



TELECOMUNICACIÓN

Campus Sur  
POLITÉCNICA

# ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN

## PROYECTO FIN DE GRADO

**TÍTULO:** Diseño de un modelo acústico virtual del Teatro Auditorio Buero Vallejo de Guadalajara

**AUTOR:** Alejandro Fernández Maldonado

**TITULACIÓN:** Ingeniería de Sonido e Imagen

**TUTOR:** Antonio Pedrero González

**DEPARTAMENTO:** Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones

VºBº

**Miembros del Tribunal Calificador:**

**PRESIDENTE:** Julia García Luengo

**TUTOR:** Antonio Pedrero González

**SECRETARIO:** Juan José Gómez Alfageme

**Fecha de lectura:**

**Calificación:**

El Secretario,



## Resumen

Este Proyecto Fin de Grado consiste en el diseño de un modelo acústico virtual del Teatro Auditorio Buero Vallejo de Guadalajara. Este modelo se utiliza como herramienta para estudiar la calidad acústica de la sala y proponer el diseño de una concha acústica para la misma, comprobando su funcionamiento.

El contenido del proyecto está dividido en dos partes principales: la primera está dedicada a la obtención de un modelo acústico virtual válido, que represente fielmente las características acústicas del teatro real; la segunda parte está enfocada a la evaluación de la calidad acústica, tanto de la sala original como de la sala con la concha acústica diseñada instalada.

El diseño del modelo acústico virtual parte de un modelo geométrico tridimensional generado con el software SketchUp, a partir de los planos de obra del teatro. Para tener una referencia de la acústica de la sala real, se han efectuado mediciones *in situ* según lo indicado en la norma UNE-EN ISO 3382-1. A continuación, se ha importado la geometría generada previamente en SketchUp a ODEON, el software de simulación acústica de salas utilizado. Con esta herramienta se recrea la sala real mediante la asignación de materiales a las superficies del modelo importado. Acto seguido, se calcula una serie de parámetros acústicos simulados en ODEON, y se comparan con los resultantes de las mediciones *in situ*. Para valorar las diferencias resultantes se ha utilizado como criterio de ajuste el JND (*Just Noticeable Difference*). Si la diferencia entre los valores medidos y simulados está entre 0 y 1 JND's, el ajuste del modelo se considera excelente; si se encuentra entre 1 y 2 JND's se califica como aceptable. Tras varias modificaciones de materiales, se ha conseguido cumplir el criterio de ajuste, con diferencias entre valores medidos y simulados de entre 0 y 2 JND's, y el modelo acústico virtual se da por ajustado.

Con la herramienta de trabajo lista, se ha estudiado la calidad acústica de la sala calculando en ODEON parámetros acústicos concretos. Se han evaluado los resultados tomando como referencia los valores óptimos establecidos para dichos parámetros, en función de la actividad que se desarrolle en la sala. El Teatro Auditorio Buero Vallejo de Guadalajara suele emplearse para representaciones teatrales y como sala de conciertos, a pesar de ser un recinto multifuncional. La evaluación de los parámetros acústicos indica que el recinto opera mejor, precisamente, como sala de conciertos. Ante este hecho, se ha propuesto el diseño de una concha acústica, que optimice más aun el recinto para esta funcionalidad. Con la concha instalada, se ha vuelto a analizar la calidad acústica, consiguiendo la mejora buscada.

Finalmente, también en ODEON, se han generado auralizaciones, archivos de audio que recrean la sensación de escucha como si se estuviera físicamente en una posición concreta del interior del teatro. Adicionalmente, para visualizar las características acústicas percibidas en las auralizaciones, se han obtenido mapas para determinados parámetros acústicos. Estos mapas, llamados rejillas en ODEON, representan cómo se distribuyen los valores del parámetro acústico en cuestión para toda la superficie de la sala.



## Abstract

This Final Degree Project consists of the design of a virtual acoustic model for the Teatro Auditorio Buero Vallejo in Guadalajara. This model is used as a tool to study the acoustic quality of the room and to design an acoustic shell for it, whose functioning is also tested.

The project is divided into two main parts: in the first part, a valid virtual acoustic model is obtained, which faithfully represents the acoustic characteristics of the real theater; the second part focuses on the evaluation of the acoustic quality, both of the original room and of the room with the designed acoustic shell installed.

The design of the virtual acoustic model is based on a three-dimensional geometric model generated with the SketchUp software, from the theater building plans. To have a reference point for the acoustics of the real room, measurements were made in situ, following the UNE-EN ISO 3382-1 standard. The geometry previously generated in SketchUp was then imported into ODEON, the room acoustic simulation software used. With this tool, the real room was recreated by assigning materials to the surfaces of the imported model. A series of acoustic parameters simulated in ODEON were then calculated and compared with those resulting from on-site measurements. To assess the resulting differences, the JND (Just Noticeable Difference) was used as an adjustment criterion. If the difference between the measured and simulated values is between 0 and 1 JND's, the model fit is considered excellent; if it is between 1 and 2 JND's, it is qualified as acceptable. After several modifications in the materials, the adjustment criterion was met, with differences between measured and simulated values of between 0 and 2 JND's, and the virtual acoustic model was considered adjusted.

Once the working tool was ready, the acoustic quality of the room was studied by calculating specific acoustic parameters in ODEON. The results were evaluated by taking as a reference the optimal values established for these parameters, depending on the activity that takes place in the room. The Teatro Auditorio Buero Vallejo in Guadalajara is usually used for theatrical performances and as a concert hall, despite being a multifunctional venue. The evaluation of the acoustic parameters indicates that the venue operates better, precisely, as a concert hall. Given this fact, the design of an acoustic shell is proposed, which further optimizes the room for this functionality. With the shell installed, the acoustic quality is re-analyzed, achieving the desired improvement.

Finally, also in ODEON, auralizations are generated, audio files that recreate the sensation of listening as if one were physically in a specific position inside the theater. Additionally, to visualize the acoustic characteristics perceived in the auralizations, maps are obtained for certain acoustic parameters. These maps, called "grids" in ODEON, represent how the values of the acoustic parameter in question are distributed over the entire surface of the room.



