0.905	0.973	1.015	1.004	1.029	1.045	1.094	1.025	0.993	0.974	0.953	0.94	0.853	0.689	0.589	0.469	0.287	0.287	0.287	
0.872	1.373	1.279	1.618	1.418	1.516	1.385	1.489	1.253	0.895	0.98	0.982	0.975	1.025	1.04	1.043	1.062	1.01	0.982	1.001	0.988	0.991	0.943	0.828	0.682	0.593	0.468	0.288	0.288	0.288	
1.079	0.629	1.625	1.592	0.826	1.698	1.377	1.581	1.078	1.191	0.725	0.777	0.846	0.824	0.955	1.038	1.036	1.013	1.047	0.963	1.004	0.991	0.947	0.875	0.747	0.604	0.528	0.331	0.331	0.331	

Tabla 13. Resultado de filtrado de Chauvenet para zona escenario

ESCENARIO			
PARÁMETRO	Nº MUESTRAS TRAS FILTRADO INR	Nº MUESTRAS TRAS CHAUVENET	% ELIMINADO POR CHAUVENET
EDT	225	224	0,00
C30	225	225	0,00
C50	225	222	1,33
C80	225	223	0,89
D50	225	222	1,33
D80	225	222	1,33
T20	225	223	0,89
T30	225	220	2,22
LF	225	217	3,56
LFC	225	197	12,44
TS	225	225	0,00
RT	225	221	1,78

5.4.2 Resultados

Una vez aplicados los dos criterios descritos en el apartado 5.4.1, los resultados de las medidas se pueden presentar de forma definitiva para su análisis y aplicación en la validación del modelo. Los datos de todos los parámetros acústicos se presentan en función de la frecuencia, promediados para el conjunto de todas las posiciones de fuentes y micrófonos del auditorio.

En las siguientes tablas y gráficos se presentan los resultados obtenidos en bandas de tercios de octava, de 100Hz a 10kHz, debido a que el software con el que se realiza la validación, EASE, no trabaja con frecuencias fuera de ese rango. En el caso de hacerlo en octavas, se analizarían los valores de 125Hz a 8kHz. Cada parámetro se presenta con el valor medio de todas las posiciones de micrófono, acompañado de la desviación estándar y de la métrica JND de los valores medidos.

Parámetros temporales

• **EDT**

El primer parámetro a analizar dentro de los parámetros temporales es el Tiempo de Reverberación Temprano (EDT). En la siguiente tabla se lista el promedio de los valores de todas las posiciones y su desviación estándar en sus unidades y en métrica JND.

Tabla 14. Promedio y desviación de las medidas del parámetro EDT [s]

EDT [s]			
Frecuencia (Hz)	Promedio	Desviación	Métrica JND
100	1,22	0,47	8
125	1,38	0,36	6
160	1,41	0,34	5
200	1,24	0,30	5
250	1,20	0,23	4
315	1,12	0,20	4
400	1,06	0,21	4
500	1,01	0,18	4
630	1,03	0,16	4
800	1,04	0,14	3
1000	1,05	0,18	4
1250	1,11	0,14	3
1600	1,08	0,17	4
2000	1,04	0,14	3
2500	0,98	0,17	4
3150	0,97	0,16	4
4000	0,92	0,12	3
5000	0,82	0,13	4
6300	0,73	0,12	4
8000	0,61	0,16	6
10000	0,51	0,13	5

En la siguiente figura se presentan estos mismos resultados de forma gráfica.

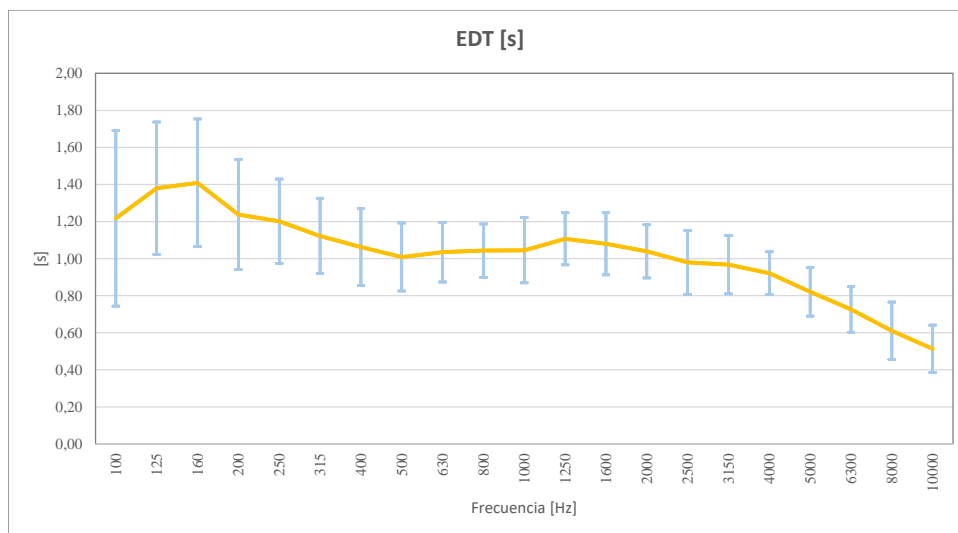


Figura 21. Promedio y desviación de las medidas del parámetro EDT

Observando el gráfico se comprueba que el tiempo de reverberación más elevado se da en frecuencias bajas, mientras que de 315Hz a 2.500Hz (frecuencias medias), mantiene un comportamiento plano. A partir de 2.500Hz (frecuencias altas), el tiempo comienza a decaer.

Estos resultados se deben a que los materiales existentes en el auditorio, tales como cortinas, telón, moqueta, tienen mayor absorción a frecuencias altas. En el rango de los resultados de baja frecuencia, cabe destacar que existe un pico en 125Hz y 160Hz. Esto se debe a la resonancia del material existente tras las paredes de madera del auditorio. El gran volumen de aire del recinto influye aumentando la absorción.

• T20

Los valores obtenidos del parámetro T20 se presentan a continuación:

Tabla 15. Promedio y desviación de las medidas del parámetro T20 [s]

T20 [s]			
Frecuencia (Hz)	Promedio	Desviación	Métrica JND
100	1,22	0,28	5
125	1,31	0,27	5
160	1,32	0,20	3
200	1,10	0,16	3
250	1,01	0,13	3
315	0,99	0,16	4
400	0,96	0,11	3
500	0,96	0,08	2
630	0,99	0,08	2
800	1,03	0,11	3
1000	1,02	0,07	2
1250	1,05	0,06	2
1600	1,06	0,10	2
2000	1,03	0,04	1
2500	0,97	0,04	1
3150	0,95	0,04	1
4000	0,95	0,04	1
5000	0,91	0,04	1
6300	0,82	0,10	3
8000	0,70	0,08	3
10000	0,57	0,06	3

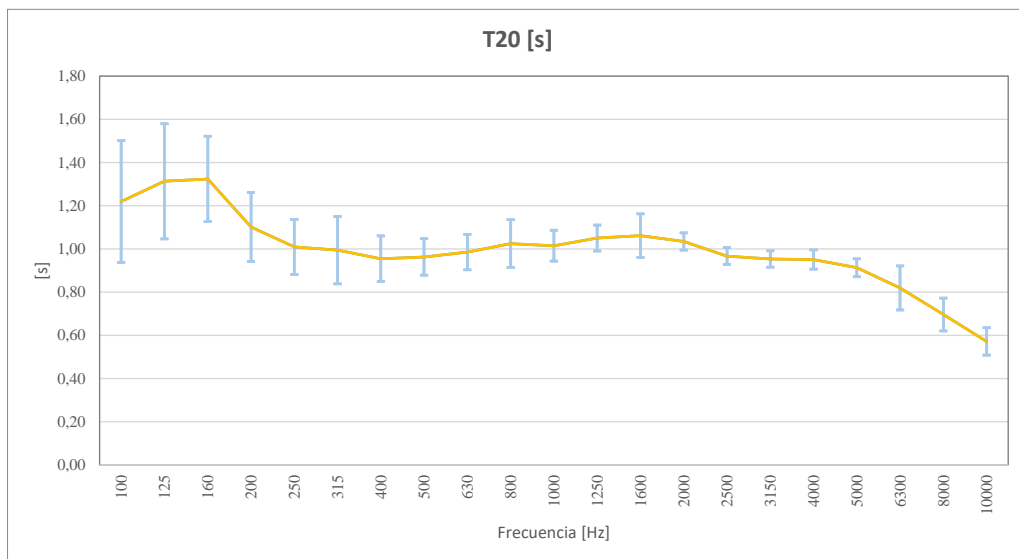


Figura 22. Promedio y desviación de las medidas del parámetro T20

Como se ha mencionado anteriormente, el RT se obtiene de una aproximación de los valores de T20. Se puede comprobar, observando las gráficas de RT y T20, que son muy similares en todas las frecuencias.

• T30

Los valores obtenidos del parámetro T30 se presentan a continuación:

Tabla 16. Promedio y desviación de las medidas del parámetro T30 [s]

T30 [s]			
Frecuencia (Hz)	Promedio	Desviación	Métrica JND
100	1,22	0,24	4
125	1,27	0,17	3
160	1,31	0,18	3
200	1,11	0,10	2
250	1,03	0,17	4
315	1,01	0,16	4
400	0,96	0,07	2
500	0,97	0,06	2
630	0,99	0,10	3
800	1,01	0,05	2
1000	1,01	0,15	3
1250	1,05	0,04	1
1600	1,06	0,04	1
2000	1,03	0,03	1
2500	0,96	0,03	1
3150	0,95	0,03	1
4000	0,95	0,04	1
5000	0,92	0,04	1
6300	0,82	0,03	1
8000	0,71	0,04	2
10000	0,58	0,08	3

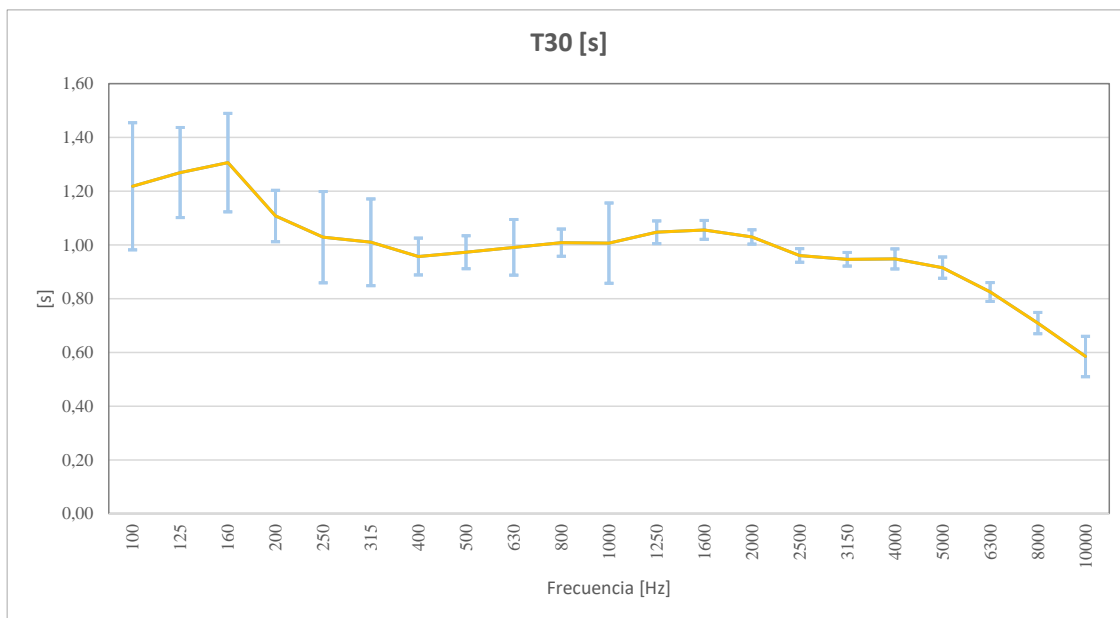


Figura 23. Promedio y desviación de las medidas del parámetro T30

Con el parámetro T30 ocurre lo mismo que con el T20. Sus valores son muy similares a los del tiempo de reverberación óptimo de la sala y las curvas son muy similares.

• RT

A continuación, se presenta el valor promedio y la desviación del tiempo de reverberación del recinto, calculado por DIRAC partiendo de los parámetros T20 y T30:

Tabla 17. Promedio y desviación de las medidas del parámetro RT[s]

RT [s]			
Frecuencia (Hz)	Promedio	Desviación	Métrica JND
100	1,17	0,31	6
125	1,28	0,25	4
160	1,34	0,26	4
200	1,12	0,17	3
250	1,03	0,15	3
315	1,01	0,17	4
400	0,96	0,15	4
500	0,97	0,13	3
630	0,99	0,11	3
800	1,01	0,15	4
1000	1,01	0,19	4
1250	1,05	0,15	3
1600	1,06	0,10	2
2000	1,03	0,12	3
2500	0,96	0,14	3
3150	0,95	0,03	1
4000	0,95	0,04	1
5000	0,92	0,04	1
6300	0,83	0,10	3
8000	0,71	0,04	2
10000	0,58	0,04	2

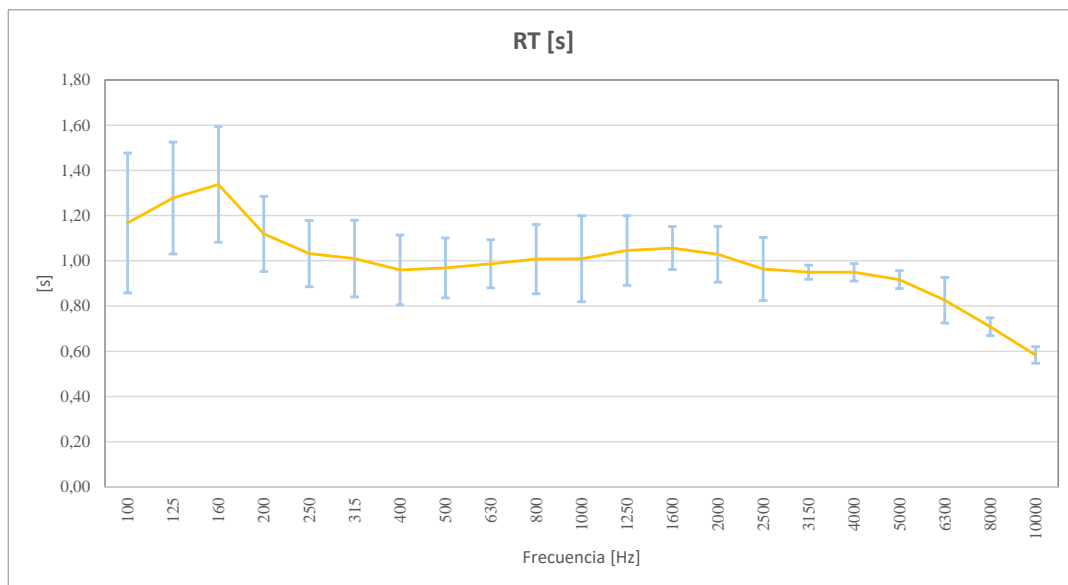


Figura 24. Promedio y desviación de las medidas del parámetro RT

Si se comparan las gráficas de los parámetros EDT y RT, se observa que ambas tienen una curva muy similar. La diferencia es que la gráfica de RT tiene una pendiente menor que la del EDT, en el momento en el que decae el tiempo de reverberación a altas frecuencias.

Este método de cálculo del tiempo de reverberación tiene más precisión por el margen que se deja al comienzo de la caída de la energía, lo que no ocurre en el caso del cálculo del EDT. DIRAC hace una aproximación del RT tomando como referencia los valores del T20 y T30 expuestos a continuación:

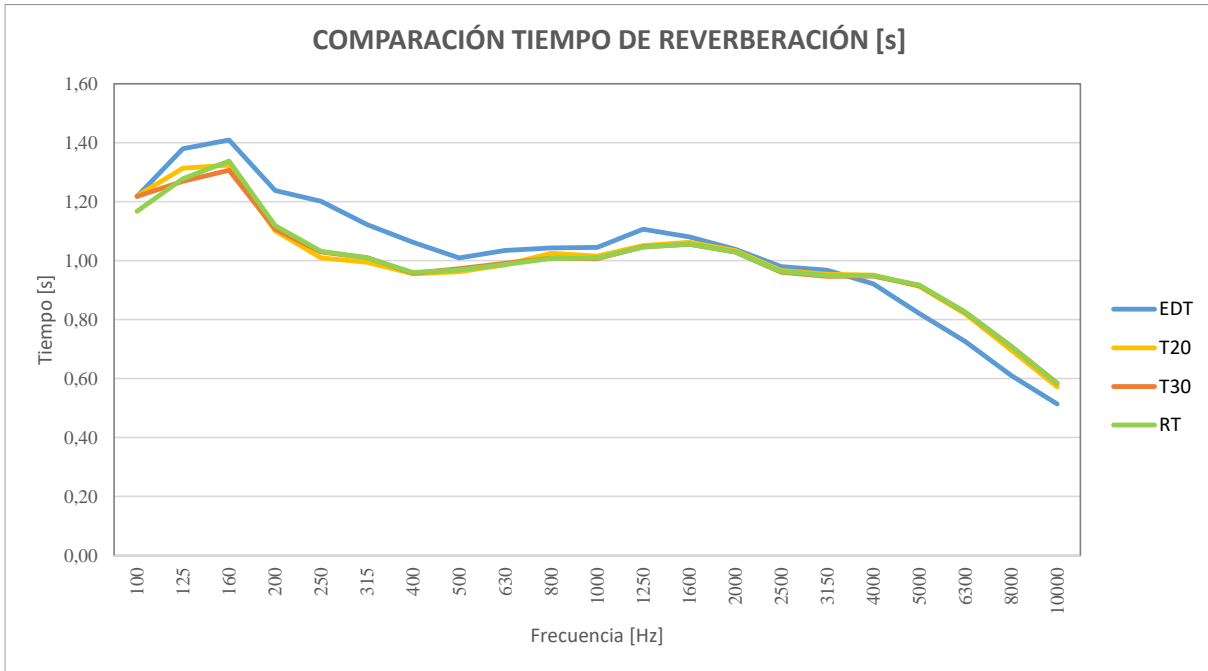


Figura 25. Comparación curvas tiempo de reverberación

Aunque los parámetros temporales descritos se calculen de distintas formas, todos ellos muestran una curva similar, y observándolos se pueden conocer las características acústicas de la sala y el comportamiento en cada banda de frecuencia.

En la figura anterior se observan las 4 curvas de los parámetros temporales. Todas son prácticamente iguales exceptuando la del EDT, ya que representa la percepción subjetiva de la reverberación.

Parámetros energéticos

• **C50**

El primer parámetro energético a analizar es el C50, la claridad de la voz. En la siguiente tabla se muestra el promedio de sus valores, junto con la figura que representa gráficamente los resultados.

Tabla 18. Promedio y desviación de las medidas del parámetro C50 [dB]

C50 [dB]			
Frecuencia (Hz)	Promedio	Desviación	Métrica JND
100	0,06	5,10	6
125	-2,60	4,47	5
160	-3,41	4,00	5
200	-2,60	2,80	3
250	-2,54	2,57	3
315	-0,52	2,32	3
400	0,28	2,73	3
500	0,52	2,81	3
630	0,42	2,42	3
800	0,49	1,89	2
1000	0,98	2,27	3
1250	0,63	1,81	2
1600	1,05	1,75	2
2000	1,34	1,93	2
2500	1,28	1,73	2
3150	1,18	1,79	2
4000	1,19	1,72	2
5000	2,66	2,04	3
6300	4,27	1,80	2
8000	5,95	1,92	2
10000	6,95	1,94	2

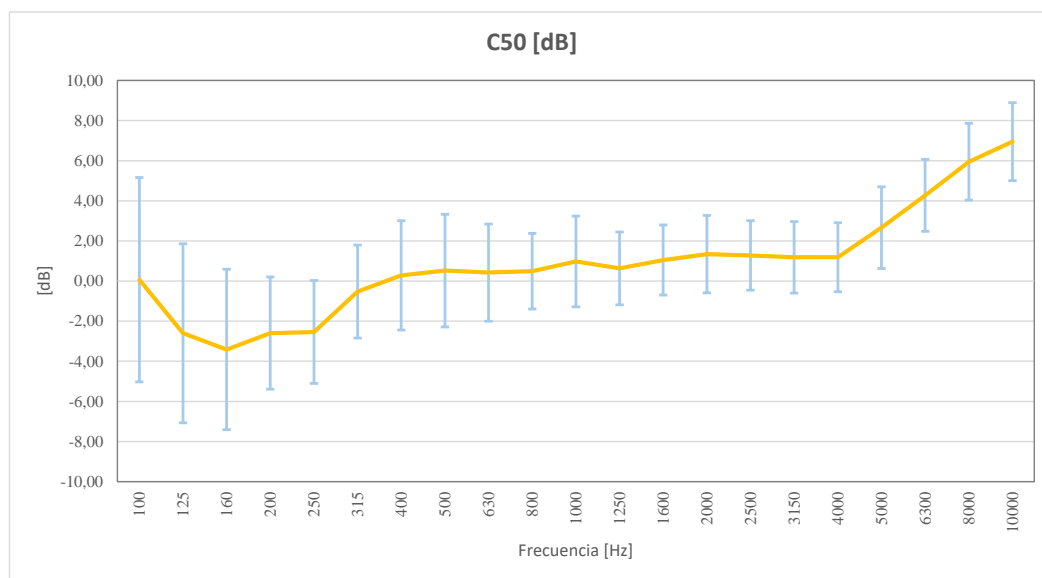


Figura 26. Promedio y desviación de las medidas del parámetro C50

Como ya se ha explicado en el apartado 4.2, el valor óptimo para la claridad de la voz, C50, tiene que ser superior a 2dB en cada punto de la sala.

Gracias a la gráfica se puede comprobar que la claridad comienza a ser óptima a partir de la frecuencia de 5kHz. Para las frecuencias bajas y medias la inteligibilidad se ve afectada por este parámetro.

• C80

En la siguiente tabla y figura se representan los valores del parámetro C80, claridad musical:

Tabla 19. Promedio y desviación de las medidas del parámetro C80 [dB]

C80 [dB]			
Frecuencia (Hz)	Promedio	Desviación	Métrica JND
100	2,60	5,03	6
125	0,53	3,55	4
160	-0,65	4,11	5
200	0,37	2,71	3
250	1,10	2,82	3
315	2,34	2,40	3
400	2,96	2,36	3
500	3,09	2,51	3
630	3,17	2,17	3
800	3,33	1,87	2
1000	3,67	2,10	3
1250	3,21	1,79	2
1600	3,85	1,95	2
2000	3,77	1,83	2
2500	4,05	1,90	2
3150	3,98	1,66	2
4000	4,23	1,70	2
5000	5,67	2,01	3
6300	7,41	1,73	2
8000	9,45	1,82	2
10000	10,69	2,08	3

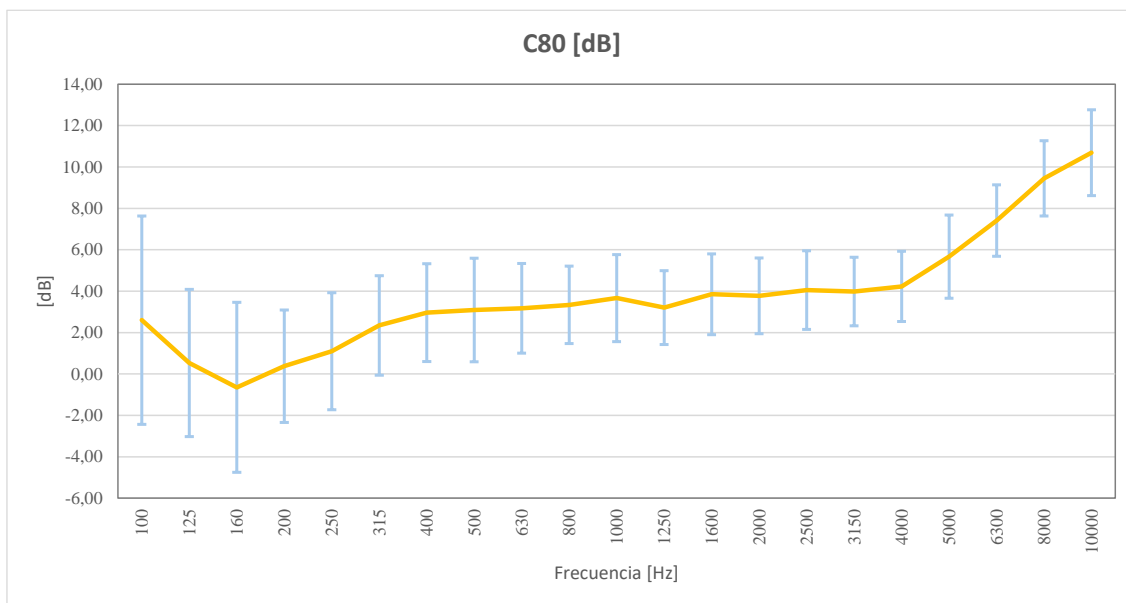


Figura 27. Promedio y desviación de las medidas del parámetro C80

En el caso de la claridad musical, el valor óptimo se encuentra en el rango de -2dB a 6 dB. En este recinto, tal y como se observa en la gráfica, este requisito se cumple hasta la frecuencia de 5kHz, consiguiendo una inteligibilidad óptima. A partir de 5kHz, la claridad comienza a decaer.

• D50

Los valores del parámetro D50 o Definición se muestran a continuación:

Tabla 20. Promedio y desviación de las medidas del parámetro D50[-]

D50 [-]			
Frecuencia (Hz)	Promedio	Desviación	Métrica JND
100	0,51	0,24	10
125	0,38	0,20	11
160	0,34	0,18	11
200	0,37	0,14	8
250	0,37	0,14	8
315	0,48	0,14	6
400	0,51	0,14	6
500	0,52	0,14	6
630	0,53	0,13	6
800	0,54	0,12	5
1000	0,55	0,12	5
1250	0,54	0,10	4
1600	0,56	0,10	4
2000	0,57	0,10	4
2500	0,58	0,10	4
3150	0,57	0,10	4
4000	0,57	0,12	5
5000	0,64	0,10	4
6300	0,72	0,11	4
8000	0,79	0,14	4
10000	0,83	0,11	3

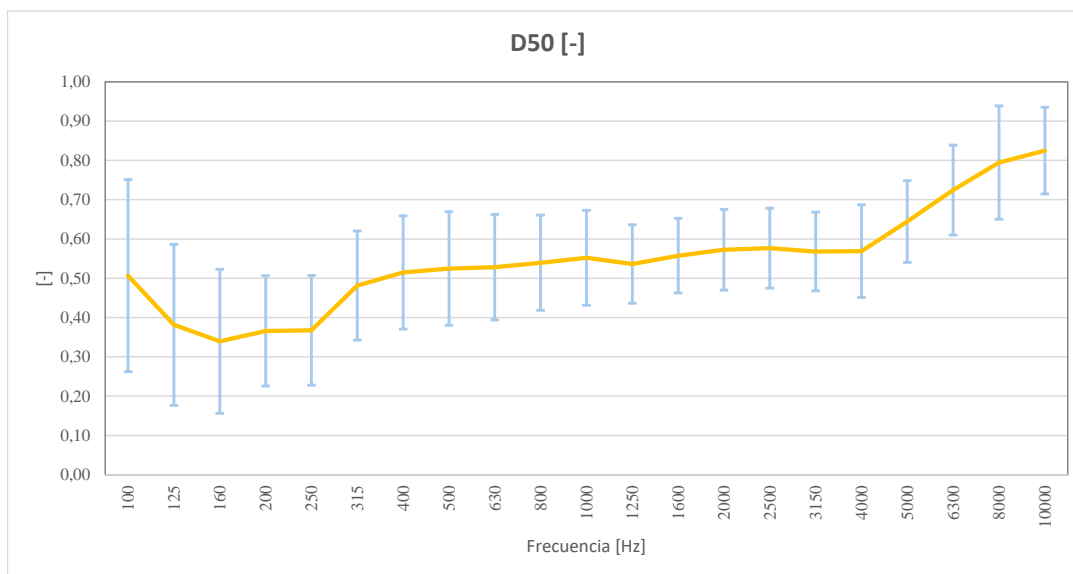


Figura 28. Promedio y desviación de las medidas del parámetro D50

El valor óptimo de la definición es a partir de 0,5. En este auditorio sucede a partir de la frecuencia de 400Hz. Las frecuencias más bajas se encuentran por debajo del valor idóneo, aunque muy cerca a este, concluyendo que la sala tiene muy buena definición en todas las frecuencias.

Como ya se ha mencionado anteriormente, a mayor tiempo de reverberación menor es la definición. Se puede comprobar esa afirmación, observando que las gráficas de ambos parámetros se comportan de forma inversa.

• Ts

El último parámetro energético se muestra en la siguiente tabla con el promedio y desviación de sus valores, y en la gráfica se muestra la curva:

Tabla 21. Promedio y desviación de las medidas del parámetro Ts [ms]

Ts [ms]			
Frecuencia (Hz)	Promedio	Desviación	Métrica JND
100	113,68	40,83	5
125	125,44	31,03	4
160	134,13	33,67	4
200	113,95	21,16	3
250	102,73	23,12	3
315	86,60	18,62	2
400	77,97	17,19	2
500	74,65	18,50	2
630	73,14	18,09	2
800	71,89	17,81	2
1000	67,55	15,60	2
1250	70,91	13,95	2
1600	67,55	13,99	2
2000	64,78	14,66	2
2500	62,96	15,28	2
3150	63,81	15,34	2
4000	62,54	15,28	2
5000	51,29	12,64	2
6300	39,81	10,41	2
8000	30,30	8,81	1
10000	26,01	7,42	1

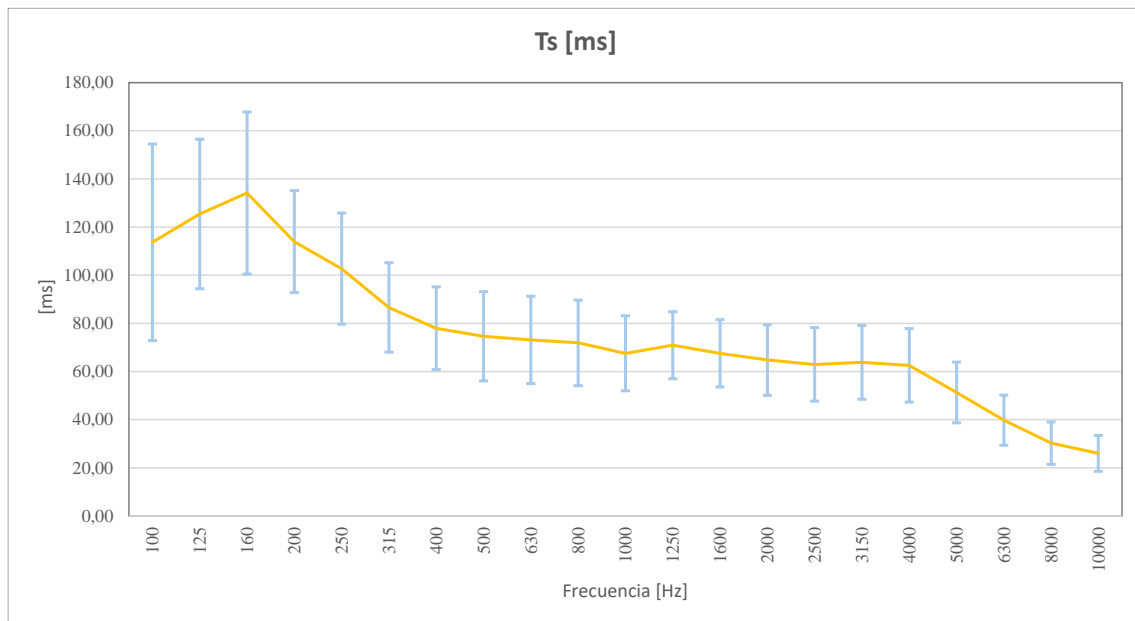


Figura 29. Promedio y desviación de las medidas del parámetro Ts

El parámetro Ts expresa la nitidez del recinto, de forma que cuanto menor sea el valor mayor será la nitidez. Si el promedio está alrededor de 130ms el valor será óptimo. Al ver la gráfica, se observa que este fenómeno de mayor nitidez solo se da en bajas frecuencias. En medias y altas frecuencias el auditorio tiene poca nitidez.

Parámetros espaciales

- LF

Tabla 22. Promedio y desviación de las medidas del parámetro LF [-]

LF [-]			
Frecuencia (Hz)	Promedio	Desviación	Métrica JND
100	0,005	0,005	1
125	0,011	0,010	1
160	0,011	0,010	1
200	0,019	0,015	1
250	0,028	0,019	1
315	0,029	0,020	1
400	0,037	0,022	1
500	0,057	0,028	1
630	0,062	0,030	1
800	0,084	0,035	1
1000	0,082	0,035	1
1250	0,092	0,039	1
1600	0,079	0,032	1
2000	0,079	0,035	1
2500	0,094	0,039	1
3150	0,108	0,043	1
4000	0,133	0,052	2
5000	0,105	0,050	2
6300	0,081	0,041	1
8000	0,090	0,052	2
10000	0,148	0,091	2

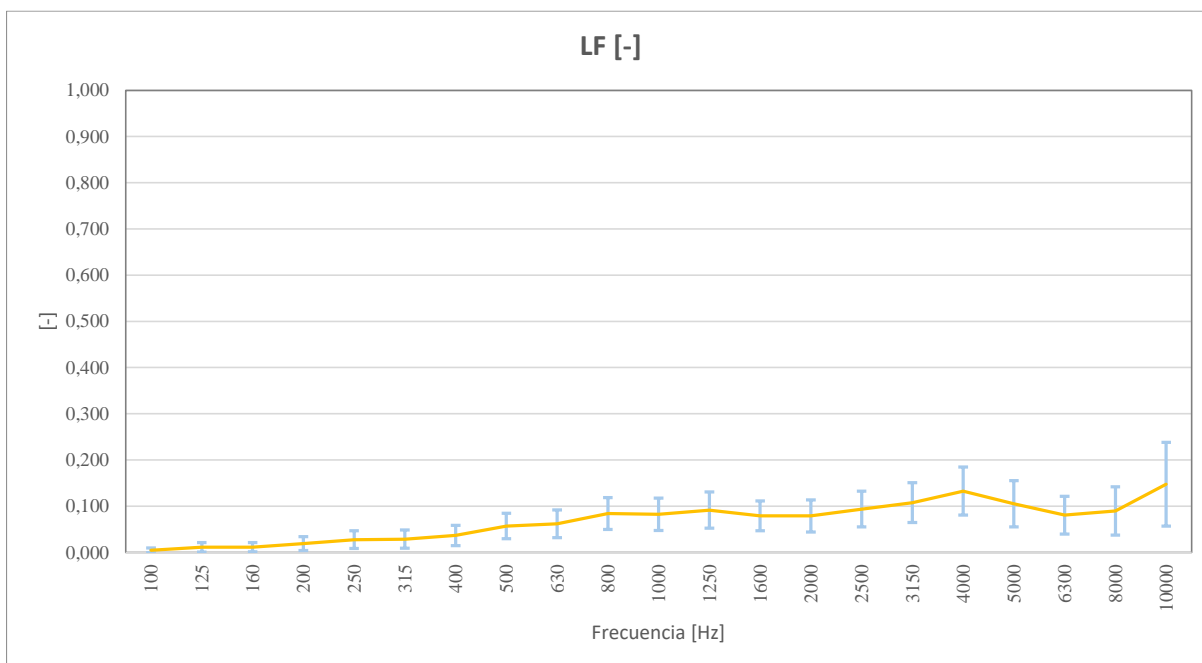


Figura 30. Promedio y desviación de las medidas del parámetro LF

Observando los datos de la tabla anterior y viéndolos gráficamente en la figura, la fracción de energía lateral que llega al espectador va aumentando con la frecuencia, con un desnivel entre las frecuencias de 4.000Hz y 8.000Hz.

• LFC

Tabla 23. Promedio y desviación de las medidas del parámetro LFC [-]

LFC [-]			
Frecuencia (Hz)	Promedio	Desviación	Métrica JND
100	0,56	0,40	8
125	0,51	0,31	7
160	0,33	0,26	6
200	0,22	0,11	3
250	0,19	0,11	3
315	0,16	0,08	2
400	0,17	0,09	2
500	0,18	0,08	2
630	0,21	0,10	2
800	0,38	0,13	3
1000	0,41	0,14	3
1250	0,32	0,12	3
1600	0,13	0,05	2
2000	0,08	0,03	1
2500	0,10	0,04	1
3150	0,17	0,08	2
4000	0,12	0,06	2
5000	0,01	0,01	1
6300	0,00	0,00	0
8000	0,00	0,00	0
10000	0,00	0,00	0

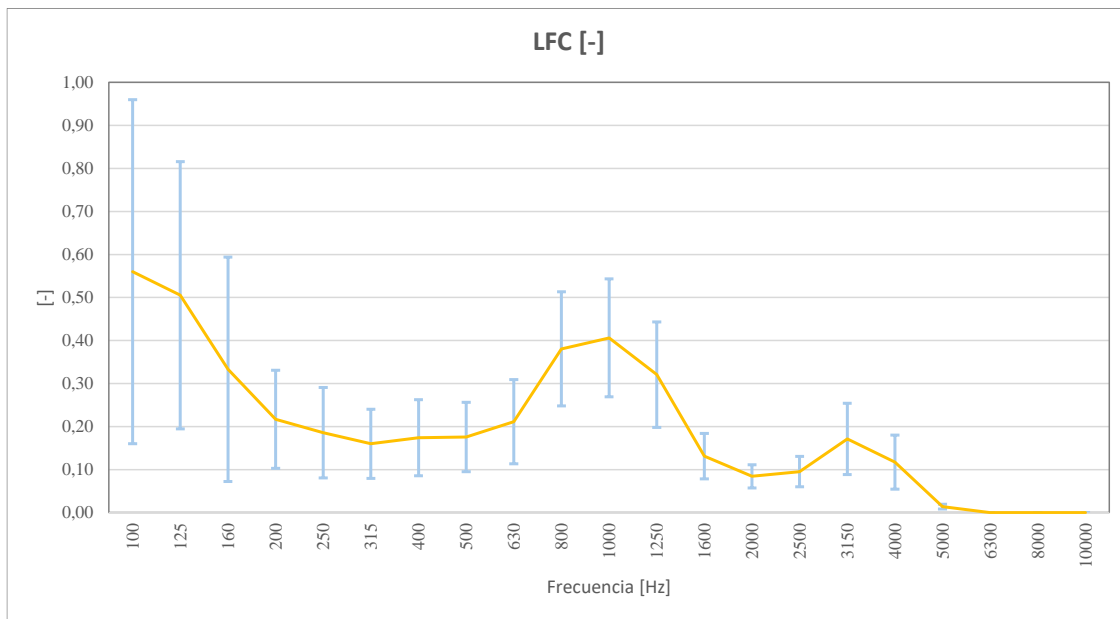


Figura 31. Promedio y desviación de las medidas del parámetro LFC

Respecto a los resultados obtenidos de LFC, los valores son más elevados que los del LF, debido a que el cálculo de energía lateral es más preciso matemáticamente. Igualmente, se obtienen algunos valores extraños debido a que se produjo un error en la ganancia del amplificador en el momento de las mediciones. Esto afectará a la hora de la validación final, ya que los resultados medidos in situ serán más diferentes a los del parámetro simulado en el modelo diseñado. No es un error muy perjudicial para la validación, ya que únicamente se produce en algunas de las frecuencias de este parámetro.

Parámetros de inteligibilidad

Por último, se analizan los parámetros de inteligibilidad. Estos no dependen de la frecuencia, por lo que se muestra el promedio y la desviación estándar de los valores de todas las posiciones de micrófono de forma global, y de forma independiente en cada zona del auditorio.

- **ALCONS**

El índice de articulación de consonantes se encuentra en el rango del 3% al 8%, caracterizando el auditorio con una inteligibilidad muy buena. En la siguiente tabla y figura, se muestran los promedios y la desviación estándar en los diferentes espacios del auditorio.

Tabla 24. Promedio y desviación Alcons por zonas

ALCONS [%]				
	PLATEA	PLANTA 1	ESCENARIO	TOTAL
PROMEDIO	6	7,06	4,5	6,26
DESVIACIÓN	1	0,91	0,54	1,15

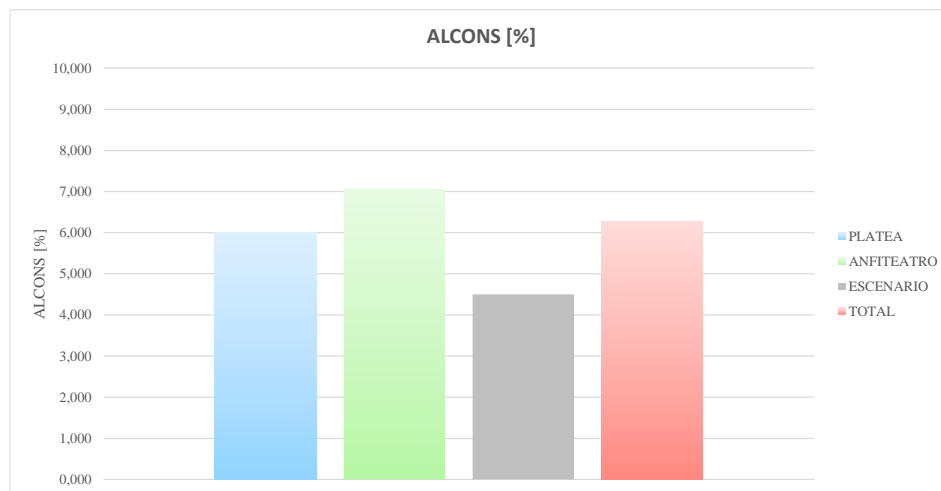


Figura 32. Promedio Alcons por zonas

- STI

En la siguiente tabla se listan los promedios del índice de transmisión del habla, obteniendo un valor de 0,61. Se encuentra en el rango de 0,60-0,75, considerándose un índice muy bueno.

Tabla 25. Promedio y desviación STI por zonas

STI [-]				
	PLATEA	PLANTA 1	ESCENARIO	TOTAL
PROMEDIO	0,621	0,59	0,673	0,61
DESVIACIÓN	0,036	0,023	0,009	0,04

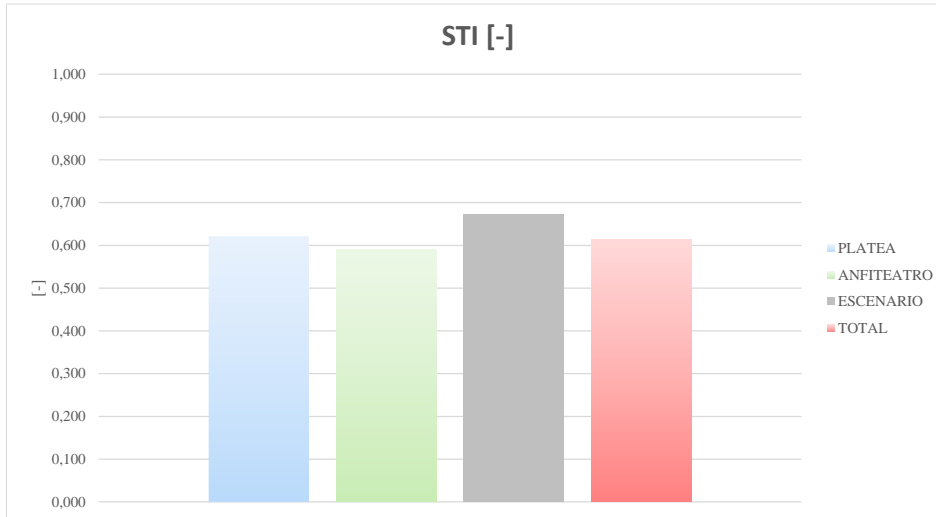


Figura 33. Promedio STI por zonas

6. Diseño 3D del Modelo Arquitectónico y Geométrico del Auditorio

En este apartado se describe el diseño del modelo arquitectónico simplificado en 3D del auditorio de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid, que se utiliza en la simulación posterior del modelo geométrico.

En un primer momento se han solicitado a la Escuela los planos del auditorio, pero únicamente se ha proporcionado un plano en planta muy simplificado que no se corresponde con la actualidad real del auditorio, por lo ha sido necesario dibujar los planos desde cero.

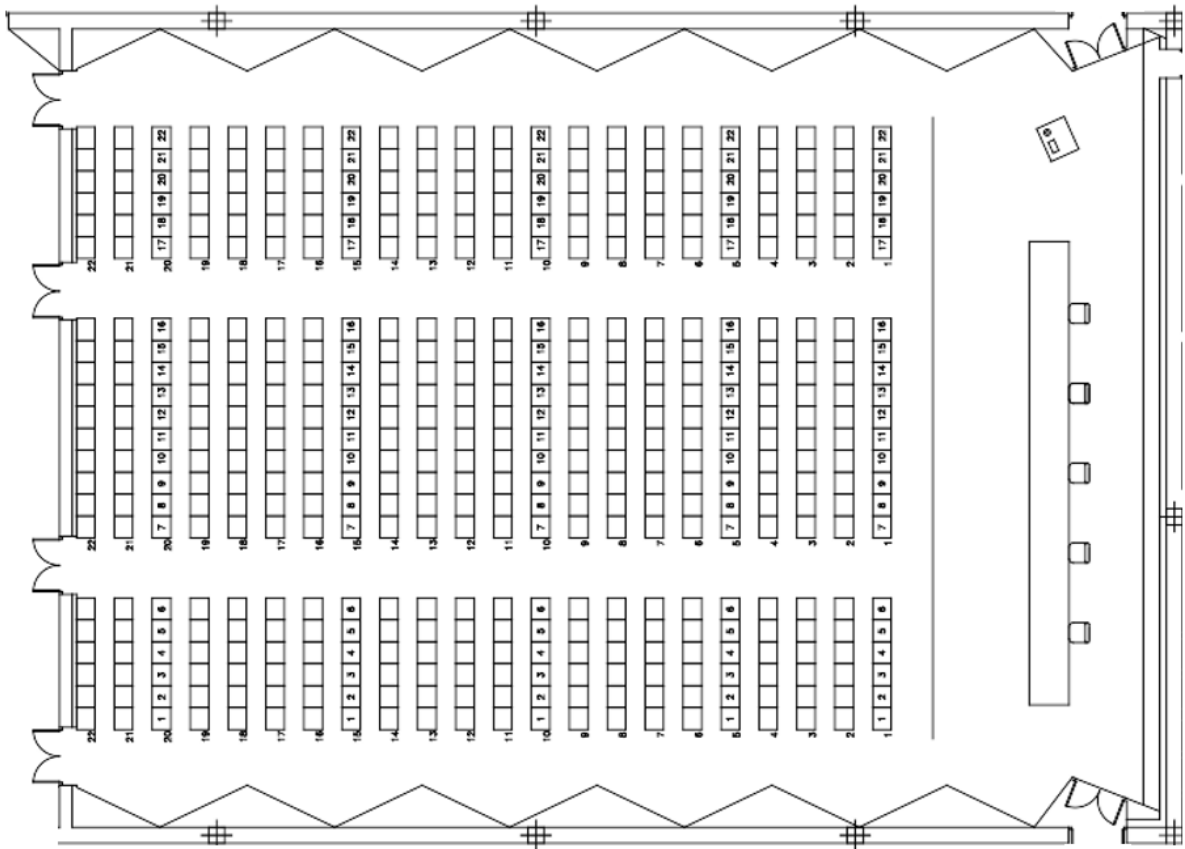


Figura 34. Plano en planta proporcionado por la escuela

Se solicita a la Escuela el acceso al auditorio un día previo al de las mediciones in situ, para poder tomar las medidas, cotas y dimensiones necesarias de este, para su posterior diseño.