## Índice de contenidos

<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>3</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>9</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>13</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>15</b>
<b>2. MARCO TECNOLÓGICO</b> .....	<b>17</b>
2.1. MODELADO Y SIMULACIÓN ACÚSTICOS DE SALAS.....	17
2.2. HISTORIA Y ESTADO DEL ARTE.....	17
2.3. ODEON ROOM ACOUSTICS SOFTWARE.....	23
<b>3. ESPECIFICACIONES Y RESTRICCIONES DE DISEÑO</b> .....	<b>25</b>
<b>4. ACÚSTICA DE SALAS: CONCEPTOS Y DEFINICIONES</b> .....	<b>27</b>
4.1. RESPUESTA AL IMPULSO.....	27
4.2. CURVA DE DECAIMIENTO ENERGÉTICO .....	28
4.3. REFLECTOGRAMA .....	29
4.4. COEFICIENTE DE ABSORCIÓN (A).....	30
4.5. COEFICIENTE DE DISPERSIÓN (S) .....	30
4.6. TIEMPO DE REVERBERACIÓN (RT) .....	31
4.7. EDT (EARLY DECAY TIME) .....	33
4.8. TIEMPO CENTRAL (Ts) .....	34
4.9. CALIDEZ ACÚSTICA (BR) Y BRILLO (BR).....	34
4.10. CLARIDAD DE LA VOZ (C <sub>50</sub> ) Y CLARIDAD MUSICAL (C <sub>80</sub> ).....	35
4.11. DEFINICIÓN (D <sub>50</sub> ).....	36
4.12. FUERZA SONORA (G).....	36
4.13. EFICIENCIA LATERAL (LF) .....	36
4.14. ÍNDICE DE TRANSMISIÓN DEL HABLA (STI) .....	37
4.15. %ALCONS (PERCENTAGE ARTICULATION LOSS OF CONSONANTS).....	37
4.16. JND (JUST NOTICEABLE DIFFERENCE) .....	38
4.17. AURALIZACIÓN .....	39
<b>5. DESCRIPCIÓN DEL DESARROLLO DEL PROYECTO</b> .....	<b>41</b>
5.1. FASES PARA GENERAR EL MODELO ACÚSTICO VIRTUAL .....	41
5.2. FASES DE EMPLEO DEL MODELO ACÚSTICO VIRTUAL .....	41
<b>6. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL TEATRO AUDITORIO BUERO VALLEJO</b> .....	<b>43</b>
6.1. FUNCIONALIDAD DEL TEATRO.....	43
6.2. AFORO Y DIMENSIONES .....	43
6.3. MATERIALES Y FORMA DE LA SALA .....	43
<b>7. MEDICIONES <i>IN SITU</i></b> .....	<b>47</b>
7.1. EQUIPAMIENTO .....	47
7.2. POSICIONES DE MEDIDA .....	48
7.3. CONDICIONES DE MEDIDA .....	49
7.4. PROCEDIMIENTO Y MÉTODO DE MEDICIÓN .....	49
7.4.1. Señal de excitación .....	49
7.4.2. Procedimiento de medición.....	50
<b>8. MODELO GEOMÉTRICO TRIDIMENSIONAL</b> .....	<b>53</b>
<b>9. MODELO ACÚSTICO VIRTUAL</b> .....	<b>55</b>
9.1. IMPORTACIÓN DEL MODELO DE SKETCHUP A ODEON .....	55

9.2. DEFINICIÓN DE POSICIONES DE FUENTE Y MICRÓFONO EN ODEON .....	56
9.3. DEFINICIÓN DE MEDICIONES EN ODEON .....	58
9.4. ASIGNACIÓN INICIAL DE MATERIALES .....	59
9.5. CONFIGURACIÓN DE CÁLCULO DE ODEON.....	63
9.5.1. Proceso de cálculo de ODEON .....	63
9.5.2. Ajuste de la configuración de cálculo de ODEON.....	64
9.6. AJUSTE DEL MODELO ACÚSTICO .....	66
9.6.1. Modelo con asignación inicial de materiales .....	67
9.6.2. Primera modificación de materiales .....	69
9.6.3. Segunda modificación de materiales y modelo acústico ajustado.....	71
<b>10. CALIDAD ACÚSTICA DE LA SALA .....</b>	<b>77</b>
10.1. TIEMPO DE REVERBERACIÓN (RT).....	77
10.2. EDT (EARLY DECAY TIME) .....	78
10.3. CALIDEZ ACÚSTICA (BR) Y BRILLO (BR).....	79
10.4. CLARIDAD DE LA MÚSICA (C <sub>80</sub> ) .....	80
10.5. DEFINICIÓN (D <sub>50</sub> ) .....	80
10.6. FUERZA SONORA (G).....	81
10.7. EFICIENCIA LATERAL (LF) .....	82
10.8. ÍNDICE DE TRANSMISIÓN DEL HABLA (STI) Y % ALCONS .....	83
10.8.1. Persona hablando a viva voz.....	84
10.8.2. Sistema electroacústico .....	85
<b>11. CONCHA ACÚSTICA.....</b>	<b>89</b>
11.1. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA .....	89
11.2. CALIDAD ACÚSTICA DE LA SALA CON LA CONCHA ACÚSTICA DISEÑADA .....	91
11.2.1. Tiempo de reverberación (RT).....	92
11.2.2. EDT (Early Decay Time) .....	92
11.2.3. Calidez acústica (BR) y brillo (Br) .....	93
11.2.4. Claridad de la música (C <sub>80</sub> ) .....	94
11.2.5. Definición (D <sub>50</sub> ) .....	94
11.2.6. Fuerza sonora (G).....	95
11.2.7. Eficiencia lateral (LF) .....	96
11.2.8. Índice de transmisión del habla (STI) y % ALCons.....	97
<b>12. AURALIZACIONES Y REJILLAS .....</b>	<b>99</b>
12.1. AURALIZACIONES REALIZADAS .....	99
12.1.1. Auralizaciones con grabaciones individuales.....	102
12.1.2. Auralizaciones con conjunto de grabaciones .....	102
12.2. DEFINICIÓN DE REJILLAS EN ODEON .....	104
<b>13. RESULTADOS .....</b>	<b>107</b>
13.1. CALIDAD ACÚSTICA DE LA SALA ORIGINAL Y DE LA SALA CON CONCHA ACÚSTICA.....	107
13.1.1. Valoración de la calidad acústica para la sala original.....	107
13.1.2. Valoración de la calidad acústica para la sala con concha acústica .....	108
13.2. ESCUCHA DE AURALIZACIONES .....	109
13.2.1. Posición de oyente M1 .....	109
13.2.2. Posición de oyente M12.....	109
13.2.3. Posición de oyente M24 .....	110
13.2.4. Posición de oyente M29.....	110
13.2.5. Posición de oyente MDirector.....	110
13.3. CORRESPONDENCIA ENTRE AURALIZACIONES Y REJILLAS .....	110
<b>14. PRESUPUESTO .....</b>	<b>113</b>
<b>15. CONCLUSIONES .....</b>	<b>115</b>
<b>16. REFERENCIAS.....</b>	<b>117</b>

<b>ANEXO I. INR DE LAS MEDICIONES <i>IN SITU</i> .....</b>	<b>119</b>
<b>ANEXO II. PARÁMETROS ACÚSTICOS OBTENIDOS DURANTE EL PROCESO DE AJUSTE DEL MODELO ACÚSTICO VIRTUAL EN ODEON .....</b>	<b>123</b>
<b>ANEXO III. OPTIMIZADOR DE MATERIALES GENÉTICO DE ODEON .....</b>	<b>129</b>
<b>ANEXO IV. PLANOS DE LA CONCHA ACÚSTICA DISEÑADA .....</b>	<b>131</b>
<b>ANEXO V. REJILLAS DE DIFERENTES PARÁMETROS ACÚSTICOS OBTENIDAS PARA LA SALA ORIGINAL Y LA SALA CON CONCHA ACÚSTICA.....</b>	<b>133</b>



## Índice de figuras

Figura 1. Extracto del libro “Collected Papers On Acoustics” publicación de Sabine (1922), que muestra la propagación sonora en un modelo físico a escala empleando la técnica de la fotografía Schlieren [2].	18
Figura 2. Modelo a escala 1:10 del “Major Hall” de La Casa de la Ópera de Sidney (no se trata del diseño final, sino del último diseño de Utzon alrededor de 1966) [4].	19
Figura 3. Extracto de “Digital Simulation of Sound Transmission in Reverberant Spaces”, publicación de Schroeder (1970), en la que se ilustra el trazado de rayos empleado en el cálculo por ordenador [6].	20
Figura 4. Extracto de “Digital Simulation of Sound Transmission in Reverberant Spaces”, publicación de Schroeder (1970), que muestra las curvas de decaimiento de energía sonora para la sala concreta dibujada en la parte superior derecha [6].	20
Figura 5. Extracto de “Digital Simulation of Sound Transmission in Reverberant Spaces”, publicación de Schroeder (1970), que muestra la comparativa entre valores del tiempo de reverberación según el método de cálculo para la sala concreta dibujada en la parte superior derecha [6].	21
Figura 6. Extracto de “Digital Simulation of Sound Transmission in Reverberant Spaces”, publicación de Krokstad, Strøm y Sørsdal (1968), que muestra las respuestas al impulso (primeras reflexiones) e intensidad del sonido para tres áreas de audiencia diferentes en una sala rectangular [7].	22
Figura 7. Sup.izq: CATT-Acoustic, sup.dcha: EASE, inf: ODEON.	23
Figura 8. Respuesta al impulso de uno de los puntos de medición en el teatro.	28
Figura 9. Curva ETC medida en un punto de un recinto [13].	28
Figura 10. Curvas de decaimiento energético por cada banda de octava obtenidas en ODEON para un punto determinado del teatro.	29
Figura 11. Representación esquemática de llegada de rayos directos, primeras reflexiones y cola reverberante, y reflectograma asociado a un punto receptor en una sala [13].	30
Figura 12. Gráfico explicativo del coeficiente de dispersión, con el sonido incidente normalizado a 1 [14].	31
Figura 13. Curva ETC y curva obtenida de la integración de la ETS (color rojo) empleada para calcular el RT [13].	32
Figura 14. Diferentes caídas de nivel empleadas para obtener RT. En amarillo $T_{20}$ , en verde $T_{30}$ , en rojo $T_{60}$ [11].	33
Figura 15. Diferencia entre EDT y RT [13].	34
Figura 16. Obtención del %ALCons a partir de RT y de $L_D - L_R$ [13].	38
Figura 17. Valores de JND para diferentes magnitudes acústicas (extracto de la UNE-EN ISO 3382-1) [12].	39
Figura 18. Diagrama de bloques del proceso de auralización [16].	40
Figura 19. Vista del teatro desde el anfiteatro	44
Figura 20. Vista del teatro desde el escenario	45
Figura 21. Vista panorámica de la caja escénica del teatro	45
Figura 22. Izq: fuente omnidireccional Brüel & Kjær 4292-L; dcha: micrófono DPA 4006A.	47
Figura 23. Posiciones de micrófono en la zona de audiencia (parte inferior platea, parte superior anfiteatro).	48
Figura 24. Posiciones de fuente y micrófono en el escenario.	49
Figura 25. Diagrama de bloques del montaje para las mediciones en el teatro.	50
Figura 26. Vista desde el anfiteatro del modelo 3D del teatro en SketchUp.	53
Figura 27. Vista desde el escenario del modelo 3D del teatro en SketchUp.	54
Figura 28. Vista de la caja escénica del modelo 3D del teatro en SketchUp.	54
Figura 29. Modelo 3D de SketchUp importado a ODEON.	55
Figura 30. Comprobación de que el modelo es un volumen cerrado.	56
Figura 31. Posiciones de fuente (puntos de color rojo) y micrófono (puntos de color azul).	57
Figura 32. Fuente sonora omnidireccional en ODEON. Izq: directividad (1 kHz); dcha: configuración.	57
Figura 33. Superficies TECHO 1, TECHO 2 y TECHO 3.	60
Figura 34. Superficies SUELO ESCENARIO Y SUELO AUDIENCIA.	60
Figura 35. Superficies PAREDES, PAREDES ESCENARIO E INTERIOR CABINAS CONTROL.	60
Figura 36. Superficies BAMBALINAS, CORTINAS, TELÓN y ALFOMBRA VERDE.	61
Figura 37. Superficies BUTACAS, ESTRUCTURA DIFRACTANTE y ESTORES CABINAS CONTROL.	61
Figura 38. Tabla extraída del manual de ODEON, con las sugerencias de coeficiente de dispersión a frecuencias medias en función del tipo de superficie [11].	61

Figura 39. Superficies con coeficiente de dispersión alterado respecto al establecido por defecto. Sup.izq: estructura difractante; sup.dcha: telón; inf.izq: butacas elevadas; inf.dcha: estructura metálica y bloques de hormigón de la caja escénica.....	62
Figura 40. Métodos empleados por ODEON para el cálculo de reflexiones [11].....	64
Figura 41. Herramienta de estimación rápida del tiempo de reverberación en ODEON. ....	64
Figura 42. Compromiso entre orden de transición y número de rayos tardíos. ....	65
Figura 43. Compromiso entre orden de transición y número de rayos tempranos. ....	65
Figura 44. Configuración de cálculo en ODEON. ....	66
Figura 45. Proceso de optimización genética de materiales de la caja escénica en ODEON. ....	70
Figura 46. Coeficiente de absorción de los materiales de la sala en bandas de octava del modelo inicial. ....	72
Figura 47. Valores simulados promedio de $T_{20}$ de la sala.....	78
Figura 48. Valores simulados promedio de EDT de la sala. ....	79
Figura 49. Valores simulados promedio de $C_{80}$ de la sala. ....	80
Figura 50. Valores simulados promedio de $D_{50}$ de la sala. ....	81
Figura 51. Valores simulados promedio de G de la sala.....	82
Figura 52. Valores simulados promedio de LF de la sala. ....	83
Figura 53. Fuente sonora BB93_RAISE_NATURAL.SO8 en ODEON. Izq: directividad (1 kHz); dcha: configuración. ....	84
Figura 54. Sistema electroacústico del Teatro Auditorio Buero Vallejo de Guadalajara. ....	85
Figura 55. Izq: montaje del array lineal en jota; dcha: directividad del array lineal (1 kHz).....	86
Figura 56. Fuente sonora SLS_LS8800.CF2 en ODEON. Izq: directividad (1 kHz); dcha: configuración. ....	86
Figura 57. Configuración del array izquierdo situado en el modelo de la sala. ....	86
Figura 58. Sistema electroacústico del teatro en ODEON. ....	87
Figura 59. Vista de la concha acústica diseñada en el nuevo modelo 3D del teatro en SketchUp.....	90
Figura 60. Modelo 3D con concha acústica de SketchUp importado a ODEON.....	90
Figura 61. Valores simulados promedio de $T_{20}$ de la sala con concha acústica. ....	92
Figura 62. Valores simulados promedio de EDT de la sala con concha acústica. ....	93
Figura 63. Valores simulados promedio de $C_{80}$ de la sala con concha acústica.....	94
Figura 64. Valores simulados promedio de $D_{50}$ de la sala con concha acústica. ....	95
Figura 65. Valores simulados promedio de G de la sala con concha acústica. ....	96
Figura 66. Valores simulados promedio de LF de la sala con concha acústica. ....	97
Figura 67. Posiciones de auralización.....	100
Figura 68. Configuraciones de cálculo de alta resolución para auralizaciones. Sup: modelo con caja escénica; inf: modelo con concha acústica.....	101
Figura 69. Fuentes sonoras distribuidas según la organización de una orquesta sinfónica (puntos rojos).....	103
Figura 70. Configuraciones de cálculo de baja resolución para rejillas. Sup: modelo con caja escénica; inf: modelo con concha acústica.....	104
Figura 71. Definición de rejillas. Izq: sala con caja escénica; dcha: sala con concha acústica. ....	105
Figura 72. Rejilla de STI evaluado con voz para la sala original.....	111
Figura 73. Rejilla de $C_{80}$ en la octava de 500 Hz para la sala original.....	112
Figura 74. Vista 3D de la concha acústica diseñada. ....	131
Figura 75. Planta de la concha acústica diseñada. ....	131
Figura 76. Perfil de la concha acústica diseñada. ....	132
Figura 77. Alzado de la concha acústica diseñada.....	132
Figura 78. Rejilla de $T_{20}$ en la octava de 500 Hz para la sala original. ....	133
Figura 79. Rejilla de $T_{20}$ en la octava de 1 kHz para la sala original. ....	133
Figura 80. Rejilla de $T_{20}$ en la octava de 500 Hz para la sala con concha acústica.....	134
Figura 81. Rejilla de $T_{20}$ en la octava de 1 kHz para la sala con concha acústica.....	134
Figura 82. Rejilla de $C_{80}$ en la octava de 500 Hz para la sala original.....	135
Figura 83. Rejilla de $C_{80}$ en la octava de 1 kHz para la sala original.....	135
Figura 84. Rejilla de $C_{80}$ en la octava de 500 Hz para la sala con concha acústica. ....	136
Figura 85. Rejilla de $C_{80}$ en la octava de 1 kHz para la sala con concha acústica. ....	136
Figura 86. Rejilla de $SPL_t$ en la octava de 500 Hz para la sala original.....	137
Figura 87. Rejilla de $SPL_t$ en la octava de 1 kHz para la sala original.....	137
Figura 88. Rejilla de $SPL_t$ en la octava de 500 Hz para la sala con concha acústica. ....	138
Figura 89. Rejilla de $SPL_t$ en la octava de 1 kHz para la sala con concha acústica. ....	138