6.1 Diseño del modelo arquitectónico en Sketch-Up

Debido a la inexistencia de planos actuales del recinto, se opta por levantar el modelo directamente en SketchUp y posteriormente obtener los planos en 2D para posibles necesidades futuras.

Como el auditorio es simétrico, solo es necesario dibujar uno de los lados, simplificando así su diseño. Una vez terminado este lado, se duplica el eje central de la sala obteniendo el modelo completo.

El diseño del auditorio es simplificado, es decir, no se representan adornos, focos, luminarias o elementos por el estilo, ya que no tienen ninguna influencia acústica al tratarse de objetos con una superficie reducida.

Los materiales asignados son aproximaciones de los reales y lo más semejante posible. Una vez terminado el auditorio se tratará de ajustarlo lo máximo posible.

Antes de comenzar con el diseño hay que conocer cierta información sobre SketchUp para el correcto funcionamiento del programa.

Todas las superficies por dibujar deben estar bien definidas, es decir, no deben existir superficies abiertas, ya que el software lo interpretaría como que el modelo no está cerrado completamente, relacionándolo con problemas de “agujeros”. SketchUp no es una herramienta 100% precisa en la que se puedan encontrar rápidamente estos errores para solucionarlos, por lo que hasta el momento de importar el modelo a EASE no se le da mucha importancia. Una vez en EASE se solucionarán todos los problemas de “agujeros”.

Cuando se dibujan caras, estas adquieren un color predeterminado en función de su orientación hacia el interior o el exterior del recinto. En el caso de que la cara tenga un tono azulado, significa que la cara es interior. Si la cara aparece de color blanco, está orientada hacia el exterior. A lo largo del diseño, las caras pueden estar invertidas según la forma en la que se hayan dibujado, pero con la opción *Reverse* se pueden invertir sin ningún problema.

Una vez dibujadas las caras, se les puede dar volumen (extruir) con la herramienta *Push/Pull*, levantándolas la altura necesaria.

De todas formas, durante el proceso de creación, se irán haciendo mejoras y solucionando pequeños problemas, según se avance en el desarrollo del modelo.

Una vez conocidas estas pautas para el correcto modelado, se comienza a diseñar el auditorio desde el suelo, definiendo los suelos inclinados y el escenario. El suelo tiene una inclinación aproximada de $2,3^\circ$, desde las puertas de entrada hasta la mitad del auditorio; desde ese punto hasta el escenario la inclinación va variando hasta hacerse prácticamente nula en las proximidades del escenario. Para poder simular la inclinación de la forma más parecida, se ha dibujado el suelo con varias caras.

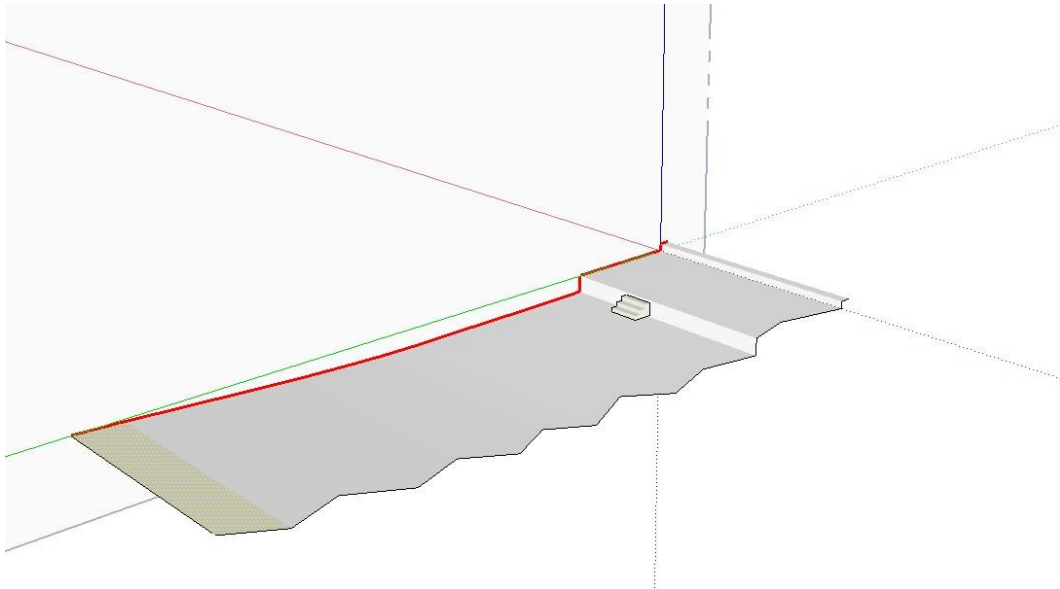


Figura 35. Diseño del suelo, escaleras y escenario

Como se muestra en la figura anterior, a la vez que se dibuja el suelo, se construye el escenario y las escaleras que facilitan el acceso al mismo, dándoles el volumen requerido con la herramienta *Push/Pull* ya mencionada.

Desde este primer momento, a cada elemento de la sala se le asigna una capa diferente con color para que la visualización del modelo sea más intuitiva, siendo diferente las capas de la moqueta del suelo, de la del escenario y de las escaleras.

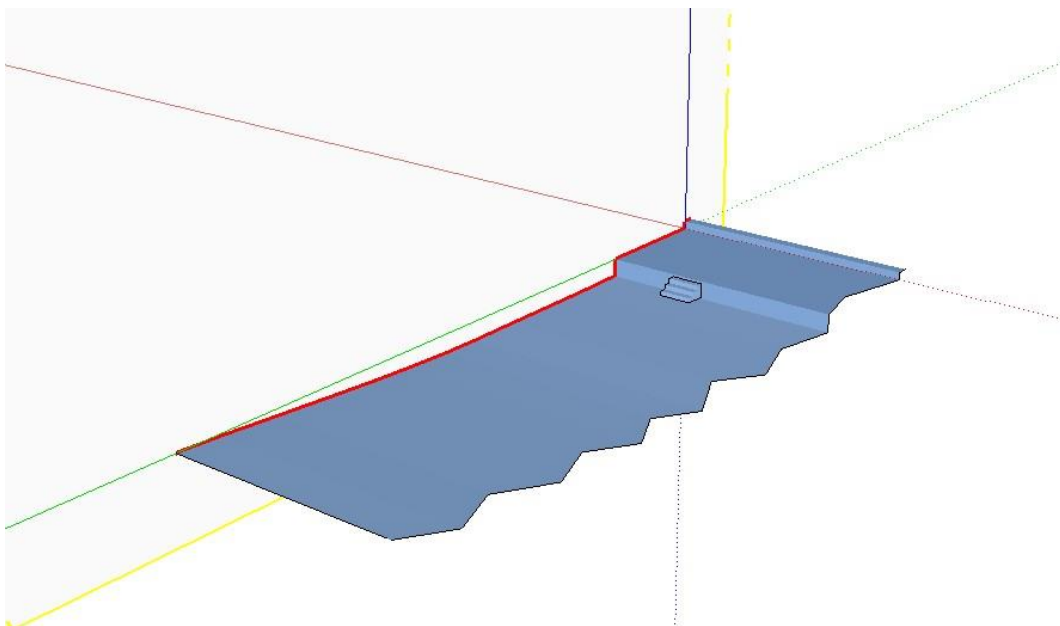


Figura 36. Diseño del suelo, escaleras y escenario a color

El siguiente paso es la construcción de las paredes del auditorio. Se trata de una pared bastante irregular por lo que el primer paso es dibujar la pared del fondo del escenario para, a partir de ahí y conociendo ya la altura, continuar añadiendo las secciones de la pared más fácilmente.

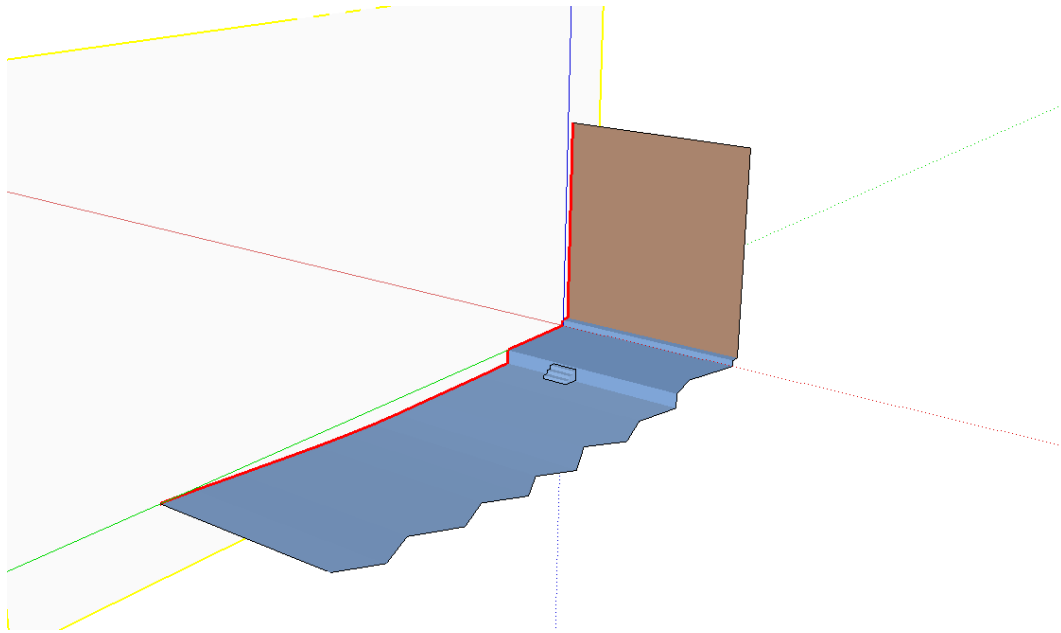


Figura 37. Diseño pared escenario

En las siguientes figuras, se muestra el auditorio desde fuera y desde dentro con las paredes levantadas. Se dejan los huecos para añadir posteriormente las puertas y cortinas. Toda la pared es de madera, por lo que se ha incluido todo en una misma capa, a excepción de una pequeña sección de la parte delantera superior en la que se encuentran unas cabinas de cristal.

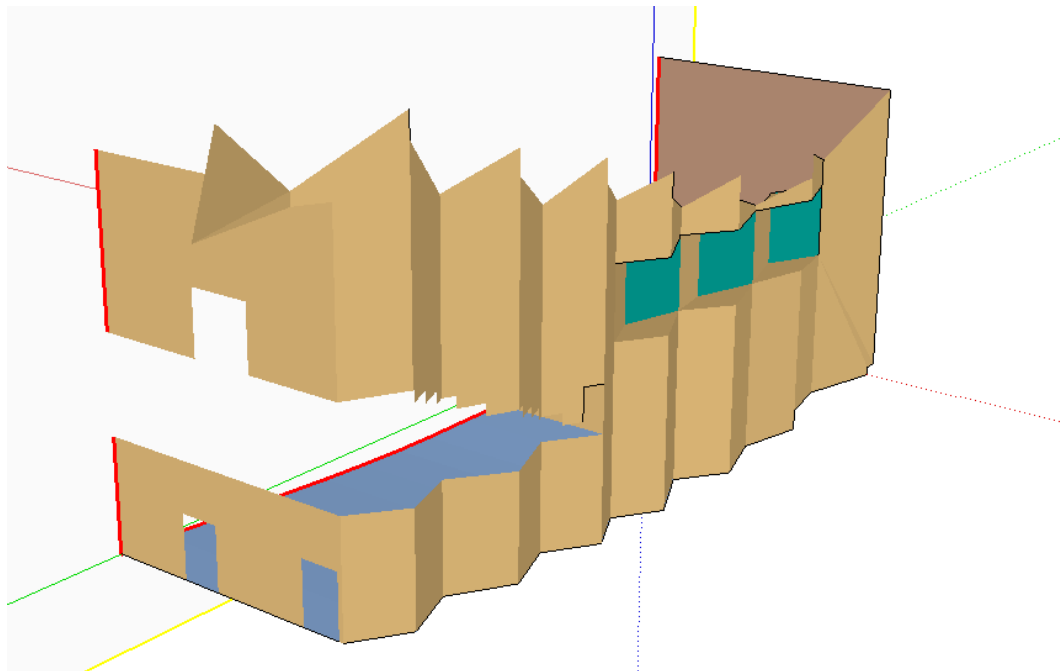


Figura 38. Diseño paredes – Vista exterior

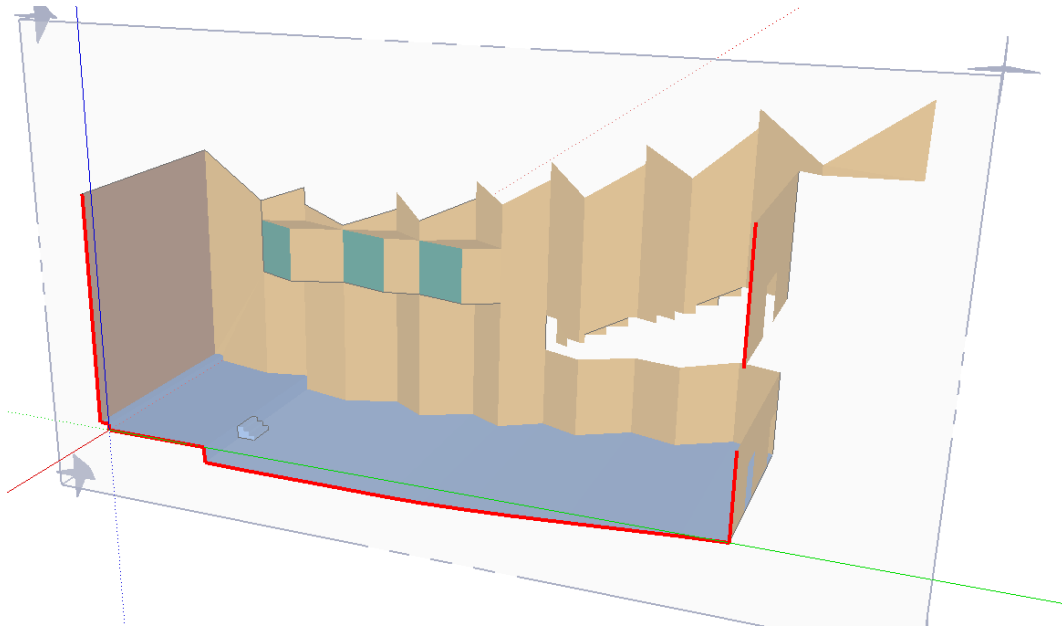


Figura 39. Diseño paredes – Vista interior

A continuación, se levantan las gradas y el antepecho de la planta 1 en las que posteriormente se añadirán las butacas. Todo el suelo de la planta 1 está acabado en linóleo.

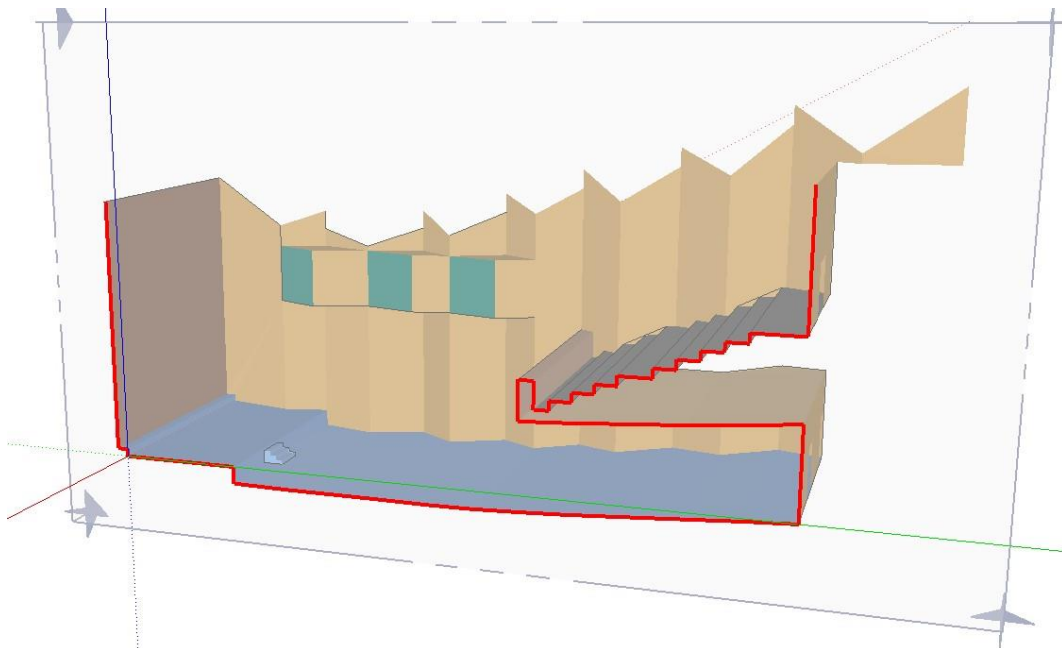


Figura 40. Diseño planta 1.

Una vez diseñada la primera planta, se añade el telón del escenario y las cortinas de las puertas de la primera planta. Estos elementos se definen como superficies de doble cara, ya que los rayos pueden impactar en ambas superficies. A la hora de diseñarlas, deben estar separadas unos 5cm del resto de superficies. También se añaden las puertas de madera de la platea.

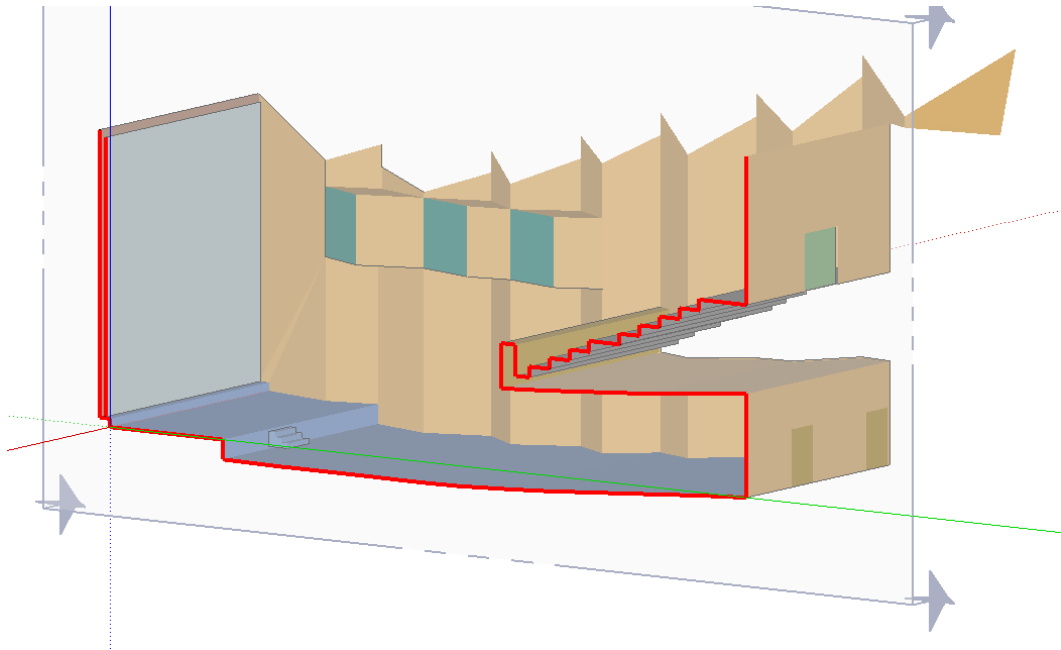


Figura 41. Diseño de telón y cortinas.

En la siguiente figura se muestra el resultado de la construcción del techo del auditorio. Se trata de un elemento muy irregular y particular. Los tramos verticales son de cristal y el resto de la superficie es de hormigón. Para poder construirlo, se tomaron en numerosos puntos del auditorio los datos de la altura desde el suelo.

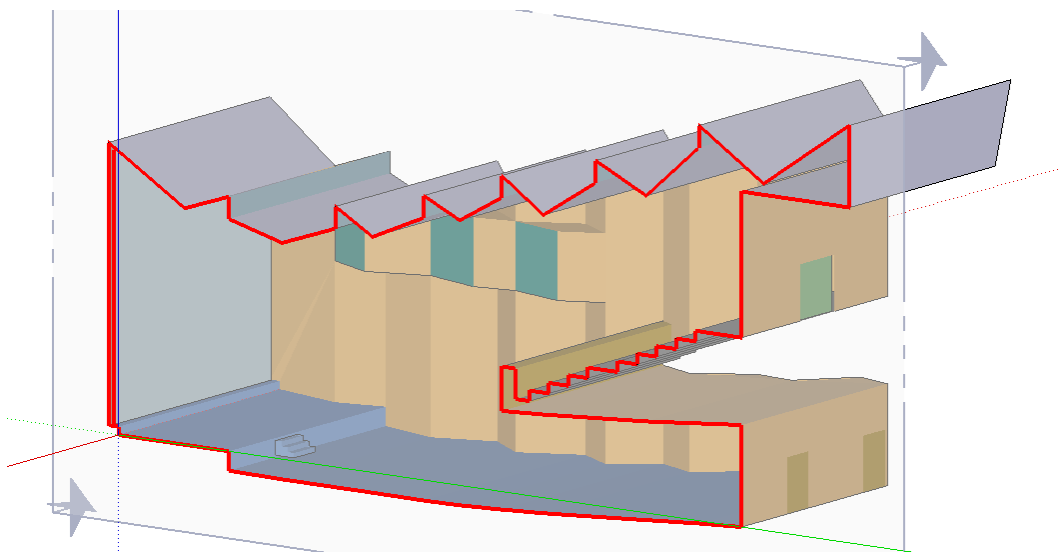


Figura 42. Diseño de techo.

En la siguiente figura se dibujan los pasillos que salen de la planta 1 al hall de entrada. Estos elementos tendrán poca influencia sobre la acústica de la sala ya que están separadas de la sala por unas cortinas de un tejido pesado, aunque sí que aportan un incremento de volumen que sea considerado no despreciable.

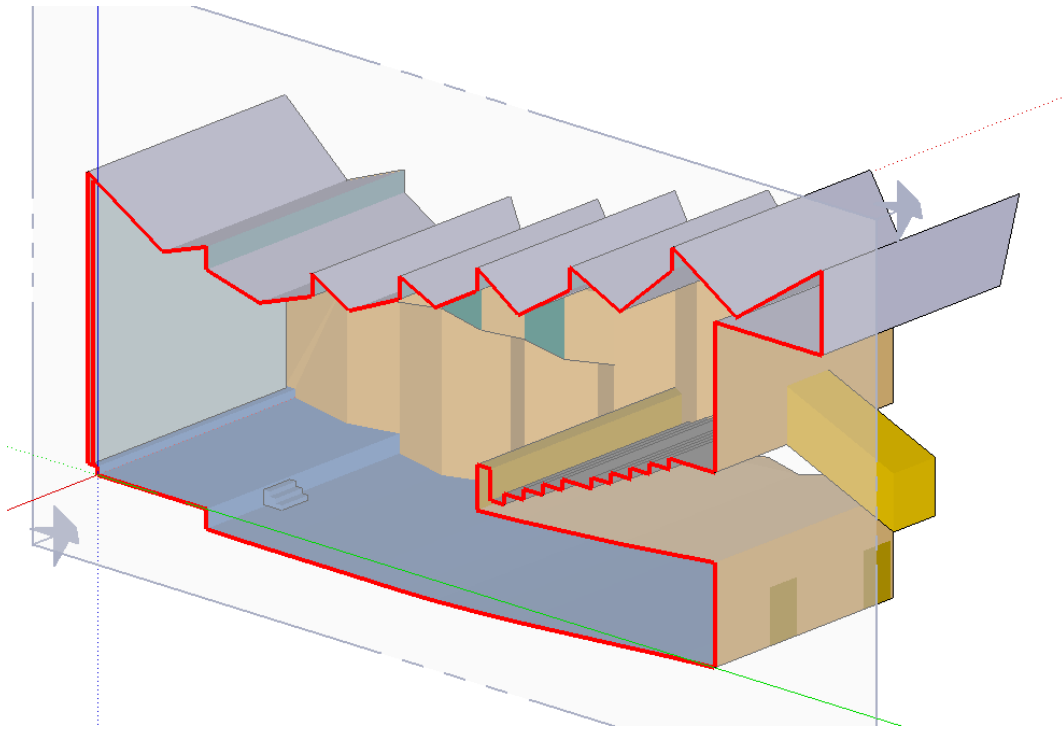


Figura 43. Diseño de pasillos de primera planta.

Por último, se añaden las butacas de la platea y de la planta 1, todas ellas separadas unos 5cm del suelo. Las de la platea tienen un diseño distinto, ya que la parte de delante de la butaca es de madera perforada y la trasera de madera lisa, por lo que estas butacas están compuestas de tres capas. En el caso de las butacas de planta 1, todas ellas están tapizadas por un mismo tejido, creándose solo una capa con estas butacas, de doble superficie.

Para facilitar el diseño de las butacas, se opta por la construcción de prismas, sin la tapa de abajo, simulando todas las butacas una a continuación de otra.

El auditorio cuenta con 23 filas de butacas en la platea. En cada lateral, los bloques de butacas están compuestos por filas de 6 butacas y en la zona central cada fila tiene 10 butacas.

En la planta 1 del auditorio, existen 9 filas de butacas más sencillas, todas ellas tapizadas completamente. El pasillo central divide los dos bloques de butacas, pares e impares, en 13 butacas por fila y lateral.

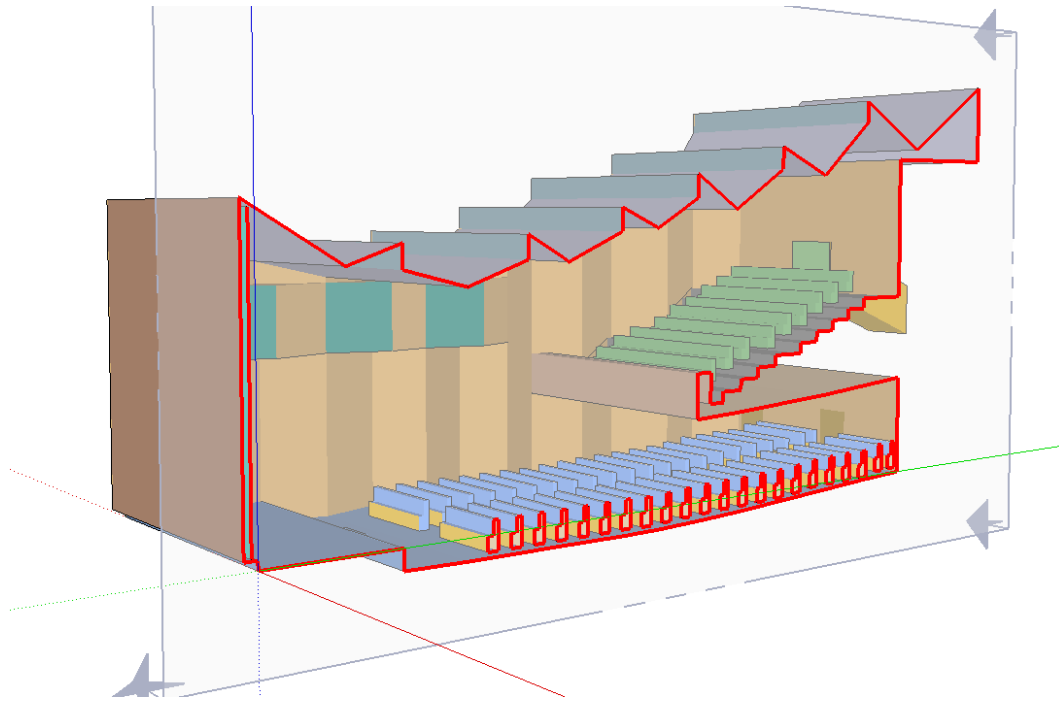


Figura 44. Diseño de butacas 1

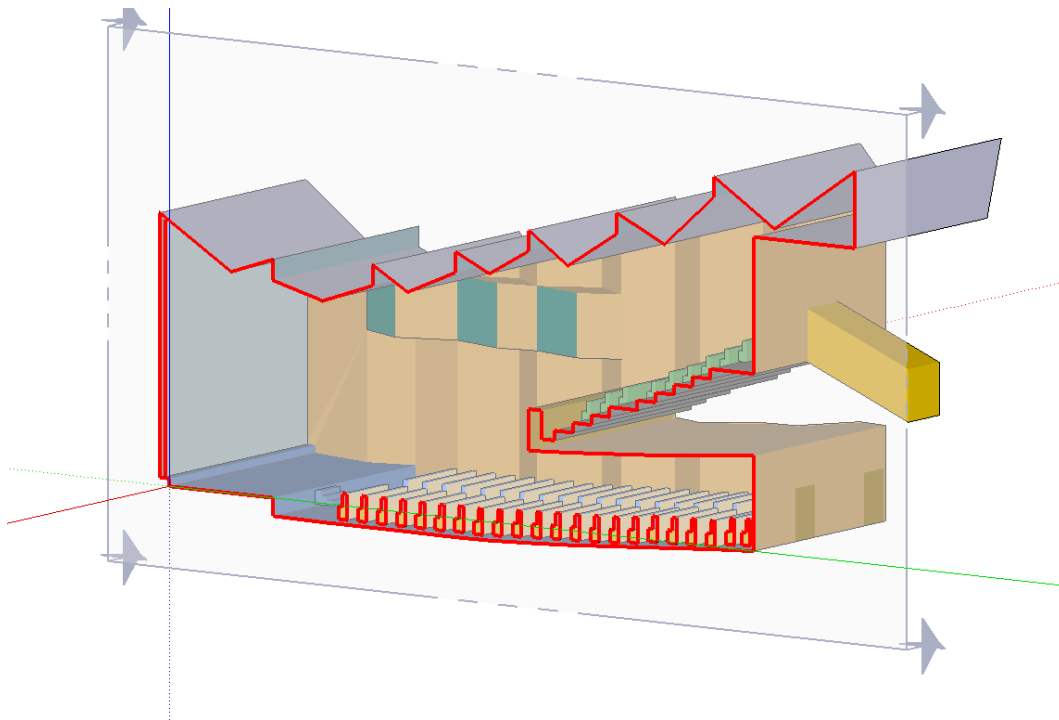


Figura 45. Diseño de butacas 2

Finalmente, para terminar el modelo se ajusta el origen de coordenadas y con la herramienta *Mirror*, pinchando en el eje X, se realiza la simetría de la sala obteniendo el auditorio completo.

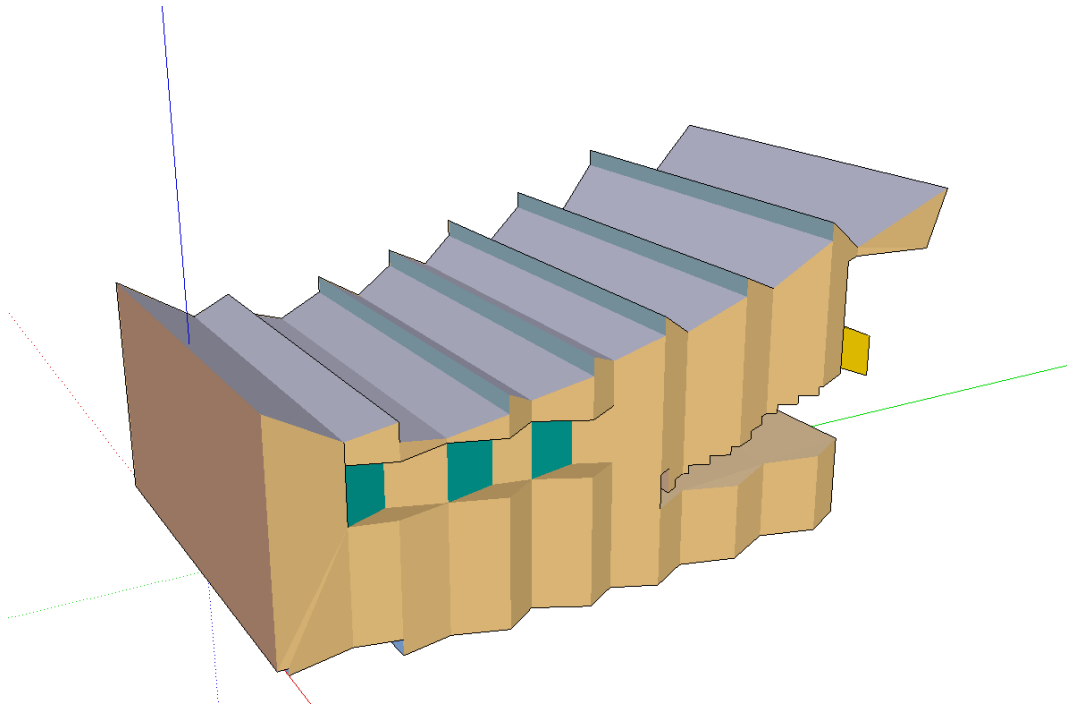


Figura 46. Auditorio completo 1

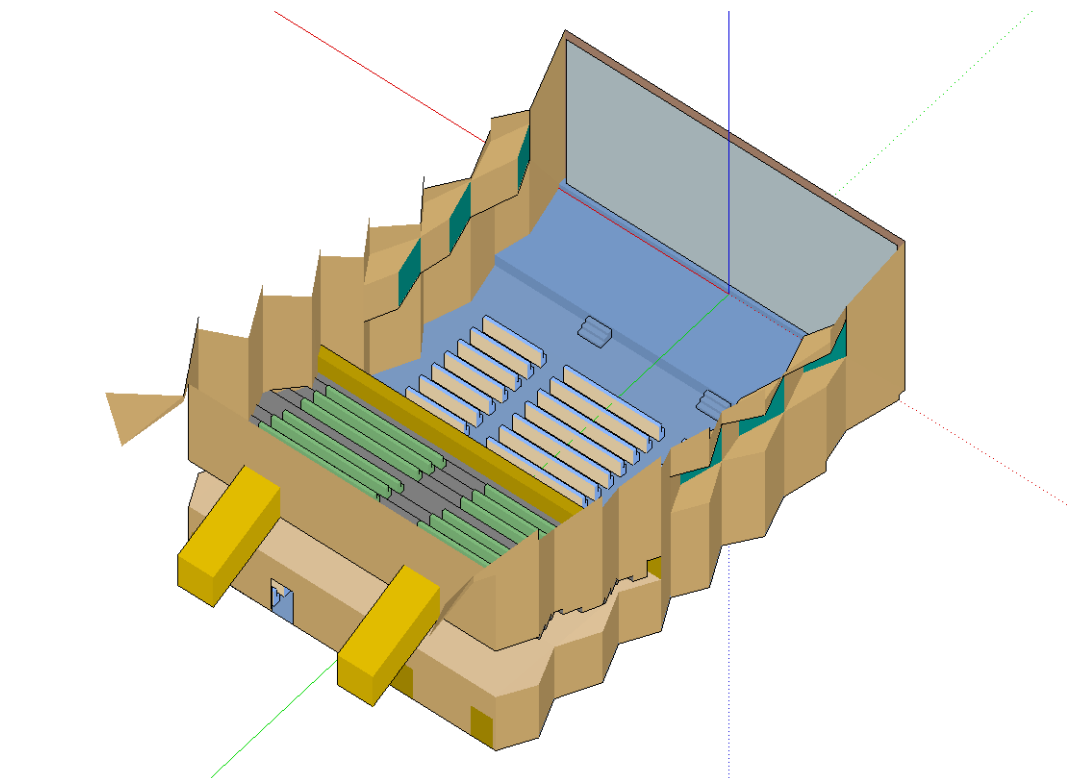


Figura 47. Auditorio completo 2

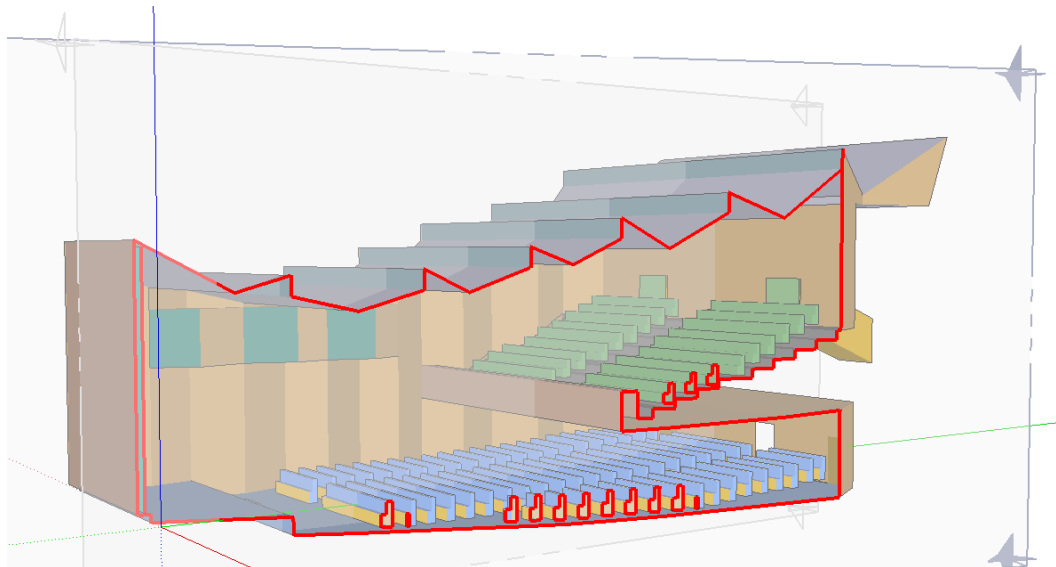


Figura 48. Sección auditorio completo

Para que el comportamiento acústico de la sala sea el correcto, hay que asegurarse de que el único volumen cerrado debe ser el propio auditorio y de que todos los elementos se comportan como un único bloque conjunto. Esto quiere decir que dentro de la sala no existen volúmenes cerrados. Por ejemplo, se elimina la tapa de debajo de las butacas de platea para conseguir volúmenes abiertos. Además, como ya se ha mencionado antes, todos estos elementos (butacas, cortinas, telón) deben estar separados 5cm de todas las superficies (suelos, paredes o techos); deben quedar 'elevados' en la sala.

Una vez comprobado que no existen volúmenes cerrados y que todas las caras tienen la orientación correcta, con la herramienta *Inspect and Close Edge Gaps*, se muestran los agujeros y líneas abiertas que hayan podido quedar en el modelo. Simplemente pinchando sobre ellas, se solucionan los errores aligerando así el proceso posterior en EASE. Igualmente, al existir numerosos volúmenes abiertos representados por las superficies de doble cara, aparecerán numerosos errores que no se pueden arreglar. De todas maneras, el modelo se puede importar a EASE sin problema.

Como ya se ha mencionado anteriormente, a cada elemento de la sala se le asigna una capa, para asignarle posteriormente un material en EASE. A cada capa se le asigna un color, para que el modelo que representa el recinto sea lo más parecido posible al original. A cada capa se le puede asignar también el nombre más conveniente. El único caso en el que hay que utilizar un nombre específico es en aquellas superficies de doble cara, como son las butacas de la platea, las cortinas y el telón, con el símbolo \$. De esta manera EASE lo reconocerá como superficie de doble cara, y se le podrán asignar dos materiales diferentes en cada una de ellas. En la siguiente figura se muestran las capas creadas en SketchUp junto a su color y nombre correspondiente:

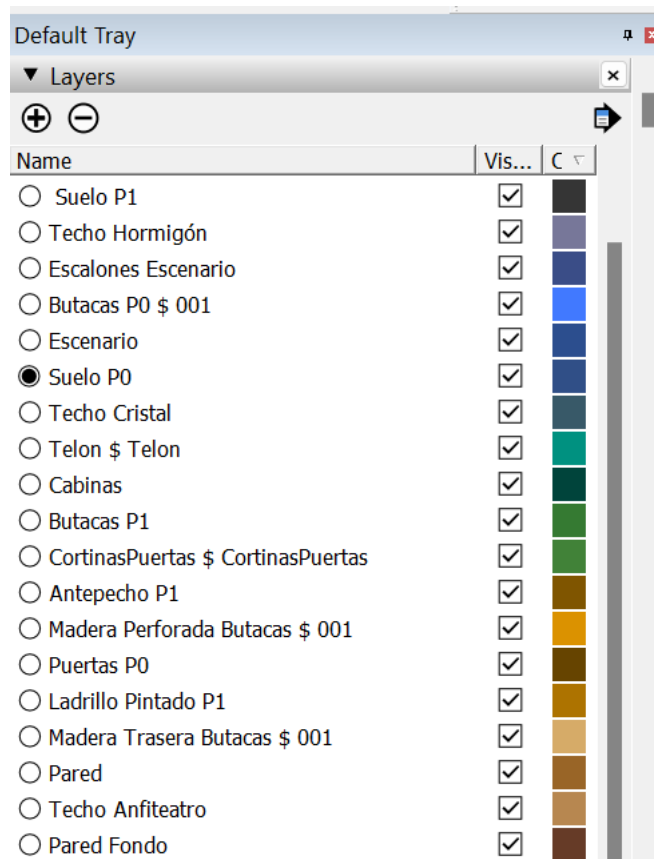


Figura 49. Capas creadas en SketchUp

Las capas y los materiales son:

- Suelo P1: suelo de la planta 1 acabado en linóleo.
- Techo Hormigón: todas las caras oblicuas del techo de hormigón.
- Escalones Escenario: los dos bloques de escalones que ascienden al escenario acabados en moqueta.
- Butacas P0 \$ 001: acabado en tejido de las butacas de la platea. En este caso es necesario nombrar así la capa ya que son elementos de doble cara. En las caras externas se le asigna un tejido como acabado y en las caras internas se les asigna un material denominado 001 que no tiene absorción.
- Escenario: corresponde al escenario acabado en moqueta.
- Suelo P0: suelo de la platea acabado en moqueta.
- Techo Cristal: superficies verticales del techo que unen las caras de hormigón acabadas en vidrio.
- Telón \$ Telón: corresponde al telón situado en el fondo del escenario. Se nombra con \$ porque se trata de una superficie de doble cara. En ambas caras se asigna el mismo tejido.
- Cabinas: pequeña superficie de las paredes laterales, situada en la parte delantera superior acabada en vidrio.
- Butacas P1: butacas de primera planta todas ellas acabadas en tejido.
- CortinasPuertas & CortinasPuertas: las dos cortinas colgadas en las puertas traseras del auditorio de la planta 1.

- Antepecho P1: antepecho situado al comienzo de las gradas de planta 1 acabado en madera.
- Madera Perforada Butacas \$ 001: se corresponde con las 'tapas' de la parte delantera de las butacas. El acabado es madera perforada. Al igual que con el tejido de las butacas, en este caso a la cara externa se le asigna un material similar a la madera perforada y a la cara interna el material 001, no absorbente.
- Puertas P0: se corresponde con las cuatro puertas de entrada al auditorio de la platea. Son puertas de madera.
- Ladrillo Pintado P1: los dos pasillos de acceso al auditorio de la planta 1. No afectan al comportamiento acústico de la sala.
- Madera Trasera Butacas \$ 001: se corresponde con las 'tapas' traseras de las butacas de la platea. Ocurre lo mismo que con la parte de delantera de las butacas respecto a la selección de materiales. En este caso el acabado es madera lisa.
- Pared: todas las paredes del auditorio acabadas en madera.
- Techo Anfiteatro: el techo de la platea o zona inferior a las gradas de la planta 1 acabado en madera.
- Pared Fondo: se corresponde con la pared de hormigón situada tras el telón del escenario.