Figura 90. Rejilla de STI evaluado con voz para la sala original. .... 139  
Figura 91. Rejilla de STI evaluado con sistema electroacústico para la sala original. .... 139  
Figura 92. Rejilla de STI evaluado con voz para la sala con concha acústica. .... 140  
Figura 93. Rejilla de STI evaluado con sistema electroacústico para la sala con concha acústica. .... 140



## Índice de tablas

Tabla 1. Valoración de la inteligibilidad del habla para una sala en función del valor del STI [15].	37
Tabla 2. Valoración de la inteligibilidad del habla para una sala en función del valor del %ALCons [13].	38
Tabla 3. Coordenadas de los puntos de fuente y micrófono.	58
Tabla 4. Asignación inicial de materiales en ODEON.	59
Tabla 5. Coeficientes de dispersión aplicados a las superficies del modelo.	62
Tabla 6. Parámetros acústicos promedio del modelo inicial para la fuente 1.	67
Tabla 7. Umbral JND para cada parámetro empleado en el ajuste.	67
Tabla 8. Diferencia en JND's entre parámetros medidos y simulados promedio del modelo inicial para la fuente 1.	68
Tabla 9. Parámetros acústicos promedio del modelo inicial para la fuente 3.	68
Tabla 10. Diferencia en JND's entre parámetros medidos y simulados promedio del modelo inicial para la fuente 3.	68
Tabla 11. $T_{20}$ en las posiciones de micrófono en el escenario del modelo inicial para la fuente 3.	69
Tabla 12. Diferencia en JND's entre $T_{20}$ medido y simulado en las posiciones de micrófono en el escenario del modelo inicial para la fuente 3.	69
Tabla 13. Materiales del modelo tras la primera modificación.	70
Tabla 14. Parámetros acústicos promedio del modelo con la primera modificación para la fuente 1.	71
Tabla 15. Diferencia en JND's entre parámetros medidos y simulados promedio del modelo con la primera modificación para la fuente 1.	71
Tabla 16. Absorción acústica de cada material de la sala en el modelo inicial.	72
Tabla 17. Materiales del modelo tras la segunda modificación.	74
Tabla 18. Parámetros acústicos promedio del modelo final para la fuente 1.	74
Tabla 19. Diferencia en JND's entre parámetros medidos y simulados promedio del modelo final para la fuente 1.	74
Tabla 20. Valores simulados promedio de $T_{20}$ de la sala.	78
Tabla 21. Valores simulados promedio de EDT de la sala.	79
Tabla 22. Valores simulados promedio de $C_{80}$ de la sala.	80
Tabla 23. Valores simulados promedio de $D_{50}$ de la sala.	81
Tabla 24. Valores simulados promedio de G de la sala.	82
Tabla 25. Valores simulados promedio de LF de la sala.	83
Tabla 26. Niveles de ruido de fondo obtenido aplicando el percentil 95.	84
Tabla 27. Valores simulados de STI y %ALCons de la sala con una persona hablando a viva voz.	84
Tabla 28. Valores simulados de STI y %ALCons de la sala con el sistema electroacústico.	87
Tabla 29. Materiales del modelo con concha acústica.	91
Tabla 30. Valores simulados promedio de $T_{20}$ de la sala con concha acústica.	92
Tabla 31. Valores simulados promedio de EDT de la sala con concha acústica.	93
Tabla 32. Valores simulados promedio de $C_{80}$ de la sala con concha acústica.	94
Tabla 33. Valores simulados promedio de $D_{50}$ de la sala con concha acústica.	95
Tabla 34. Valores simulados promedio de G de la sala con concha acústica.	96
Tabla 35. Valores simulados promedio de LF de la sala con concha acústica.	97
Tabla 36. Valores simulados de STI y %ALCons de la sala con concha acústica con una persona hablando a viva voz.	97
Tabla 37. Valores simulados de STI y %ALCons de la sala con concha acústica con el sistema electroacústico.	98
Tabla 38. Posiciones de auralización.	99
Tabla 39. Coordenadas de las fuentes sonoras que conforman la orquesta en ODEON.	103
Tabla 40. Valoración de la calidad acústica de la sala original para funcionalidad como teatro.	107
Tabla 41. Valoración de la calidad acústica de la sala original para funcionalidad como sala de conciertos.	108
Tabla 42. Valoración de la calidad acústica de la sala con concha acústica para funcionalidad como teatro.	108
Tabla 43. Valoración de la calidad acústica de la sala con concha acústica para funcionalidad como sala de conciertos.	109
Tabla 44. Presupuesto para la concha acústica diseñada.	113
Tabla 45. INR para medidas con la fuente 1.	119
Tabla 46. INR para medidas con la fuente 2.	120
Tabla 47. INR para medidas con la fuente 3.	121