A continuación, se muestran algunas imágenes en las que se compara el auditorio real con el diseñado para mostrar el nivel de similaridad conseguido:

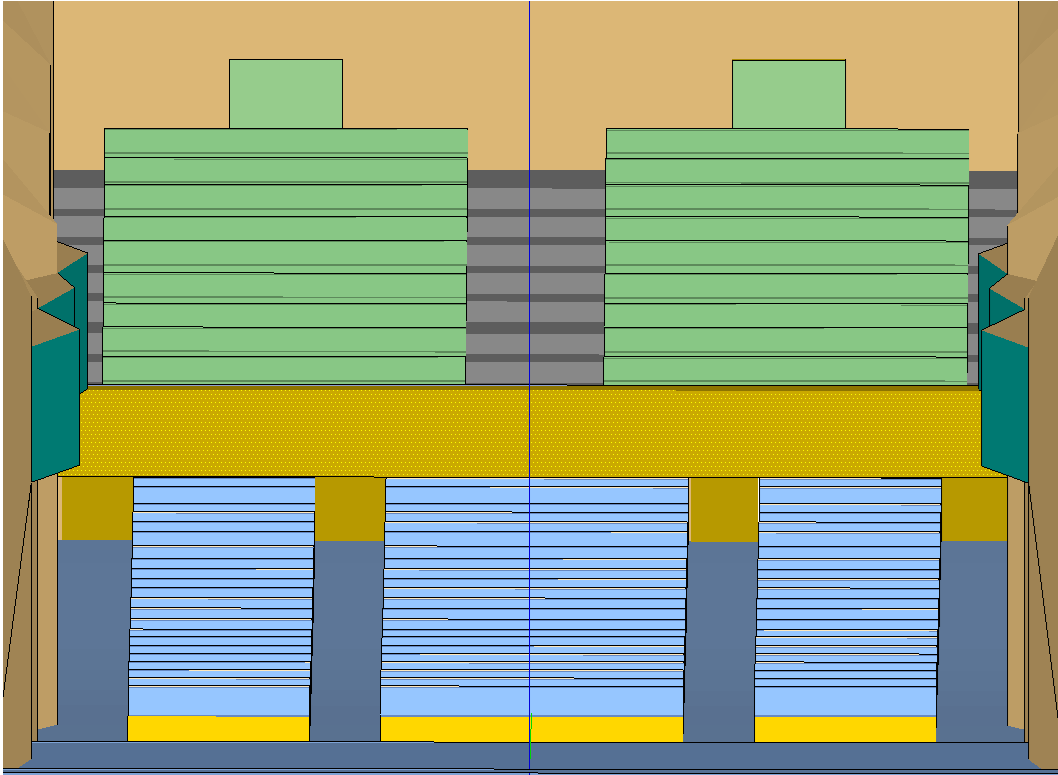


Figura 50. Vista desde el escenario del modelo

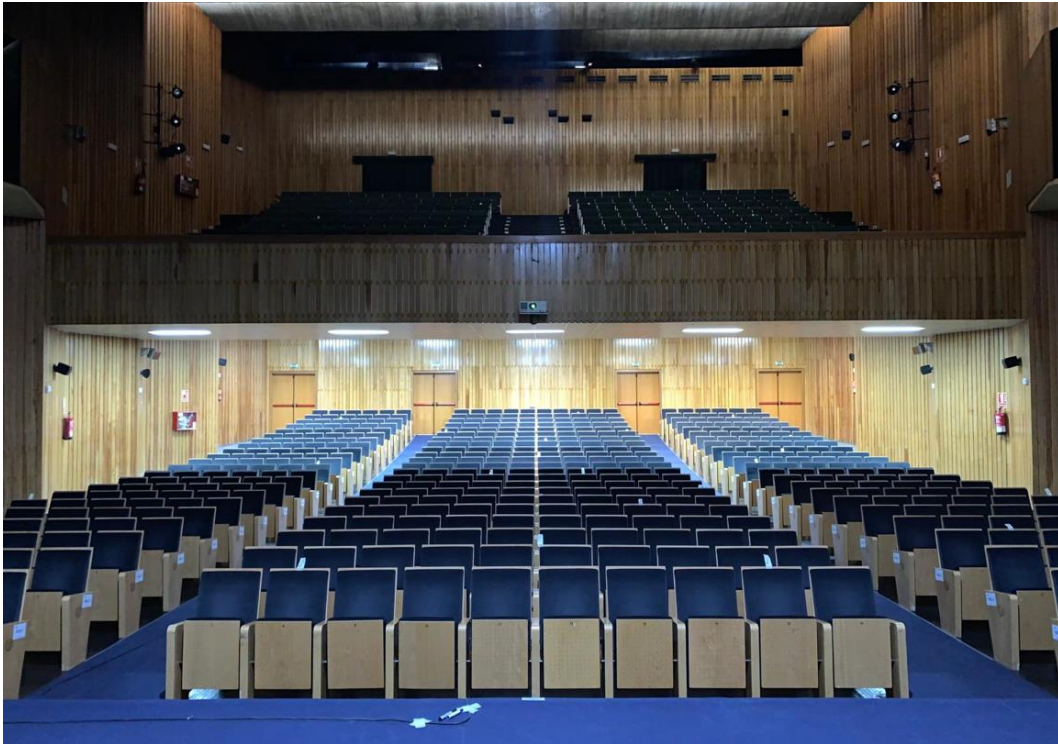


Figura 51. Vista desde el escenario del auditorio real

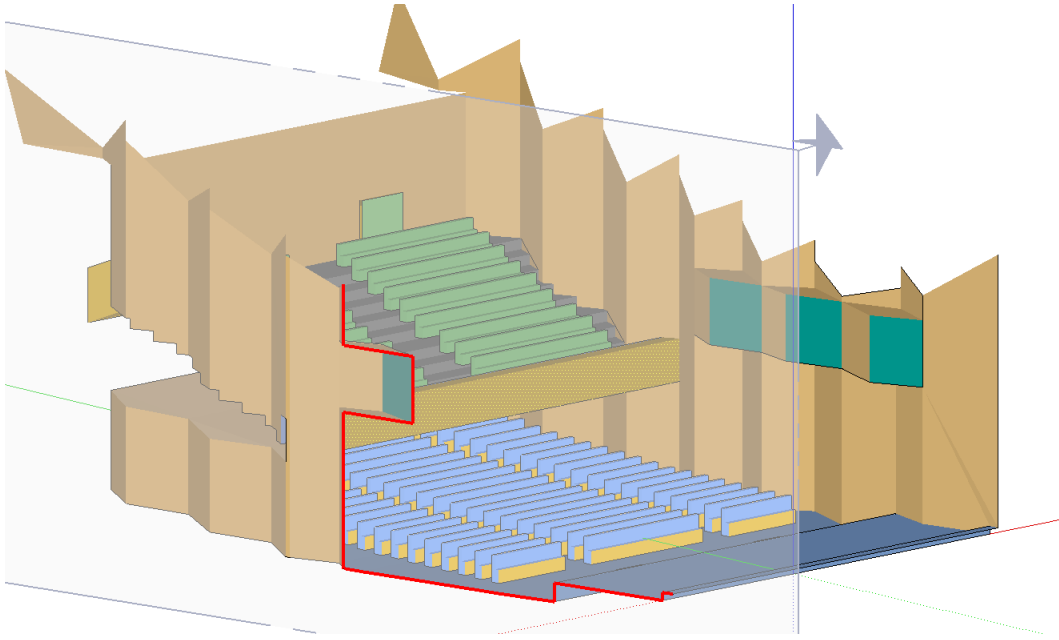


Figura 52. Vista desde el escenario lateral del modelo



Figura 53. Vista desde el escenario lateral del auditorio real

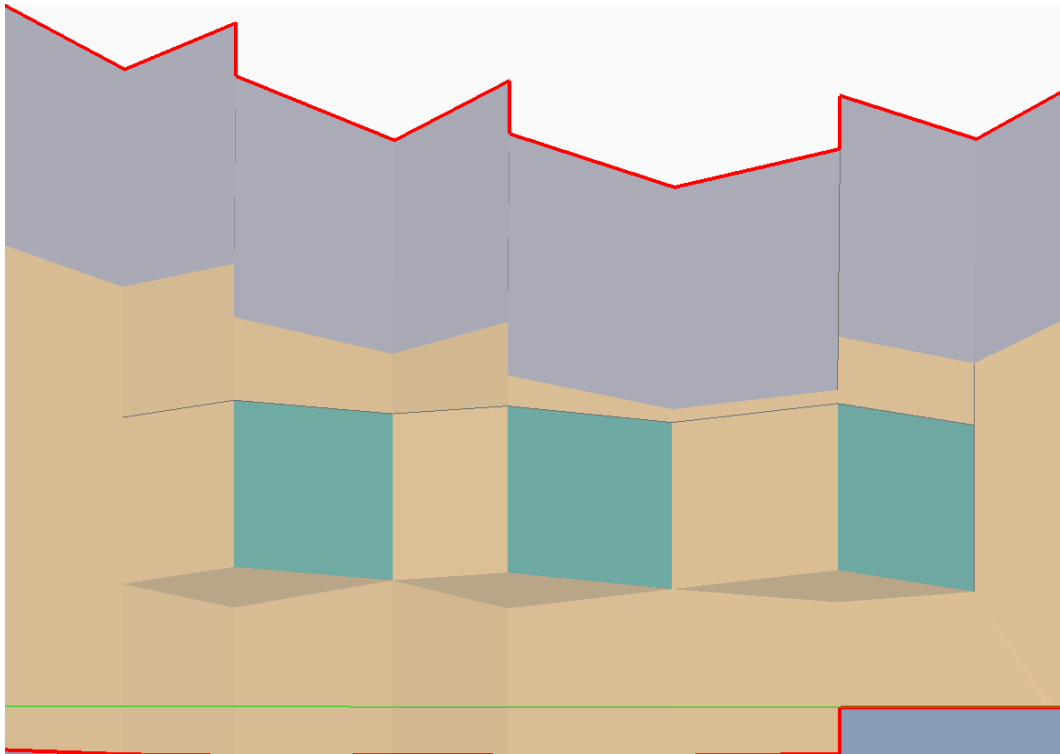


Figura 54. Cabinas y techos del modelo

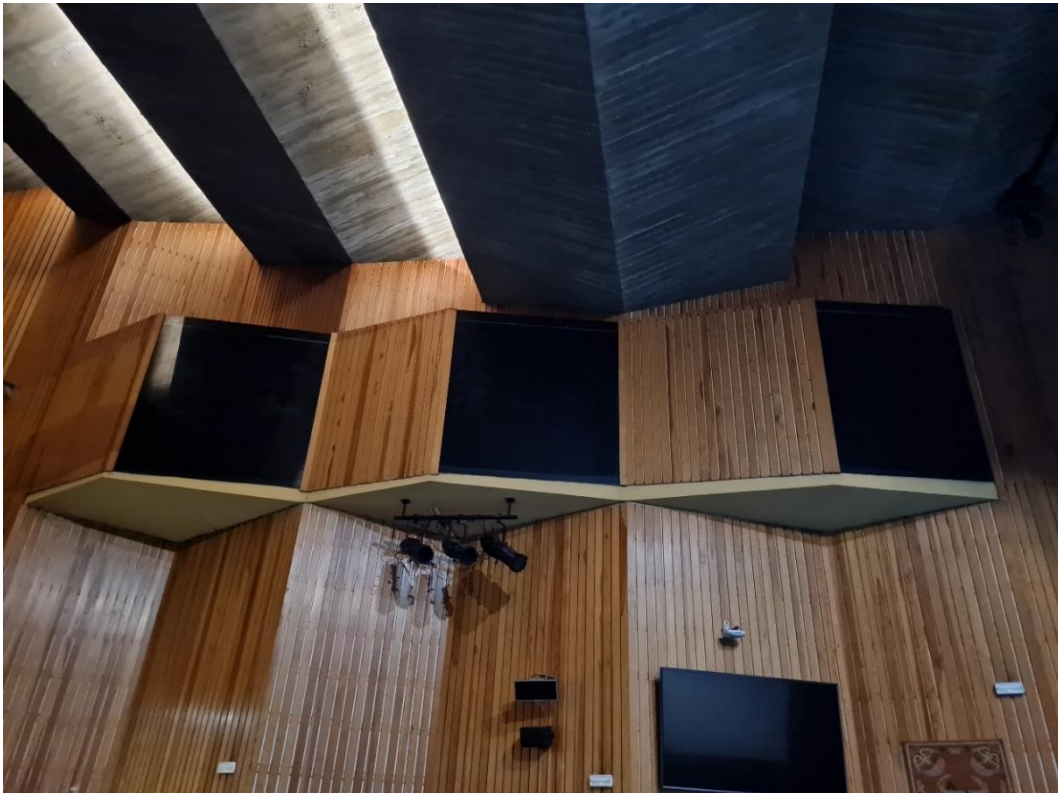


Figura 55. Cabinas y techos del auditorio real

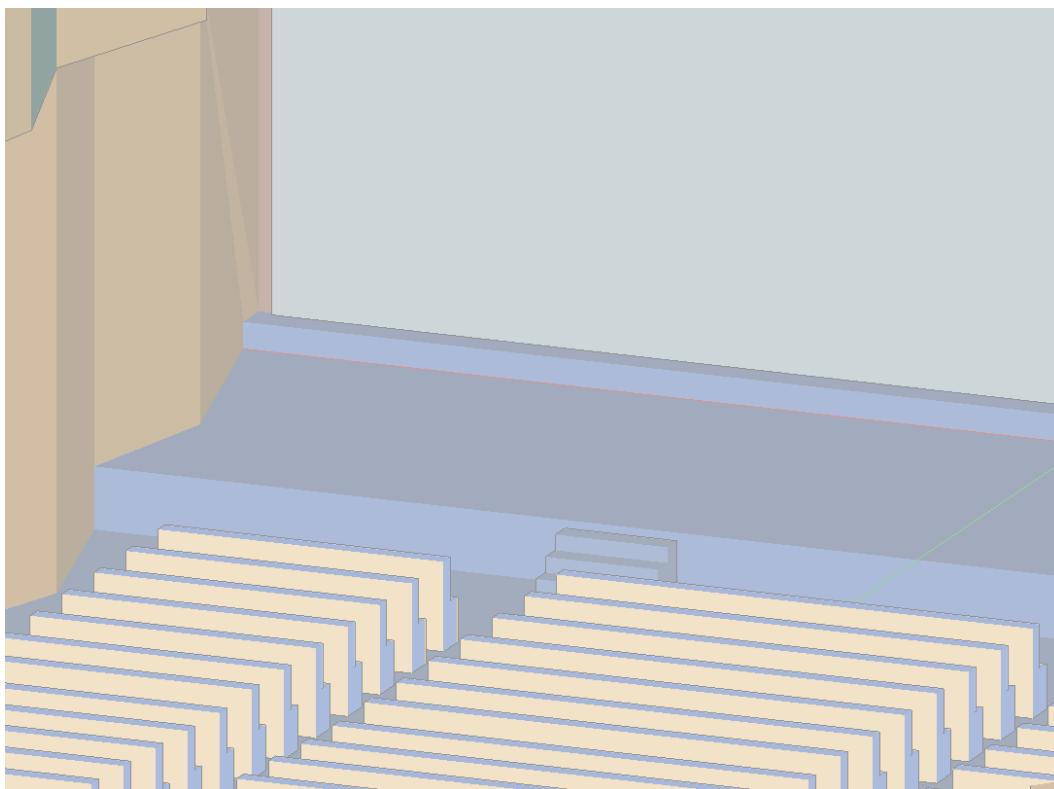


Figura 56. Vista desde platea hacia el escenario del modelo

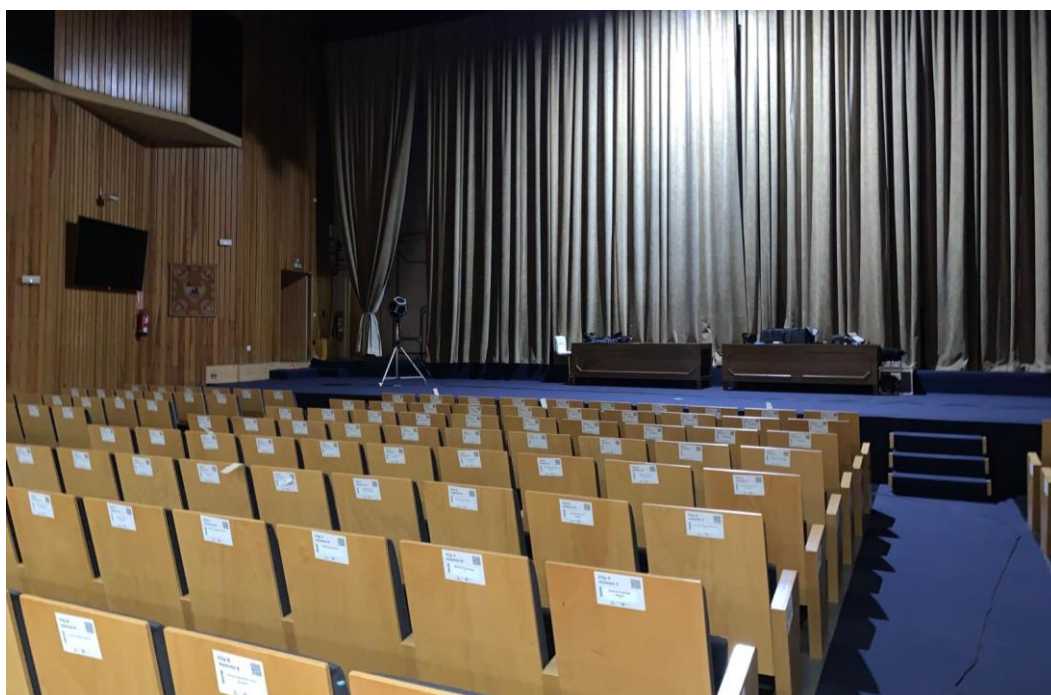


Figura 57. Vista desde platea hacia el escenario del auditorio real

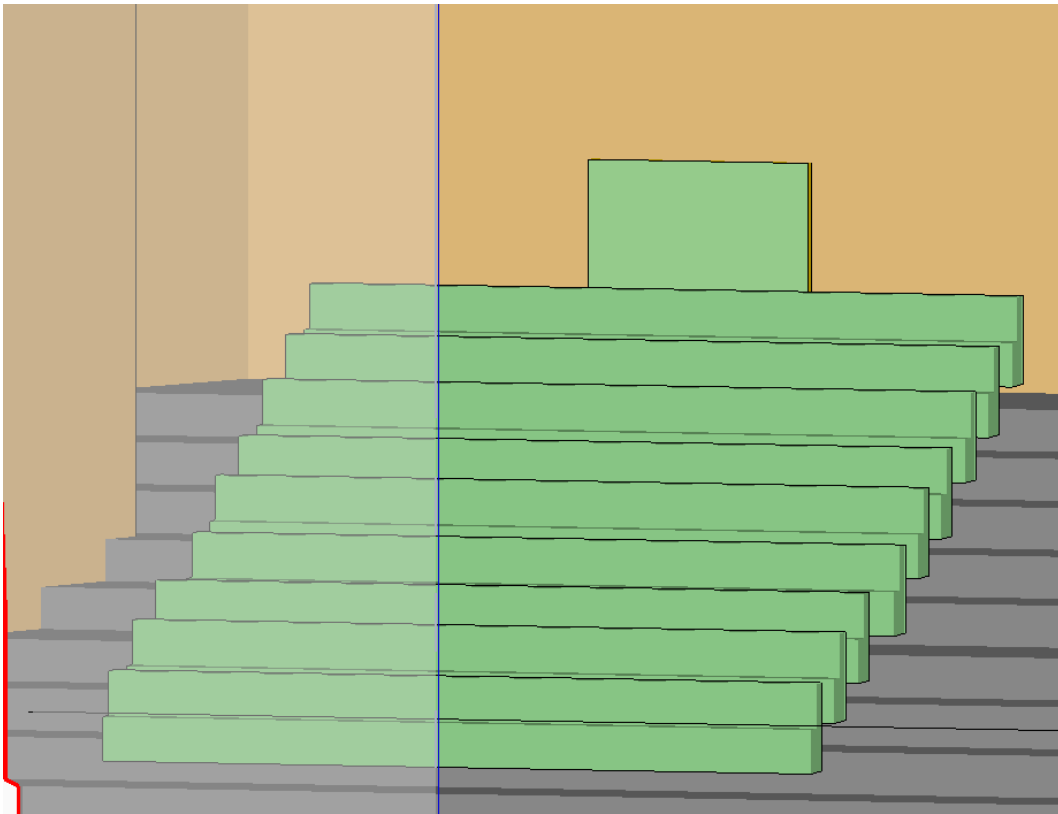


Figura 58. Vista de las butacas de planta 1 del modelo

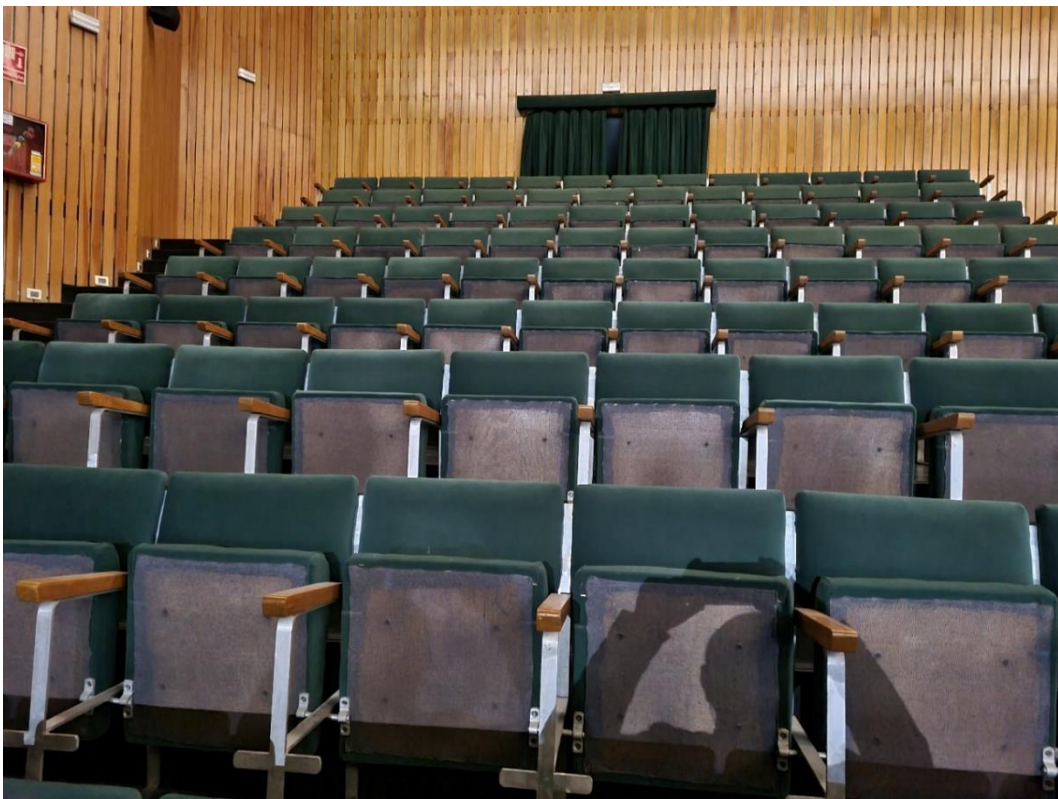


Figura 59. Vista de las butacas de planta 1 del auditorio real

6.2 Importación y Configuración del Modelo Geométrico a EASE

Tras finalizar el modelado del diseño en SketchUp, se procede a importación en EASE. En este software se realizará la simulación acústica para la validación del modelo.

El primer paso es crear un nuevo proyecto en EASE. Para ello, se importa el diseño de SketchUp guardado en la versión 7, lo que facilita su importación. Al hacerlo se despliega una ventana en la que se debe asociar un material específico para cada capa creada en de SketchUp como se muestra en la siguiente figura:

Tabla 26. Materiales importados a EASE

Wall Material	Used	Description	Path
090 butaca MTSEAT FAB, Full	Yes	FAB.WELL.UPOLST. SEATS UNOCCUP	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
001 à = 10%	Yes	10% Sound Absorbing	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
1855 Contrachapado de madera	Yes	Contrachapado de madera 25mm	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
180 Revestimiento de madera 1	Yes	Revestimiento de madera 1 Muy baja absorción	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
000 à = 0%	No	perfect reflector	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
156 Cortina Terciopelo Pesada	Yes	Heavyweight Drapery, 18 oz per sq/yd, draped to half area (2 ft of drapery to 1 ft of wall) ...	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
120 moqueta CARPT COMM, Full	Yes	COMMERCIAL GRADE CARPET	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
002 à = 20%	No	20% Sound Absorbing	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
003 à = 30%	Yes	30% Sound Absorbing	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
004 à = 40%	No	40% Sound Absorbing	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
005 à = 50%	No	50% Sound Absorbing	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
006 à = 60%	No	60% Sound Absorbing	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
007 à = 70%	No	70% Sound Absorbing	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
008 à = 80%	No	80% Sound Absorbing	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
009 à = 90%	No	90% sound absorbing	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
010 à = 100%	No	100% sound absorbing	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
030 125HZ PANEL Resonator, Full	No	125 Hz Helmholtz Resonator w/fg	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
031 200HZ PANEL Resonator, Full	No	200 Hz Helmholtz Resonator w/fgCreado APSResonador a 200Hz con caída hasta coefi...	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
032 250HZ PANEL Resonator, Full	No	250 Hz Helmholtz Resonator w/fg	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
033 250HZ PANEL Resonator, ModAPS	No	250 Hz Helmholtz Resonator w/fgcon incremento de absorción en alta frecuenciaMod APS	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
034 500HZ PANEL Resonator, Full	No	500 Hz Helmholtz Resonator w/fg	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
035 250HZ PANEL Resonator suave	No	250 Hz Helmholtz Resonator w/fgmodificación del 032 suavizando la resonancia a 250Hz...	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
035+1 250HZ PANEL Resonator suave	No	250 Hz Helmholtz Resonator w/fgmodificación del 032 suavizando la resonancia a 250Hz...	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
035+2 250HZ PANEL Resonator suave	No	250 Hz Helmholtz Resonator w/fgmodificación del 032 suavizando la resonancia a 250Hz...	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
035+3 250HZ PANEL Resonator suave	No	250 Hz Helmholtz Resonator w/fgmodificación del 032 suavizando la resonancia a 250Hz...	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
036 Resonador 315 Hz	No	Resonador de 315 Hz	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
037 160 Hz Panel Resonator	No	Techo Teatroronador suave a 160 Hz	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
038 200HZ PANEL Resonator, Full EMR	No	Modificado a partir Material T3 a 200 Hz EMR200 Hz Helmholtz Resonator w/fg con incre...	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
040 500HZ PANEL Resonator 2	No	Modificación 034Absorción máxima 0.3, 0.0 en baja frecuencia Factor de calidad bajMo...	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
060 Concrete or Cinder Block, Smooth Face, Generic	Yes	Cinder or Concrete blocks, smooth surface, unpainted1 Octave Data: 125Hz-4KHzData U...	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
061 Concrete or Cinder Block, Painted, Generic	No	Concrete Block or Cinder block Painted1 Octave Data: 125Hz-4KHzData From Sound Sy...	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
062 Concrete, Smooth Finish, Generic	No	Concrete wall or floor, smooth finish1 Octave Data: 125Hz-4KHzData Unattributed	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
063 Revriquo de cemento	Yes	Revriquo de cemento	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
063+1 Revriquo de cemento	No	Revriquo de cementocacile scattering s1	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
064 Concrete or Cinder Block, rough Face, Generic	No	Cinder or Concrete blocks, rough surface, unpaintedAbsorción alta1 Octave Data: 125Hz-4...	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
065 Concrete or Cinder Block, Smooth Face, Generic	No	Cinder or Concrete blocks, smooth surface, unpainted1 Octave Data: 125Hz-4KHzData U...	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
066 Concrete or Cinder Block, Smooth Face, Mod	No	Cinder or Concrete blocks, smooth surface, unpainted1 Octave Data: 125Hz-4KHzData U...	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
067 Concrete or Cinder Block, Smooth Face, Mod2	No	Cinder or Concrete blocks, smooth surface, unpainted1 Octave Data: 125Hz-4KHzData U...	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
068 variación 061	No	90% variación 21 Concreteamiento de la absorción a alta frecuencia y disminuye en baja fr...	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
069 Concrete or Cinder Block, rough Face, ModEMR	No	Modificado del Material 064 EMRCinder or Concrete blocks, rough surface, unpaintedAbs...	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
070 Concrete or Cinder Block, rough Face, Mod2 JIGA	No	Modificado del Material 063 JIGACinder or Concrete blocks, rough surface, unpaintedAbs...	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
071 Concrete or Cinder Block, Smooth Face, mod NPR	No	Modificado del 060 NPRDisminuir la absorción hasta 500 Hz	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
072 Concrete or Cinder Block, Smooth Face, Generic mod NPR	No	Modificado del 065 NPRDisminuir la absorción hasta 250Hz	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
073 suelo cemento liso mod JIGA	No	variación 068disminuye absorción en baja frecuencia < 160 Hz, luego constante 0.02mod J...	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
074 Concrete or Cinder Block, Smooth Face, mod JIGA	No	Modificado del 071 JIGAigual que 071 sumando 0.12 de absorción en todas las bandas	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
075 Bloque Cemento liso, Mod JIGA	No	Modificado de 0.665Juma 0.12 a todas las frecuencias	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
091 Butaca tapizada terciopelo	Yes	Butaca tapizada terciopelo	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
092 Butaca terciopelo 2	No	Butaca terciopelo 2	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M
093 Butaca terciopelo terciopelo 3	No	Butaca terciopelo terciopelo 3	C:\USERS\PUESTO\DOWNLOADS\28\05\EASE21\05\EASE\EASE\ARCHIVE\AUDITORIO CCP CERRADO V7 M

Se dispone de una gran lista de materiales que se han ido recopilando a lo largo de los años y son típicos en este tipo de recintos. Para cargar los materiales, se pulsa el botón "Assign from File".

Con la ayuda de las notas y fotografías tomadas durante la visita al auditorio, se realiza una asignación de los materiales a cada capa y se completa la información requerida por el software como se muestra a continuación:

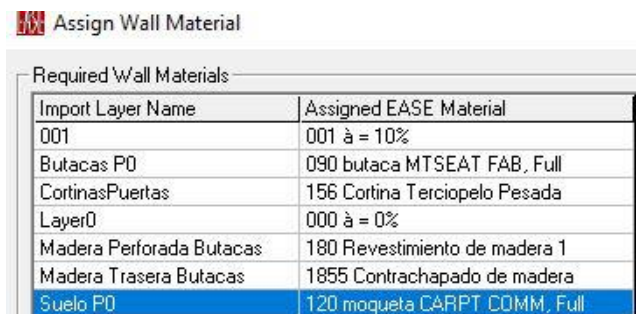


Figura 60. Asignación inicial de materiales a las capas en EASE

Posteriormente se modifican los materiales para ajustarlos lo máximo posible a la realidad.

En la siguiente tabla se muestran las capas creadas en SketchUp junto el material asignado a cada una de ellas y el número identificativo del material en EASE asignado al comienzo de la configuración.

Tabla 27. Asignación inicial de materiales a las capas en EASE

Nombre Capa	Material	Identificación Material EASE
Pared	Madera	187
Pared Fondo	Hormigón	63
Cabinas	Vidrio	360
Telón \$ Telón	Tejido	156
Escenario	Moqueta	120
Suelo P0	Moqueta	120
Suelo P1	Linóleo	121
Butacas P0 \$ 001	Tejido	90
Madera Perforada Butacas \$ 001	Madera Perforada	180
Madera Trasera Butacas \$ 001	Madera	1855
Butacas P1	Tejido	91
Techo Anfiteatro	Madera	3
Puertas P0	Madera	330
CortinasPuertas \$ CortinasPuertas	Tejido	156
Ladrillo Pintado P1	Ladrillo	60
Techo Hormigón	Hormigón	63
Techo Cristal	Cristal	360
Escalones Escenario	Moqueta	2
Antepecho 1	Madera	182

Al completar la información de esta tabla, se obtiene el modelo geométrico diseñado en EASE que se muestra en las siguientes figuras.

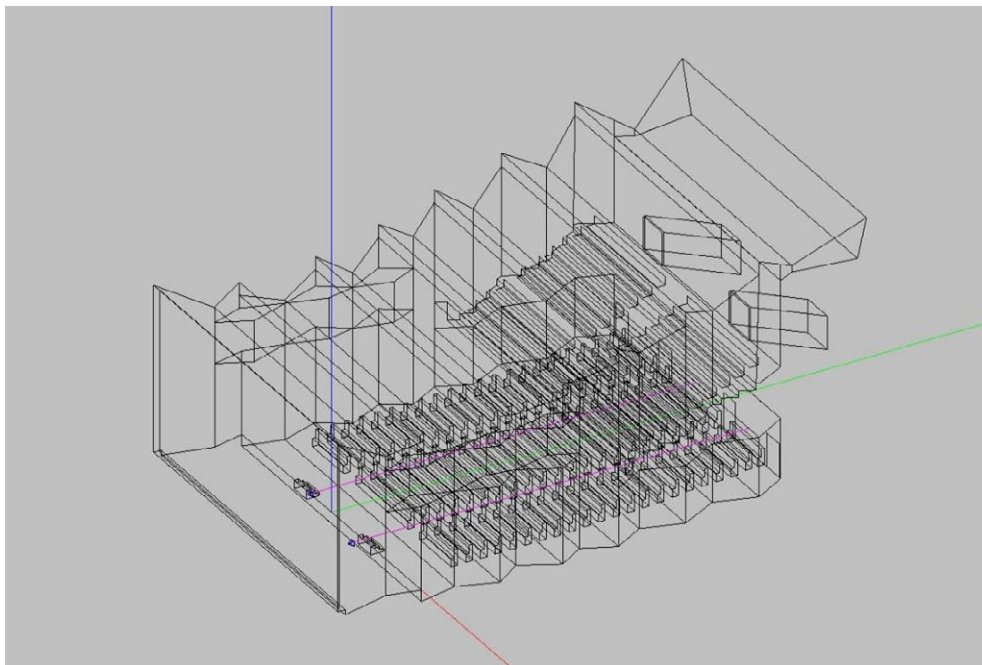


Figura 61. Modelo geométrico 3D en EASE

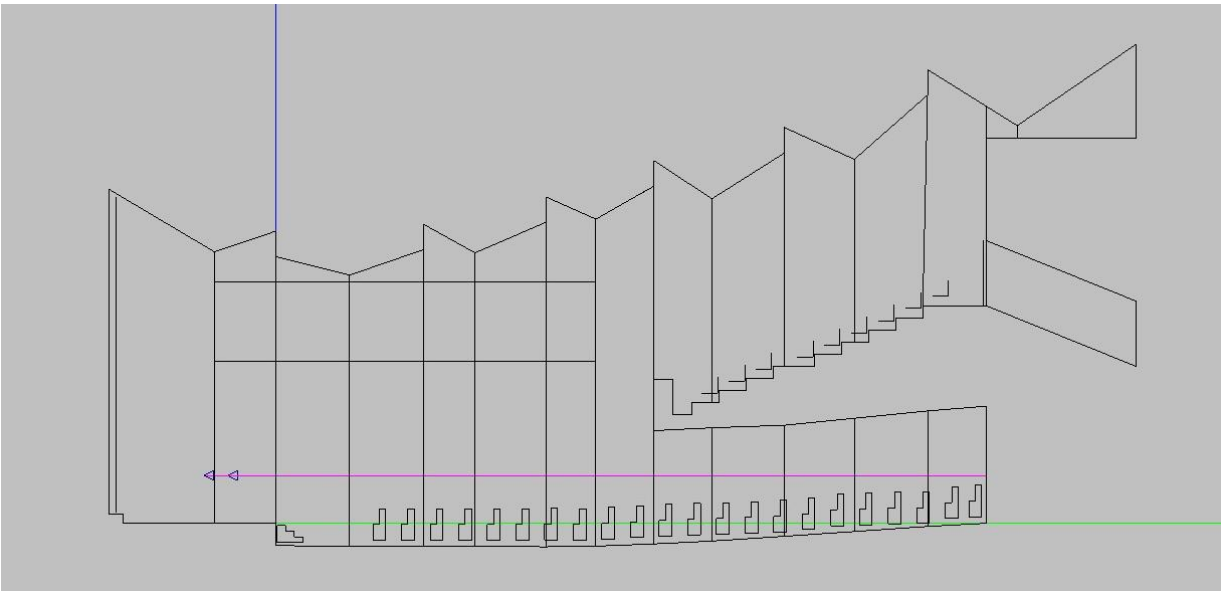


Figura 62. Alzado lateral del modelo geométrico en EASE

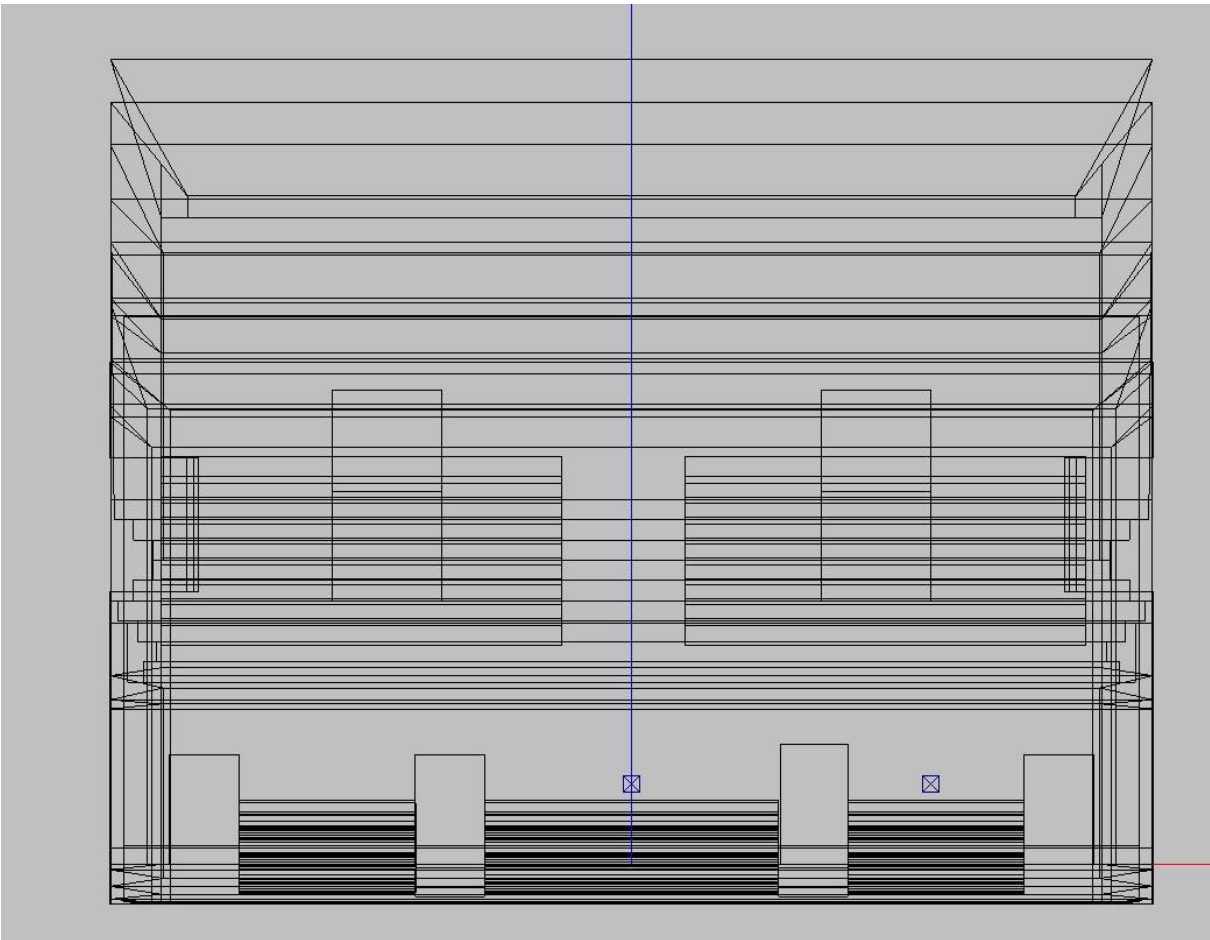


Figura 63. Sección Transversal del modelo geométrico en EASE

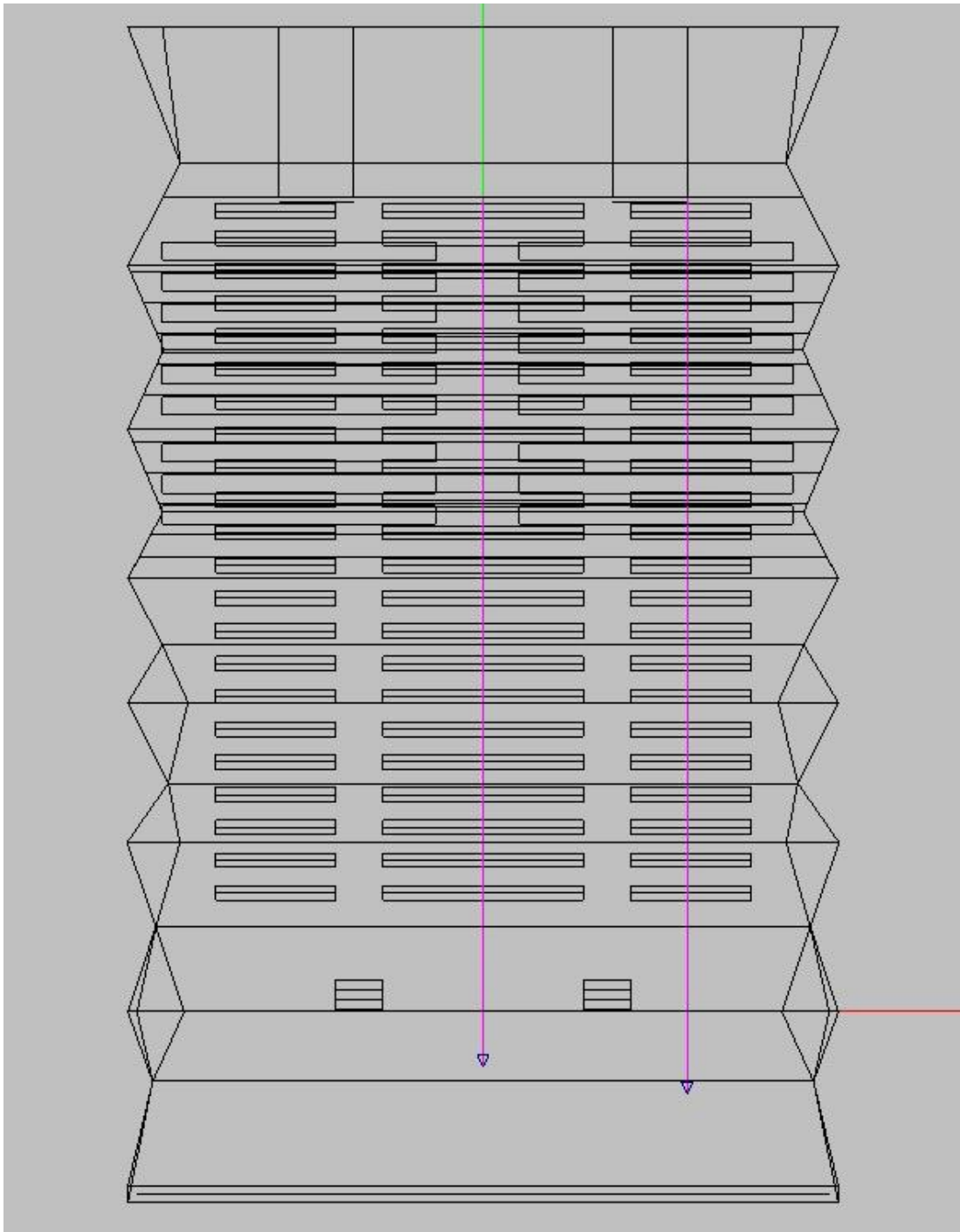


Figura 64. Vista en planta del modelo geométrico en EASE

Dentro del proyecto generado, con la opción *Edit* → *Room Data*, se debe desactivar la opción de *Room Open* para que el programa detecte cualquier posible agujero. Posteriormente, se realiza una comprobación con la opción *Check Data*, que revisa si hay errores en el proyecto para poder continuar. En este caso, como existen superficies abiertas, aparece un mensaje indicando que debe realizarse una revisión.

La opción *Check Holes* muestra todas las superficies de la sala que podrían causar errores. En este caso, aparecen todas las superficies de doble cara (butacas y cortinas). Para solucionar este problema, en el menú de caras del proyecto se debe marcar que se trata de una superficie de dos caras marcando la opción *2-Fold*. A continuación, se asigna un material a la cara externa, *Face Material*, y otro a la cara interna de la superficie, *Rear Material*, ya que ambas

caras afectan a la acústica de la sala. Este material puede ser el mismo si se trata de cortinas o separadores, o distinto en el caso del interior de las butacas.

#	G	Item	Image	Vis	Img	Face Material	Color	2-Fold	Rear Material	Rear Clr.	Face Texture	Rear Texture	Surface [m²]	Shading	Locked	Sides
1		F1	-	Yes	Yes	120 moqueta CAR...	8782338	No		16777215	WALL	WALL	40.84	No	No	4
2		F2	-	Yes	Yes	187 Paneles sobr...	2648484	No		16777215	WALL	WALL	8.49	Yes	No	4
3		F3	-	Yes	Yes	001 à = 10%	15889214	Yes	090 butaca MTSE...	15889214			0.66	Yes	No	4
4		F4	-	Yes	Yes	001 à = 10%	15889214	Yes	090 butaca MTSE...	15889214	WALL	WALL	0.66	Yes	No	4
5		F5	-	Yes	Yes	001 à = 10%	6859734	Yes	1855 Contrachap...	6859734			3.30	Yes	No	4
6		F6	-	Yes	Yes	001 à = 10%	15889214	Yes	090 butaca MTSE...	15889214			1.65	Yes	No	4
7		F7	-	Yes	Yes	001 à = 10%	15889214	Yes	090 butaca MTSE...	15889214			0.30	Yes	No	6
8		F8	-	Yes	Yes	001 à = 10%	15889214	Yes	090 butaca MTSE...	15889214			0.30	Yes	No	6
9		F9	-	Yes	Yes	001 à = 10%	15889214	Yes	090 butaca MTSE...	15889214			0.30	Yes	No	6
10		F10	-	Yes	Yes	001 à = 10%	15889214	Yes	090 butaca MTSE...	15889214			0.30	Yes	No	6
11		F11	-	Yes	Yes	001 à = 10%	6859734	Yes	1855 Contrachap...	6859734			3.30	Yes	No	4
12		F12	-	Yes	Yes	001 à = 10%	37595	Yes	180 Revestment...	37595			1.65	Yes	No	4
13		F13	-	Yes	Yes	001 à = 10%	15889214	Yes	090 butaca MTSE...	15889214			1.65	Yes	No	4
14		F14	-	Yes	Yes	001 à = 10%	15889214	Yes	090 butaca MTSE...	15889214			0.66	Yes	No	4
15		F15	-	Yes	Yes	001 à = 10%	15889214	Yes	090 butaca MTSE...	15889214			0.66	Yes	No	4
16		F16	-	Yes	Yes	001 à = 10%	15889214	Yes	090 butaca MTSE...	15889214			0.30	Yes	No	6
17		F17	-	Yes	Yes	001 à = 10%	15889214	Yes	090 butaca MTSE...	15889214			0.30	Yes	No	6
18		F18	-	Yes	Yes	001 à = 10%	6859734	Yes	1855 Contrachap...	6859734			3.30	Yes	No	4
19		F19	-	Yes	Yes	001 à = 10%	37595	Yes	180 Revestment...	37595			1.65	Yes	No	4
20		F20	-	Yes	Yes	001 à = 10%	15889214	Yes	090 butaca MTSE...	15889214			1.65	Yes	No	4
21		F21	-	Yes	Yes	001 à = 10%	15889214	Yes	090 butaca MTSE...	15889214			0.66	Yes	No	4
22		F22	-	Yes	Yes	001 à = 10%	15889214	Yes	090 butaca MTSE...	15889214			0.66	Yes	No	4
23		F23	-	Yes	Yes	001 à = 10%	6859734	Yes	1855 Contrachap...	6859734			5.50	Yes	No	4
24		F24	-	Yes	Yes	001 à = 10%	15889214	Yes	090 butaca MTSE...	15889214			0.30	Yes	No	6
25		F25	-	Yes	Yes	001 à = 10%	15889214	Yes	090 butaca MTSE...	15889214			0.30	Yes	No	6
26		F26	-	Yes	Yes	001 à = 10%	37595	Yes	180 Revestment...	37595			2.75	Yes	No	4
27		F27	-	Yes	Yes	001 à = 10%	15889214	Yes	090 butaca MTSE...	15889214			2.75	Yes	No	4
28		F28	-	Yes	Yes	001 à = 10%	15889214	Yes	090 butaca MTSE...	15889214			1.10	Yes	No	4
29		F29	-	Yes	Yes	001 à = 10%	15889214	Yes	090 butaca MTSE...	15889214			1.10	Yes	No	4
30		F30	-	Yes	Yes	156 Cortina Tercio...	3492660	Yes	156 Cortina Tercio...	14079702	WALL	WALL	4.20	Yes	No	4
31		F31	-	Yes	No	156 Cortina Tercio...	3492660	Yes	156 Cortina Tercio...	3197647	WALL	WALL	188.10	Yes	No	4
32		F32	-	Yes	Yes	156 Cortina Tercio...	3492660	Yes	156 Cortina Tercio...	3703361			4.20	Yes	No	4
33		F33	-	Yes	Yes	001 à = 10%	15889214	Yes	090 butaca MTSE...	15889214			0.66	Yes	No	4
34		F34	-	Yes	Yes	120 moqueta CAR...		No		14079702	WALL	WALL	34.55	No	No	12
35		F35	-	Yes	Yes	002 à = 20%		No		14079702			0.35	Yes	No	4
36		F36	-	Yes	Yes	002 à = 20%		No		14079702			0.28	Yes	No	8
37		F37	-	Yes	Yes	002 à = 20%		No		14079702			0.35	Yes	No	4
38		F38	-	Yes	Yes	002 à = 20%		No		14079702			0.35	Yes	No	4
39		F39	-	Yes	Yes	002 à = 20%		No		14079702			0.28	Yes	No	8
40		F40	-	Yes	Yes	002 à = 20%		No		14079702			0.23	Yes	No	4
41		F41	-	Yes	Yes	002 à = 20%		No		14079702			0.68	Yes	No	4
42		F42	-	Yes	Yes	002 à = 20%		No		14079702			0.23	Yes	No	4
43		F43	-	Yes	Yes	002 à = 20%		No		14079702			1.05	Yes	No	4
44		F44	-	Yes	Yes	002 à = 20%		No		14079702			0.23	Yes	No	4
45		F45	-	Yes	Yes	002 à = 20%		No		14079702			0.35	Yes	No	4
46		F46	-	Yes	Yes	002 à = 20%		No		14079702			0.28	Yes	No	8
47		F47	-	Yes	Yes	002 à = 20%		No		14079702			0.35	Yes	No	4
48		F48	-	Yes	Yes	002 à = 20%		No		14079702			0.35	Yes	No	4
49		F49	-	Yes	Yes	002 à = 20%		No		14079702			0.28	Yes	No	8
50		F50	-	Yes	Yes	002 à = 20%		No		14079702			0.23	Yes	No	4
51		F51	-	Yes	Yes	002 à = 20%		No		14079702			0.68	Yes	No	4
52		F52	-	Yes	Yes	002 à = 20%		No		14079702			0.23	Yes	No	4
53		F53	-	Yes	Yes	002 à = 20%		No		14079702			1.05	Yes	No	4
54		F54	-	Yes	Yes	002 à = 20%		No		14079702			0.23	Yes	No	4

Figura 65. Asignación de Materiales en las Caras

Otro error detectado en el proyecto es que algunas de las caras del recinto se han ‘roto’ al importar el modelo. Para solucionarlo se han vuelto a dibujar en EASE desde cero.

Una vez se ha completado este proceso con todas las caras y vértices, se vuelve a verificar la existencia de agujeros utilizando la opción *Check Holes*. Si no se encuentra ningún problema, esto indica que no hay agujeros en el modelo.

Finalmente, se ubican en el modelo todas las posiciones de micrófono y fuente en los mismos puntos en los que se midió *in situ* en el auditorio. Se selecciona la fuente sonora *Sphere*, simulando ser la fuente dodecaédrica utilizada en las mediciones *in situ*. Los micrófonos se colocan en las coordenadas anotadas el día de las mediciones, y se giran el ángulo necesario para que estén orientadas y direccionadas hacia la posición de fuente F01.

7. Validación del Modelo

Una vez se ha importado el modelo en EASE, se ha comprobado que el recinto está completamente cerrado y se han elegido materiales similares a los reales, se procede con la validación del modelo. Esta se lleva a cabo en tres fases, utilizando el promedio de los valores medidos *in situ* y el de los simulados. Se llevan a cabo las configuraciones y simulaciones acústicas necesarias, analizando sus resultados, procesándolos y recalculándolos para conseguir que se ajusten lo más posible a la realidad del recinto.

El objetivo de la validación es obtener la menor distancia posible, en términos de la métrica JND explicada anteriormente, entre los parámetros medidos en el auditorio y los simulados en el modelo de EASE.

7.1 Fase 1. Ajuste del Tiempo de reverberación inicial

Para comenzar con la validación es esencial ajustar el tiempo de reverberación de la sala, calculado por aproximación de la acústica estadística mediante la expresión de Eyring. En el cálculo del tiempo de reverberación influyen el volumen y la superficie de la sala, y los coeficientes de absorción de los materiales. Debido a que el modelo ha sido diseñado en SketchUp, el volumen y la superficie de la sala no se modificarán, por lo que, será necesario ir modificando los materiales asignados a las capas del modelo para ajustar el tiempo de reverberación.

Como ya se ha mencionado, al exportar el modelo a EASE se le asignan unos primeros materiales que no se corresponden exactamente con los reales en la sala, pero que representan una primera aproximación. El tiempo de reverberación con estos primeros materiales se obtiene con la herramienta *Optimize RT* y se representa en la siguiente figura:

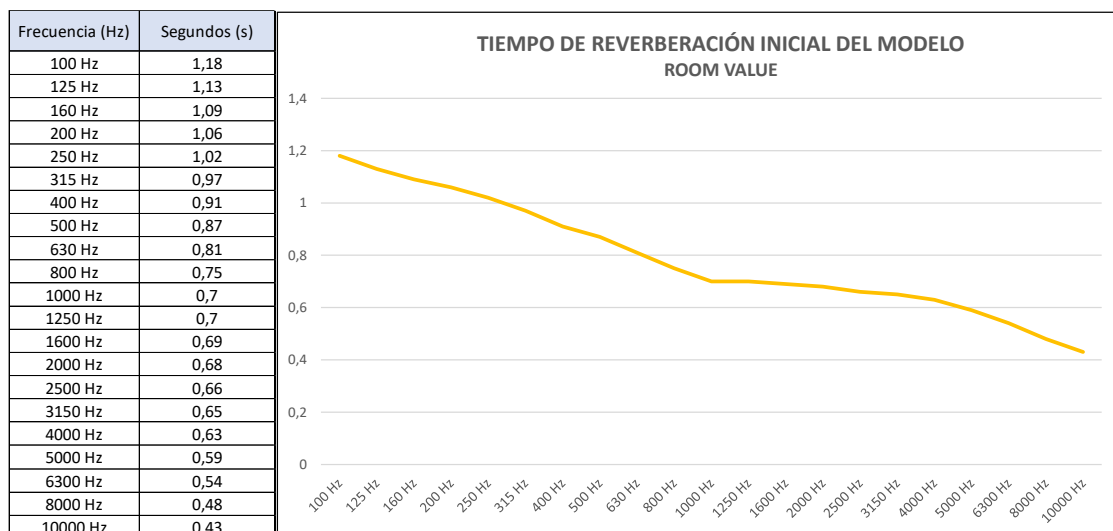


Figura 66. Tiempo de Reverberación con materiales iniciales

Para poder comparar los tiempos de reverberación, medido y simulado, la opción *Edit Table* permite introducir en el campo *Target RT* los valores del Tiempo de Reverberación medido *in situ* (representado con una curva gris en la siguiente figura):

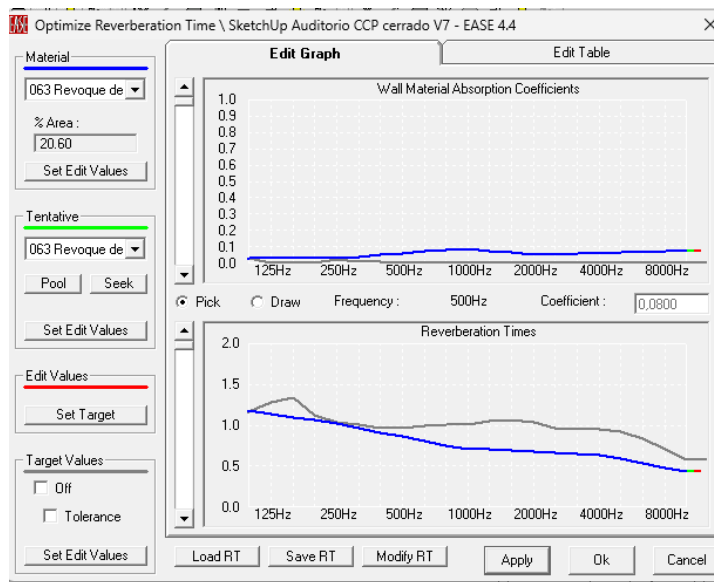


Figura 67. Comparación del tiempo de reverberación inicial.

El campo *Room Value* corresponde al tiempo de reverberación actual de la sala, representado por la curva azul, y el campo *Tentative Value*, que se mostraría con una curva verde, representa una previsualización del Tiempo de Reverberación en el caso de que se modificaran los coeficientes de absorción de algún material.

En la figura anterior se muestran las curvas de los coeficientes de absorción de los materiales de la sala y de los tiempos de reverberación de esta. Las curvas azules representan los valores de la simulación y las curvas grises de lo medido *in situ* en el auditorio.

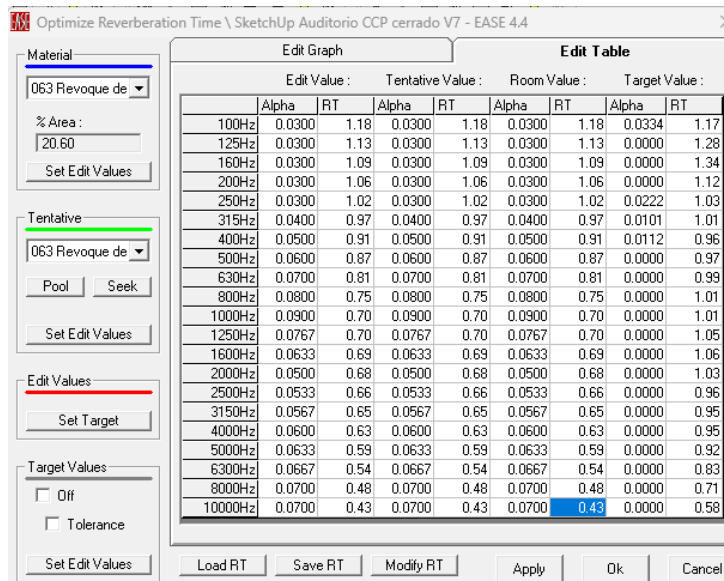


Figura 68. Valores del tiempo de reverberación inicial.

El objetivo final es conseguir que la curva azul (simulada) del tiempo de reverberación se asemeje lo máximo posible a la curva gris (valores medidos). Igualmente, durante el proceso de ajuste, se intenta que la curva simulada quede ligeramente por debajo de la curva del Tiempo de Reverberación medido en la sala. Esto se debe a que se ha comprobado, en simulaciones de otros modelos, que EASE tiende a sobreestimar el Tiempo de Reverberación al utilizar la acústica geométrica para el cálculo. Por ello, es necesario buscar un equilibrio y

lograr que los materiales finalmente escogidos den lugar a que el tiempo de reverberación simulado sea algo menor que el tiempo de reverberación medido en el recinto.

7.2 Fase 2. Ajuste de materiales y simulaciones en baja resolución

En la siguiente fase, en la que se van modificando los materiales hasta lograr el objetivo final, las simulaciones se realizan de una manera más sencilla, con baja resolución tanto para la acústica estadística (STD) como para la geométrica (AURA), para agilizar así el proceso. Únicamente se compararán los parámetros energéticos C50 y C80 y los temporales RT y T30. En cada una de las modificaciones se obtendrá en métrica JND la distancia entre los parámetros medidos y los simulados, hasta que se consiga el resultado óptimo para la validación del modelo.

En la siguiente tabla se observan las diferencias, usando la métrica JND, entre los valores medidos y los simulados procesados con la configuración de materiales inicial. De esta diferencia se decide que, principalmente, hay que lograr un equilibrio entre los parámetros temporales, es decir, entre T30 Aura (teoría geométrica) y RT Standard (teoría estadística), ya que resultan muy distantes en un comienzo.

Tabla 28. Métrica JND con los materiales iniciales – Modificación 0

MODIFICACIÓN 0										
Frecuencias [Hz]	C50 Standard	C50 Aura	C80 Standard	C80 Aura	T30 Aura	RT Standard				
100 Hz	1	3	1	3	5	1				
125 Hz	3	1	2	1	4	3				
160 Hz	4	1	4	1	2	4				
200 Hz	3	1	3	1	7	2				
250 Hz	3	1	3	1	8	1				
315 Hz	2	2	2	2	8	1				
400 Hz	1	2	2	2	8	2				
500 Hz	1	2	2	2	8	3				
630 Hz	2	2	2	2	6	4				
800 Hz	2	2	3	2	4	6				
1000 Hz	2	2	3	1	3	7				
1250 Hz	3	1	4	1	2	7				
1600 Hz	2	2	3	1	1	7				
2000 Hz	2	2	3	1	2	7				
2500 Hz	2	1	3	1	4	7				
3150 Hz	3	1	3	1	3	7				
4000 Hz	3	1	3	1	4	7				
5000 Hz	2	2	3	2	2	8				
6300 Hz	1	2	2	2	1	7				
8000 Hz	1	3	1	3	1	7				
10000 Hz	1	3	1	3	2	6				
Cantidad por escalón	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
% sobre Total	34	38	26	9	1	3	10	5	0	0
% acumulado	27%	57%	78%	85%	86%		8%	4%	0%	0%

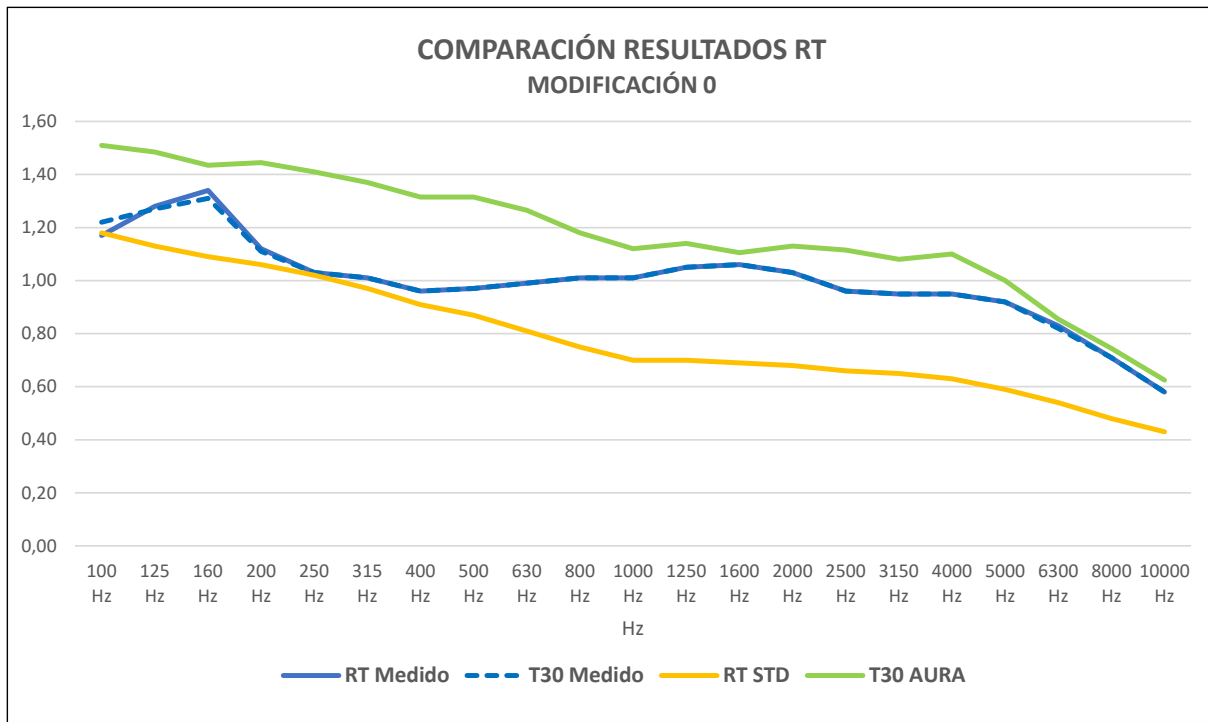


Figura 69. Comparación Resultados TR – Modificación 0

Para poder ajustar el tiempo de reverberación y validar el modelo, EASE solo permite modificar la geometría de la sala y la absorción de los materiales asignados a cada superficie del recinto. Debido a que el diseño no se va a modificar, se ajustará el tiempo de reverberación cambiando los materiales de las capas del recinto y buscando los coeficientes de absorción más adecuados, para obtener el tiempo de reverberación más parecido al medido *in situ*, intentando emplear materiales que se asemejen a los que presenta la sala real.

Para influir de manera global en la sala, es necesario trabajar con materiales que cubran una superficie significativa del recinto. De lo contrario, los cambios en la sala serán insignificantes y la respuesta acústica del recinto se mantendrá prácticamente igual.

En el caso de este recinto, las capas de mayor superficie del mismo material son las paredes de madera, así como la moqueta del suelo de la planta 0 y del escenario. El proceso del cambio de materiales se divide en tres fases de modificación que se detallan a continuación.

7.2.1 Modificación 1

Debido a que la superficie de mayor área con el mismo material está representada por las paredes del recinto, este será el primer material a modificar. En un comienzo se le asigna un material de madera, el 187 en la base de datos. A causa de la forma de las paredes laterales del auditorio, se crea un material partiendo de la madera elegida, pero modificándolo de forma que se comporte como un resonador a las frecuencias de 100 Hz y 250 Hz, consiguiendo que la curva del tiempo de reverberación se parezca más a la medida (la estructura real de las paredes del recinto que detrás de la madera en listones se encuentra una cámara de aire de tamaño variable hasta la pared estructural de la sala; esta cámara de aire varía tanto en profundidad como en altura lo que suponemos que da origen a las dos zonas de absorción sonora que presenta el tiempo de reverberación medido *in situ*). En la figura 70, se representa

el material inicial y en la figura 71 el material creado y asignado nuevamente a las paredes del auditorio.

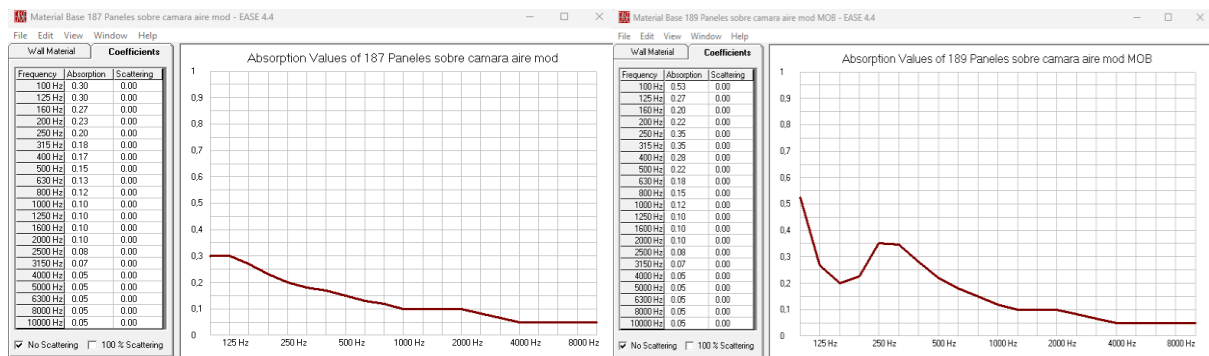


Figura 70. Material Inicial y Modificado Paredes Madera

En la siguiente figura, la curva verde del gráfico superior representa los coeficientes de absorción del material modificado. De esta manera, la curva verde del tiempo de reverberación (gráfica inferior) se asemeja bastante más a la curva gris (tiempo de reverberación medido), pero quedando por debajo de ésta como se ha explicado anteriormente. La curva azul que representa el tiempo de reverberación con la madera de la modificación 0 asignada inicialmente, es sustituida finalmente por la nueva curva diseñada. Tras esta primera modificación, se consigue un mayor equilibrio entre el tiempo de reverberación calculado según la teoría geométrica y el calculado según la estadística. En las siguientes figuras se muestran los valores finales de tiempo de reverberación.

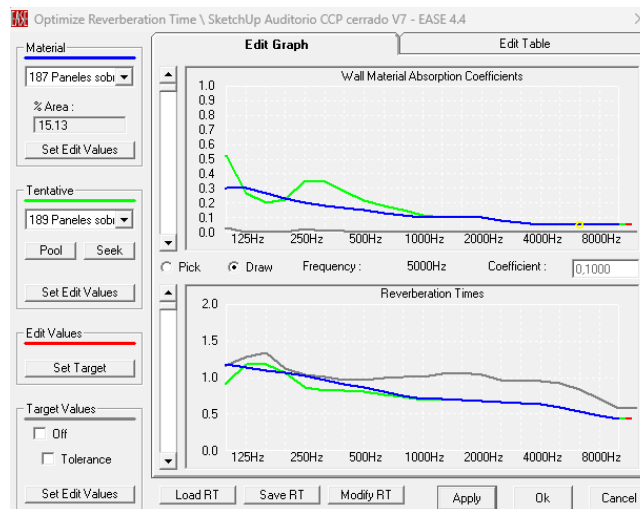


Figura 71. Curva Tiempo de Reverberación – Modificación 1

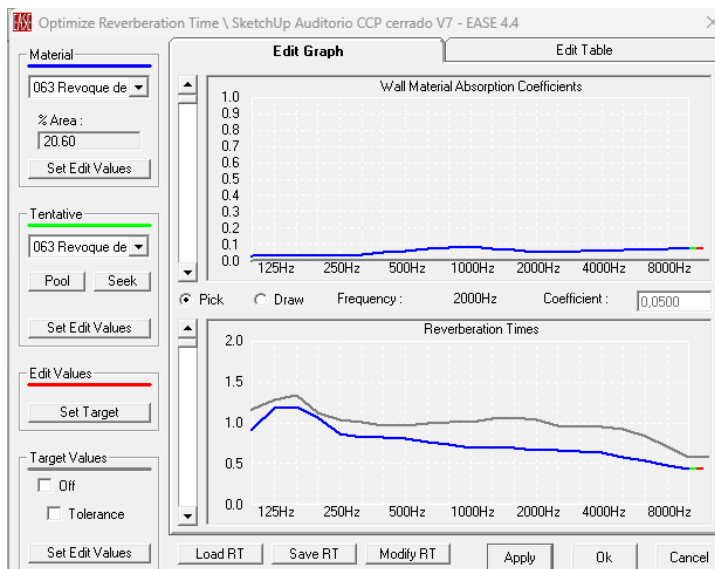


Figura 72. Comparación del tiempo de reverberación final.

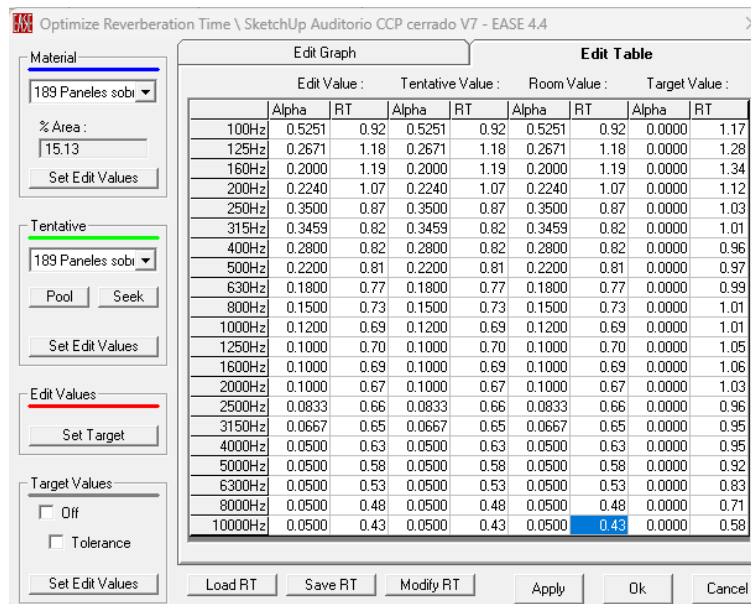


Figura 73. Valores del tiempo de reverberación final.

Además, respecto a los parámetros energéticos, la métrica JND disminuye en la mayoría de los casos consiguiendo un mejor resultado y disminuyendo el número de escalones.

Tabla 29. Métrica JND con los materiales iniciales – Modificación 1

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cantidad por escalón	38	31	30	10	4	2	10	1	0	0
% sobre Total	30%	25%	24%	8%	3%	2%	8%	1%	0%	0%
% acumulado	30%	55%	79%	87%	90%					

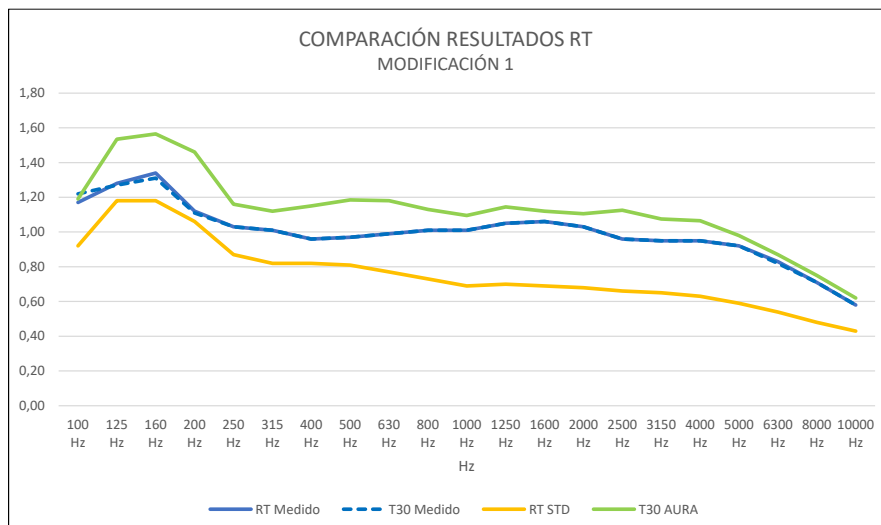


Figura 74. Comparación Resultados TR – Modificación 1

De todas formas, se procede a realizar una segunda modificación para intentar conseguir un resultado óptimo.

7.2.2 Modificación 2

La segunda superficie de mayor extensión dentro del auditorio está representada por la moqueta del suelo de la planta 0 y del escenario, por lo que va a ser el siguiente material a modificar.

La moqueta escogida en primer momento es muy absorbente, por lo que se va a cambiar por una que absorba un poco menos a medias y altas frecuencias, para conseguir aumentar el tiempo de reverberación en ese intervalo, y obtener una curva más parecida a la del tiempo de reverberación medido.

Debido a que en la base de datos no se dispone de moquetas menos absorbentes, se procede a modificar la moqueta inicial, denominada 120 y representada en la siguiente figura, reduciendo los coeficientes de absorción a medias y altas frecuencias, como se muestra en la figura 77.

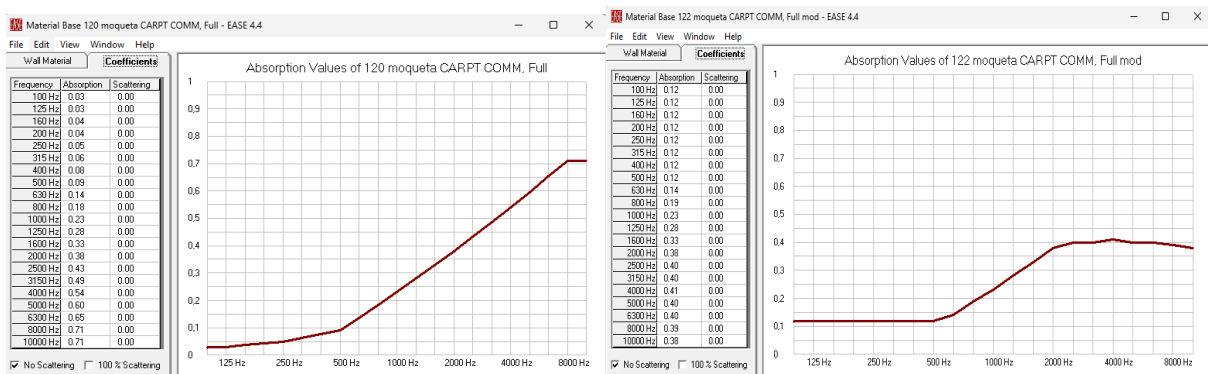


Figura 75. Material Inicial y Modificado de Moqueta Suelo

En esta fase también se realizan otros dos cambios, que tienen una influencia muy limitada en el tiempo de reverberación de la sala, ya que los materiales sustituidos cubren zonas con una superficie muy pequeña dentro del recinto. Por un lado, a las escaleras de subida al escenario se les asigna el material nuevo diseñado para el suelo y el escenario, ya que antes tenía asignado un material muy poco absorbente. Y por otro, se asigna un material acústico al techo del anfiteatro. Tras realizar estos cambios se obtienen los resultados que se muestran en la siguiente tabla, en la que se observa que a frecuencias altas el T30 mejora, pero el RT empeora notablemente, desequilibrando el balance entre los tiempos de reverberación calculados mediante la teoría geométrica y estadística.

Tabla 30. Métrica JND con los materiales iniciales – Modificación 2

MODIFICACIÓN 2										
Frecuencias [Hz]	C50 Standard	C50 Aura	C80 Standard	C80 Aura	T30 Aura	RT Standard				
100 Hz	1	1	2	1	1	6				
125 Hz	3	1	2	1	5	4				
160 Hz	3	1	3	1	4	5				
200 Hz	3	1	3	1	7	3				
250 Hz	4	3	4	2	4	5				
315 Hz	3	1	3	1	3	5				
400 Hz	2	1	2	1	4	4				
500 Hz	2	2	2	1	5	5				
630 Hz	2	1	3	1	4	6				
800 Hz	2	1	3	1	3	7				
1000 Hz	2	2	3	1	2	7				
1250 Hz	3	1	4	1	2	8				
1600 Hz	2	2	3	2	2	8				
2000 Hz	2	2	3	1	2	8				
2500 Hz	2	1	3	1	4	7				
3150 Hz	3	1	3	1	4	7				
4000 Hz	3	1	3	1	3	7				
5000 Hz	2	2	3	2	2	7				
6300 Hz	1	3	2	3	1	6				
8000 Hz	1	3	1	3	1	5				
10000 Hz	1	3	1	3	1	4				
Cantidad por escalón	37	27	30	12	7	3	7	3	0	0
% sobre Total	29%	21%	24%	10%	6%	2%	6%	2%	0%	0%
% acumulado	29%	51%	75%	84%	90%					

7.2.3 Modificación 3

Al empeorar el resultado con la segunda modificación, se decide volver hacia atrás y mantener la primera moqueta escogida (número 120) en el suelo de la planta 0 y de las escaleras del escenario, es decir, sin modificar los coeficientes de absorción de ninguna frecuencia, y reasignar al techo del anfiteatro el material que tenía al comienzo, el cual absorbe al 40% en todas las frecuencias.

Tras las pruebas y simulaciones realizadas, los únicos cambios realizados finalmente, respecto a la configuración inicial de asignación de materiales a las superficies son:

- Modificación del material de las paredes de madera, simulando dos resonadores con el nuevo material creado (modificación 1).
- Modificación de la asignación del material de las escaleras de escenario, cambiándolo por la moqueta 120, también asignada al suelo y escenario.

Se decide no realizar más modificaciones, debido a que el resto de las superficies, no tienen un área suficientemente extensa como para que un cambio de material afecte notablemente al tiempo de reverberación.

Finalmente se obtienen los siguientes resultados con el mejor balance posible entre T30 y RT, y unos valores de la métrica JND bastante aceptables para los parámetros energéticos:

Tabla 31. Métrica JND con los materiales iniciales – Modificación 3

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cantidad por escalón	38	31	30	10	4	2	10	1	0	0
% sobre Total	30%	25%	24%	8%	3%	2%	8%	1%	0%	0%
% acumulado	30%	55%	79%	87%	90%					

Una vez finalizado el proceso de asignación de materiales, es el turno de asignar la propiedad de *scattering* a aquellas superficies rugosas o irregulares. Debido a que el auditorio de la ETSCCP no dispone de decoración, ni de ninguna superficie circular o fuera de lo común, no es necesario aplicar *scattering* a ninguna cara.

7.3 Fase 3. Simulación en alta resolución de todos los parámetros acústicos

La fase 3 de la validación comienza una vez que se ha decidido la asignación definitiva de los materiales en la fase anterior. En esta fase se simulan todos los parámetros de estudio con mayor resolución, tanto por el método *Standard Mapping* (acústica estadística) como por *AURA Mapping* (acústica geométrica).

Para poder obtener los mapas, en el menú de *Mapping* se abre la ventana con las opciones de cálculo, Figura 78. A partir de ese momento, se escoge la fuente con la que se simula el mapa, F01 o F02; las posiciones de micrófono en las que se quiere medir, escogiendo la opción de todas; y los parámetros y las frecuencias que se quieren obtener, Figura 79.

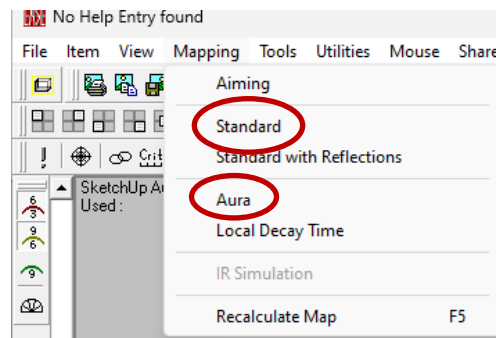


Figura 76. Herramienta de mapping en EASE

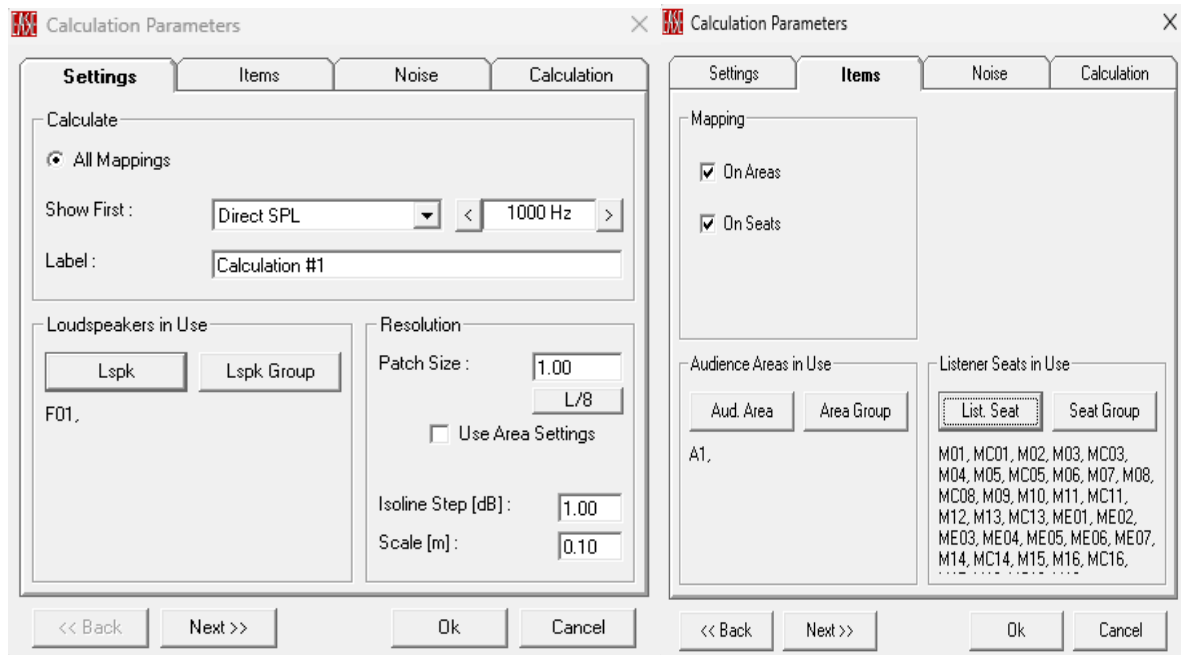
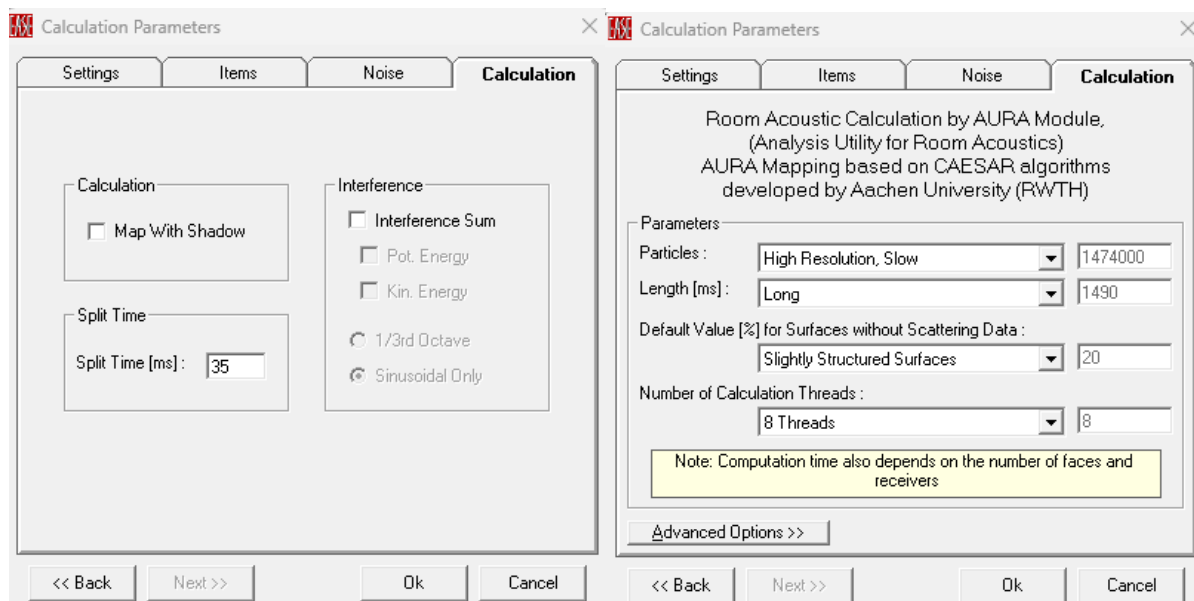


Figura 77. Selección de Fuentes y Micrófonos para el cálculo de mapas

Hasta este momento, las opciones para simular los mapas *AURA Mapping* y *Standard Mapping* son las mismas. En la figura 80 se muestran los parámetros finales que se introducen para obtener el mapa según *Standard Mapping*, y en la figura 81 para *AURA Mapping*, con una ventana larga y una resolución superior a las simulaciones anteriores.

Figura 78. Parámetros Resolución de *Standard Mapping* y *AURA Mapping*

Validación del Modelo

Con los resultados obtenidos tras las simulaciones, se realiza un nuevo procesamiento de datos en Excel siguiendo las mismas pautas explicadas en el apartado 5.4. Sin embargo, para este procesamiento no se aplica la máscara INR, sino que se emplea directamente el criterio de Chauvenet. De este modo, se eliminan los valores que se consideran estadísticamente poco representativos.

Al hacer la comparación para la validación, se utilizan los datos filtrados de las mediciones *in situ* y los de las simulaciones finales filtrados. La tabla 32 muestra como ejemplo la estructura del procesamiento de datos, comprendidos entre 100 Hz y 10.000 Hz, ya que es el intervalo con el que trabaja EASE, del parámetro C50 simulado mediante AURA Mapping. En la tabla 33, se muestran los resultados tras aplicar el criterio de Chauvenet.

Tabla 32. Ejemplo Estructura de Procesado de Datos Simulados

C50 [dB]	F01	M12	Tercios	1 F01M12	22,64	Platea	1,47	-1,14	-0,96	-0,16	1,86	2,42	2,64	2,52	2,79	3,29
C50 [dB]	F01	M13	Tercios	1 F01M13	22,51	Platea	-0,08	-3	-3,45	-2,25	-0,31	0,12	-0,04	-0,24	-0,07	0,33
C50 [dB]	F01	MC13	Tercios	1 F01MC13	22,51	Platea	0,05	-3,05	-3,41	-2,33	-0,2	0,4	0,13	-0,12	-0,22	0,13
C50 [dB]	F01	ME01	Tercios	1 F01ME01	3,97	Platea	3,14	1,56	1,44	2,2	3,59	4,12	4,17	4,25	4,58	4,93
C50 [dB]	F01	ME02	Tercios	1 F01ME02	7,74	Platea	-0,15	-2,07	-2,15	-1,54	-0,06	0,48	0,42	0,4	0,7	1,12
C50 [dB]	F01	ME03	Tercios	1 F01ME03	13,32	Platea	0,93	-1,17	-1,65	-0,8	0,66	1,08	0,9	0,78	1,01	1,59
C50 [dB]	F01	ME04	Tercios	1 F01ME04	18,80	Platea	-0,93	-3,03	-3,59	-2,47	-0,78	-0,12	-0,18	-0,16	0,11	0,46
C50 [dB]	F02	M01	Tercios	1 F02M01	20,34	Platea	1,73	0,05	0,01	1,04	2,32	2,74	2,94	3,03	3,47	3,89
C50 [dB]	F02	MC01	Tercios	1 F02MC01	6,94	Platea	1,25	-0,47	-0,48	0,13	1,59	1,59	2	2,07	2,4	2,85
C50 [dB]	F02	M02	Tercios	1 F02M02	8,69	Platea	2,42	0,96	0,92	1,68	3,15	3,59	3,66	3,79	4,19	4,61
C50 [dB]	F02	M03	Tercios	1 F02M03	6,33	Platea	-0,19	-2,34	-2,46	-1,74	-0,34	0,3	0,18	0	0,1	0,46
C50 [dB]	F02	MC03	Tercios	1 F02MC03	9,45	Platea	-0,5	-2,3	-2,53	-1,79	-0,43	-0,19	-0,22	-0,34	-0,1	0,14
C50 [dB]	F02	M04	Tercios	1 F02M04	16,85	Platea	-0,52	-2,33	-2,47	-1,67	-0,17	0,23	0,23	0,16	0,54	1,01
C50 [dB]	F02	M05	Tercios	1 F02M05	10,59	Platea	-1,39	-3,43	-3,63	-2,88	-1,41	-1,09	-1,15	-1,19	-1	-0,57
C50 [dB]	F02	MC05	Tercios	1 F02MC05	12,96	Platea	-1,21	-3,31	-3,38	-2,76	-1,17	-0,83	-1,03	-1,04	-0,73	-0,57
C50 [dB]	F02	M06	Tercios	1 F02M06	13,72	Platea	0,62	-1,08	-1,09	-0,45	0,9	1,49	1,34	1,36	1,53	1,98
C50 [dB]	F02	M07	Tercios	1 F02M07	9,38	Platea	-1,4	-3,59	-4,07	-3,32	-1,54	-0,98	-1,33	-1,51	-0,9	-0,91
C50 [dB]	F02	M08	Tercios	1 F02M08	16,76	Platea	-1,48	-3,82	-4,02	-3,26	-1,71	-1,19	-1,41	-1,65	-1,44	-1,07
C50 [dB]	F02	MC08	Tercios	1 F02MC08	14,03	Platea	-0,23	-2,28	-2,25	-1,47	0,07	0,4	0,33	0,63	0,85	1,42
C50 [dB]	F02	M09	Tercios	1 F02M09	17,11	Platea	-0,86	-3,32	-3,63	-2,72	-0,81	-0,47	-0,52	-0,6	-0,25	0,08
C50 [dB]	F02	M10	Tercios	1 F02M10	18,48	Platea	-0,23	-3,12	-3,58	-2,84	-0,9	-0,41	-0,97	-0,88	-0,94	-0,76
C50 [dB]	F02	M11	Tercios	1 F02M11	18,57	Platea	-0,73	-3,49	-3,62	-2,78	-0,82	-0,41	-0,67	-0,85	-0,53	-0,51
C50 [dB]	F02	MC11	Tercios	1 F02MC11	19,77	Platea	0,2	-2,39	-2,46	-1,86	0,06	0,62	0,39	0,48	0,65	1,23
C50 [dB]	F02	M12	Tercios	1 F02M12	21,06	Platea	0,73	-2,51	-2,55	-1,75	0,49	0,84	0,84	0,62	1,09	0,97
C50 [dB]	F02	M13	Tercios	1 F02M13	23,73	Platea	-0,13	-2,91	-3,24	-2,6	-0,37	0,08	-0,32	-0,31	-0,19	0,07
C50 [dB]	F02	MC13	Tercios	1 F02MC13	22,48	Platea	0,65	-1,82	-1,92	-1,06	1,17	1,59	1,69	1,65	2,06	2,69
C50 [dB]	F02	ME01	Tercios	1 F02ME01	25,23	Platea	1,17	-0,33	-0,31	0,27	1,67	2,05	2,2	2,25	2,57	2,99
C50 [dB]	F02	ME02	Tercios	1 F02ME02	7,32	Platea	-0,22	-1,82	-2,07	-1,34	-0,08	0,34	0,34	0,2	0,48	0,75
C50 [dB]	F02	ME03	Tercios	1 F02ME03	10,16	Platea	-2,89	-4,92	-5,12	-4,58	-3,16	-2,7	-2,97	-3,21	-3,02	-2,73
C50 [dB]	F02	ME04	Tercios	1 F02ME04	15,14	Platea	-0,37	-2,91	-2,93	-2,21	-0,15	0,19	-0,02	0,09	0,29	0,6
C50 [dB]	F01	ME05	Tercios	1 F01ME05	14,55	Planta 1	-0,6	-2,57	-2,86	-2,18	-0,49	-0,07	-0,58	-0,7	-0,38	-0,29
C50 [dB]	F01	ME06	Tercios	1 F01ME06	19,68	Planta 1	-1,93	-4,02	-4,33	-3,42	-2,11	-1,74	-2,17	-2,44	-2,33	-2,19
C50 [dB]	F01	M12	Tercios	1 F01M12	23,03	Planta 1	-0,58	-3,02	-3,33	-2,62	-1,08	-0,74	-1,11	-1,58	-1,53	-1,58
C50 [dB]	F01	M14	Tercios	1 F01M14	16,76	Planta 1	-0,89	-3,28	-3,44	-2,81	-1,18	-0,85	-1,34	-1,4	-1,4	-1,3
C50 [dB]	F01	MC14	Tercios	1 F01MC14	16,76	Planta 1	-1,05	-3,15	-3,68	-2,86	-1,23	-1,02	-1,36	-1,62	-1,53	-1,31
C50 [dB]	F01	M15	Tercios	1 F01M15	17,64	Planta 1	-1,45	-3,95	-4,19	-3,64	-1,95	-1,53	-1,96	-2,23	-2,22	-1,86
C50 [dB]	F01	M16	Tercios	1 F01M16	20,44	Planta 1	-1,9	-4,58	-4,86	-4,2	-2,57	-2,15	-2,6	-2,93	-2,81	-2,68
C50 [dB]	F01	MC16	Tercios	1 F01MC16	20,44	Planta 1	-1,84	-4,68	-5,11	-4,28	-2,53	-2,31	-2,69	-3,08	-3,03	-3,06
C50 [dB]	F01	M17	Tercios	1 F01M17	20,78	Planta 1	-0,89	-3,73	-3,97	-3,22	-1,43	-1,15	-1,47	-2,05	-1,97	-1,93
C50 [dB]	F01	M18	Tercios	1 F01M18	21,42	Planta 1	-0,04	-2,87	-3,36	-2,61	-0,81	-0,55	-0,92	-1,29	-1,22	-1,18
C50 [dB]	F01	MC18	Tercios	1 F01MC18	21,42	Planta 1	-0,42	-3,95	-3,32	-2,55	-0,85	-0,43	-1,08	-1,12	-1,17	-1,25

Tabla 33. Ejemplo Estructura de Procesado de Datos Simulados tras aplicar Chauvenet

100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	
						3,75	3,91	4,27	4,60	5,03	5,09	5,22	5,32	5,56	5,76	6,24	6,74	7,65	8,72	9,98	
1,35	-0,45	-0,63	0,21	1,71	2,21	2,13	3,85	4,19	4,62	5,05	5,00	5,21	5,33	5,48	5,82	6,13	6,73	7,58	8,68	9,98	
-0,72	-2,53	-2,80	-1,10	-0,71	-0,32	-0,51	-0,46	-0,29	0,00	0,25	0,25	0,39	0,64	0,72	0,89	1,21	1,88	2,55	3,69	4,94	
-0,68	-2,58	-2,72	-2,11	-0,64	-0,30	-0,39	-0,43	-0,31	0,03	0,35	0,29	0,40	0,61	0,69	0,95	1,27	1,82	2,67	3,59	5,04	
-1,42	-3,26	-3,36	-2,60	-1,03	-0,56	-0,64	-0,57	-0,23	0,25	0,54	0,54	0,83	0,98	1,13	1,31	1,82	2,51	3,51	4,75	6,24	
-1,46	-3,66	-3,88	-3,15	-1,68	-1,15	-1,33	-1,47	-1,10	-0,76	-0,55	-0,54	-0,37	-0,08	0,11	0,25	0,66	1,35	2,20	3,55	4,90	
-1,75	-3,62	-3,82	-3,20	-1,72	-1,27	-1,38	-1,56	-1,20	-0,93	-0,65	-0,47	-0,33	-0,24	-0,09	0,16	0,61	1,23	2,12	3,46	4,63	
-0,01	-2,00	-2,01	-1,36	0,17	0,71	0,55	0,60	0,92	1,29	1,67	1,66	1,76	2,03	2,12	2,32	2,64	3,31	4,12	5,32	6,99	
-0,98	-2,79	-2,93	-2,24	-0,68	-0,16	0,08	0,14	0,55	1,19	1,46	1,54	1,69	1,82	2,02	2,13	2,57	3,16	4,08	4,90	6,41	
-1,82	-3,77	-3,74	-2,97	-1,50	-1,04	-1,10	-0,99	-0,69	-0,48	0,01	0,05	0,07	0,23	0,45	0,77	0,95	1,73	2,43	3,45	4,81	
-1,74	-3,63	-3,80	-2,99	-1,51	-1,06	-1,04	-0,97	-0,72	-0,31	0,09	0,11	0,14	0,40	0,53	0,82	1,09	1,80	2,46	3,77	4,94	
-0,63	-2,77	-3,11	-2,07	-0,27	0,16	-0,20	0,39	0,66	1,16	0,95	1,13	1,27	1,39	1,47	1,74	2,13	2,92	4,04	5,38		
-1,14	-3,62	-4,00	-3,23	-1,09	-0,76	-0,91	-1,00	-0,85	-0,37	-0,16	-0,13	-0,04	0,27	0,24	0,27	0,57	1,10	2,10	2,89	4,46	
-0,57	-3,05	-3,02	-2,07	-0,22	0,26	0,22	0,24	0,65	0,97	1,37	1,23	1,33	1,65	1,94	2,05	2,18	2,77	3,45	4,72	6,17	
-0,83	-2,76	-2,88	-2,18	-0,45	0,09	0,19	0,21	0,37	1,11	1,09	1,30	1,40	1,87	1,90	2,12	2,22	2,72	3,67	4,67	6,24	
1,47	-1,14	-0,96	-0,16	1,86	2,42	2,64	2,52	2,79	3,29	3,33	3,29	3,70	3,87	3,74	3,58	3,87	4,33	5,17	6,33	7,63	
-0,08	-3,00	-3,45	-2,25	-0,31	0,12	-0,04	-0,24	-0,07	0,33	0,56	0,43	0,36	0,55	0,68	0,42	0,84	1,53	2,30	3,06	4,85	
0,05	-3,05	-3,41	-2,33	-0,20	0,40	0,13	-0,12	-0,22	0,13	0,78	0,24	0,47	0,65	0,55	0,72	0,78	1,44	2,08	3,04	4,54	
							4,25	4,58	4,93	5,34	5,39	5,52	5,65	5,75	6,00	6,27	6,86	7,67	8,75	10,05	
-0,15	-2,07	-2,15	-1,54	-0,06	0,48	0,42	0,40	0,70	1,12	1,45	1,56	1,62	2,03	1,93	2,19	2,71	3,47	4,54	5,48	6,68	
0,93	-1,17	-1,65	-0,80	0,66	1,08	0,90	0,78	1,01	1,59	1,77	1,71	1,74	1,99	2,02	2,59	2,65	3,17	4,04	5,27	7,13	
-0,93	-3,03	-3,59	-2,47	-0,78	-0,12	-0,18	-0,16	0,11	0,46	0,84	0,71	1,02	1,11	1,14	1,30	1,32	2,07	2,73	4,21	5,62	
1,73		0,31	1,04	2,32	2,74	2,94	3,03	3,47	3,81	4,35	4,34	4,52	4,71	4,89	5,13	5,46	6,09	6,77	7,95	9,30	
1,25	-0,47	-0,48	0,13	1,59	1,99	2,00	2,07	2,40	2,65	3,09	3,18	3,10	3,15	3,30	3,71	3,87	4,49	5,21	6,25	7,44	
2,42						3,59	3,66	3,79	4,19	4,61	5,00	5,14	5,24	5,52	5,63	5,99	6,26	7,04	7,96	9,27	10,69
-0,15	-2,34	-2,46	-1,74	-0,34	0,30	0,18	0,00	0,10	0,46	0,75	0,80	0,86	1,14	1,31	1,41	1,95	2,63	3,60	5,12	6,74	
-0,50	-2,30	-2,53	-1,79	-0,43	-0,19	-0,22	-0,34	-0,10	0,14	0,54	0,53	0,57	0,88	1,06	1,22	1,57	2,32	3,00	4,07	5,19	
-0,52	-2,33	-2,47	-1,67	-0,17	0,23	0,23	0,16	0,54	1,01	1,23	1,22	1,36	1,59	1,72	1,96	2,30	3,09	3,88	5,14	6,64	
-1,39	-3,43	-3,63	-																		

7.4 Resultado de la Validación

Una vez procesados todos los valores de todos los parámetros simulados, se realiza la estimación de la “distancia” entre los valores medidos *in situ* y los simulados en el rango de 100Hz a 10kHz, en tercios de octava, utilizando la métrica JND.