Tabla 48. Criterios para evaluar INR. ....	121
Tabla 49. Parámetros acústicos promedio del modelo inicial para la fuente 1. ....	123
Tabla 50. Diferencia en JND's entre parámetros medidos y simulados promedio del modelo inicial para la fuente 1. ....	123
Tabla 51. Parámetros acústicos promedio del modelo inicial para la fuente 2. ....	123
Tabla 52. Diferencia en JND's entre parámetros medidos y simulados promedio del modelo inicial para la fuente 2. ....	124
Tabla 53. Parámetros acústicos promedio del modelo inicial para la fuente 3. ....	124
Tabla 54. Diferencia en JND's entre parámetros medidos y simulados promedio del modelo inicial para la fuente 3. ....	124
Tabla 55. Parámetros acústicos promedio del modelo con la primera modificación para la fuente 1. ....	124
Tabla 56. Diferencia en JND's entre parámetros medidos y simulados promedio del modelo con la primera modificación para la fuente 1. ....	125
Tabla 57. Parámetros acústicos promedio del modelo con la primera modificación para la fuente 2. ....	125
Tabla 58. Diferencia en JND's entre parámetros medidos y simulados promedio del modelo con la primera modificación para la fuente 2. ....	125
Tabla 59. Parámetros acústicos promedio del modelo con la primera modificación para la fuente 3. ....	125
Tabla 60. Diferencia en JND's entre parámetros medidos y simulados promedio del modelo con la primera modificación para la fuente 3. ....	126
Tabla 61. Parámetros acústicos promedio del modelo final para la fuente 1. ....	126
Tabla 62. Diferencia en JND's entre parámetros medidos y simulados promedio del modelo final para la fuente 1. ....	126
Tabla 63. Parámetros acústicos promedio del modelo final para la fuente 2. ....	126
Tabla 64. Diferencia en JND's entre parámetros medidos y simulados promedio del modelo final para la fuente 2. ....	127
Tabla 65. Parámetros acústicos promedio del modelo final para la fuente 3. ....	127
Tabla 66. Diferencia en JND's entre parámetros medidos y simulados promedio del modelo final para la fuente 3. ....	127
Tabla 67. Símil de los términos genéticos para la optimización acústica de materiales. ....	129

## 1. Introducción

El término acústica proviene del griego antiguo *ἀκουστικός* (akoustikos). Su significado es “listo para oír”, y es que ya en la Antigua Grecia se intentaba comprender el comportamiento de la acústica de los edificios. Sin embargo, hubo que esperar muchos años hasta llegar a finales del siglo XIX, para que el padre de la acústica de salas, Wallace Clement Sabine diera paso a la acústica de salas moderna que ha llegado hasta la actualidad. A principios del siglo XX, Sabine ya estudiaba la acústica haciendo uso de modelos físicos a escala. Años después, este modelado acústico a escala de salas fue evolucionando, hasta el punto de que a finales de los años cincuenta surge el primer modelo por ordenador. Finalmente, ya a finales de los años ochenta y principios de los noventa, se da la gran revolución del modelado acústico por ordenador (virtual), con la aparición de los softwares de simulación de acústica de salas punteros en el mercado en la actualidad.

En este proyecto, el problema a resolver nace de la necesidad de analizar la acústica de un recinto, en este caso, el Teatro Auditorio Buero Vallejo de Guadalajara, y poder proponer alguna modificación para mejorar su calidad. Habitualmente, para conocer las características acústicas de una sala se realizan mediciones *in situ*. Éstas requieren equipos de medición costosos, por lo que no es viable efectuarlas repetidas veces para evaluar el resultado de las modificaciones propuestas (y así comparar respecto a la sala original). Por ello, como alternativa, la solución planteada es el diseño de un modelo acústico virtual del teatro.

Esta memoria comienza contextualizando el campo de conocimiento al que pertenece el proyecto, el modelado acústico de salas. Tras ello, se indican las especificaciones y restricciones existentes para el diseño del modelo. En el cuarto apartado del documento se habla sobre diferentes conceptos y parámetros empleados a lo largo del proyecto, siendo en la sección quinta donde se describe el desarrollo del mismo, aportando una visión global de todas las fases. El epígrafe 6 está dedicado a comentar las características principales del Teatro Auditorio Buero Vallejo de Guadalajara. A partir de aquí, los apartados 7, 8, y 9 están dedicados a la obtención del modelo acústico virtual. En ellos se abordan las mediciones *in situ*, el modelado geométrico tridimensional y la obtención del modelo acústico virtual válido, que represente fielmente las características de la sala real. Con el modelo terminado, éste se utiliza como herramienta en los apartados 10, 11 y 12, para analizar la calidad acústica de la sala, proponer el diseño de una concha acústica para el teatro y estudiar el funcionamiento de la misma al instalarla, respectivamente. Por último, se comentan los resultados obtenidos de todo el proceso anterior, se plantea el presupuesto requerido para el proyecto (diseño e instalación de la concha acústica), se exponen las conclusiones y se incluyen las referencias utilizadas en la memoria.

Adicionalmente, se adjuntan cinco anexos al final del documento, los cuales se mencionan a lo largo de éste para ser consultados.



## 2. Marco tecnológico

A lo largo de este apartado se busca explicar los antecedentes y el marco tecnológico en el que se ubica el tema de este proyecto. Para llevar a cabo la exposición se desarrollan tres subapartados distintos: el primero de ellos es en el que se introduce el campo del modelado y la simulación acústicos de salas; en el segundo subapartado se presenta de manera breve la historia y estado del arte de las principales técnicas de modelado acústico geométrico de salas; por último, el tercero, está dedicado a comentar las características fundamentales del software utilizado para estudiar de manera virtual la acústica de la sala: *ODEON Room Acoustics Software*.

### 2.1. Modelado y simulación acústicos de salas

El objetivo principal de la simulación acústica de salas, a través del modelado de las mismas, consiste en proporcionar respuestas al impulso (véase 4.1) que se puedan emplear para calcular diferentes parámetros acústicos propios de una sala, como puede ser, por ejemplo, el tiempo de reverberación (véase 4.6), o para aplicaciones más complejas como puede ser la auralización (véase 4.17).

La acústica de una sala se puede modelar bajo marcos diferentes y con fines diversos. Existen dos enfoques principales, basados bien en la resolución numérica de la ecuación de onda o en los supuestos de la acústica geométrica. En principio, el modelado basado en las ondas es el que proporciona resultados más precisos. Sin embargo, las técnicas empleadas para llevarlo a cabo son muy costosas computacionalmente hablando, por lo que suele ser conveniente recurrir a técnicas más rápidas, aunque menos precisas, como las basadas en la acústica geométrica. De hecho, en la práctica, las técnicas de acústica geométrica se utilizan ampliamente para modelar el comportamiento de las salas en las frecuencias medias y altas. La razón es que, en dichas frecuencias, la longitud de onda del sonido es pequeña en comparación a las dimensiones de las superficies y espacio modelado. Así pues, en la acústica geométrica se desprecian las propiedades ondulatorias del sonido, y se pasa a suponer que su propagación se da en forma de rayos sonoros<sup>1</sup>. Como detalle, cabe destacar que el físico acústico chino Dah-You Maa ya señaló en 1941 que los "teóricos de la investigación" insisten en la acústica física rigurosa, pero que los profesionales prefieren la acústica geométrica. Es más, D. Y. Maa manifestó esta preferencia mucho antes de que se discutiera el uso de ordenadores para simulaciones acústicas de salas [1].

### 2.2. Historia y estado del arte

A principios del siglo XX, el padre de la acústica de salas, W. C. Sabine, ya empleó la acústica basada en rayos con el propósito de investigar los caminos que tomaba el sonido durante el fenómeno de su propagación. La constatación de estos hechos queda patente gracias a su publicación *Collected Papers On Acoustics*, concretamente en la sección llamada *Theatre Acoustics* [2]. Sabine muestra la propagación de ondas sonoras en un modelo construido físicamente y a escala del teatro *Century Theatre* de Nueva York (en la época era conocido como el *New Theatre*). Para poder captar la propagación del sonido en dicho modelo, Sabine se sirvió de la técnica conocida como fotografía Schlieren (inventada por August Toepler). La técnica consiste en iluminar mediante una chispa eléctrica el modelo físico

---

<sup>1</sup> Un rayo sonoro es una recta orientada característica del avance de un frente de ondas planas.

mientras el sonido lo atraviesa, de manera que la luz es refractada por las ondas sonoras, que actúan como prácticamente su propia lente para producir la fotografía. En la figura 1 se presenta un extracto del libro mencionado escrito por Sabine. En dicha figura aparece una sucesión de imágenes en las que se representa la propagación del sonido utilizando el método comentado en este párrafo. Así pues, esas imágenes provenientes de un modelo físico a escala se pueden considerar como uno de los primeros pasos hacia el trazado de rayos por ordenador.