El parámetro temporal RT se calcula por *Standard Mapping*, los parámetros energéticos C50, C80 y los parámetros de inteligibilidad Alcons y, STI se calculan tanto por el método de *AURA Mapping* como por el de *Standard Mapping*. El resto de los parámetros se calcula únicamente por *AURA Mapping*.

De las figuras 82 a 93 y de las tablas 34 a 49, se muestran los promedios y la desviación de los datos medidos, los resultados de la simulación y el escalón JND, representado la “distancia” entre estos (cuanto más pequeño el escalón, menos “distancia” entre valores).

En el Anexo III, se muestran los resultados de la validación en octavas.

Parámetros temporales

- EDT

Tabla 34. Comparación datos medidos y datos simulados en 1/3 de octava parámetro EDT [s]

EDT [s] AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND
100	1,22	0,47	1,20	0,01	1
125	1,38	0,36	1,64	0,19	2
160	1,41	0,34	1,69	0,20	3
200	1,24	0,30	1,51	0,22	3
250	1,20	0,23	1,19	0,01	1
315	1,12	0,20	1,13	0,01	1
400	1,06	0,21	1,17	0,10	1
500	1,01	0,18	1,19	0,18	2
630	1,03	0,16	1,17	0,13	2
800	1,04	0,14	1,14	0,09	1
1000	1,05	0,18	1,11	0,06	1
1250	1,11	0,14	1,12	0,01	1
1600	1,08	0,17	1,11	0,03	1
2000	1,04	0,14	1,09	0,05	1
2500	0,98	0,17	1,08	0,10	2
3150	0,97	0,16	1,06	0,10	1
4000	0,92	0,12	1,02	0,11	2
5000	0,82	0,13	0,93	0,14	2
6300	0,73	0,12	0,83	0,15	2
8000	0,61	0,16	0,72	0,19	2
10000	0,51	0,13	0,62	0,21	3

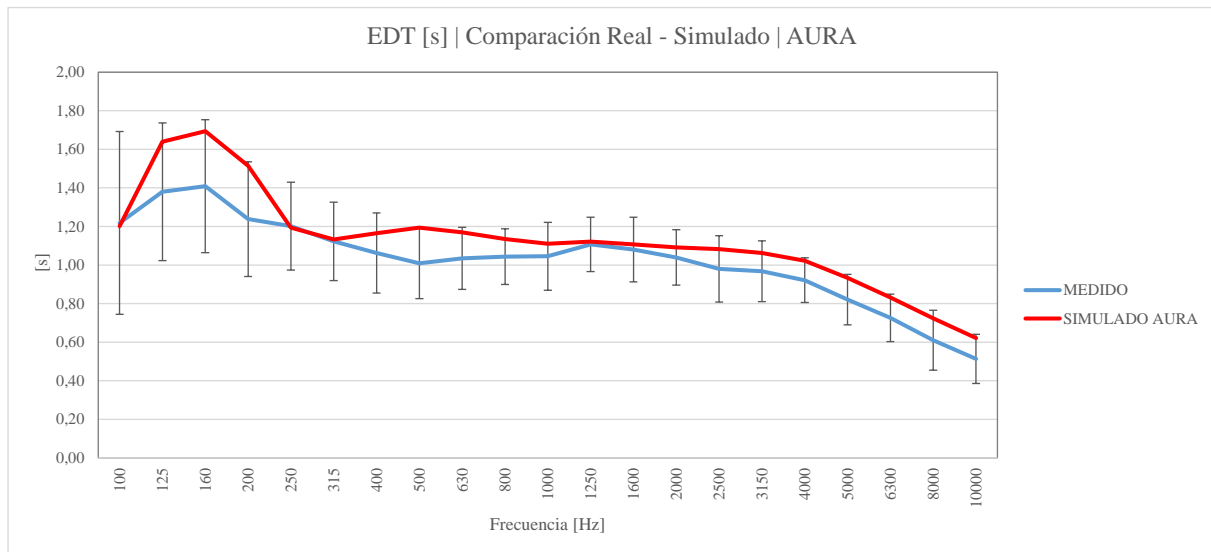


Figura 79. Comparación datos medidos y datos simulados en 1/3 de octava parámetro EDT

• T20

Tabla 35. Comparación datos medidos y datos simulados en 1/3 de octava parámetro T20 [s]

T20 [s] AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND
100	1,22	0,28	1,20	0,01	1
125	1,31	0,27	1,60	0,21	3
160	1,32	0,20	1,65	0,24	3
200	1,10	0,16	1,48	0,34	4
250	1,01	0,13	1,17	0,16	2
315	0,99	0,16	1,11	0,12	2
400	0,96	0,11	1,14	0,19	2
500	0,96	0,08	1,17	0,22	3
630	0,99	0,08	1,16	0,17	2
800	1,03	0,11	1,13	0,10	2
1000	1,02	0,07	1,11	0,09	1
1250	1,05	0,06	1,13	0,07	1
1600	1,06	0,10	1,13	0,06	1
2000	1,03	0,04	1,11	0,08	1
2500	0,97	0,04	1,11	0,15	2
3150	0,95	0,04	1,09	0,15	2
4000	0,95	0,04	1,06	0,11	2
5000	0,91	0,04	0,96	0,05	1
6300	0,82	0,10	0,86	0,05	1
8000	0,70	0,08	0,73	0,05	1
10000	0,57	0,06	0,61	0,07	1

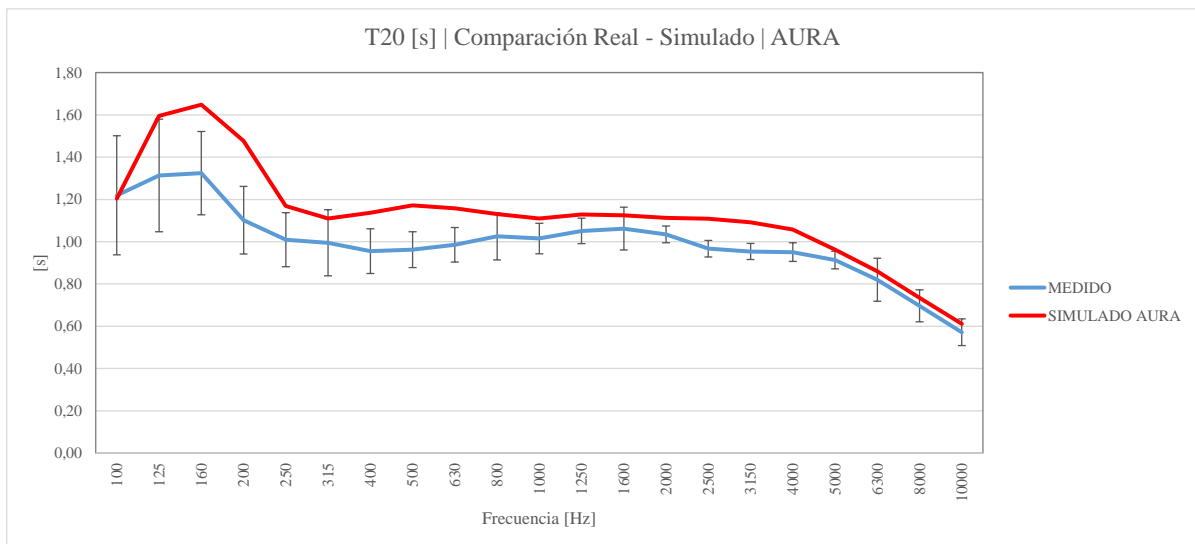


Figura 80. Comparación datos medidos y datos simulados en 1/3 de octava parámetro T20

• T30

Tabla 36. Comparación datos medidos y datos simulados en 1/3 de octava parámetro T30 [s]

T30 [s] AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND
100	1,22	0,24	1,20	0,01	1
125	1,27	0,17	1,59	0,26	3
160	1,31	0,18	1,65	0,26	3
200	1,11	0,10	1,48	0,33	4
250	1,03	0,17	1,17	0,14	2
315	1,01	0,16	1,11	0,10	1
400	0,96	0,07	1,14	0,19	2
500	0,97	0,06	1,18	0,21	3
630	0,99	0,10	1,16	0,17	2
800	1,01	0,05	1,14	0,13	2
1000	1,01	0,15	1,11	0,11	2
1250	1,05	0,04	1,14	0,09	1
1600	1,06	0,04	1,13	0,07	1
2000	1,03	0,03	1,12	0,09	1
2500	0,96	0,03	1,12	0,16	2
3150	0,95	0,03	1,10	0,16	2
4000	0,95	0,04	1,07	0,12	2
5000	0,92	0,04	0,97	0,06	1
6300	0,82	0,03	0,86	0,05	1
8000	0,71	0,04	0,74	0,05	1
10000	0,58	0,08	0,62	0,05	1

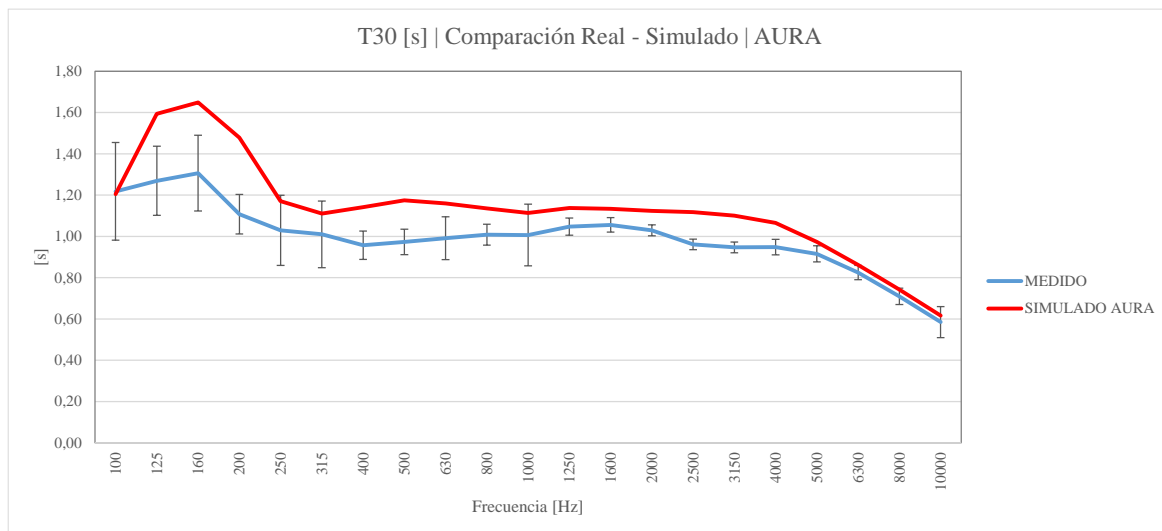


Figura 81. Comparación datos medidos y datos simulados en 1/3 de octava parámetro T30

• RT

Tabla 37. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en tercios de octava Parámetro RT [s]

RT [s] STD					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND
100	1,17	0,31	0,84	0,33	4
125	1,28	0,25	1,06	0,22	3
160	1,34	0,26	1,07	0,27	3
200	1,12	0,17	0,98	0,14	2
250	1,03	0,15	0,82	0,21	3
315	1,01	0,17	0,78	0,23	3
400	0,96	0,15	0,78	0,18	2
500	0,97	0,13	0,76	0,21	3
630	0,99	0,11	0,71	0,28	3
800	1,01	0,15	0,68	0,33	4
1000	1,01	0,19	0,68	0,33	4
1250	1,05	0,15	0,67	0,38	4
1600	1,06	0,10	0,66	0,40	4
2000	1,03	0,12	0,66	0,37	4
2500	0,96	0,14	0,66	0,30	4
3150	0,95	0,03	0,66	0,29	3
4000	0,95	0,04	0,66	0,29	3
5000	0,92	0,04	0,63	0,29	3
6300	0,83	0,10	0,59	0,24	3
8000	0,71	0,04	0,54	0,17	2
10000	0,58	0,04	0,48	0,10	2

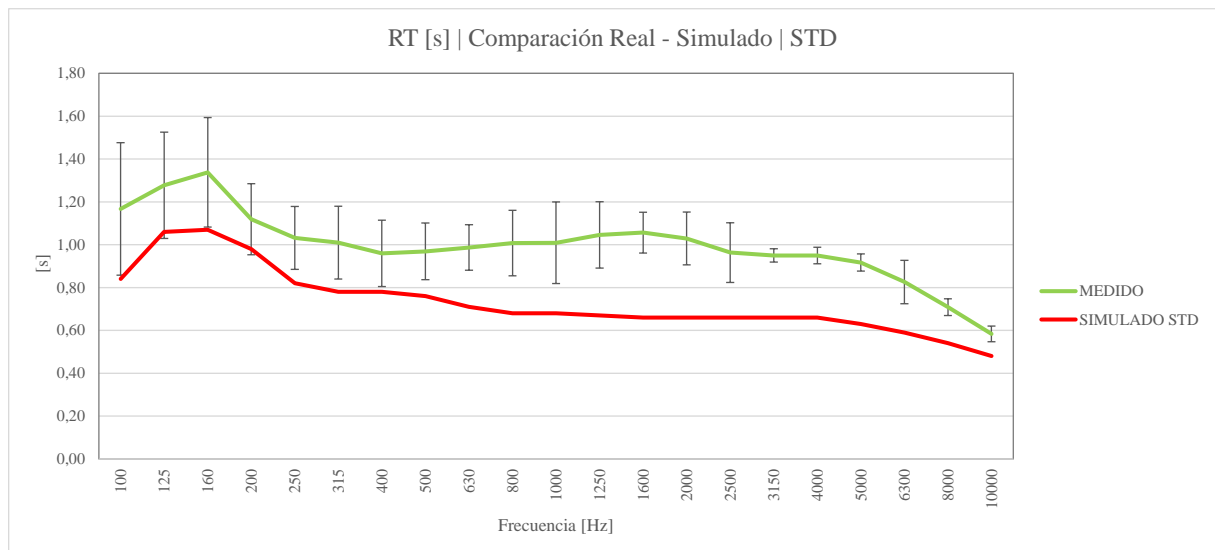


Figura 82. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en tercios de octava Parámetro RT

Parámetros energéticos

- C50

Tabla 38. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados STD en tercios de octava Parámetro C50 [dB]

C50 [dB] STD					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND
100	0,06	5,10	0,45	0,39	1
125	-2,60	4,47	-1,05	1,55	2
160	-3,41	4,00	-1,08	2,34	3
200	-2,60	2,80	-0,46	2,14	3
250	-2,54	2,57	0,77	3,31	4
315	-0,52	2,32	1,16	1,68	2
400	0,28	2,73	1,17	0,88	1
500	0,52	2,81	1,21	0,69	1
630	0,42	2,42	1,55	1,13	2
800	0,49	1,89	1,94	1,44	2
1000	0,98	2,27	2,31	1,33	2
1250	0,63	1,81	2,28	1,65	2
1600	1,05	1,75	2,37	1,32	2
2000	1,34	1,93	2,48	1,14	2
2500	1,28	1,73	2,60	1,32	2
3150	1,18	1,79	2,75	1,57	2
4000	1,19	1,72	2,97	1,78	2
5000	2,66	2,04	3,45	0,79	1
6300	4,27	1,80	4,04	0,23	1
8000	5,95	1,92	4,84	1,11	2
10000	6,95	1,94	5,68	1,27	2

Tabla 39. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados AURA en tercios de octava Parámetro C50 [dB]

C50 [dB] AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND
100	0,06	5,10	-0,60	0,66	1
125	-2,60	4,47	-3,00	0,40	1
160	-3,41	4,00	-3,21	0,21	1
200	-2,60	2,80	-2,46	0,14	1
250	-2,54	2,57	-0,77	1,77	2
315	-0,52	2,32	-0,31	0,21	1
400	0,28	2,73	-0,47	0,75	1
500	0,52	2,81	-0,46	0,98	1
630	0,42	2,42	-0,28	0,70	1
800	0,49	1,89	-0,01	0,51	1
1000	0,98	2,27	0,25	0,73	1
1250	0,63	1,81	0,15	0,48	1
1600	1,05	1,75	0,28	0,77	1
2000	1,34	1,93	0,42	0,92	1
2500	1,28	1,73	0,51	0,76	1
3150	1,18	1,79	0,68	0,50	1
4000	1,19	1,72	0,93	0,26	1
5000	2,66	2,04	1,56	1,10	2
6300	4,27	1,80	2,41	1,87	2
8000	5,95	1,92	3,52	2,42	3
10000	6,95	1,94	4,89	2,07	3

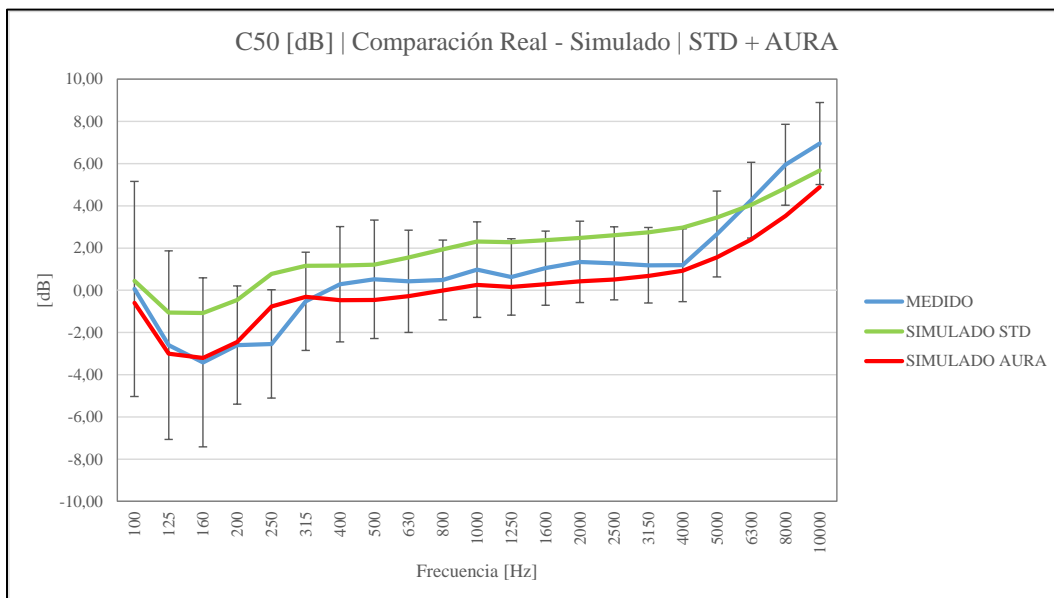


Figura 83. Comparación datos medidos y datos simulados en 1/3 de octava parámetro C50

- C80

Tabla 40. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados STD en tercios de octava Parámetro C80 [dB]

C80 [dB] STD					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND
100	2,60	5,03	3,62	1,02	2
125	0,53	3,55	1,84	1,32	2
160	-0,65	4,11	1,81	2,46	3
200	0,37	2,71	2,54	2,17	3
250	1,10	2,82	3,99	2,89	3
315	2,34	2,40	4,46	2,11	3
400	2,96	2,36	4,49	1,53	2
500	3,09	2,51	4,55	1,46	2
630	3,17	2,17	4,94	1,77	2
800	3,33	1,87	5,42	2,08	3
1000	3,67	2,10	5,88	2,21	3
1250	3,21	1,79	5,85	2,65	3
1600	3,85	1,95	5,97	2,11	3
2000	3,77	1,83	6,11	2,34	3
2500	4,05	1,90	6,26	2,21	3
3150	3,98	1,66	6,46	2,48	3
4000	4,23	1,70	6,75	2,52	3
5000	5,67	2,01	7,39	1,72	2
6300	7,41	1,73	8,21	0,80	1
8000	9,45	1,82	9,32	0,13	1
10000	10,69	2,08	10,50	0,19	1

Tabla 41. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados AURA en tercios de octava Parámetro C80 [dB]

C80 [dB] AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND
100	2,60	5,03	2,20	0,40	1
125	0,53	3,55	-0,39	0,91	1
160	-0,65	4,11	-0,55	0,10	1
200	0,37	2,71	0,24	0,13	1
250	1,10	2,82	2,08	0,98	1
315	2,34	2,40	2,50	0,15	1
400	2,96	2,36	2,25	0,71	1
500	3,09	2,51	2,20	0,89	1
630	3,17	2,17	2,46	0,72	1
800	3,33	1,87	2,74	0,59	1
1000	3,67	2,10	3,00	0,67	1
1250	3,21	1,79	2,90	0,31	1
1600	3,85	1,95	3,04	0,82	1
2000	3,77	1,83	3,18	0,59	1
2500	4,05	1,90	3,25	0,80	1
3150	3,98	1,66	3,45	0,53	1
4000	4,23	1,70	3,74	0,49	1
5000	5,67	2,01	4,46	1,21	2
6300	7,41	1,73	5,44	1,97	2
8000	9,45	1,82	6,79	2,66	3
10000	10,69	2,08	8,50	2,19	3

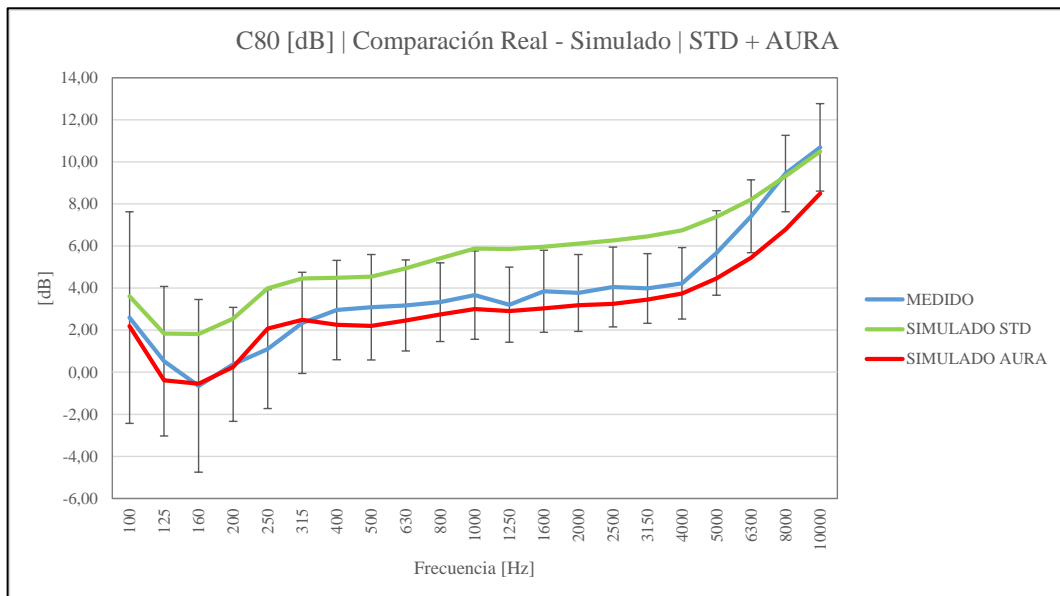


Figura 84. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en tercios de octava Parámetro C80

• D50

Tabla 42. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en tercios de octava Parámetro D50 [-]

D50 [-] AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND
100	0,51	0,24	0,48	0,05	1
125	0,38	0,20	0,38	0,00	1
160	0,34	0,18	0,37	0,09	1
200	0,37	0,14	0,41	0,11	2
250	0,37	0,14	0,48	0,31	4
315	0,48	0,14	0,50	0,05	1
400	0,51	0,14	0,50	0,04	1
500	0,52	0,14	0,49	0,07	1
630	0,53	0,13	0,50	0,06	1
800	0,54	0,12	0,51	0,05	1
1000	0,55	0,12	0,52	0,05	1
1250	0,54	0,10	0,52	0,03	1
1600	0,56	0,10	0,53	0,06	1
2000	0,57	0,10	0,53	0,07	1
2500	0,58	0,10	0,54	0,06	1
3150	0,57	0,10	0,55	0,03	1
4000	0,57	0,12	0,57	0,00	1
5000	0,64	0,10	0,60	0,07	1
6300	0,72	0,11	0,64	0,11	2
8000	0,79	0,14	0,70	0,12	2
10000	0,83	0,11	0,76	0,08	1

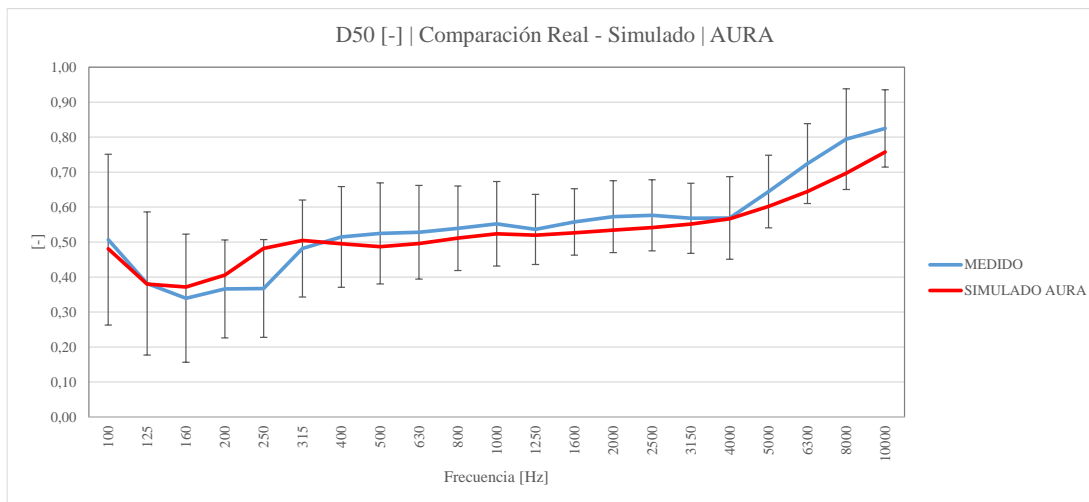


Figura 85. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en tercios de octava Parámetro D50

• Ts

Tabla 43. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en tercios de octava Parámetro Ts [ms]

Ts [ms] AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND
100	113,68	40,83	82,05	31,63	4
125	125,44	31,03	118,81	6,62	1
160	134,13	33,67	123,47	10,65	2
200	113,95	21,16	108,49	5,46	1
250	102,73	23,12	82,24	20,49	3
315	86,60	18,62	76,83	9,78	1
400	77,97	17,19	79,47	1,51	1
500	74,65	18,50	79,94	5,29	1
630	73,14	18,09	77,90	4,76	1
800	71,89	17,81	74,93	3,05	1
1000	67,55	15,60	72,34	4,79	1
1250	70,91	13,95	73,56	2,65	1
1600	67,55	13,99	72,30	4,75	1
2000	64,78	14,66	70,98	6,20	1
2500	62,96	15,28	70,29	7,34	1
3150	63,81	15,34	68,57	4,76	1
4000	62,54	15,28	65,85	3,31	1
5000	51,29	12,64	59,23	7,95	1
6300	39,81	10,41	51,48	11,68	2
8000	30,30	8,81	42,87	12,57	2
10000	26,01	7,42	34,63	8,62	1

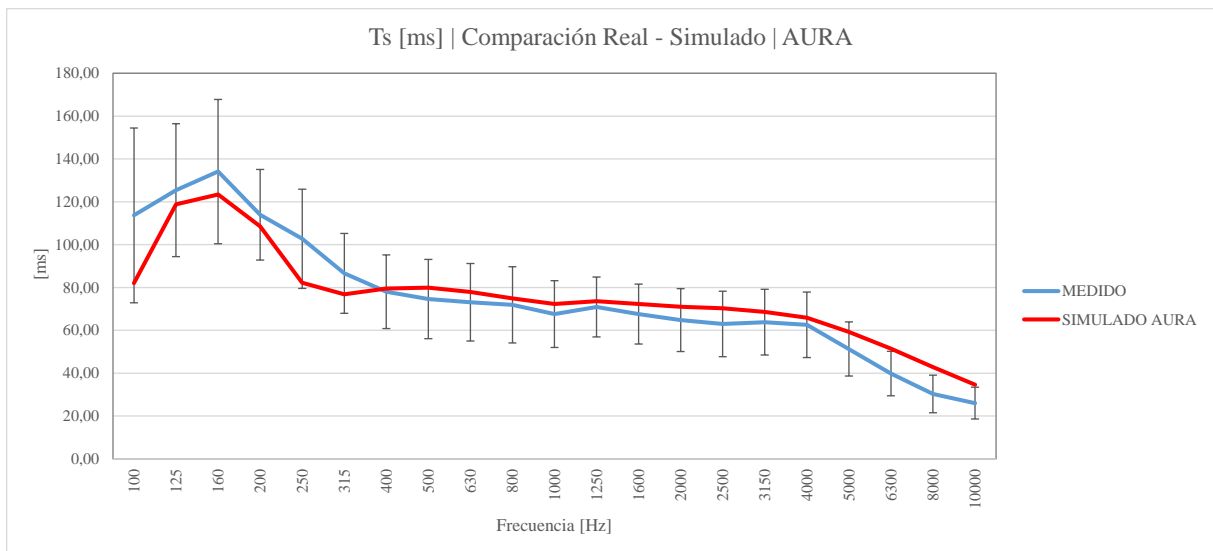


Figura 86. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en tercios de octava Parámetro Ts

Parámetros espaciales

- LF

Tabla 44. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en tercios de octava Parámetro LF [-]

LF [-] AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND
100	0,005	0,005	0,172	0,168	4
125	0,011	0,010	0,212	0,201	5
160	0,011	0,010	0,220	0,209	5
200	0,019	0,015	0,216	0,197	4
250	0,028	0,019	0,195	0,168	4
315	0,029	0,020	0,195	0,167	4
400	0,037	0,022	0,204	0,168	4
500	0,057	0,028	0,211	0,153	4
630	0,062	0,030	0,214	0,152	4
800	0,084	0,035	0,218	0,134	3
1000	0,082	0,035	0,220	0,138	3
1250	0,092	0,039	0,223	0,132	3
1600	0,079	0,032	0,222	0,142	3
2000	0,079	0,035	0,221	0,142	3
2500	0,094	0,039	0,223	0,129	3
3150	0,108	0,043	0,223	0,116	3
4000	0,133	0,052	0,223	0,090	2
5000	0,105	0,050	0,220	0,115	3
6300	0,081	0,041	0,214	0,133	3
8000	0,090	0,052	0,205	0,115	3
10000	0,148	0,091	0,193	0,045	1

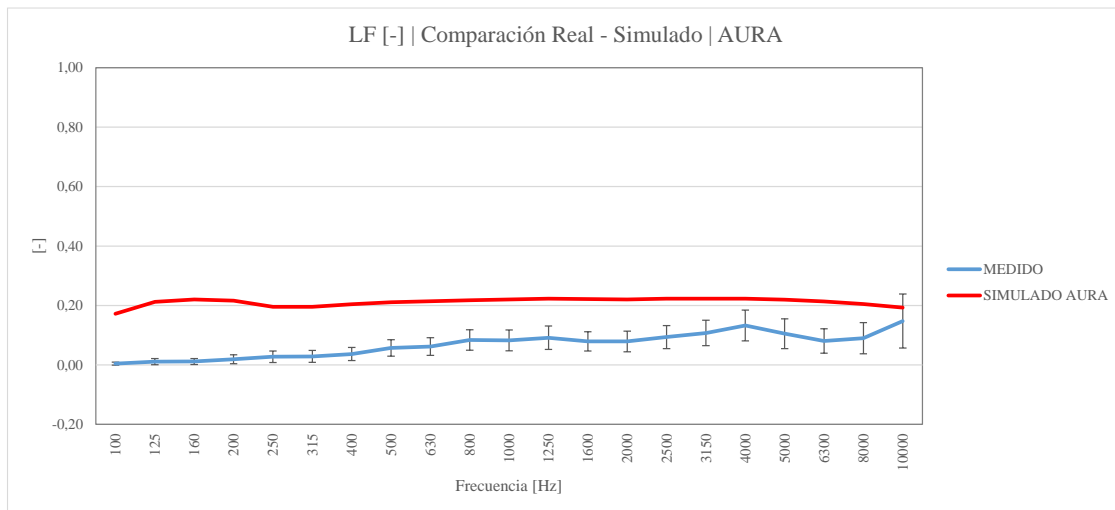


Figura 87. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en tercios de octava Parámetro LF

• LFC

Tabla 45. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en tercios de octava Parámetro LFC

LFC [-] AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND
100	0,56	0,40	0,29	0,27	6
125	0,51	0,31	0,34	0,17	4
160	0,33	0,26	0,35	0,01	1
200	0,22	0,11	0,34	0,12	3
250	0,19	0,11	0,31	0,13	3
315	0,16	0,08	0,31	0,15	3
400	0,17	0,09	0,32	0,14	3
500	0,18	0,08	0,32	0,15	3
630	0,21	0,10	0,33	0,12	3
800	0,38	0,13	0,33	0,05	2
1000	0,41	0,14	0,33	0,08	2
1250	0,32	0,12	0,33	0,01	1
1600	0,13	0,05	0,33	0,20	5
2000	0,08	0,03	0,33	0,24	5
2500	0,10	0,04	0,33	0,23	5
3150	0,17	0,08	0,33	0,16	4
4000	0,12	0,06	0,33	0,21	5
5000	0,01	0,01	0,32	0,31	7
6300	0,00	0,00	0,31	0,31	7
8000	0,00	0,00	0,30	0,30	7
10000	0,00	0,00	0,28	0,28	6

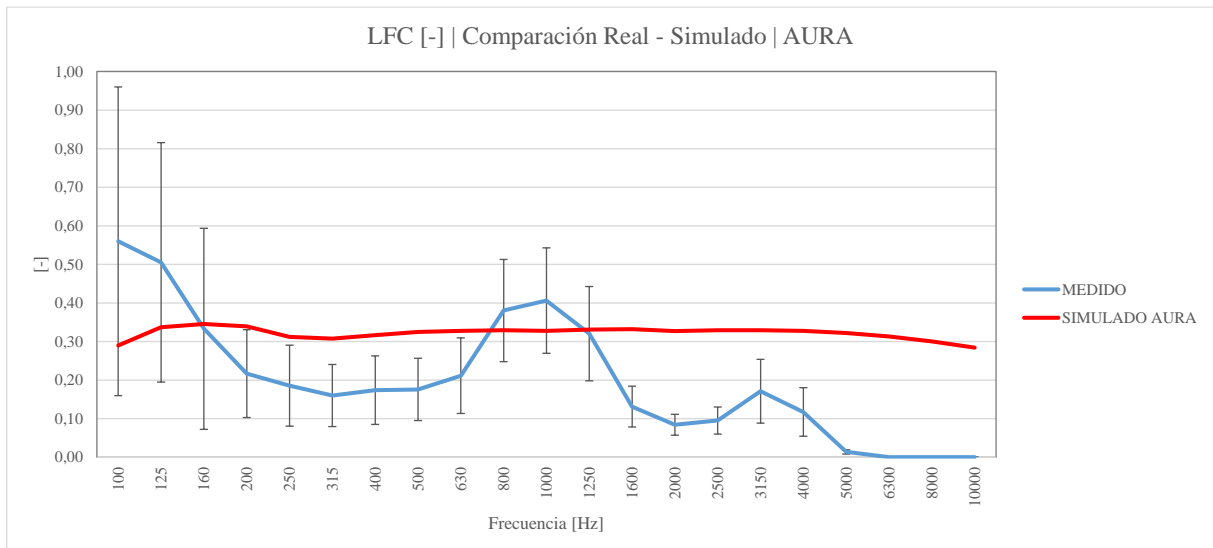


Figura 88. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en tercios de octava Parámetro LFC

Parámetros de inteligibilidad

- STI

Tabla 46. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados STD en tercios de octava Parámetro STI [-]

STI[-] STD				
MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO STD	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND
0,61	0,04	0,69	0,08	3

Tabla 47. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados AURA en tercios de octava Parámetro STI [-]

STI[-] AURA				
MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO STD	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND
0,61	0,04	0,69	0,08	3

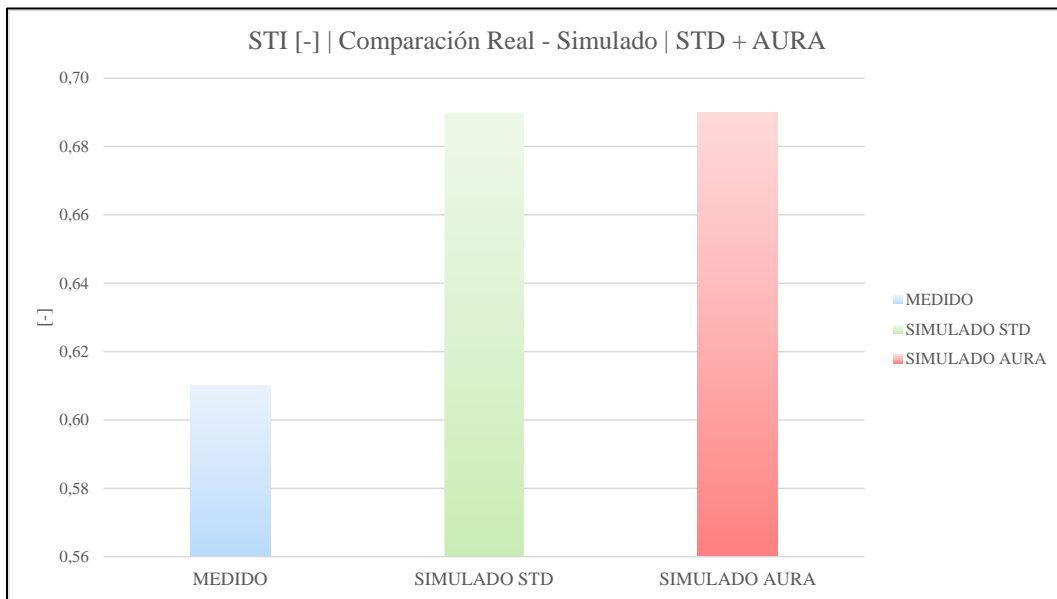


Figura 89. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en tercios de octava Parámetro STI

• **ALCONS**

Tabla 48. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados STD en tercios de octava Parámetro ALCONS [%]

ALCONS[%] STD				
MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO AURA	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND
6,26	1,15	4,02	2,24	2

Tabla 49. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados AURA en tercios de octava Parámetro ALCONS

ALCONS [%] AURA				
MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO STD	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND
6,26	1,15	4,02	2,24	2

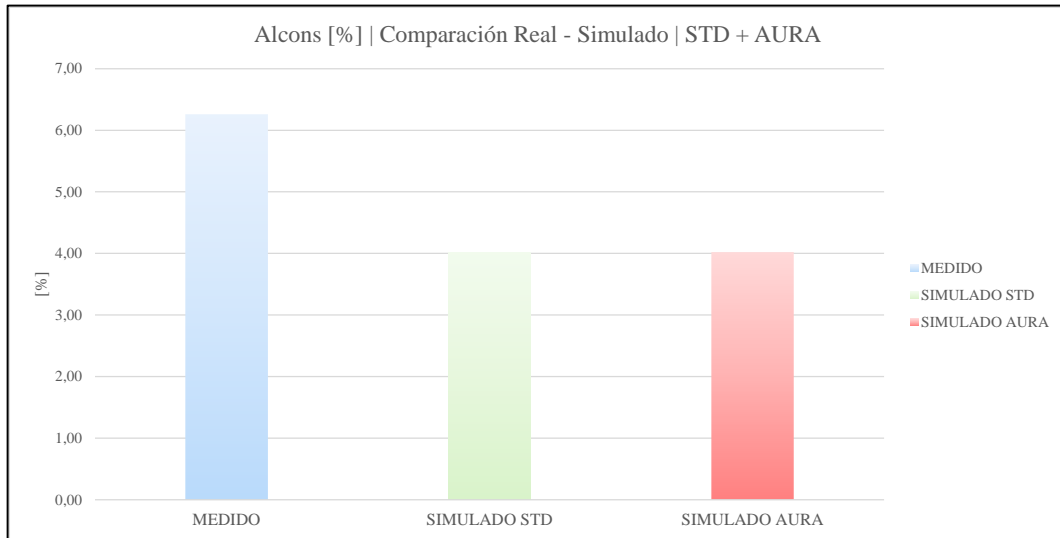


Figura 90. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en tercios de octava Parámetro ALCONS

Frecuencia [Hz]	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 M STD	STI M AURA	AICons M STD	AICons M AURA
100 Hz	1	1	1	4	1	1	2	1	1	4	4	6				
125 Hz	2	3	3	3	2	1	2	1	1	1	5	4				
160 Hz	3	3	3	3	3	1	3	1	1	2	5	1				
200 Hz	3	4	4	2	3	1	3	1	2	1	4	3				
250 Hz	1	2	2	3	4	2	3	1	4	3	4	3				
315 Hz	1	2	1	3	2	1	3	1	1	1	4	3				
400 Hz	1	2	2	2	1	1	2	1	1	1	4	3				
500 Hz	2	3	3	3	1	1	2	1	1	1	4	3				
630 Hz	2	2	2	3	2	1	2	1	1	1	4	3				
800 Hz	1	2	2	4	2	1	3	1	1	1	3	2				
1000 Hz	1	1	1	4	2	1	3	1	1	1	3	2	3	3	2	2
1250 Hz	1	1	1	4	2	1	3	1	1	1	3	1				
1600 Hz	1	1	1	4	2	1	3	1	1	1	3	5				
2000 Hz	1	1	1	4	2	1	3	1	1	1	3	5				
2500 Hz	2	2	2	4	2	1	3	1	1	1	3	5				
3150 Hz	1	2	2	3	2	1	3	1	1	1	3	4				
4000 Hz	2	2	2	3	2	1	3	1	1	1	2	5				
5000 Hz	2	1	1	3	1	2	2	2	1	1	3	7				
6300 Hz	2	1	1	3	1	2	1	2	2	2	3	7				
8000 Hz	2	1	1	2	2	3	1	3	2	2	3	7				
10000 Hz	3	1	1	2	2	3	1	3	1	1	1	6				

Cantidad por escalón	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
% sobre Total	105	63	56	21	6	2	3	0	0	0
% acumulado	41%	25%	22%	8%	2%	1%	100%	100%	100%	100%

Tabla 50. Resultados datos procesados tercios

En la siguiente tabla, se muestran en conjunto los valores de los escalones de la métrica JND de todos los parámetros para tercios de octava. Se observa que el 41% de los valores están dentro del escalón 1, el 66% están dentro de los escalones 1 y 2, y el 88% de los valores están entre los escalones 1 y 3. Consideramos que la validación del modelo geométrico es adecuada, más si tenemos en cuenta que los únicos parámetros en los que la distancia entre los parámetros medidos y simulados es mayor es en los parámetros espaciales, que de acuerdo con la experiencia acumulada por el grupo GAMMA son los de ajustes más complicado.

7.5 Simetría del auditorio

A lo largo del desarrollo del proyecto, se ha supuesto que el auditorio es simétrico para simplificar el proceso de modelado y cálculo de datos. Para poder verificarlo, se utilizan los micrófonos de control colocados durante las mediciones *in situ*. Al analizar los datos proporcionados por un micrófono de control y su equivalente simétrico en el lado opuesto, se puede comprobar la similitud entre los valores de los parámetros acústicos captados por ambos. De esta manera, se puede evaluar la simetría de la sala con respecto al eje longitudinal.

Los micrófonos de control elegidos fueron:

Tabla 51. Micrófonos normales y de control

	MICROS	MICROS DE CONTROL
PLATEA	M01	MC01
	M03	MC03
	M05	MC05
	M08	MC08
	M11	MC11
	M13	MC13
PLANTA 1	M14	MC14
	M16	MC16
	M18	MC18

Para verificar la simetría del auditorio, se decide realizar el análisis comparando los valores de los micrófonos M01 y MC01, M08 y MC08, M14 y MC14 de los parámetros C50, EDT y RT que sirven de referencia para el resto de los parámetros y posiciones.

Tabla 52. Comparación Simetría valores C50 de micrófonos normales y de control

	C50 [dB]								
	MICRO M01	MICRO MC01	JND	MICRO M08	MICRO MC08	JND	MICRO M14	MICRO MC14	JND
100	6,68	3,67	4	0,09	0,63	1	-11,76	-12,66	1
125	0,86	0,46	1	-0,76	-0,43	1	-8,34	-9,31	1
160	-0,91	-0,01	1	-4,47	-6,38	2	-0,91	-2,08	2
200	1,72	1,03	1	-1,87	-3,16	2	-3,14	-2,06	2
250	5,91	6,76	1	-4,60	-5,01	1	-4,65	-4,58	1
315	6,03	7,92	2	0,08	-1,43	2	2,05	0,48	2
400	6,80	2,70	5	1,63	2,34	1	-1,78	-0,96	1
500	5,44	4,81	1	1,94	2,11	1	-0,84	-1,27	1
630	4,81	7,57	3	-1,44	-0,21	2	0,31	0,12	1
800	7,51	7,71	1	0,81	0,55	1	0,36	-1,92	3
1000	4,44	5,50	2	1,04	1,99	1	-4,63	-0,14	5
1250	4,24	3,83	1	-0,07	0,98	2	-2,06	-0,49	2
1600	5,04	4,99	1	0,20	0,38	1	0,01	-0,41	1
2000	6,39	6,24	1	2,52	-0,63	4	-1,24	-2,52	2
2500	7,01	6,04	1	1,62	-0,47	3	-1,17	-2,28	2
3150	6,54	5,50	2	1,03	-0,12	2	0,29	-1,08	2
4000	9,29	6,58	3	0,35	0,19	1	-0,33	-0,78	1
5000	8,11	8,72	1	1,92	2,18	1	-0,45	1,41	2
6300	5,52	6,94	2	5,85	3,90	2	-0,71	2,37	4
8000	6,20	7,91	2	8,35	6,88	2	1,07	5,33	5
10000	5,38	8,76	4	6,00	5,65	1	4,22	6,04	2

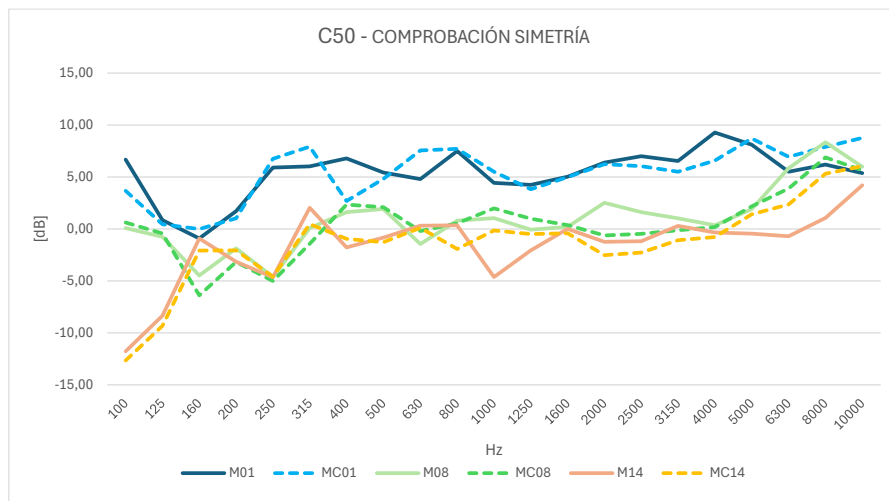


Figura 91. Comparación Simetría valores C50 de micrófonos normales y de control

Tabla 53. Comparación Simetría valores EDT de micrófonos normales y de control

	EDT [s]								
	MICRO M01	MICRO MC01	JND	MICRO M08	MICRO MC08	JND	MICRO M14	MICRO MC14	JND
100	0,43	0,47	1	1,97	2,14	1	1,38	1,48	1
125	1,29	1,51	1	1,57	1,65	1	1,20	1,37	1
160	1,28	1,29	1	1,71	1,44	1	1,20	1,15	1
200	0,82	0,62	1	0,94	1,52	1	1,26	1,34	1
250	1,33	1,20	1	1,11	1,27	1	1,53	1,32	1
315	1,11	1,03	1	1,07	1,36	1	1,35	1,34	1
400	1,02	0,78	1	1,10	1,07	1	1,09	0,98	1
500	0,80	0,72	1	1,12	1,06	1	1,21	1,06	1
630	0,81	0,99	1	0,85	0,95	1	1,12	0,99	1
800	0,94	0,88	1	0,99	1,00	1	1,04	1,23	1
1000	1,03	1,09	1	1,04	0,89	1	1,23	1,38	1
1250	1,13	1,30	1	1,23	0,98	1	1,34	1,10	1
1600	0,91	1,02	1	1,16	1,11	1	1,31	1,29	1
2000	1,03	0,88	1	1,03	1,15	1	1,25	1,36	1
2500	0,77	0,92	1	1,03	0,91	1	1,10	1,14	1
3150	1,00	1,00	1	0,88	0,78	1	1,14	1,26	1
4000	0,79	0,98	1	0,91	0,85	1	1,11	1,03	1
5000	0,64	0,75	1	0,87	0,86	1	1,08	1,01	1
6300	0,64	0,86	1	0,69	0,67	1	0,90	0,96	1
8000	0,66	0,66	1	0,59	0,56	1	0,78	0,64	1
10000	0,60	0,58	1	0,54	0,51	1	0,54	0,56	1

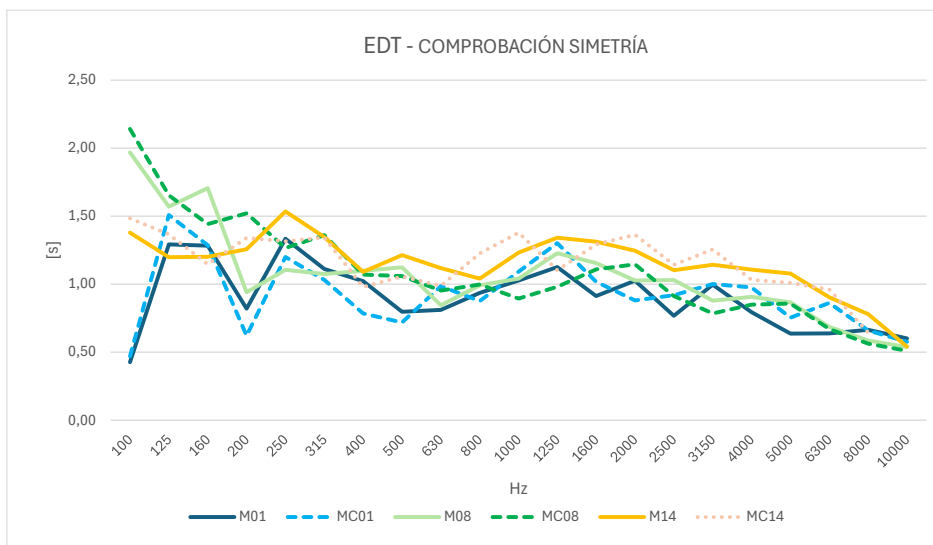


Figura 92. Comparación Simetría valores EDT de micrófonos normales y de control

Tabla 54. Comparación Simetría valores RT de micrófonos normales y de control

	RT [s]								
	MICRO M01	MICRO MC01	JND	MICRO M08	MICRO MC08	JND	MICRO M14	MICRO MC14	JND
100	1,24	1,28	1	1,36	1,51	1	1,35	1,52	1
125	1,25	0,74	1	1,53	1,44	1	1,61	1,33	1
160	1,72	1,26	1	1,22	1,27	1	1,49	1,40	1
200	1,14	1,15	1	1,08	1,06	1	1,21	1,32	1
250	1,03	0,95	1	0,97	0,91	1	1,05	1,07	1
315	1,00	1,07	1	0,90	1,05	1	1,02	0,91	1
400	0,99	0,99	1	0,95	0,96	1	0,97	0,73	1
500	0,90	0,89	1	0,92	1,00	1	0,96	0,96	1
630	0,94	1,10	1	1,01	1,01	1	1,13	1,01	1
800	0,99	1,08	1	0,99	0,91	1	1,04	0,94	1
1000	0,97	0,98	1	1,04	1,04	1	1,12	1,01	1
1250	0,97	1,07	1	0,98	0,98	1	1,04	1,02	1
1600	1,02	1,07	1	1,03	1,04	1	1,04	1,04	1
2000	1,02	1,01	1	1,08	1,01	1	1,04	1,01	1
2500	0,86	0,92	1	0,99	0,95	1	1,01	0,98	1
3150	0,90	0,90	1	0,99	0,99	1	0,93	0,94	1
4000	0,92	0,92	1	0,94	0,95	1	0,93	0,91	1
5000	0,84	0,87	1	0,88	0,94	1	0,91	0,91	1
6300	0,65	0,78	1	0,84	0,84	1	0,81	0,81	1
8000	0,66	0,68	1	0,73	0,74	1	0,69	0,72	1
10000	0,52	0,53	1	0,60	0,58	1	0,59	0,61	1

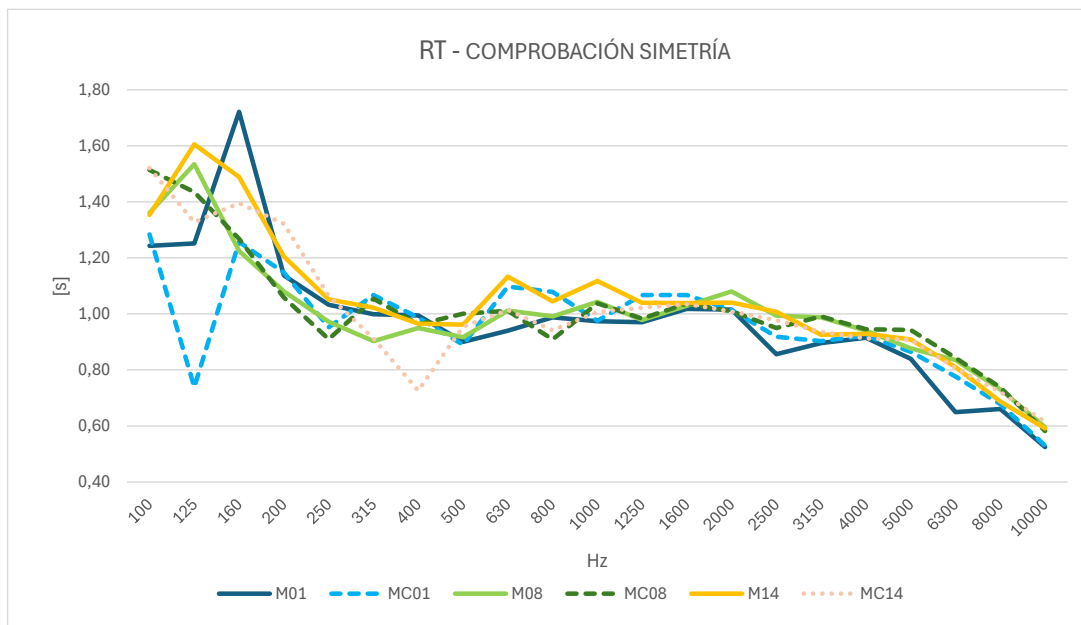


Figura 93. Comparación Simetría valores RT de micrófonos normales y de control

En todos los casos, la diferencia entre los valores captados con el micrófono normal y con el de control es insignificante. Se puede apreciar algo más de diferencia en los gráficos de los parámetros energéticos (C50). Cabe destacar, que la diferencia es algo mayor entre las posiciones de micrófonos M01 y MC01, debido a que estas se encuentran más cerca de la fuente sonora. De todas formas, estos resultados verifican el correcto comportamiento simétrico del auditorio.

8. Presupuesto

El proyecto forma parte del plan de estudios del Grado de Sonido e Imagen de la Universidad Politécnica de Madrid, por lo que las cifras estimadas del presupuesto se presentan conforme a las directrices del COITT [9] (Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos de Telecomunicación).

Además de ello, se incluyen los costos relacionados con el alquiler del equipo de medición utilizado durante las pruebas en la sala, así como las licencias de software DIRAC 6.0 y EASE 4.4. El programa de diseño SketchUp, se ha utilizado bajo la licencia de la Universidad. El presupuesto también incluye la contratación de los servicios un ingeniero técnico adicional para llevar a cabo las mediciones in situ.

A continuación, se presenta un desglose del presupuesto basado en las horas dedicadas a cada fase del proyecto. Es importante destacar que el costo real es considerablemente menor, dado que los equipos y aplicaciones informáticas utilizadas fueron proporcionados por la Universidad Politécnica de Madrid y la mano de obra no se ha tenido en cuenta.

FASE	ACTIVIDAD	DURACIÓN	PRESUPUESTO PARCIAL	PRESUPUESTO TOTAL
Documentación	Estudio del recinto y documentación necesaria para el proyecto	8h	15€/hora	120 €
Medidas <i>In Situ</i>	Alquiler de Equipos	1 día	600€/día	600 €
	Toma de medidas	8h	15€/hora cada ingeniero	240 €
	Licencia DIRAC 6.0	-	300 €	300 €
Diseño Recinto	Creación del Modelo 3D en SketchUP	100h	15€/hora	1.500 €
	Licencia EASE 4.4	-	300 €	300 €
	Exportación del Modelo 3D a EASE y Ajuste	50h	15€/hora	750 €
Procesado de Datos	Procesado de datos de medidas <i>in situ</i>	50h	15€/hora	750 €
	Procesado de datos simulados en EASE	40h	15€/hora	600 €
Validación del Modelo	Comparación de datos de medidas <i>in situ</i> y simulados	60h	15€/hora	900 €
Memoria	Redacción de memoria	50h	15€/hora	750 €
TOTAL	-	366 h	-	6.810 €

9. Impacto del proyecto

Un buen estudio acústico puede tener un impacto significativo en la vida de las personas, mejorando su salud, bienestar, productividad y disfrute de los espacios en los que viven, trabajan y se recrean. Ambientes con un buen estudio acústico reducen el ruido no deseado, lo que puede disminuir los niveles de estrés y ansiedad o garantizar una mejor experiencia auditiva para el público, como ocurre en el caso de un auditorio con una acústica bien diseñada. Aunque esta contribución pueda parecer indirecta, su impacto en los ámbitos social, de la salud, ambiental, económico y tecnológico es significativo.

De igual manera las repercusiones de este proyecto se pueden relacionar con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. Los ODS son un llamado a acción global para abordar una amplia gama de desafíos, incluyendo aquellos relacionados con la salud, el bienestar, la educación, la igualdad y la sostenibilidad ambiental. Una buena acústica puede contribuir significativamente a varios de estos objetivos de manera directa e indirecta, por ejemplo:

- La acústica adecuada en las salas puede contribuir significativamente a la salud y el bienestar de las personas que las utilizan. La exposición continua al ruido excesivo puede provocar estrés, fatiga y otros problemas de salud. Un diseño acústico adecuado puede reducir estos efectos negativos y promover un entorno más saludable. Estos aspectos se pueden relacionar con el ODS 3 [10], **Salud y Bienestar**.
- Desde una perspectiva social, se podría generar una auralización del recinto, entendida como el proceso mediante el cual se simula la sensación de escuchar sonido tridimensional en el interior de una sala, ofreciendo una experiencia inmersiva mediante el uso de auriculares junto con imágenes 360° de la sala, facilitando la participación remota para aquellos que no puedan acceder físicamente al recinto. Esta iniciativa se vincula con los ODS 4 [11], y 9[13], **Educación de Calidad e Industria, Innovación e Infraestructura**.
- Al poder ajustar virtualmente la configuración de la sala y evitar la necesidad de desplazamientos para realizar mediciones, se logra un ahorro significativo de tiempo y dinero. Se evitan pérdidas económicas al eliminar los gastos de desplazamiento y alquiler de equipos. Además, la reducción de los desplazamientos tiene un impacto positivo en la reducción de la huella de carbono, contribuyendo así a una menor contaminación ambiental. En resumen, este enfoque se relaciona con los ODS 8 [12], y 11 [14], **Trabajo Decente y Crecimiento Económico y Ciudades y Comunidades Sostenibles**.

En el caso de que sea necesario modificar los materiales de la sala, el modelo virtual 3D permite evaluar el impacto de los nuevos materiales en el comportamiento acústico, y elegir aquellos materiales que sean más sostenibles elaborados, por ejemplo, a partir de materiales reciclados que representen alternativas más favorables para el medio ambiente. Esta acción también está alineada con el ODS 11 de *Ciudades y Comunidades Sostenibles*.

- Por último, la colaboración entre diferentes sectores, como la arquitectura, la ingeniería y la salud pública es esencial para abordar los desafíos relacionados con la acústica de las salas de manera integral y efectiva, lo que viene a relacionarse con el ODS 17 [15], **Alianzas para lograr los Objetivos**.

Impacto del proyecto

Todos los datos generados y analizados en este proyecto se integrarán en la base de datos del grupo de investigación GAMMA, que recopila datos de varios recintos y teatros en España. En el futuro, esta base de datos permitirá acceder a información valiosa sobre la acústica de cada recinto con ahorro de tiempo y sin necesidad de realizar desplazamientos físicos.

10. Conclusiones

El propósito de este proyecto es el diseño y la validación del modelo geométrico para el estudio acústico del Auditorio de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid. A lo largo de este documento se recoge todo el proceso de creación y validación del modelo en grandes fases secuenciales, comenzando con las mediciones *in situ* del auditorio, procediendo posteriormente con la creación del modelo geométrico en el software Sketch Up y terminando con las simulaciones acústicas en EASE, de donde se extrae la información necesaria para realizar la validación final del modelo.

El estudio demuestra que las metodologías empleadas para la simulación y la validación acústica son efectivas. La precisión de los modelos geométricos y la correlación entre los valores medidos *in situ* y simulados refuerzan la fiabilidad de las herramientas utilizadas. Aunque el modelo es una simplificación de la realidad y los materiales simulados no tienen exactamente el mismo coeficiente de absorción que los reales, una vez realizada la validación y obtenidos los valores de la métrica JND, se comprueba que el 88% de los valores está entre los escalones 1 y 3, destacando la notable precisión del modelo, y confirmando que los cambios no son demasiado perceptibles para el oyente.

Respecto a los parámetros acústicos, los energéticos LF y LFC, son los más difíciles de predecir y de interpretar debido a su naturaleza aleatoria, subrayando la necesidad de desarrollar modelos que se adapten dinámicamente a variaciones inesperadas. Los valores de los parámetros de inteligibilidad obtenidos permiten comprender perfectamente lo que ocurre en el escenario, en la zona de audiencia. Los parámetros temporales tienen mayor precisión que los energéticos. Junto con el resto de los parámetros, todos ellos indican que la sala tiene una buena acústica.

En general, la desviación típica de los parámetros medidos es correcta, aunque aumenta en las bandas de frecuencia de ambos extremos debido a la limitación de emisión de la fuente.

La estructuración del proyecto en fases secuenciales ha facilitado su ejecución, promoviendo un trabajo organizado y minucioso. En estudios de impacto ambiental, control de ruido y vibraciones, diseño de espacios de espectáculos, etc., es indispensable el cumplimiento de las normas y la legislación de conformidad. En este estudio, se han seguido y aplicado dichas normas, además de haberlas interpretado para este caso específico.

La creación del modelo del auditorio requiere el uso de programas de modelado, como AutoCad o SketchUp, así como la utilización intensiva del programa de simulación acústica EASE, lo que en conjunto ha permitido profundizar en el conocimiento de estas aplicaciones, y adquirir habilidades y competencias en su manejo.

Por último, el análisis del auditorio ha revelado que el diseño arquitectónico de un recinto tiene un impacto significativo en la acústica de éste, enfatizando así la necesidad de integrar consideraciones acústicas en las primeras etapas del diseño arquitectónico.

Conclusiones

La metodología desarrollada para este estudio es escalable y puede aplicarse a otros recintos y proyectos, abriendo la posibilidad de aumentar la base de datos del grupo GAMMA, en la cual este proyecto pasará a integrarse, para posteriores investigaciones comparativas y desarrollo de nuevas tecnologías en acústica.

El proyecto puede ser utilizado en futuras líneas de trabajo. La capacidad de predecir condiciones y simular diferentes escenarios acústicos mediante este tipo de modelos, antes de implementar cambios físicos, es una ventaja significativa, ya que permite tomar decisiones sobre renovaciones y mejoras, optimizando tanto los costos como la calidad acústica de recintos y auditorios.

11. Referencias

A lo largo de la memoria descriptiva se han citado las siguientes fuentes bibliográficas:

- [1] WIKIPEDIA. Acústica Arquitectónica [on-line]; disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Ac%C3%BAstica_arquitect%C3%B3nica
- [2] AENOR, “UNE-EN ISO 3382-1: Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos”, España, febrero 2010.
- [3] AENOR, “UNE-EN 61672-1: Electroacústica. Sonómetros. Parte 1: Especificaciones”, España, noviembre 2014.
- [4] AENOR, “UNE-EN 60942. Electroacústica. Calibradores Acústicos”, España, febrero 2019.
- [5] AENOR, “UNE-EN ISO 18233: Acústica. Aplicación de nuevos métodos de medición en la acústica de los edificios y recintos”, España, febrero 2007
- [6] “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, 2020.
- [7] “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, 2020.
- [8] “Odeon Room Acoustic Software”, [on-line], disponible en: <https://odeon.dk/learn/articles/room-acoustics/>
- [9] Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos de Telecomunicación. [on-line]; disponible en: <https://www2.coitt.es/index.php>
- [10] ONU, “Objetivos de desarrollo Sostenible. Objetivo 3: Salud y bienestar”, 2024, [on-line], disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/health/>
- [11] ONU, “Objetivos de desarrollo Sostenible. Objetivo 4: Educación de Calidad”, 2024, [on-line], disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/education/>
- [12] ONU, “Objetivos de desarrollo Sostenible. Objetivo 8: Trabajo Decente y Crecimiento Económico”, 2024, [on-line], disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/economic-growth/>
- [13] ONU, “Objetivos de desarrollo Sostenible. Objetivo 9: Industria, Innovación e Infraestructuras, 2024, [on-line], disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>
- [14] ONU, “Objetivos de desarrollo Sostenible. Objetivo 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles”, 2024, [on-line], disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>
- [15] ONU, “Objetivos de desarrollo Sostenible. Objetivo 17: Alianzas para lograr los objetivos”, 2024, [on-line], disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/globalpartnerships/>

Anexo I: Ruido de fondo

En el presente anexo se muestra el ruido de fondo medido en el auditorio de la Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos. En la siguiente tabla se han incluido los niveles medidos en cada punto, junto al promedio de todos ellos y su desviación. En la figura a continuación de la tabla se ha representado gráficamente el promedio y la desviación de estos puntos.

RUIDO DE FONDO [dB]									
Frecuencia (Hz)	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Promedio	Desviación
12,5	30,3	42,9	32,4	40,4	40,2	39,2	39,8	37,9	4,3
16	34,6	40,7	39,7	41,5	43,8	39,4	43,7	40,5	2,9
20	36,7	37,2	38,3	40,5	36,6	36,6	37,5	37,6	1,3
25	37,6	38,1	36,7	44,0	39,5	38,5	39,7	39,2	2,2
31,5	39,8	34,6	35,5	32,8	38,1	40,0	41,5	37,5	3,0
40	35,0	32,7	31,3	31,4	37,1	38,4	41,4	35,3	3,5
50	33,6	35,7	36,0	35,7	43,1	44,1	40,4	38,4	3,8
63	28,9	29,3	28,2	29,5	31,7	35,5	36,7	31,4	3,2
80	29,0	26,6	25,5	24,2	27,2	31,4	34,8	28,4	3,4
100	28,4	28,9	31,0	27,8	28,1	30,7	32,1	29,6	1,6
125	27,2	25,8	25,8	31,2	28,1	30,4	33,5	28,9	2,7
160	25,1	24,0	32,1	44,1	39,5	29,3	31,2	32,2	6,8
200	23,2	25,7	29,8	24,0	25,7	27,5	30,2	26,6	2,5
250	21,2	21,8	18,4	23,0	23,7	23,5	25,5	22,4	2,1
315	20,7	19,6	17,8	33,5	26,2	23,1	24,5	23,6	4,8
400	18,3	18,4	18,4	19,0	21,6	23,4	23,2	20,3	2,2
500	17,9	20,1	19,6	18,0	17,8	23,0	22,4	19,8	2,0
630	17,5	18,5	16,7	15,6	16,7	23,7	22,7	18,8	2,9
800	18,7	16,5	13,5	14,5	18,6	25,7	24,5	18,9	4,3
1000	18,9	17,1	14,1	14,6	19,0	26,5	25,1	19,3	4,5
1250	19,3	15,4	12,5	13,0	18,5	25,4	24,0	18,3	4,7
1600	16,5	14,2	10,7	11,5	16,6	23,5	22,6	16,5	4,6
2000	13,6	12,0	9,5	10,8	13,5	20,6	17,6	13,9	3,6
2500	13,6	11,4	9,5	11,6	11,2	16,8	13,0	12,4	2,2
3150	13,1	12,7	8,4	12,7	10,0	13,4	9,2	11,4	1,9
4000	12,7	12,4	7,5	10,4	9,8	11,5	9,4	10,5	1,7
5000	12,8	10,5	7,6	9,0	9,1	10,5	9,9	9,9	1,5
6300	11,2	9,7	7,9	9,0	9,0	9,4	8,9	9,3	0,9
8000	10,7	9,6	8,6	8,9	10,4	9,6	8,5	9,5	0,8
10000	10,8	9,8	9,5	9,9	10,5	8,5	8,4	9,6	0,8
12500	9,6	12,5	13,6	12,0	9,0	8,4	8,6	10,5	2,0
16000	8,4	10,0	12,5	12,1	8,7	8,6	8,6	9,8	1,6
20000	9,6	10,1	9,3	9,8	8,8	9,4	9,3	9,5	0,4

Tabla 55. Valores de ruido de fondo

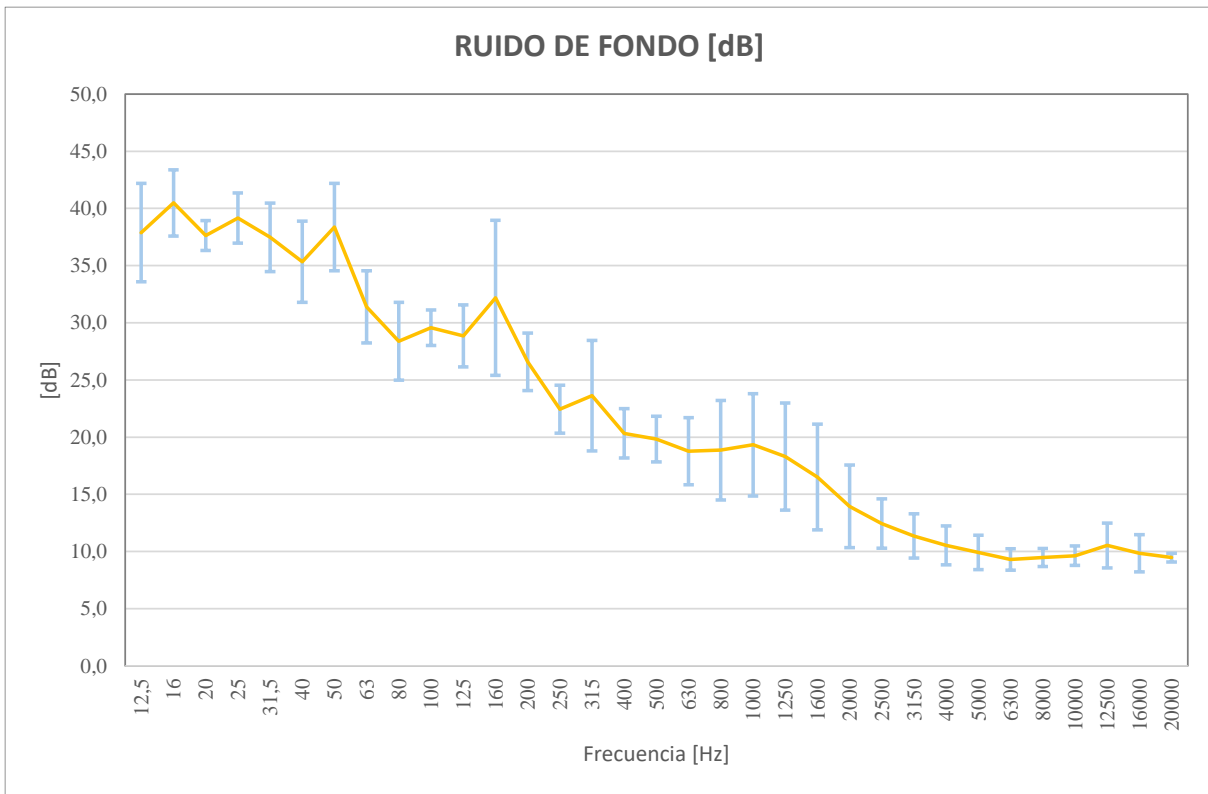


Figura 94. Valores de ruido de fondo

Anexo II: Estudio acústico en octavas

En este Anexo, se presentan todos los datos medidos *in situ* en el auditorio de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, en bandas de octava. Estos datos se entregarán a la propia Escuela.

A continuación, se presentan los promedios y desviaciones de los valores medidos de todos los parámetros acústicos medidos en las diferentes zonas del auditorio sin procesar.

• **EDT**

Tabla 56. Promedios y Desviación por Zonas en Octavas EDT [s]

EDT Promedios					EDT Desviaciones				
Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Escenario	Total	Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Escenario	Total
31,5	1,14	1,50	1,64	1,28	31,5	0,35	0,35	0,70	0,42
63	0,94	1,47	0,69	1,10	63	0,25	0,19	0,03	0,34
125	1,35	1,40	0,95	1,35	125	0,28	0,17	0,11	0,26
250	1,14	1,27	0,97	1,17	250	0,14	0,12	0,08	0,15
500	1,01	1,12	0,78	1,03	500	0,10	0,10	0,05	0,13
1000	1,03	1,16	0,86	1,06	1000	0,07	0,07	0,03	0,10
2000	0,98	1,17	0,77	1,03	2000	0,08	0,06	0,04	0,13
4000	0,88	1,01	0,72	0,91	4000	0,08	0,06	0,07	0,10
8000	0,67	0,77	0,49	0,69	8000	0,11	0,11	0,02	0,13
16.000	0,54	0,57	0,41	0,54	16.000	0,12	0,13	0,03	0,13

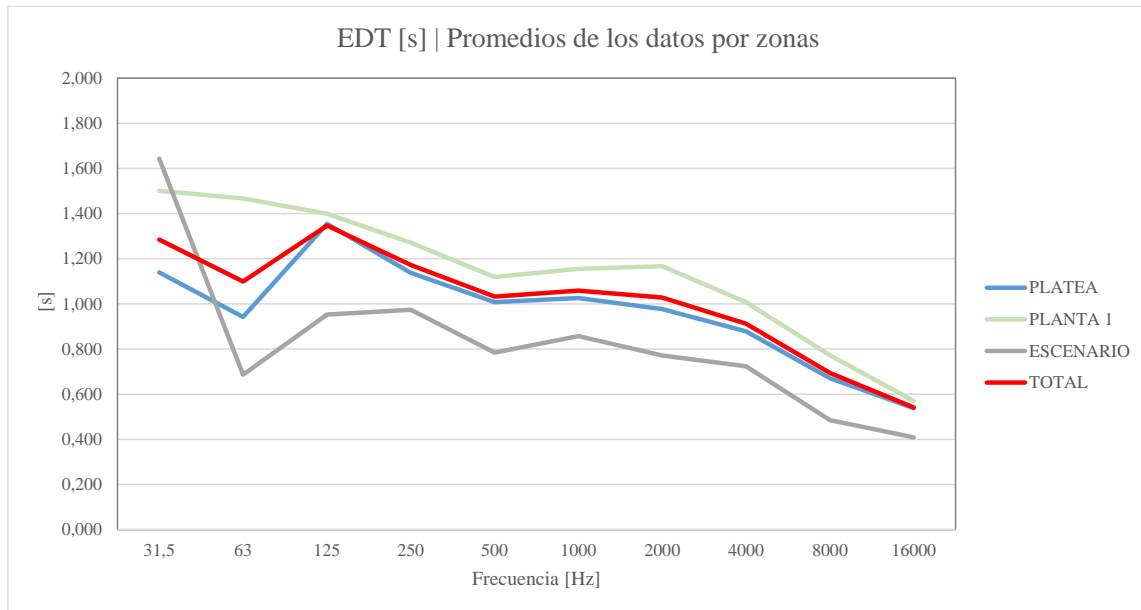


Figura 95. Promedios por Zonas en Octavas EDT

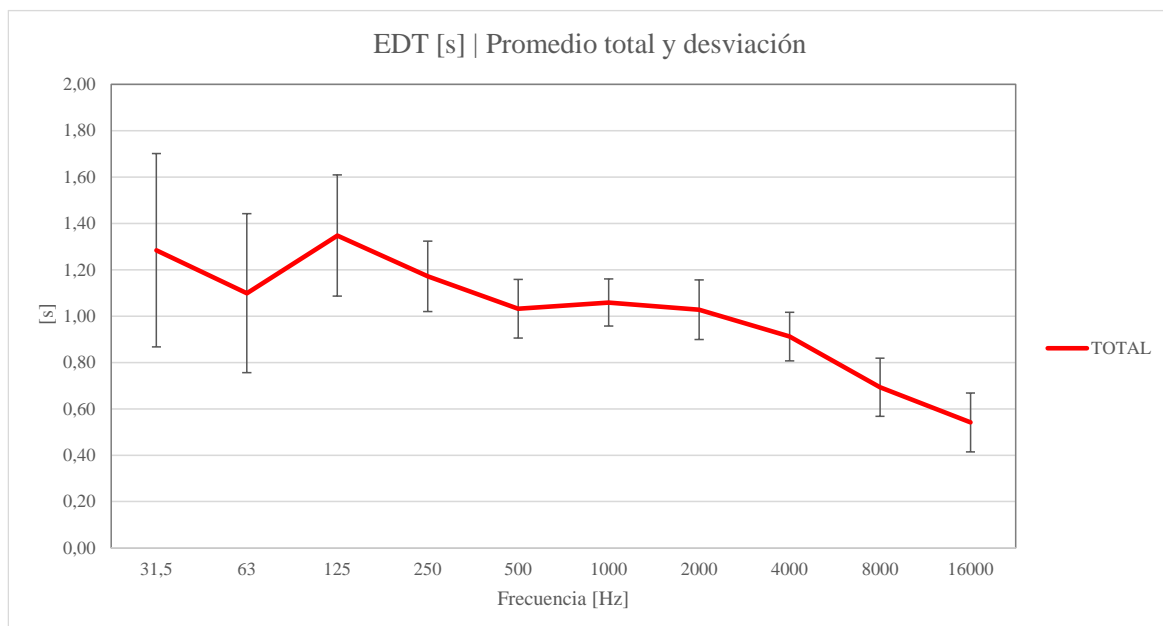


Figura 96. Promedio y Desviación Total Octavas EDT

• **RT**

Tabla 57. Promedios y Desviación por Zonas en Octavas RT [s]

RT Promedios					RT Desviaciones				
Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Escenario	Total	Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Escenario	Total
31,5	1,37	1,54	1,38	1,42	31,5	0,32	0,39	0,12	0,35
63	1,18	1,34	0,95	1,22	63	0,17	0,15	0,12	0,19
125	1,34	1,29	1,13	1,31	125	0,19	0,15	0,07	0,18
250	1,06	1,09	1,08	1,07	250	0,06	0,08	0,03	0,07
500	0,96	1,02	0,98	0,98	500	0,04	0,05	0,01	0,05
1000	1,01	1,06	1,02	1,03	1000	0,03	0,03	0,02	0,04
2000	1,02	1,04	1,03	1,02	2000	0,02	0,02	0,01	0,03
4000	0,95	0,94	0,93	0,94	4000	0,03	0,02	0,01	0,03
8000	0,81	0,79	0,84	0,81	8000	0,04	0,02	0,01	0,04
16.000	0,64	0,66	0,70	0,65	16.000	0,05	0,03	0,02	0,05

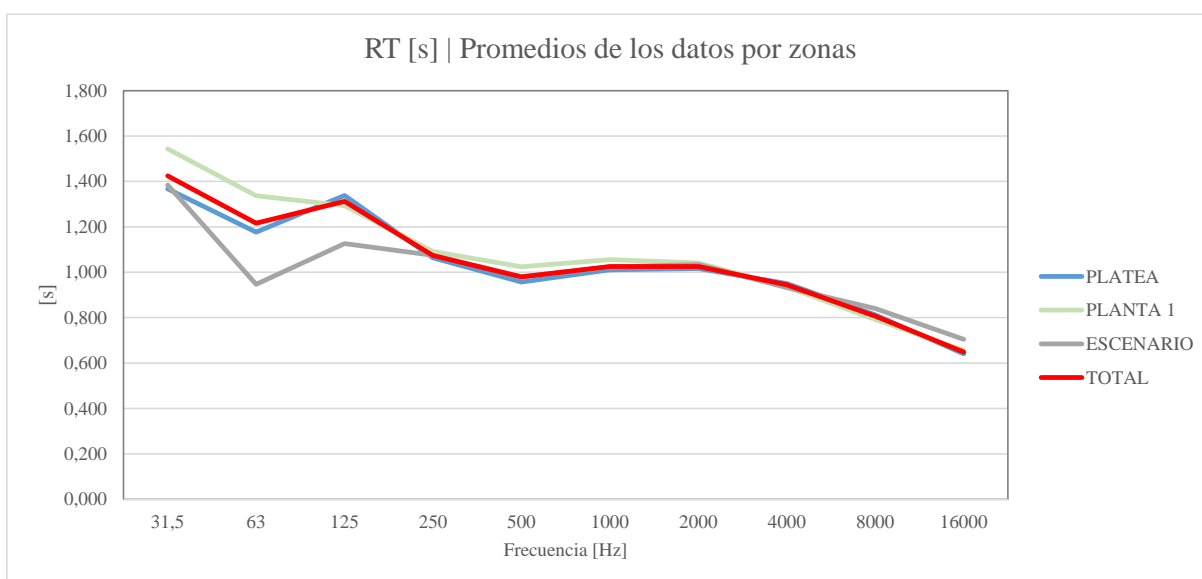


Figura 97. Promedios por Zonas en Octavas RT

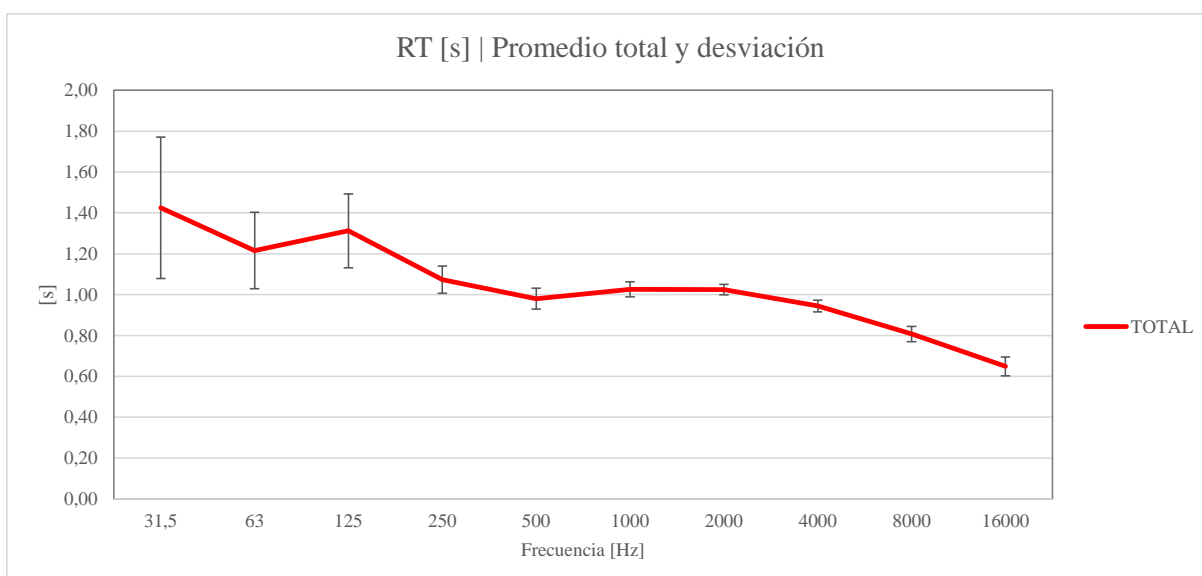


Figura 98. Promedio y Desviación Total Octavas RT

• **T20**

Tabla 58. Promedios y Desviación por Zonas en Octavas T20 [s]

T20 Promedios					T20 Desviaciones				
Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Escenario	Total	Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Escenario	Total
31,5	1,38	1,62	1,24	1,45	31,5	0,23	0,39	0,16	0,31
63	1,15	1,32	0,91	1,19	63	0,19	0,15	0,08	0,20
125	1,30	1,29	1,17	1,29	125	0,15	0,16	0,17	0,15
250	1,04	1,05	1,04	1,04	250	0,08	0,07	0,06	0,08
500	0,94	1,02	0,97	0,97	500	0,05	0,05	0,03	0,06
1000	1,00	1,07	0,98	1,02	1000	0,04	0,04	0,06	0,05
2000	1,02	1,04	1,03	1,03	2000	0,03	0,03	0,04	0,03
4000	0,95	0,94	0,93	0,94	4000	0,03	0,02	0,01	0,03
8000	0,80	0,79	0,82	0,80	8000	0,05	0,02	0,02	0,04
16.000	0,62	0,66	0,64	0,63	16.000	0,05	0,03	0,11	0,05

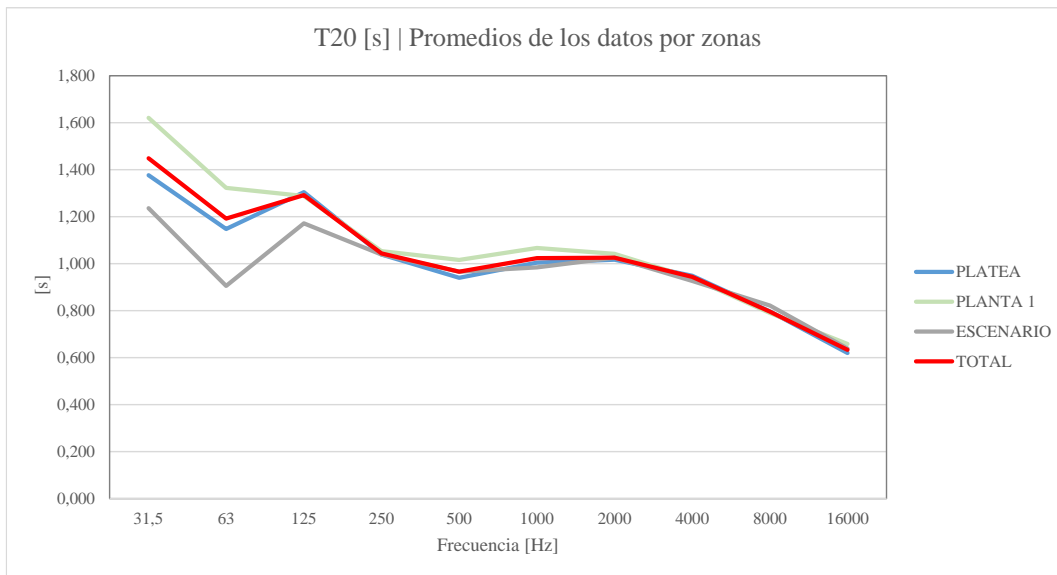


Figura 99. Promedios por Zonas en Octavas T20

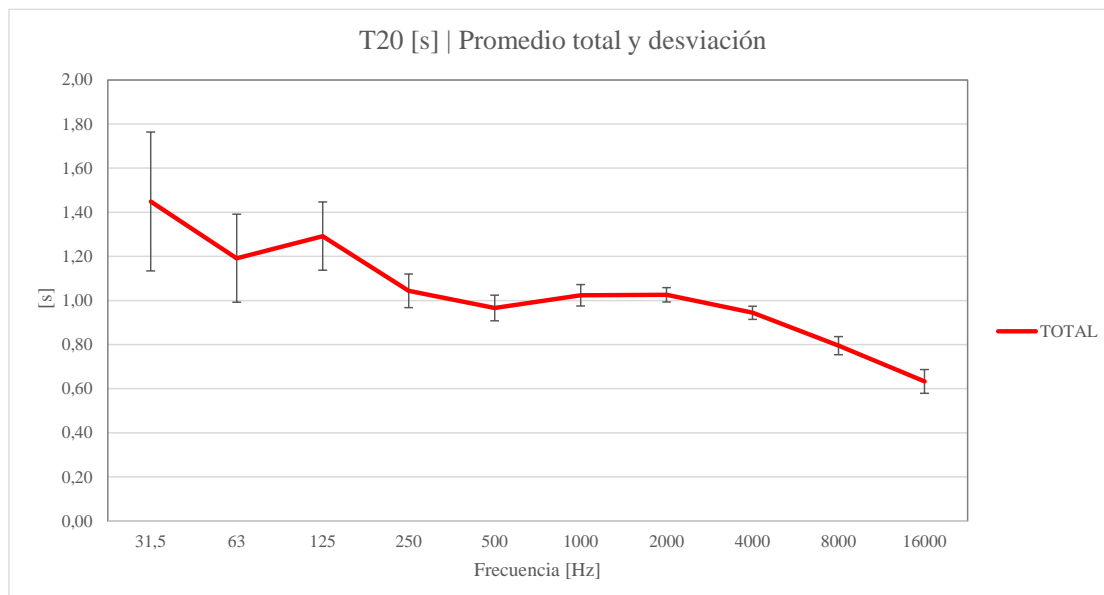


Figura 100. Promedio y Desviación Total Octavas T20

• **T30**

Tabla 59. Promedios y Desviación por Zonas en Octavas T30 [s]

T30 Promedios					T30 Desviaciones				
Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Escenario	Total	Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Escenario	Total
31,5	1,40	1,44	1,37	1,41	31,5	0,28	0,32	0,14	0,29
63	1,18	1,33	0,93	1,21	63	0,17	0,14	0,11	0,18
125	1,30	1,26	1,12	1,28	125	0,12	0,14	0,06	0,13
250	1,06	1,08	1,08	1,07	250	0,06	0,06	0,03	0,05
500	0,96	1,02	0,98	0,98	500	0,04	0,03	0,01	0,04
1000	1,01	1,05	1,02	1,03	1000	0,02	0,02	0,02	0,03
2000	1,01	1,04	1,03	1,02	2000	0,02	0,02	0,01	0,02
4000	0,95	0,93	0,93	0,94	4000	0,03	0,02	0,01	0,03
8000	0,81	0,79	0,84	0,81	8000	0,04	0,02	0,01	0,03
16.000	0,64	0,65	0,70	0,65	16.000	0,05	0,03	0,02	0,05