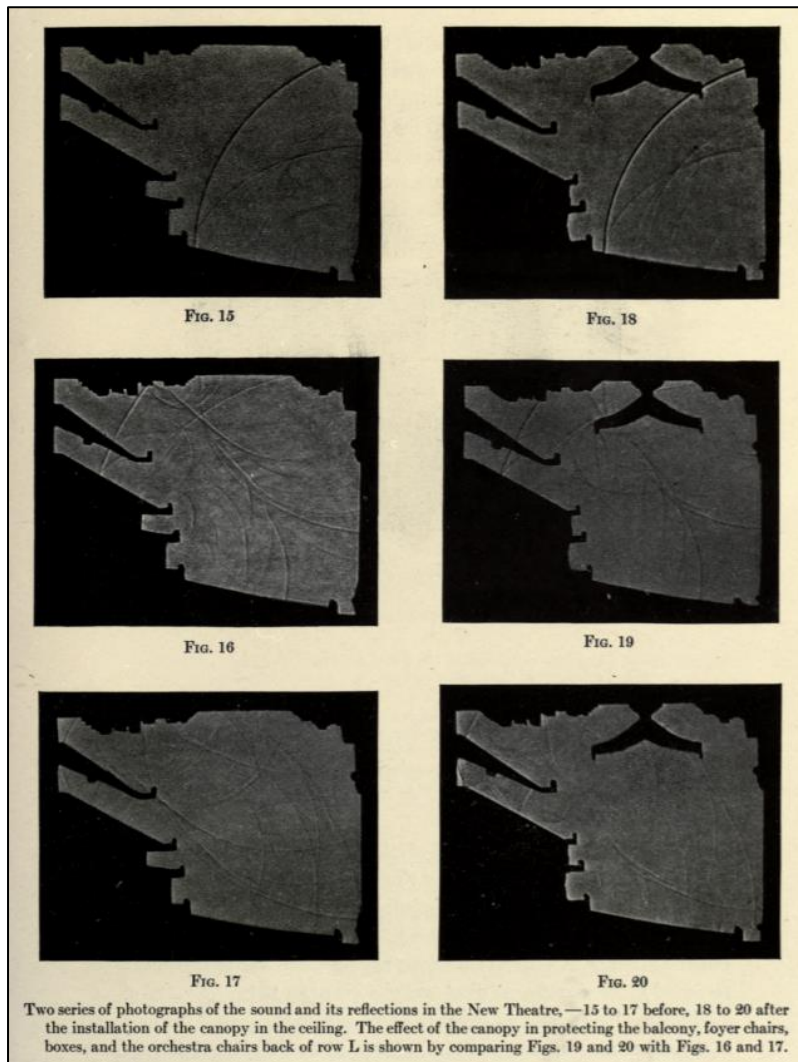


Figura 1. Extracto del libro “Collected Papers On Acoustics” publicación de Sabine (1922), que muestra la propagación sonora en un modelo físico a escala empleando la técnica de la fotografía Schlieren [2].

Años después, en 1929, fue demostrada la validez de la aproximación de la acústica geométrica cuando la longitud de onda de sonido es pequeña en comparación con las dimensiones de la sala.

Cinco años después, en 1934, Spandöck presentó el primer informe sobre un método para la evaluación subjetiva de la acústica de una sala mediante el uso de modelos tridimensionales a escala [3]. Un ejemplo de ese tipo de modelos a escala se puede apreciar en la figura 2, que muestra un modelo a escala del Major Hall for the Sydney Opera House.



*Figura 2. Modelo a escala 1:10 del "Major Hall" de La Casa de la Ópera de Sidney (no se trata del diseño final, sino del último diseño de Utzon alrededor de 1966) [4].*

Posteriormente, en 1958, Allred y Newhouse presentaron el primer modelo por ordenador, utilizado para determinar las longitudes del camino libre medio<sup>2</sup>. Hasta entonces sólo se había trabajado con modelos físicos y a escala, en los que las dimensiones tanto del recinto como de las longitudes de onda se veían reducidos mediante la aplicación de un factor de escala.

Casi una década después (en 1967), con la intención de desarrollar una teoría de la reverberación basada en rayos acústicos más precisa, Atal y Schroeder presentaron el cálculo (por ordenador) de las curvas de decaimiento de energía sonora de salas en dos dimensiones [5]. El proceso de obtención de éstas consistía en trazar el camino de cada rayo radiado desde una fuente puntual en el recinto. La energía de cada rayo se calculaba en función del tiempo, teniendo en cuenta la influencia de la absorción provocada por los materiales de los bordes del modelo empleado. Las fórmulas obtenidas para el tiempo de reverberación tras emplear este método de cálculo dependían de la forma de la sala analizada y de las características absorbentes de los materiales. En una publicación del propio Schroeder en 1970, se explica más en profundidad el proceso de obtención de las curvas de decaimiento y algunos resultados que lo ejemplarizan [6]. En la figura 3, se incluye un extracto de dicha publicación. Concretamente, se trata de una sala en dos dimensiones que cuenta en su interior con una zona de material absorbente en el techo y con una fuente omnidireccional que emite 300 rayos con la misma energía. El ordenador va trazando los caminos que toma cada rayo, contando con las reflexiones en los muros. Cuando un rayo incide en la zona en la que se ubica el material absorbente la energía se ve disminuida por un factor  $(1 - \alpha)$ , siendo  $\alpha$  el coeficiente de absorción del material (véase 4.4).

<sup>2</sup> El concepto de camino libre medio hace referencia al promedio de distancia que un rayo sonoro recorre entre reflexiones sucesivas en una geometría dada.

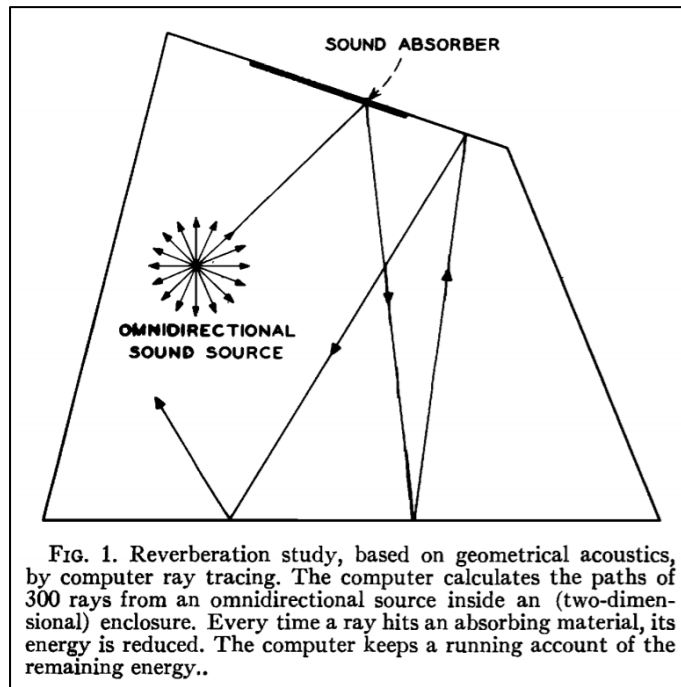


Figura 3. Extracto de “Digital Simulation of Sound Transmission in Reverberant Spaces”, publicación de Schroeder (1970), en la que se ilustra el trazado de rayos empleado en el cálculo por ordenador [6].