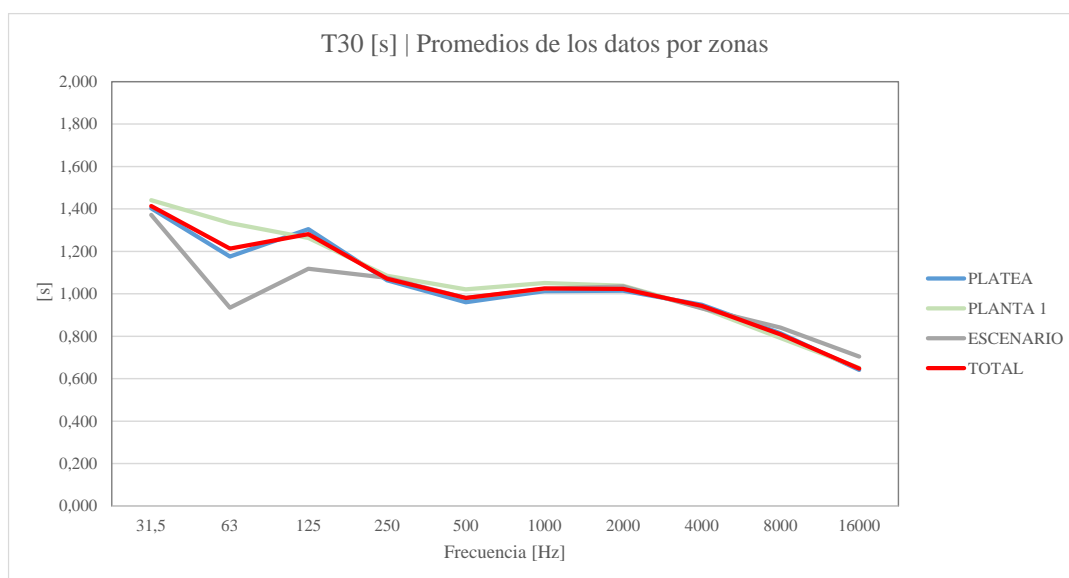


Figura 101. Promedios por Zonas en Octavas T30

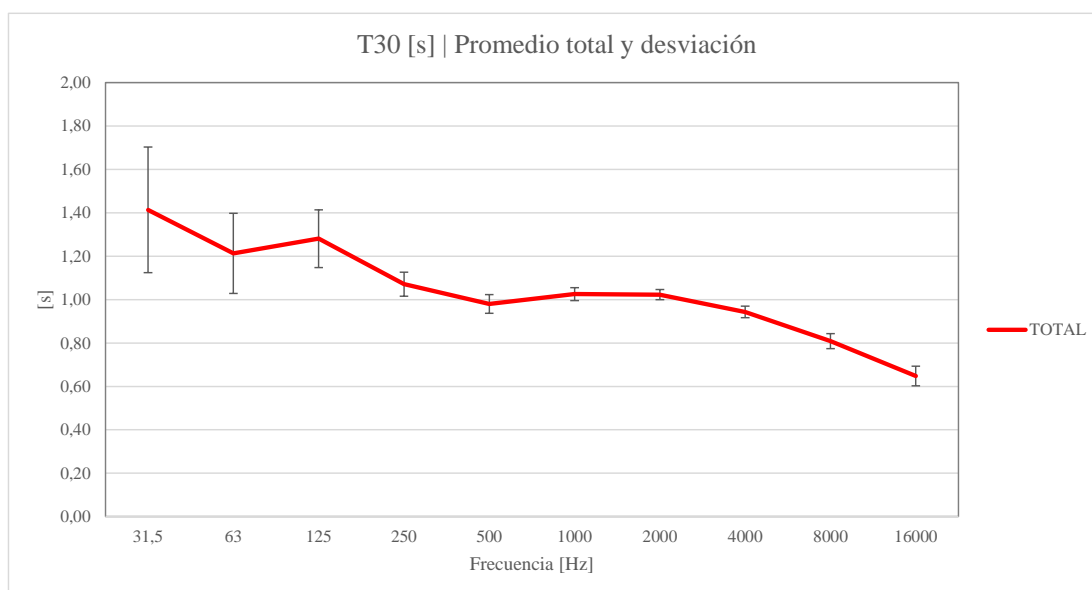


Figura 102. Promedio y Desviación Total Octavas T30

• **C50**

Tabla 60. Promedios y Desviación por Zonas en Octavas C50[dB]

C50 Promedios					C50 Desviaciones				
Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Escenario	Total	Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Escenario	Total
31,5	1,45	-1,43	-0,40	-0,09	31,5	2,42	2,13	0,56	2,96
63	3,34	-3,59	4,72	-0,74	63	2,49	1,45	1,37	5,69
125	-1,79	-2,64	1,16	-2,54	125	3,10	2,14	2,39	3,79
250	-1,42	-1,87	0,03	-2,34	250	2,34	1,50	0,93	2,80
500	0,59	-0,34	4,69	-0,31	500	2,27	1,38	3,10	3,54
1000	1,37	-0,40	3,07	-0,07	1000	1,58	1,08	1,12	2,89
2000	1,70	0,13	3,86	0,22	2000	1,45	1,28	0,49	3,05
4000	1,79	1,40	4,31	0,79	4000	1,64	1,75	0,79	2,98
8000	5,18	4,00	5,02	3,52	8000	1,45	1,79	1,69	3,10
16.000	6,64	6,40	5,93	5,27	16.000	1,94	1,84	1,34	3,16

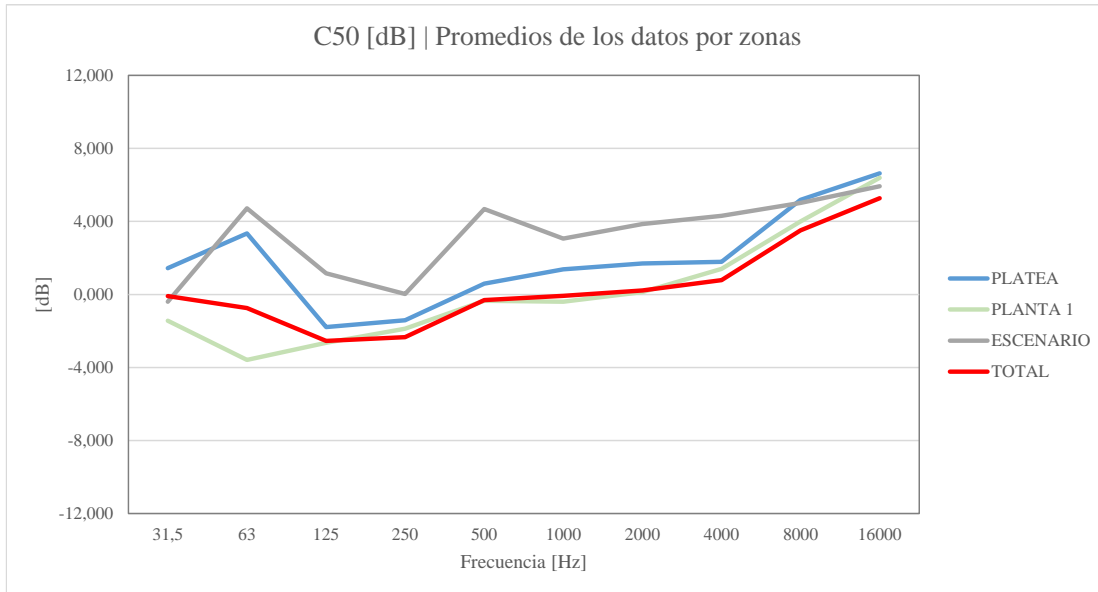


Figura 103. Promedios por Zonas en Octavas C50

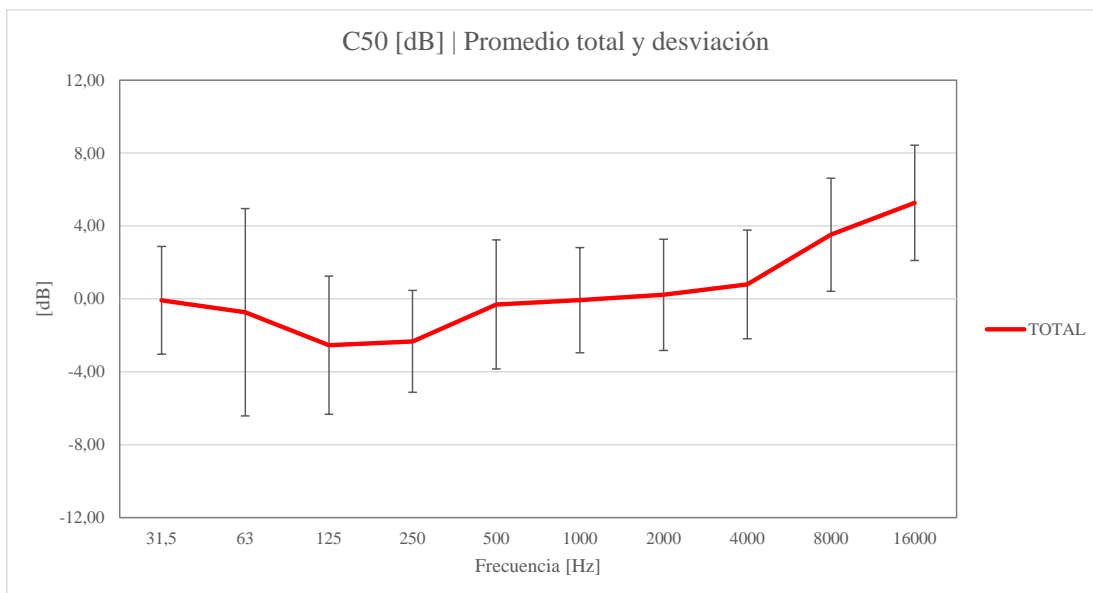


Figura 104. Promedio y Desviación Total Octavas C50

• **C80**

Tabla 61. Promedios y Desviación por Zonas en Octavas C80 [dB]

C80 Promedios					C80 Desviaciones				
Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Escenario	Total	Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Escenario	Total
31,5	3,03	0,82	2,43	2,28	31,5	2,69	2,21	1,52	2,69
63	5,76	-0,78	7,89	3,75	63	2,19	1,55	1,50	3,74
125	0,66	0,17	4,54	0,71	125	2,95	2,11	3,17	2,86
250	1,68	0,69	3,62	1,46	250	2,33	1,46	1,22	2,14
500	3,40	2,18	7,48	3,22	500	2,05	1,17	1,59	2,13
1000	4,08	2,03	6,39	3,54	1000	1,51	0,97	0,80	1,76
2000	4,60	2,45	7,05	4,03	2000	1,51	1,07	0,38	1,82
4000	4,88	3,96	7,25	4,71	4000	1,59	1,50	0,84	1,69
8000	8,47	6,80	9,51	7,99	8000	1,41	1,58	0,43	1,66
16.000	10,21	8,96	8,92	9,73	16.000	1,96	2,03	1,59	2,05

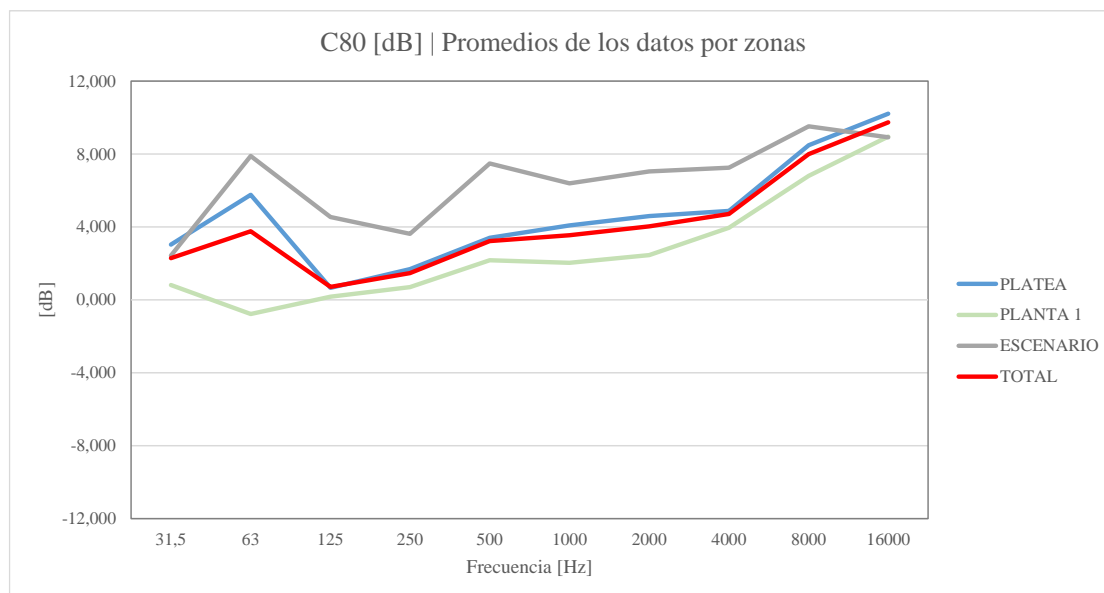


Figura 105. Promedios por Zonas en Octavas C80

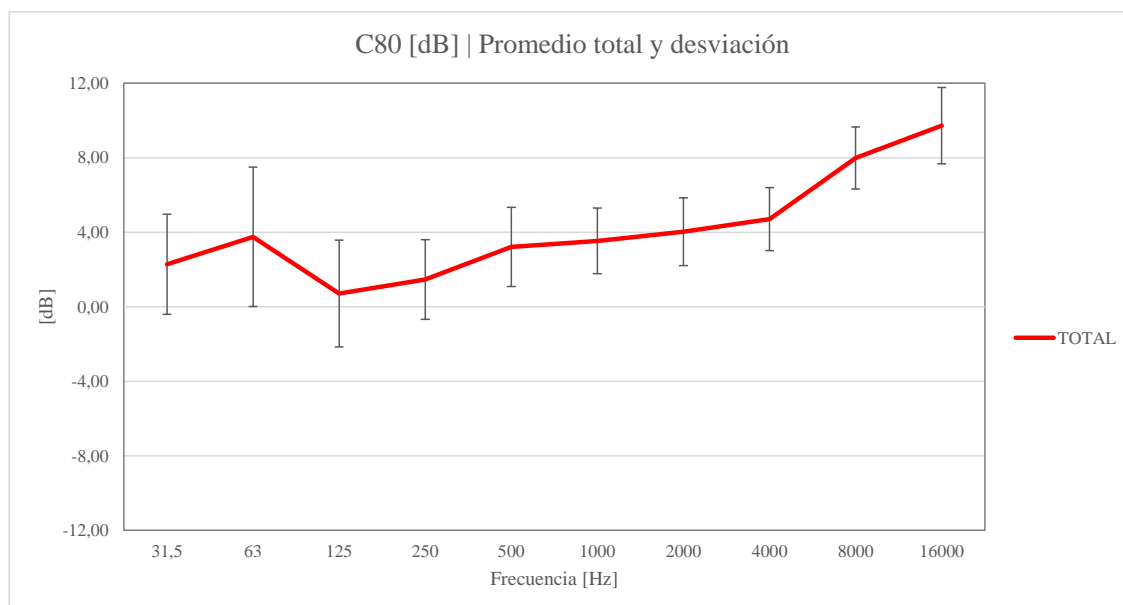


Figura 106. Promedio y Desviación Total Octavas C80

• **D50**

Tabla 62. Promedios y Desviación por Zonas en Octavas D50[-]

D50 Promedios					D50 Desviaciones				
Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Escenario	Total	Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Escenario	Total
31,5	0,58	0,42	0,48	0,52	31,5	0,13	0,12	0,03	0,14
63	0,67	0,31	0,75	0,56	63	0,13	0,07	0,06	0,21
125	0,41	0,36	0,57	0,40	125	0,15	0,11	0,13	0,15
250	0,42	0,40	0,50	0,42	250	0,12	0,08	0,05	0,11
500	0,53	0,48	0,73	0,52	500	0,12	0,08	0,15	0,12
1000	0,58	0,48	0,67	0,55	1000	0,08	0,06	0,06	0,09
2000	0,59	0,51	0,71	0,57	2000	0,07	0,07	0,02	0,09
4000	0,60	0,58	0,73	0,60	4000	0,08	0,10	0,04	0,09
8000	0,76	0,71	0,76	0,74	8000	0,06	0,08	0,07	0,07
16.000	0,81	0,81	0,79	0,81	16.000	0,07	0,07	0,05	0,07

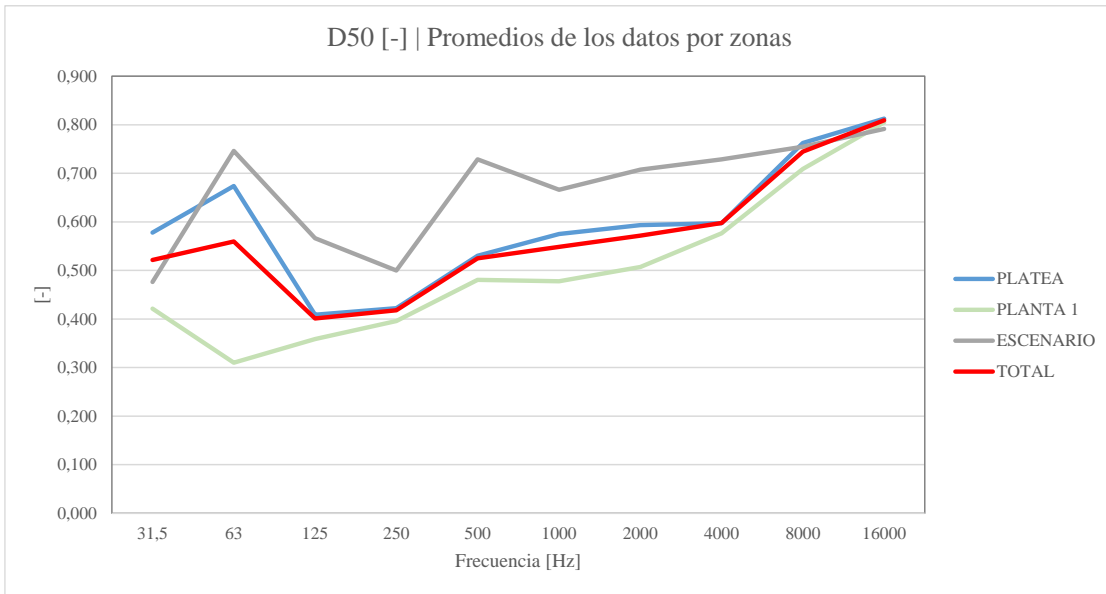


Figura 107. Promedios por Zonas en Octavas D50

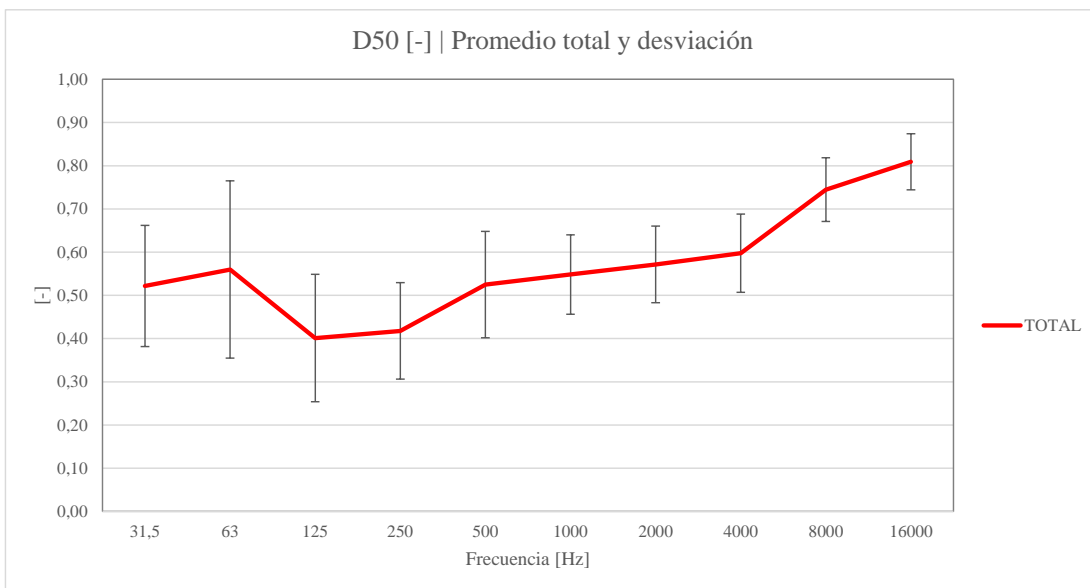


Figura 108. Promedio y Desviación Total Octavas D50

• **TS**

Tabla 63. Promedios y Desviación por Zonas en Octavas Ts [s]

TS Promedios					TS Desviaciones				
Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Escenario	Total	Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Escenario	Total
31,5	96,43	128,51	106,16	107,22	31,5	15,48	23,58	16,56	23,60
63	65,79	130,63	47,35	85,52	63	14,26	18,43	10,46	34,91
125	108,54	114,56	72,34	108,49	125	26,72	17,24	11,18	25,07
250	87,55	97,88	77,64	90,31	250	18,10	9,81	8,61	16,43
500	67,53	80,87	41,60	70,38	500	14,84	7,46	16,00	15,91
1000	61,65	79,87	49,34	66,80	1000	10,90	7,15	4,95	13,41
2000	59,16	74,90	45,29	63,43	2000	10,37	9,81	3,70	13,03
4000	57,80	60,13	42,88	57,73	4000	11,07	12,00	5,94	11,72
8000	34,19	41,24	35,98	36,54	8000	7,89	9,78	4,70	8,98
16.000	24,88	27,74	29,83	26,07	16.000	7,14	7,54	2,70	7,25

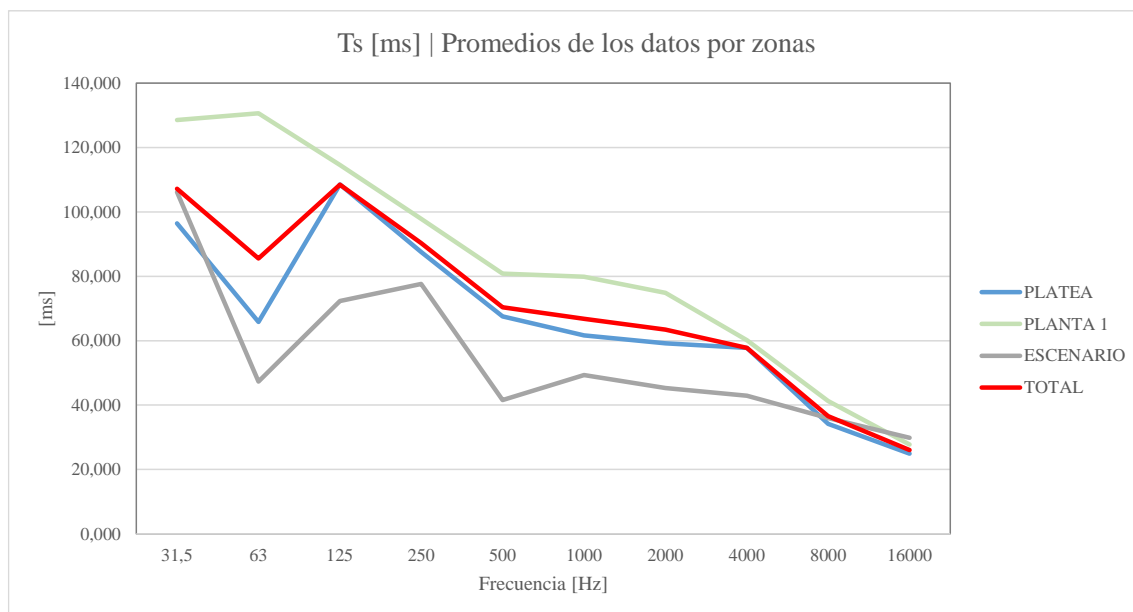


Figura 109. Promedios por Zonas en Octavas Ts

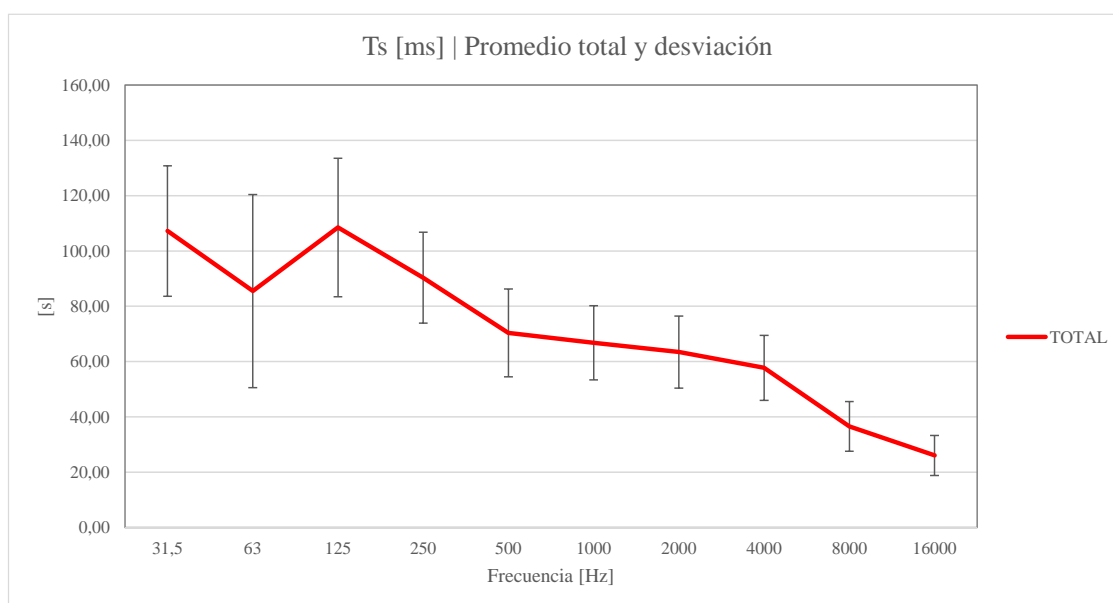


Figura 110. Promedio y Desviación Total Octavas Ts

• **LF**

Tabla 64. Promedios y Desviación por Zonas en Octavas LF [-]

LF Promedios					LF Desviaciones				
Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Escenario	Total	Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Escenario	Total
31,5	0,016	0,023	0,221	0,033	31,5	0,013	0,011	0,108	0,055
63	0,006	0,015	0,013	0,009	63	0,006	0,008	0,005	0,008
125	0,014	0,007	0,000	0,012	125	0,008	0,005	0,000	0,008
250	0,022	0,020	0,040	0,022	250	0,012	0,010	0,017	0,012
500	0,055	0,044	0,051	0,051	500	0,025	0,010	0,022	0,021
1000	0,085	0,076	0,108	0,084	1000	0,030	0,025	0,032	0,029
2000	0,090	0,076	0,108	0,087	2000	0,032	0,029	0,035	0,032
4000	0,119	0,082	0,164	0,109	4000	0,034	0,030	0,076	0,042
8000	0,088	0,069	0,163	0,086	8000	0,042	0,028	0,053	0,043
16.000	0,107	0,073	0,198	0,101	16.000	0,062	0,028	0,066	0,060

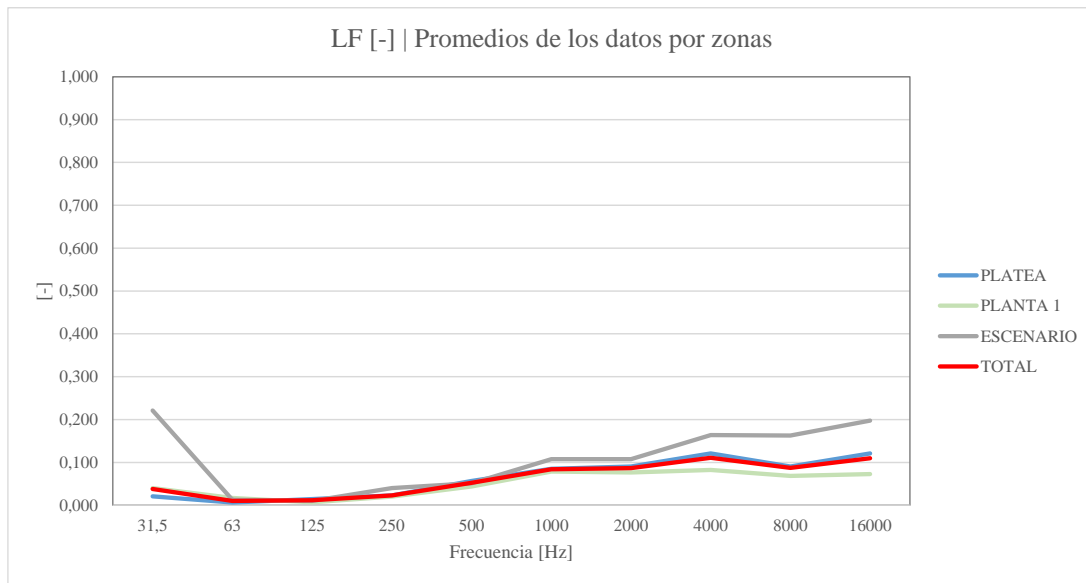


Figura 111. Promedios por Zonas en Octavas LF

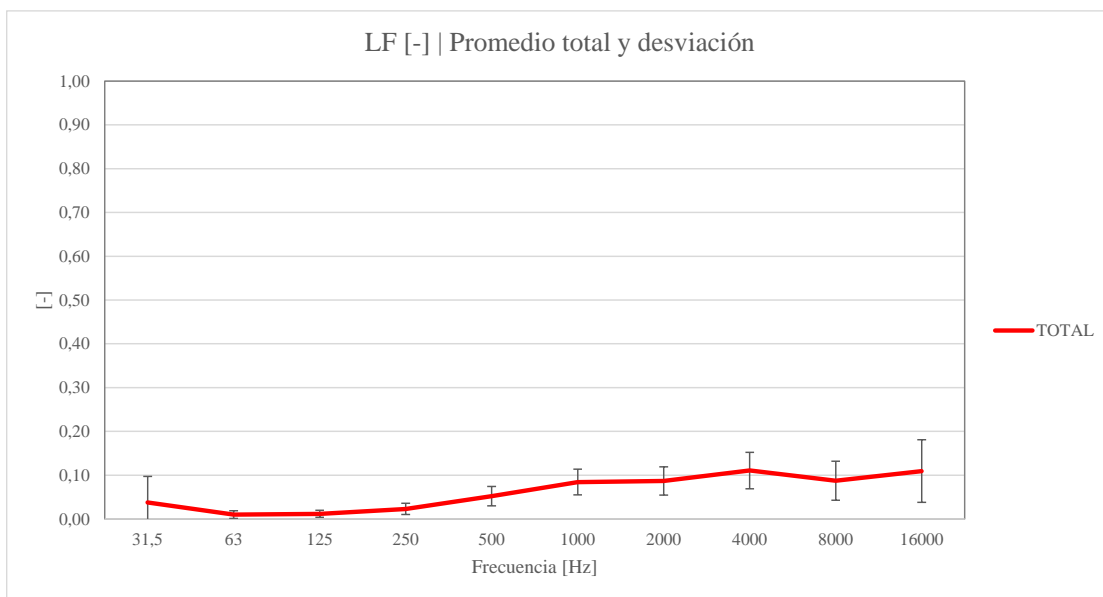


Figura 112. Promedio y Desviación Total Octavas LF

• **LFC**

Tabla 65. Promedios y Desviación por Zonas en Octavas LFC[-]

LFC Promedios					LFC Desviaciones				
Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Escenario	Total	Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Escenario	Total
31,5	4,65	1,62	15,78	5,19	31,5	2,63	0,88	6,73	4,29
63	1,68	8,00	4,78	3,36	63	1,14	4,42	0,91	3,14
125	0,45	0,52	0,17	0,45	125	0,25	0,28	0,07	0,26
250	0,17	0,21	0,12	0,18	250	0,07	0,05	0,04	0,07
500	0,19	0,20	0,11	0,19	500	0,07	0,05	0,04	0,07
1000	0,33	0,39	0,26	0,34	1000	0,09	0,05	0,06	0,09
2000	0,11	0,12	0,07	0,11	2000	0,03	0,02	0,02	0,03
4000	0,11	0,09	0,09	0,10	4000	0,04	0,03	0,02	0,04
8000	0,00	0,00	0,00	0,00	8000	0,00	0,00	0,00	0,00
16.000	27,99	33,14	40,32	30,36	16.000	9,81	6,92	9,18	9,60

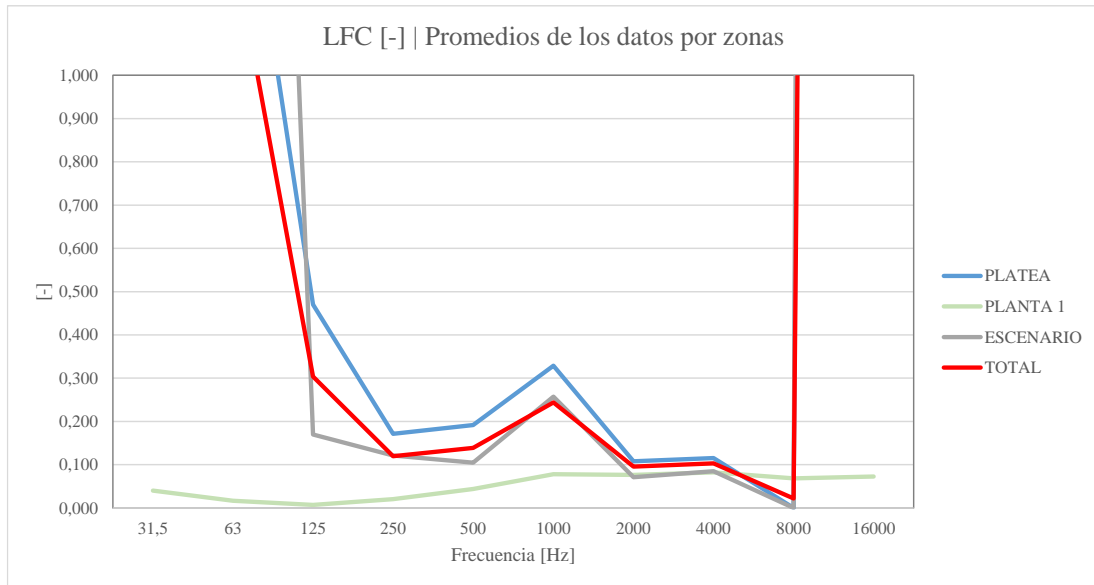


Figura 113. Promedios por Zonas en Octavas LFC

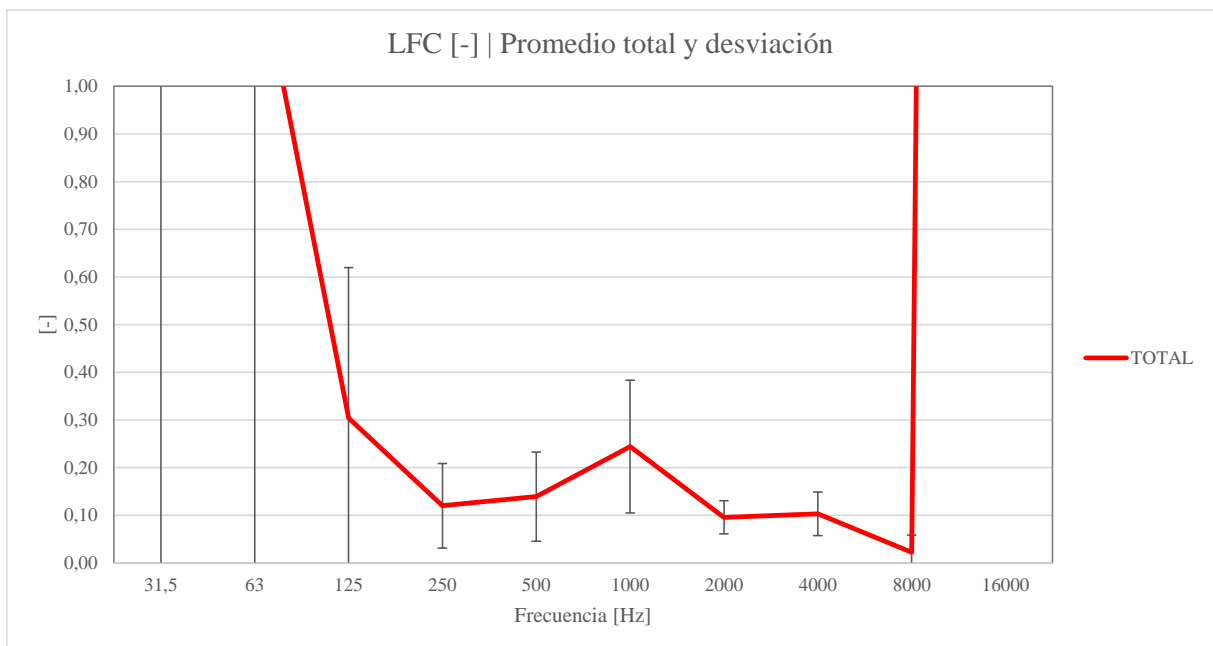


Figura 114. Promedio y Desviación Total Octavas LFC

- **ALCONS**

Tabla 66. Promedios y Desviación por Zonas en Octavas Alcons [%]

ALCONS [%]				
	PLATEA	PLANTA 1	ESCENARIO	TOTAL
PROMEDIO	6	7,06	4,5	6,26
DESVIACIÓN	1	0,91	0,54	1,15

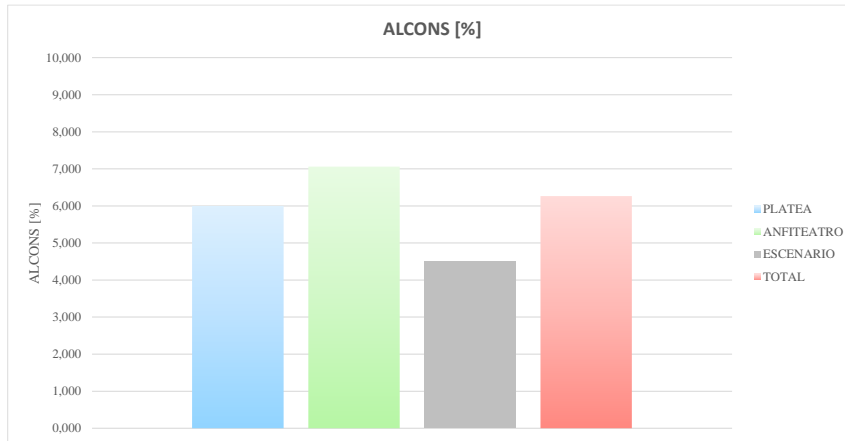


Figura 115. Promedio Alcons por Zonas

- **STI**

Tabla 67. Promedios y Desviación por Zonas en Octavas STI [-]

STI [-]				
	PLATEA	PLANTA 1	ESCENARIO	TOTAL
PROMEDIO	0,621	0,59	0,673	0,61
DESVIACIÓN	0,036	0,023	0,009	0,04

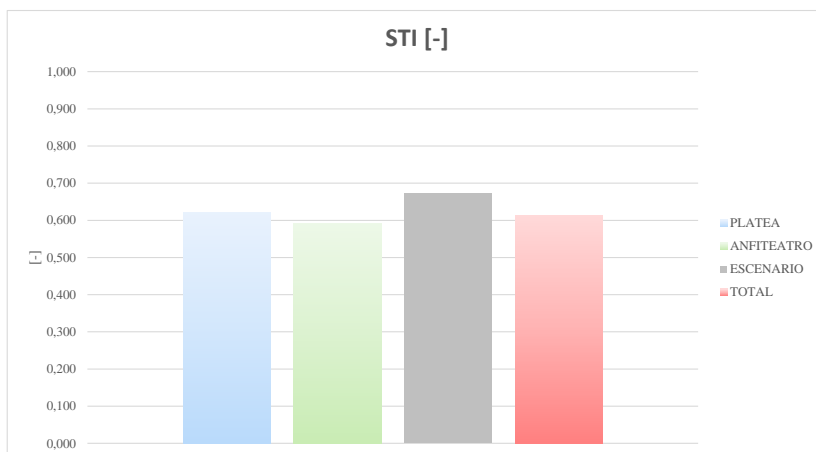


Figura 116. Promedio STI por Zonas

Anexo III: Datos Simulados en EASE en octavas

Una vez realizado todo el proceso de diseño del modelo y simulaciones, se obtienen los valores de los parámetros en octavas del auditorio en EASE. A continuación, se presentan los valores sin procesar, los resultados tras aplicar Chauvenet, y la tabla comparativa junto con los valores de la métrica JND para comprobar que la validación realizada ha sido la correcta.

• **EDT**

Tabla 68. Datos Simulados en octavas EDT [s] sin procesar

EDT Promedios				EDT Desviaciones			
Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Total	Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Total
125	1,55	1,68	1,59	125	0,08	0,04	0,10
250	1,24	1,37	1,29	250	0,08	0,04	0,09
500	1,11	1,30	1,18	500	0,09	0,04	0,12
1000	1,04	1,28	1,12	1000	0,10	0,04	0,14
2000	1,00	1,26	1,09	2000	0,11	0,05	0,15
4000	0,91	1,18	1,00	4000	0,11	0,06	0,16
8000	0,66	0,87	0,73	8000	0,13	0,07	0,15

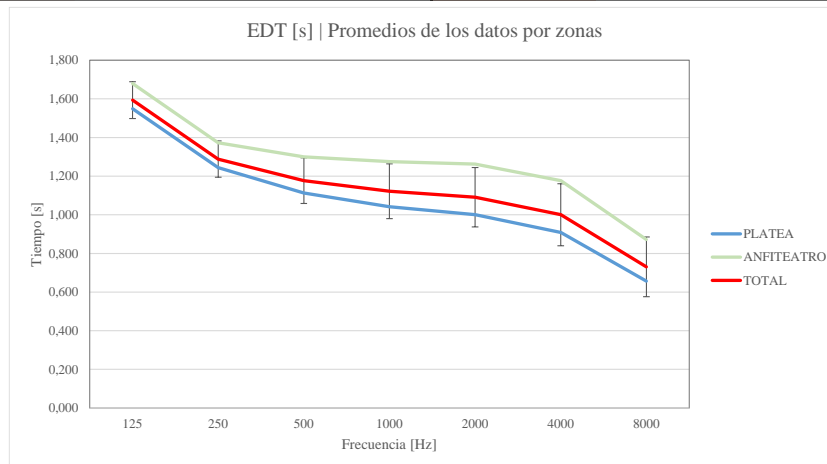


Figura 117. Datos Simulados en octavas EDT sin procesar

Tabla 69. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas EDT

EDT [s] AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
125	1,35	0,26	1,59	0,18	2
250	1,17	0,15	1,29	0,10	1
500	1,03	0,13	1,18	0,14	2
1000	1,06	0,10	1,12	0,06	1
2000	1,03	0,13	1,09	0,06	1
4000	0,91	0,10	1,00	0,10	1
8000	0,69	0,13	0,73	0,05	1

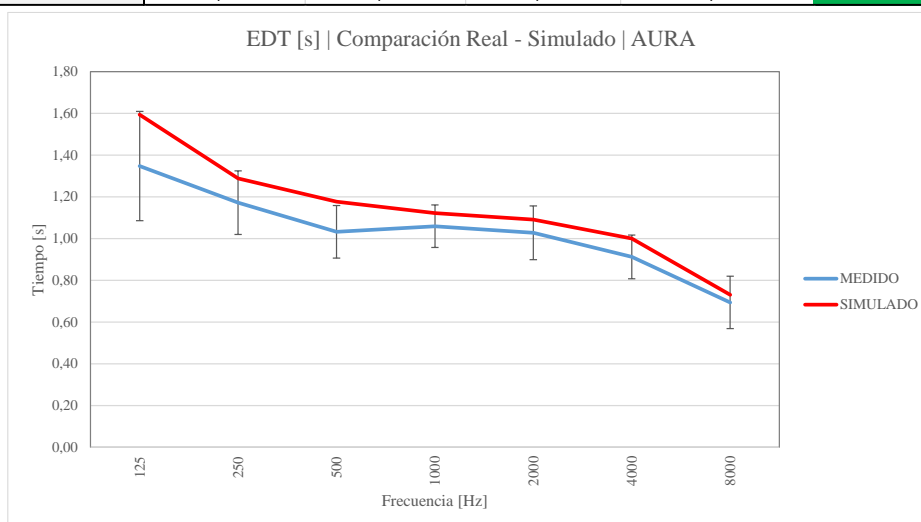


Figura 118. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro EDT

• **T20**

Tabla 70. Datos Simulados en octavas Parámetro T20 [s] sin procesar

T20 Promedios			T20 Desviaciones				
Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Total	Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Total
125	1,58	1,61	1,59	125	0,02	0,01	0,02
250	1,30	1,33	1,31	250	0,02	0,02	0,03
500	1,14	1,18	1,16	500	0,01	0,01	0,02
1000	1,11	1,16	1,12	1000	0,02	0,01	0,03
2000	1,09	1,15	1,11	2000	0,02	0,01	0,04
4000	1,02	1,07	1,04	4000	0,03	0,01	0,04
8000	0,75	0,80	0,77	8000	0,03	0,01	0,04

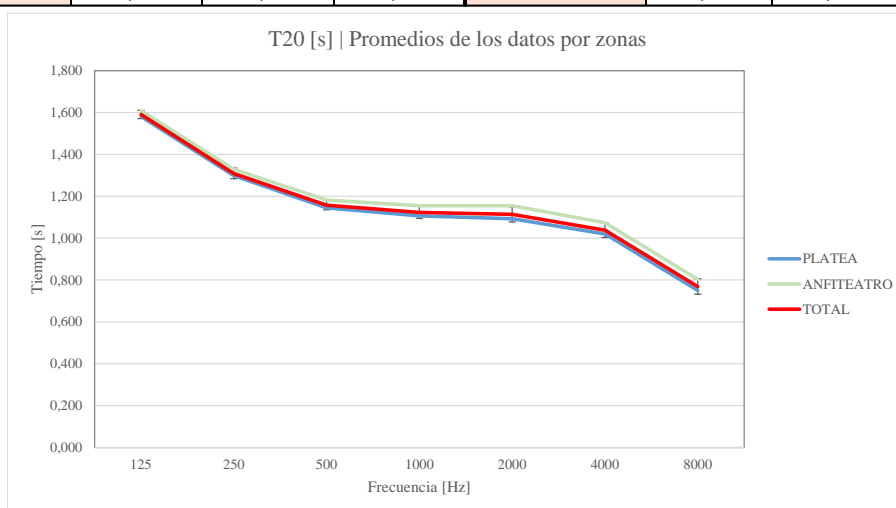


Figura 119. Datos Simulados en octavas Parámetro T20 sin procesar

Tabla 71. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro T20

T20 [s] AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
125	1,29	0,15	1,59	0,23	3
250	1,04	0,08	1,31	0,25	3
500	0,97	0,06	1,16	0,20	2
1000	1,02	0,05	1,12	0,10	1
2000	1,03	0,03	1,11	0,09	1
4000	0,94	0,03	1,04	0,10	2
8000	0,80	0,10	0,77	0,03	1

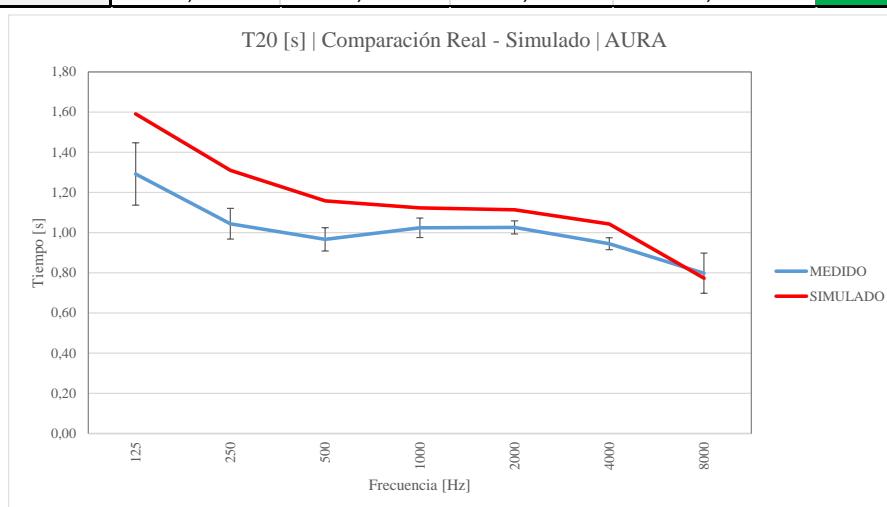


Figura 120. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro T20

• **T30**

Tabla 72. Datos Simulados en octavas Parámetro T30 [s] sin procesar

T30 Promedios				T30 Desviaciones			
Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Total	Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Total
125	1,59	1,62	1,60	125	0,01	0,02	0,02
250	1,33	1,35	1,34	250	0,02	0,02	0,02
500	1,15	1,18	1,16	500	0,01	0,01	0,01
1000	1,12	1,15	1,13	1000	0,02	0,02	0,02
2000	1,11	1,15	1,12	2000	0,02	0,03	0,03
4000	1,04	1,07	1,05	4000	0,02	0,02	0,02
8000	0,78	0,81	0,79	8000	0,03	0,03	0,03