En la figura 4 se añade un ejemplo del cálculo de la curva de decaimiento de energía sonora también extraído del mismo artículo de 1970. En la gráfica que aparece se representan las curvas de dos rayos individuales (en forma de escalera) y una tercera curva obtenida de la media de los 300 rayos empleados. Esta última curva se aproxima a una recta con pequeñas irregularidades a partir de la cual se puede deducir un tiempo de reverberación de 0,63 s para el recinto analizado. Dicho recinto se muestra dibujado en la parte superior izquierda, y se puede advertir cómo el muro superior del mismo posee un material con coeficiente de absorción igual a 0,5.

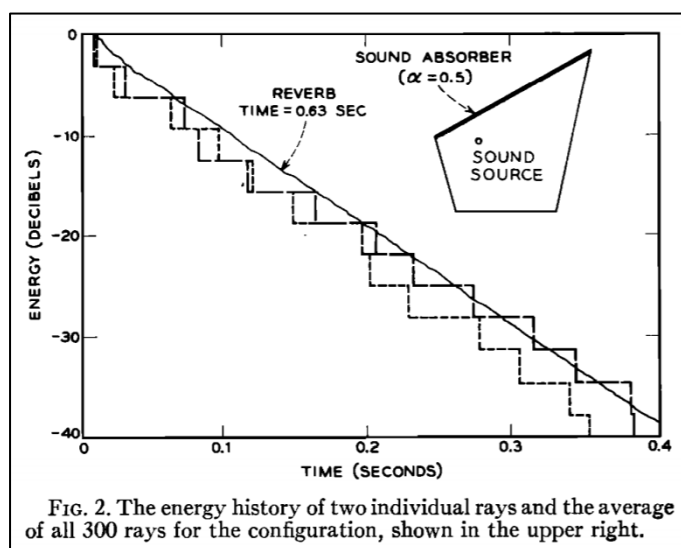


Figura 4. Extracto de “Digital Simulation of Sound Transmission in Reverberant Spaces”, publicación de Schroeder (1970), que muestra las curvas de decaimiento de energía sonora para la sala concreta dibujada en la parte superior derecha [6].

Como último detalle respecto a este documento, cabe destacar la comparativa entre la curva de decaimiento obtenida por el ordenador mediante el trazado de rayos que propone Schroeder y las curvas predichas según las fórmulas de Sabine, Eyring y Millington. Se puede contemplar en la figura 5 los distintos valores que se obtienen para el tiempo de reverberación de la sala en dos dimensiones que se representa en la parte superior derecha de la gráfica. Los tiempos de reverberación calculados de acuerdo con la fórmula de Sabine y de Eyring se encuentran por encima del calculado por Schroeder, mientras que el de Millington posee un valor menor.

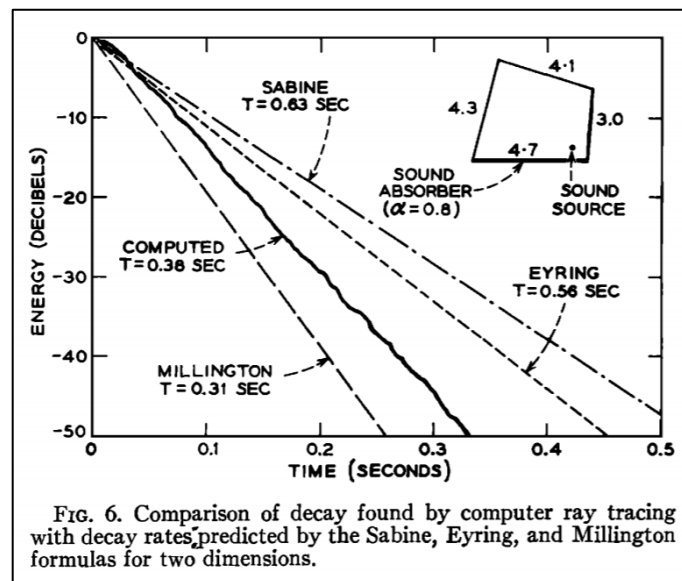


Figura 5. Extracto de "Digital Simulation of Sound Transmission in Reverberant Spaces", publicación de Schroeder (1970), que muestra la comparativa entre valores del tiempo de reverberación según el método de cálculo para la sala concreta dibujada en la parte superior derecha [6].

Volviendo un par de años en el tiempo, en 1968, sale a la luz el primer método de cálculo (por ordenador) para calcular las respuestas acústicas de una sala con diferentes posiciones de receptor acústico. Los culpables de ello son Krokstad, Strøm y Sørsdal. Explican en su publicación *Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique* que al utilizar el trazado de rayos pueden calcular simultáneamente la distribución espacial y temporal de las primeras reflexiones, a lo que llaman respuesta de la sala (la excitación de la sala se produce mediante una fuente puntual que emite un pulso sonoro) [6]. Indican también la necesidad de eliminar las superficies demasiado pequeñas del recinto estudiado para obtener un grado razonable de precisión en el cálculo. En la figura 6 se puede contemplar un extracto del artículo en el que se plasma el resultado del cálculo sobre una sala rectangular. Se distinguen dos tipos de representaciones distintas, aunque ambas plasmadas mediante una máquina de dibujo conectada al ordenador que efectúa los cálculos. Las gráficas de la parte superior son las respuestas al impulso de la sala en las tres áreas de audiencia diferentes que se utilizan. En cambio, en la parte inferior, las gráficas se obtienen trazando los puntos de impacto en dichas áreas en varios intervalos de tiempo. Así, la comparación entre la densidad de puntos y la longitud de los intervalos de tiempo proporciona una idea de la intensidad del sonido.