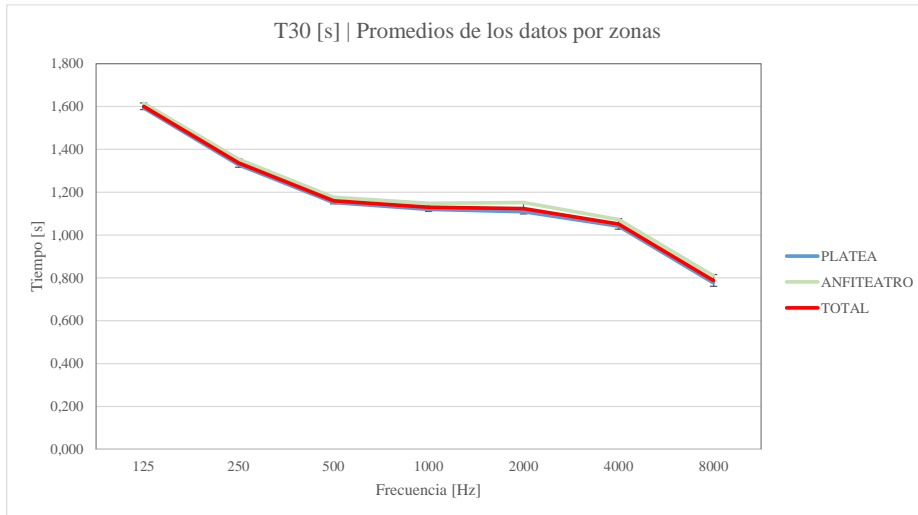


Figura 121. Datos Simulados en octavas Parámetro T30 sin procesar

Tabla 73. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro T30

T30 [s] AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
125	1,29	0,19	1,60	0,24	3
250	1,07	0,10	1,34	0,25	3
500	0,98	0,04	1,16	0,18	2
1000	1,02	0,09	1,13	0,10	2
2000	1,02	0,02	1,12	0,10	1
4000	0,94	0,03	1,05	0,12	2
8000	0,81	0,03	0,79	0,02	1

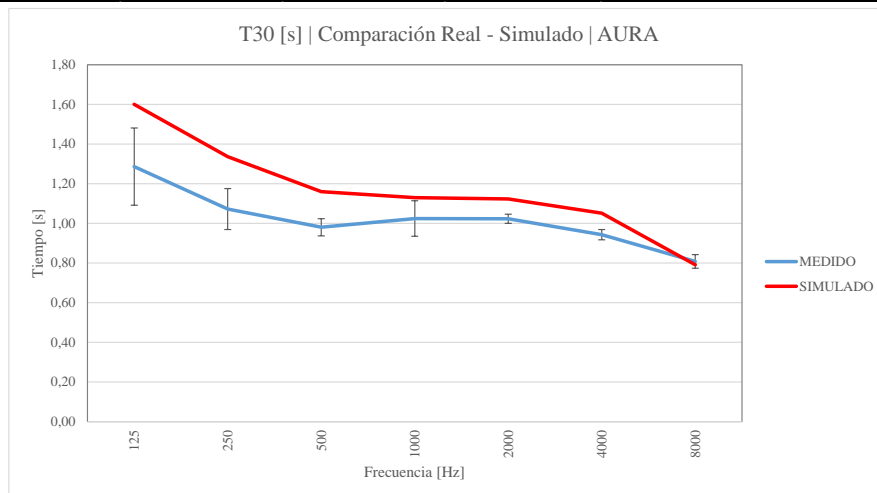


Figura 122. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro T30

• **C50 STD**

Tabla 74. Datos Simulados en octavas Parámetro C50 [dB] sin procesar

C50 Promedios				C50 Desviaciones			
Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Total	Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Total
125	0,71	-0,76	-0,09	125	1,90	0,13	1,31
250	1,75	0,27	0,87	250	1,97	0,14	1,20
500	2,74	1,17	1,80	500	2,09	0,15	1,24
1000	3,67	2,02	2,68	1000	2,20	0,16	1,29
2000	4,02	2,33	3,01	2000	2,24	0,16	1,30
4000	4,63	2,88	3,57	4000	2,33	0,16	1,33
8000	6,56	4,62	5,32	8000	2,63	0,16	1,42

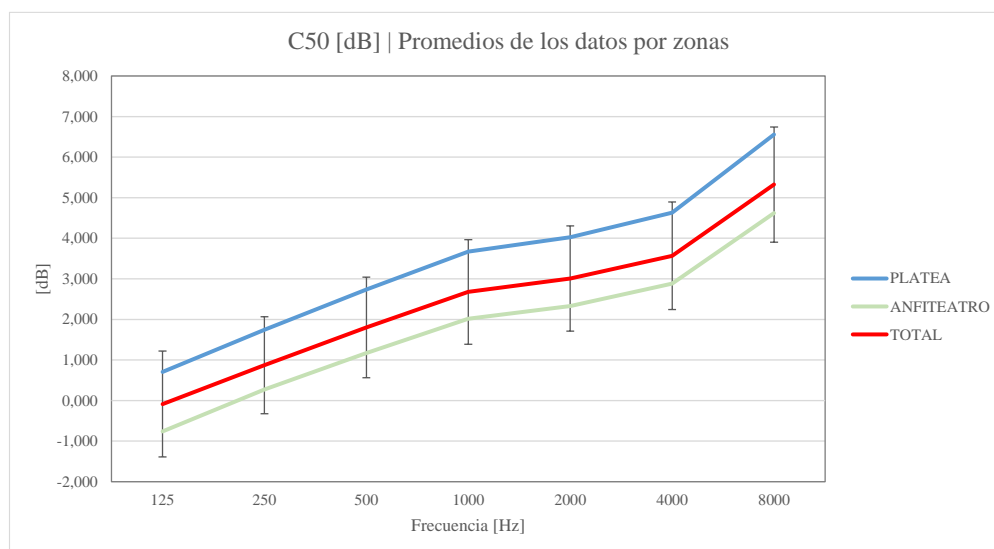


Figura 123. Datos Simulados en octavas Parámetro C50 STD sin procesar

Tabla 75. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro C50 STD

C50 [dB] STD					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO STD	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
125	-2,08	2,89	-0,64	1,44	2
250	-1,77	1,79	0,40	2,17	3
500	0,27	2,33	1,32	1,05	2
1000	0,50	1,37	2,19	1,69	2
2000	1,01	1,46	2,46	1,45	2
4000	1,49	1,53	3,03	1,53	2
8000	4,78	1,66	4,77	0,01	1

• **C50 AURA**

Tabla 76. Datos Simulados en octavas Parámetro C50 [dB] AURA sin procesar

C50 Promedios				C50 Desviaciones			
Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Total	Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Total
125	-1,90	-3,31	-2,38	125	1,50	0,82	1,46
250	-0,40	-2,02	-0,95	250	1,53	0,86	1,54
500	0,46	-1,92	-0,36	500	1,64	0,93	1,83
1000	1,20	-1,90	0,14	1000	1,75	1,07	2,14
2000	1,60	-1,83	0,42	2000	1,78	1,12	2,27
4000	2,34	-1,31	1,09	4000	1,81	1,15	2,37
8000	4,76	1,14	3,52	8000	1,86	1,15	2,38

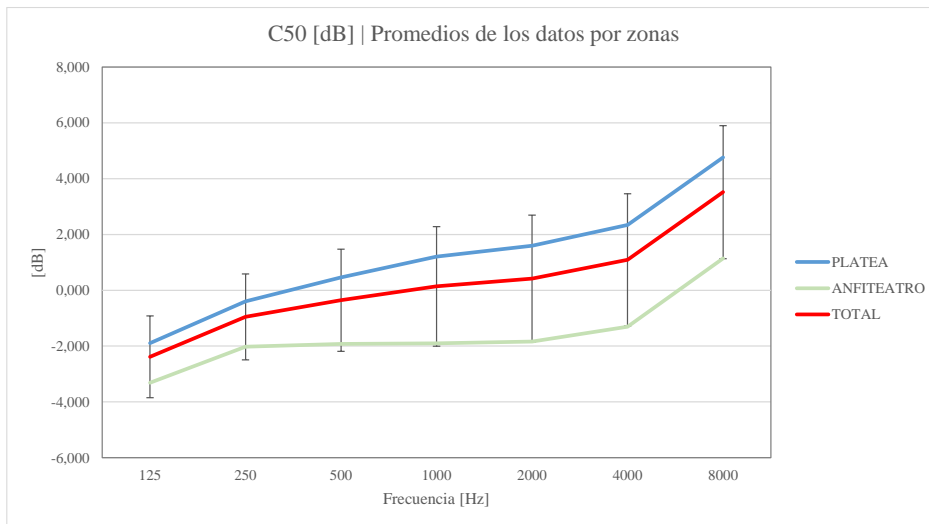


Figura 124. Datos Simulados en octavas Parámetro C50 AURA sin procesar

Tabla 77. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro C50 AURA

C50 [dB] AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO STD	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
125	-2,08	2,89	-2,67	0,59	1
250	-1,77	1,79	-1,25	0,52	1
500	0,27	2,33	-0,36	0,63	1
1000	0,50	1,37	0,14	0,36	1
2000	1,01	1,46	0,42	0,59	1
4000	1,49	1,53	1,09	0,40	1
8000	4,78	1,66	3,52	1,26	2

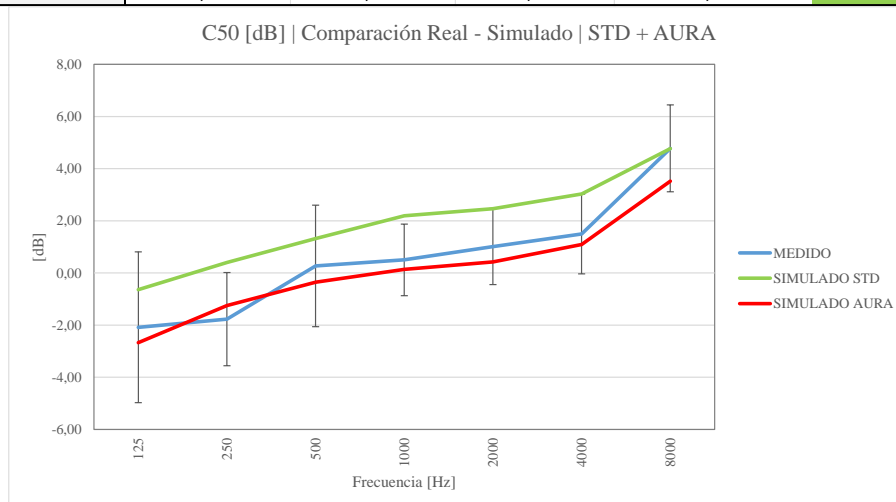


Figura 125. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro C50

• **C80 STD**

Tabla 78. Datos Simulados en octavas Parámetro C80 [dB] STD sin procesar

C80 Promedios				C80 Desviaciones			
Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Total	Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Total
125	2,93	2,24	2,69	125	1,05	0,10	0,91
250	4,21	3,45	3,95	250	1,12	0,10	0,98
500	5,37	4,58	5,10	500	1,18	0,11	1,03
1000	6,48	5,62	6,18	1000	1,25	0,12	1,09
2000	6,89	6,02	6,60	2000	1,27	0,12	1,11
4000	7,64	6,75	7,34	4000	1,31	0,13	1,14
8000	10,06	9,09	9,73	8000	1,42	0,13	1,24

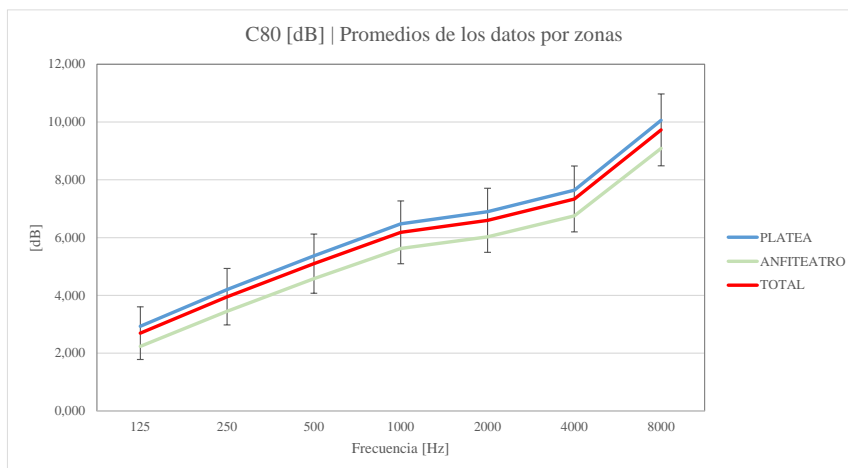


Figura 126. Datos Simulados en octavas Parámetro C80 STD sin procesar

Tabla 79. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro C80 STD

C80 [dB] STD					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO STD	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
125	0,71	2,86	2,28	1,57	2
250	1,22	1,78	3,51	2,29	3
500	2,98	1,85	4,63	1,65	2
1000	3,41	1,67	5,68	2,28	3
2000	3,88	1,70	6,08	2,20	3
4000	4,55	1,60	6,81	2,26	3
8000	7,99	1,66	9,16	1,17	2

• **C80 AURA**

Tabla 80. Datos Simulados en octavas Parámetro C80 [dB] AURA sin procesar

C80 Promedios				C80 Desviaciones			
Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Total	Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Total
125	0,78	-0,86	0,22	125	1,34	0,72	1,40
250	2,39	0,54	1,76	250	1,37	0,75	1,49
500	3,28	0,68	2,39	500	1,48	0,81	1,78
1000	4,01	0,75	2,89	1000	1,59	0,92	2,09
2000	4,40	0,82	3,17	2000	1,61	0,98	2,23
4000	5,23	1,39	3,91	4000	1,66	1,01	2,35
8000	8,12	4,12	6,75	8000	1,79	1,10	2,48

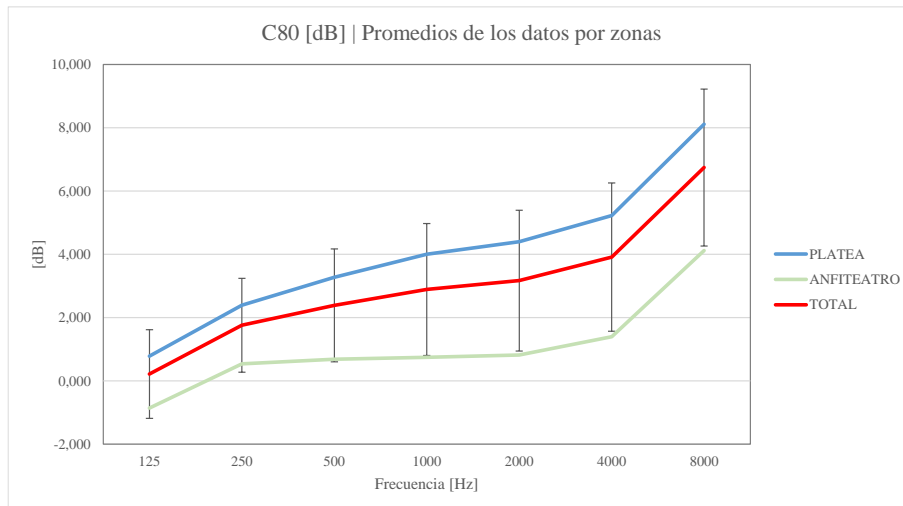


Figura 127. Datos Simulados en octavas Parámetro C50 AURA sin procesar

Tabla 81. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro C80 AURA

C80 [dB] AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO STD	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
125	0,71	2,86	0,00	0,71	1
250	1,22	1,78	1,58	0,36	1
500	2,98	1,85	2,32	0,66	1
1000	3,41	1,67	2,89	0,52	1
2000	3,88	1,70	3,17	0,71	1
4000	4,55	1,60	3,91	0,64	1
8000	7,99	1,66	6,75	1,24	2

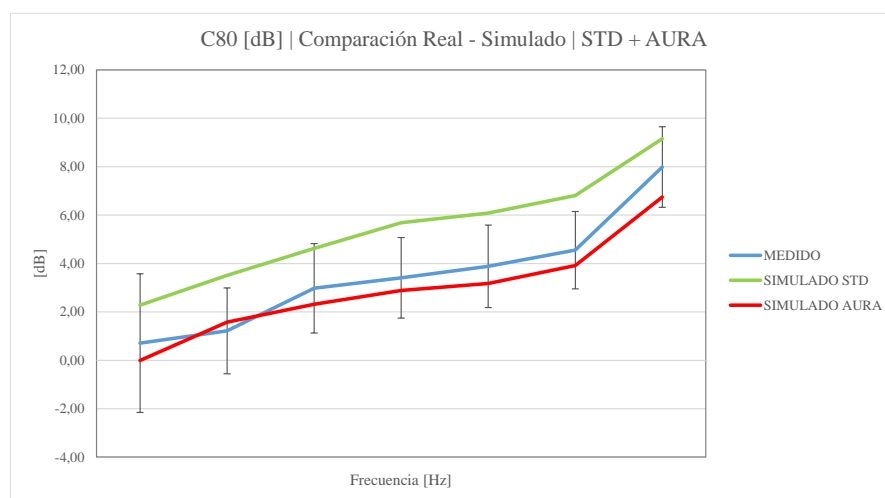


Figura 128. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro C80

• **D50**

Tabla 82. Datos Simulados en octavas Parámetro D50 [dB] sin procesar

D50 Promedios				D50 Desviaciones			
Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Total	Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Total
125	0,39	0,32	0,37	125	0,08	0,04	0,08
250	0,48	0,39	0,45	250	0,09	0,05	0,09
500	0,52	0,39	0,48	500	0,09	0,05	0,10
1000	0,57	0,39	0,51	1000	0,09	0,06	0,12
2000	0,59	0,40	0,52	2000	0,09	0,06	0,12
4000	0,63	0,43	0,56	4000	0,09	0,06	0,13
8000	0,74	0,56	0,68	8000	0,07	0,06	0,11

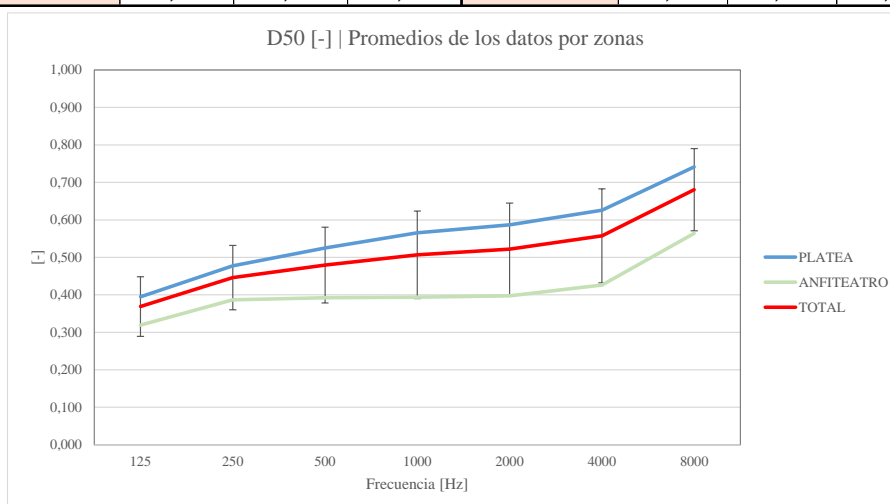


Figura 129. Datos Simulados en octavas Parámetro D50 sin procesar

Tabla 83. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro D50

D50 [-] AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
125	0,40	0,15	0,35	0,13	2
250	0,41	0,12	0,43	0,05	1
500	0,52	0,12	0,48	0,09	1
1000	0,55	0,09	0,51	0,08	1
2000	0,57	0,11	0,52	0,08	1
4000	0,59	0,11	0,56	0,06	1
8000	0,75	0,11	0,68	0,09	1

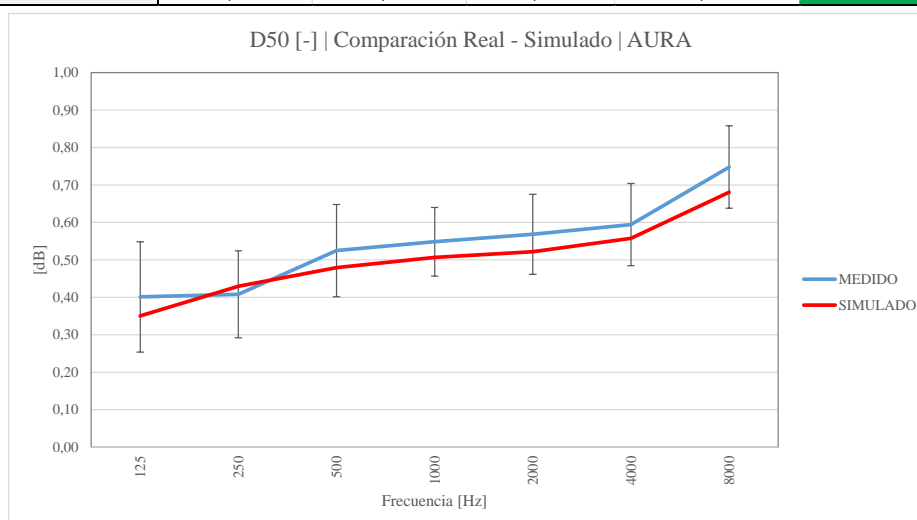


Figura 130. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro D50

• **TS**

Tabla 84. Datos Simulados en octavas Parámetro Ts [ms] sin procesar

TS Promedios				TS Desviaciones			
Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Total	Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Total
125	104,70	123,90	111,28	125	14,28	6,67	15,24
250	80,88	99,68	87,32	250	12,19	5,98	13,77
500	69,93	95,18	78,59	500	11,64	6,25	15,72
1000	63,12	93,53	73,55	1000	11,44	6,90	17,68
2000	59,84	92,55	71,06	2000	11,07	7,30	18,50
4000	53,25	85,16	64,19	4000	10,32	7,18	17,87
8000	35,40	58,74	43,40	8000	7,56	5,63	13,13

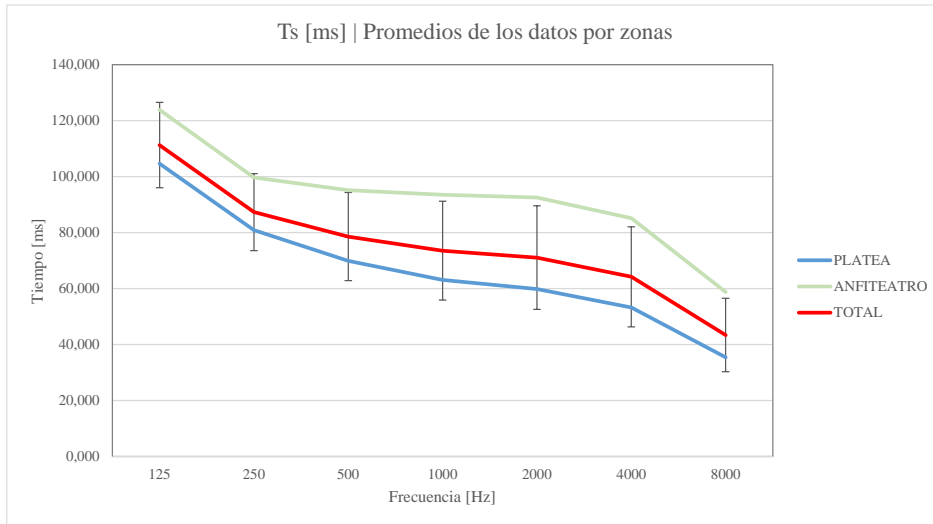


Figura 131. Datos Simulados en octavas Parámetro TS sin procesar

Tabla 85. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro Ts

Ts [ms] AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
125	108,49	25,07	114,30	5,80	1
250	91,78	20,41	89,51	2,27	1
500	71,51	18,53	78,59	7,07	1
1000	67,06	14,18	73,55	6,49	1
2000	64,46	15,58	71,06	6,60	1
4000	58,74	13,88	64,19	5,45	1
8000	36,14	9,31	43,40	7,26	1

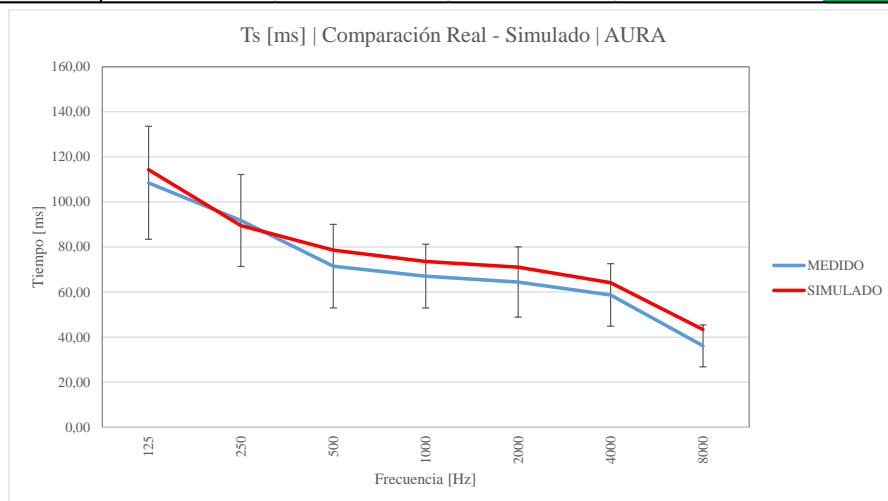


Figura 132. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro Ts

• **LF**

Tabla 86. Datos Simulados en octavas Parámetro LF [-] sin procesar

LF Promedios				LF Desviaciones			
Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Total	Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Total
125	0,23	0,18	0,21	125	0,05	0,03	0,05
250	0,22	0,18	0,21	250	0,05	0,03	0,05
500	0,23	0,19	0,21	500	0,06	0,03	0,06
1000	0,24	0,20	0,22	1000	0,07	0,03	0,06
2000	0,24	0,19	0,22	2000	0,07	0,03	0,07
4000	0,24	0,19	0,22	4000	0,08	0,04	0,07
8000	0,22	0,18	0,20	8000	0,08	0,04	0,07

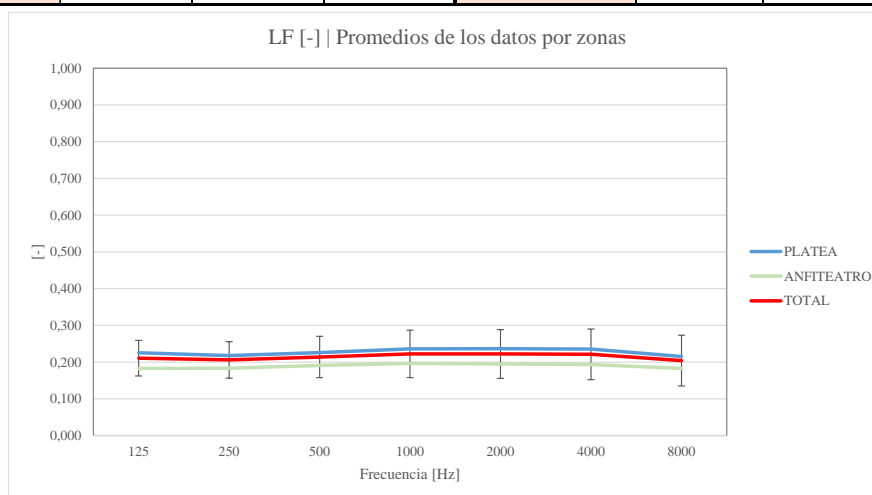


Figura 133. Datos Simulados en octavas Parámetro LF sin procesar

Tabla 87. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro LF

LF [-] AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
125	0,01	0,01	0,21	0,20	4
250	0,02	0,01	0,21	0,18	4
500	0,05	0,02	0,21	0,16	4
1000	0,08	0,03	0,22	0,14	3
2000	0,09	0,03	0,22	0,13	3
4000	0,11	0,04	0,22	0,11	3
8000	0,09	0,04	0,20	0,12	3

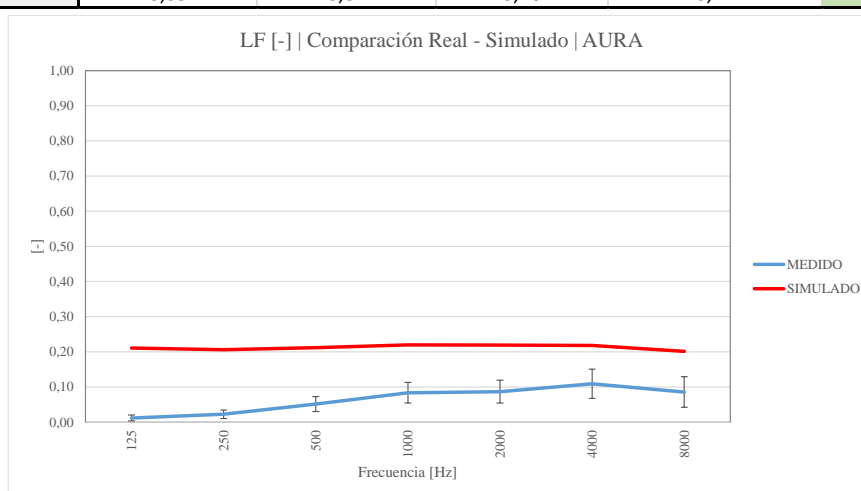


Figura 134. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro LF

• **LFC**

Tabla 88. Datos Simulados en octavas Parámetro LFC[-] sin procesar

LFC Promedios				LFC Desviaciones			
Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Total	Fz (Hz)	Platea	Planta 1	Total
125	0,34	0,30	0,33	125	0,06	0,04	0,06
250	0,33	0,30	0,32	250	0,07	0,04	0,06
500	0,33	0,32	0,32	500	0,08	0,04	0,07
1000	0,33	0,33	0,33	1000	0,09	0,04	0,07
2000	0,33	0,33	0,33	2000	0,09	0,04	0,08
4000	0,33	0,34	0,33	4000	0,09	0,05	0,08
8000	0,30	0,31	0,30	8000	0,09	0,05	0,08

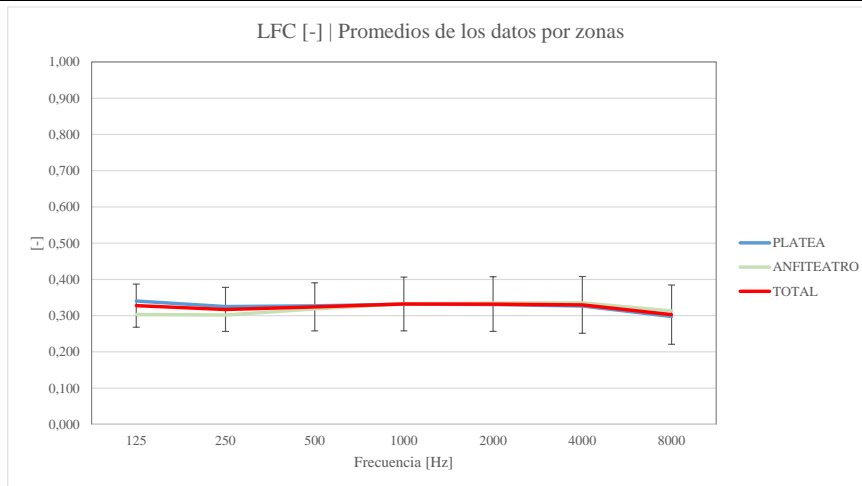


Figura 135. Datos Simulados en octavas Parámetro LFC sin procesar

Tabla 89. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro LFC

LFC [-] AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
125	0,45	0,26	0,33	0,12	3
250	0,18	0,07	0,32	0,14	3
500	0,19	0,07	0,32	0,14	3
1000	0,34	0,09	0,33	0,01	1
2000	0,11	0,03	0,33	0,22	5
4000	0,10	0,04	0,33	0,23	5
8000	0,00	0,00	0,30	0,30	6

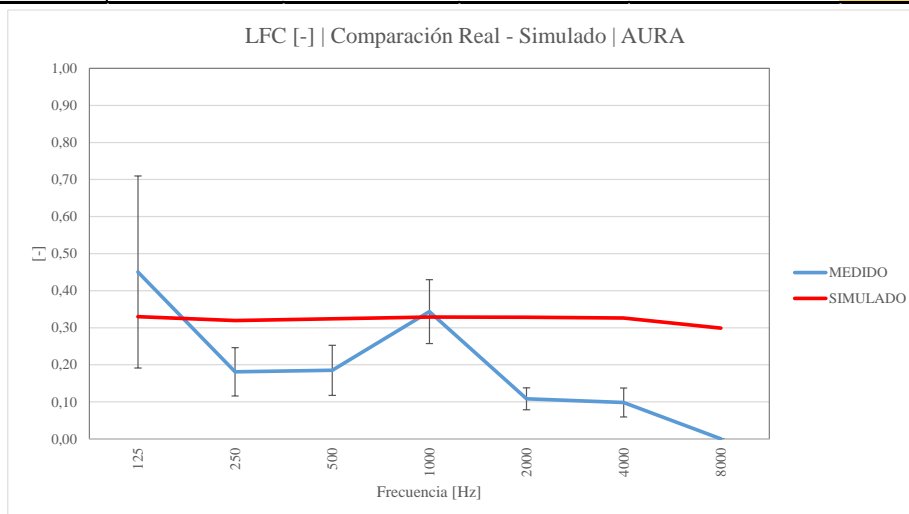


Figura 136. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro LFC

- **ALCONS STD**

Tabla 90. Datos Simulados en octavas Parámetro ALCONS [%] STD

ALCONS [%]			
	PLATEA	PLANTA 1	TOTAL
PROMEDIO	3,881	4,286	4,02
DESVIACIÓN	0,573	0,055	0,5

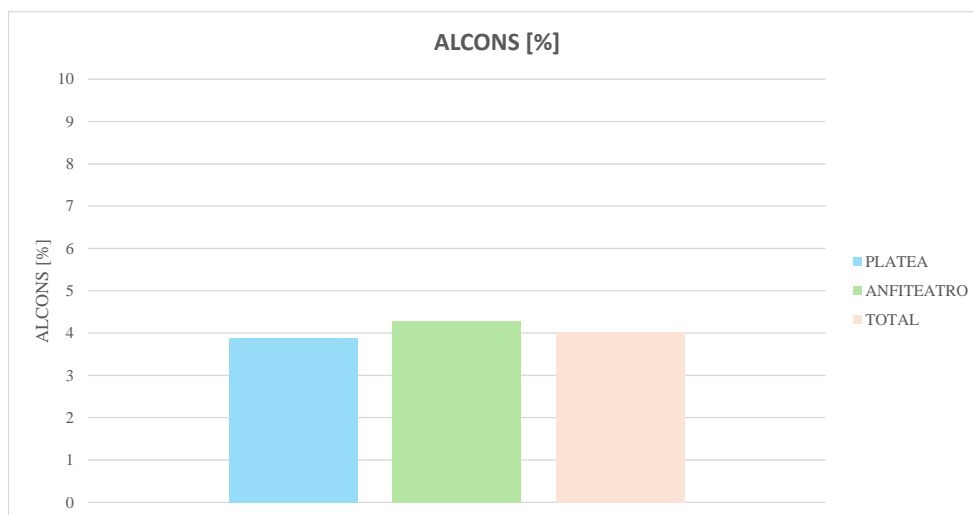


Figura 137. Datos Simulados en octavas Parámetro ALCONS STD

Tabla 91. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro ALCONS STD

ALCONS [%] STD					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO STD	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
-	0,61	0,04	0,69	0,08	1

• **ALCONS AURA**

Tabla 92. Datos Simulados en octavas Parámetro ALCONS AURA

ALCONS [%]			
	PLATEA	PLANTA 1	TOTAL
PROMEDIO	6,55	9,469	7,55
DESVIACIÓN	1,286	1,244	1,88

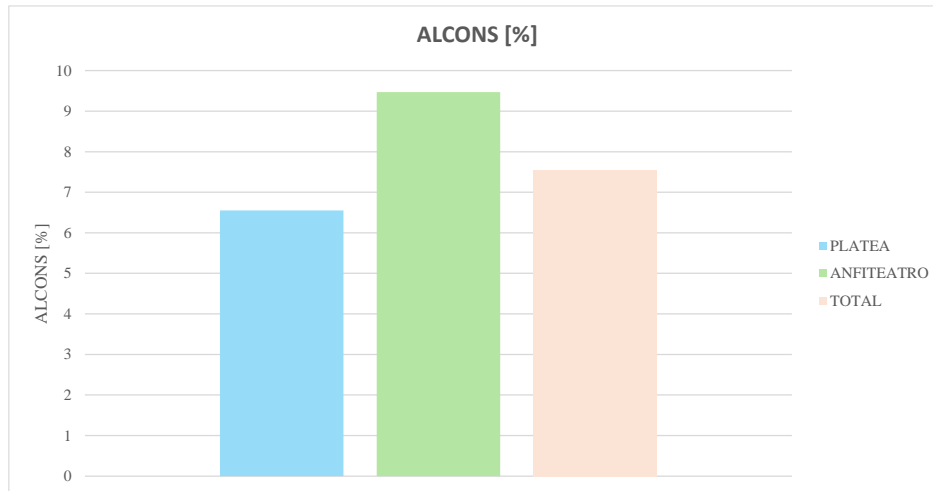


Figura 138. Datos Simulados en octavas Parámetro ALCONS AURA

Tabla 93. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro ALCONS AURA

ALCONS [%] AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO STD	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
-	0,61	0,04	0,69	0,08	1

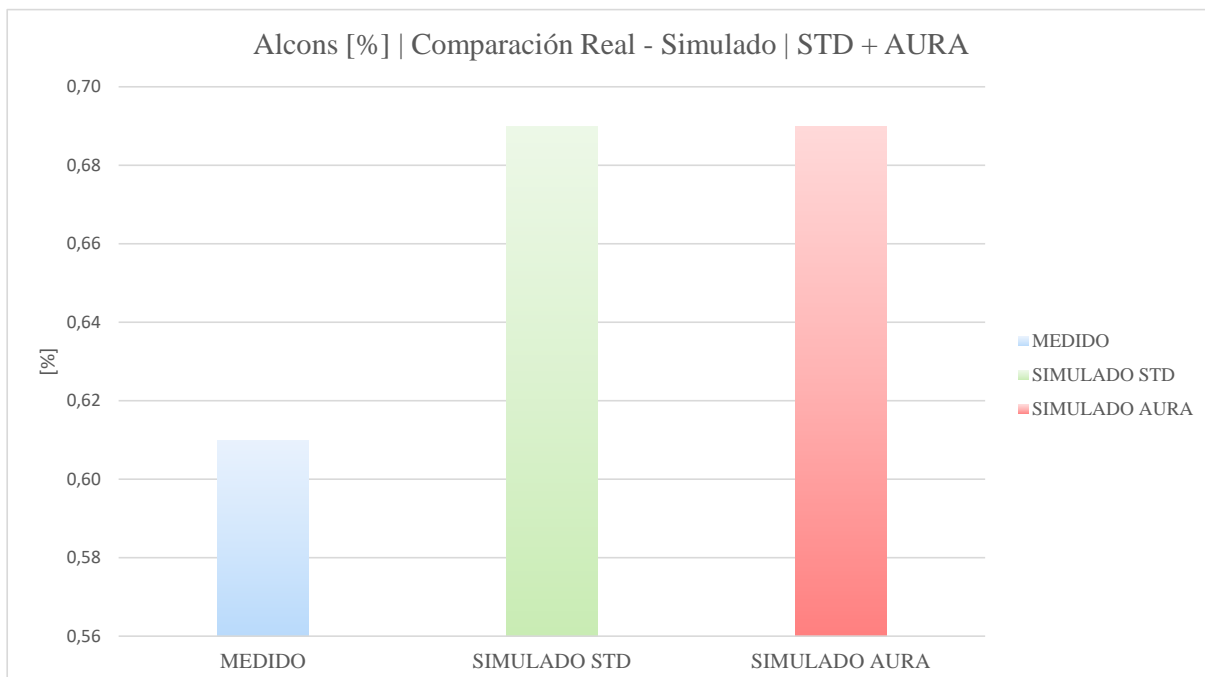


Figura 139. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro ALCONS

- **STI STD**

Tabla 94. Datos Simulados en octavas Parámetro STI STD

STI [-]			
	PLATEA	PLANTA 1	TOTAL
PROMEDIO	0,7	0,68	0,69
DESVIACIÓN	0,032	0,002	0,03

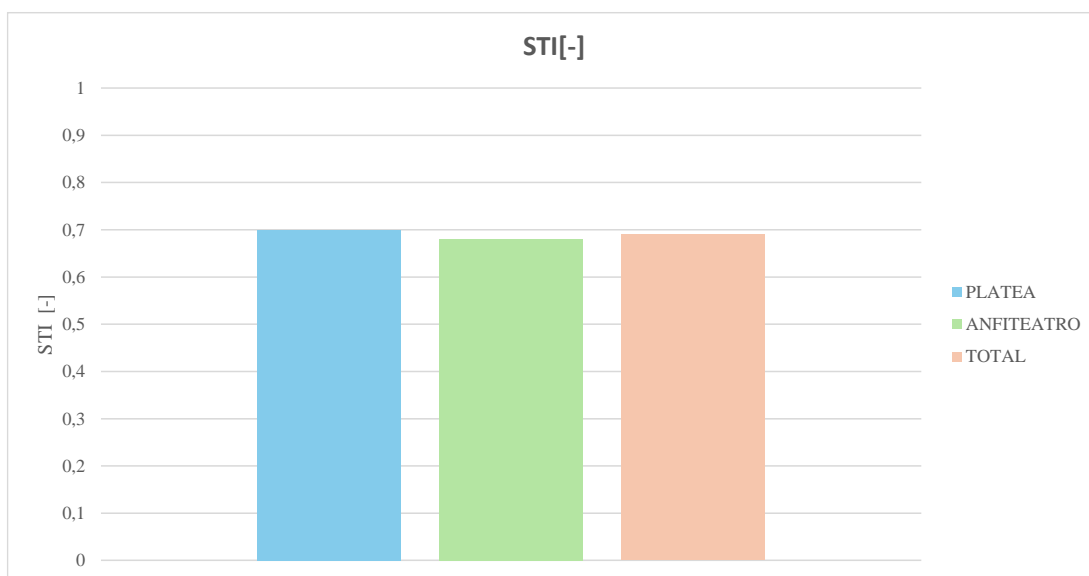


Figura 140. Datos Simulados en octavas Parámetro STI STD

Tabla 95. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro STI STD

STI [-] STD					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO STD	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
-	0,61	0,04	0,69	0,08	3

• **STI AURA**

Tabla 96. Datos Simulados en octavas Parámetro STI AURA

STI [-]			
	PLATEA	PLANTA 1	TOTAL
PROMEDIO	0,606	0,535	0,58
DESVIACIÓN	0,041	0,026	0,05

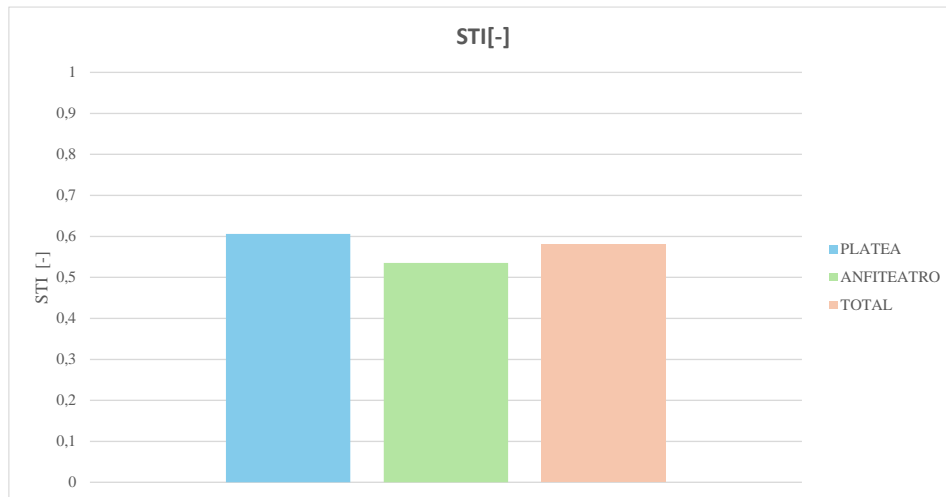


Figura 141. Datos Simulados en octavas Parámetro STI AURA

Tabla 97. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro STI AURA

STI [-] AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO STD	DESVIACIÓN JND	ESCALÓN JND
-	0,61	0,04	0,69	0,08	3

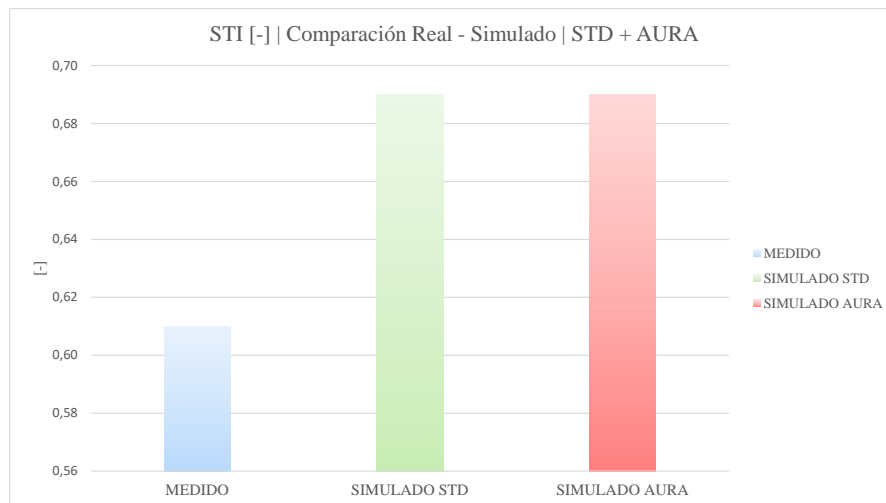


Figura 142. Comparación de Datos Medidos y Datos Simulados en octavas Parámetro STI

Frecuencia [Hz]	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 M STD	STI M AURA	AICons M STD	AICons M AURA
125 Hz	2	3	3	4	2	1	2	1	2	1	4	3				
250 Hz	1	3	3	3	3	1	3	1	1	1	4	3				
500 Hz	2	2	2	3	2	1	2	1	1	1	4	3				
1000 Hz	1	1	2	4	2	1	3	1	1	1	3	1	3	3	1	1
2000 Hz	1	1	1	4	2	1	3	1	1	1	3	5				
4000 Hz	1	2	2	3	2	1	3	1	1	1	3	5				
8000 Hz	1	1	1	3	1	2	2	2	1	1	3	6				

Cantidad por escalón	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
% sobre Total	39	18	22	6	2	1	0	0	0	0
% acumulado	44%	20%	25%	7%	2%	1%	0%	0%	0%	0%
	44%	65%	90%	97%	99%	100%	100%	100%	100%	100%

Finalmente, se añade el cuadro resumen con los valores de la métrica JND para cada parámetro y frecuencia, confirmando que la validación realizada ha sido correcta, ya que más del 90% de los valores están por debajo del escalón 3.

Anexo IV: Materiales Modelo Geométrico EASE

Por último, se presentan los materiales junto con sus coeficientes de absorción, utilizados para el diseño del modelo acústico geométrico del Auditorio.