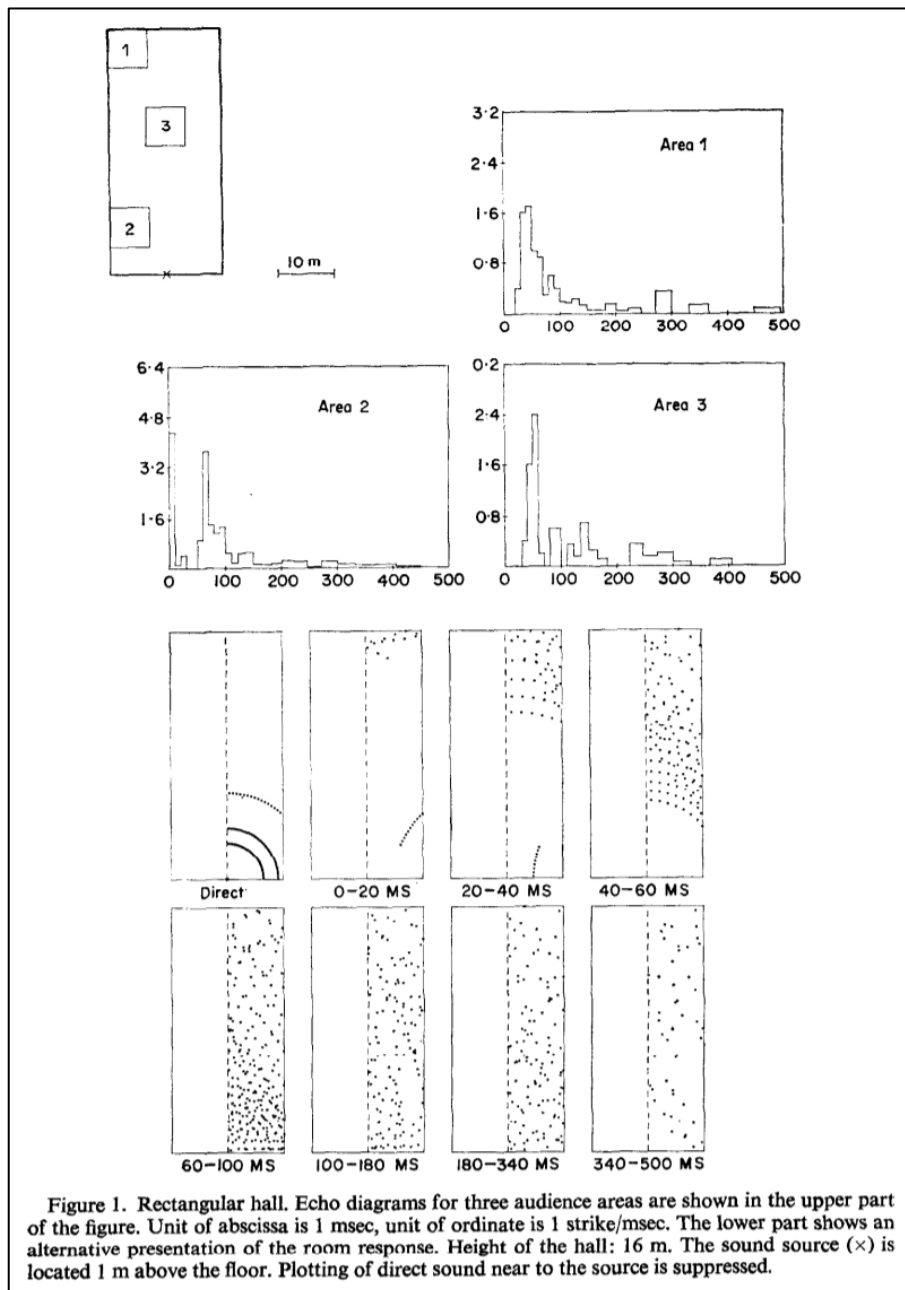


Figura 6. Extracto de “Digital Simulation of Sound Transmission in Reverberant Spaces”, publicación de Krokstad, Strøm y Sørdsdal (1968), que muestra las respuestas al impulso (primeras reflexiones) e intensidad del sonido para tres áreas de audiencia diferentes en una sala rectangular [7].

En general, en los siguientes años, el desarrollo y despliegue del modelado acústico de salas tuvo una evolución lenta. Hubo que esperar hasta principios de la década de los 90 para que se diera el momento de gran auge en la investigación sobre modelado acústico de salas. Fue en esa época cuando nacieron la mayoría de las herramientas actuales empleadas en este campo de conocimiento. Las tres principales son ODEON *Room Acoustics Software*, EASE (*Enhanced Acoustic Simulator for Engineers*) y CATT-Acoustic (*Computer Aided Theater Technique - Acoustic*). ODEON, desarrollado por la Universidad Técnica de Dinamarca y distribuido por Brüel & Kjær, lanza su primera versión software en 1991 [8]. Contemporáneamente, nace EASE, el software de simulación de la firma alemana AFMG [9]. Algo

después, en 1996, aparece el software sueco CATT-Acoustic [10]. En la figura 7 aparecen las tres herramientas de modelado acústico de salas.

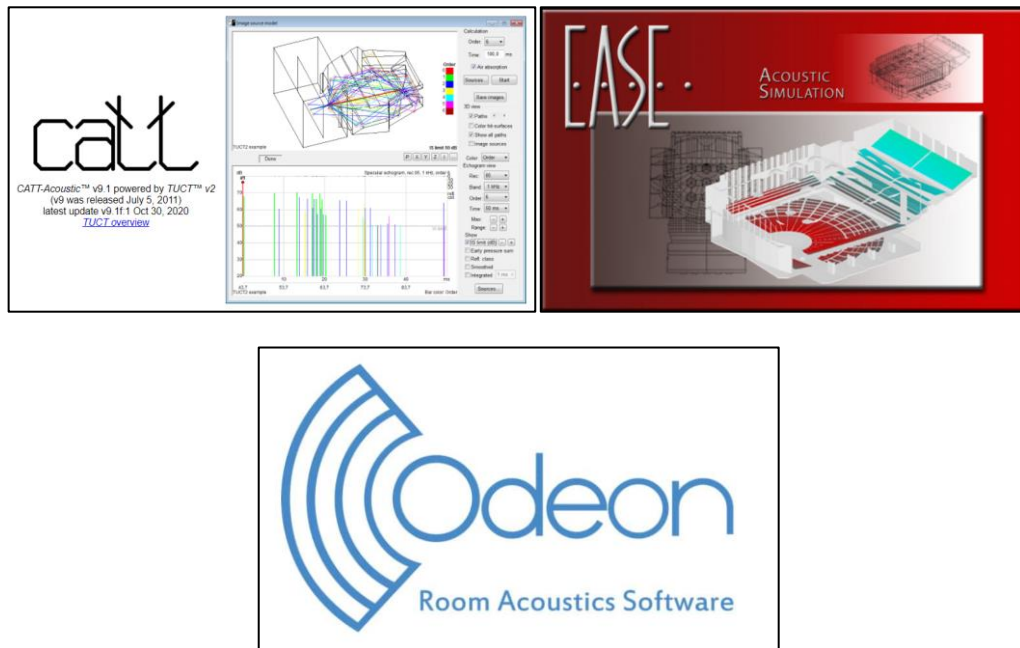


Figura 7. Sup.izq: CATT-Acoustic, sup.dcha: EASE, inf: ODEON.

Actualmente, el uso de ordenadores para el diseño de acústica de salas ha crecido notablemente. Tal es su popularidad que, incluso, se ha comenzado a utilizar estas técnicas de modelado acústico virtual en videojuegos, para poder conseguir un audio más realista que eleve la experiencia de juego a otro nivel. Sin embargo, en el mundo de los videojuegos el objetivo respecto al audio es conseguir una auralización plausible de manera eficiente, mientras que en el campo de la acústica de salas lo más importante es la precisión, estando ésta por encima del rendimiento computacional. De hecho, para apoyar los cálculos realizados por ordenador mediante simulaciones de ciertas salas de conciertos, aun hoy en día se construyen modelos a escala de dichos recintos.

### 2.3. ODEON Room Acoustics Software

ODEON se trata de software de modelado acústico de salas cuyos cálculos se desarrollan en el dominio de la energía y no en el de la presión, de manera que las ondas sonoras se representan como rayos sonoros. Esos rayos pueden ser entendidos como líneas rectas que unen fuente sonora con receptor. Los rayos que no se dirigen de manera directa a un receptor se consideran reflexiones, las cuales se tratan mediante diferentes métodos, como se va a ver más adelante. Así, con esta idea como base, es posible obtener la respuesta acústica en grandes espacios sin requerir un largo tiempo de procesado y cálculo por ordenador [11].

En cuanto a los usos principales del software, los más habituales son: la predicción y optimización de la acústica de salas de edificios nuevos que se van a construir, la predicción del efecto que tienen

determinados cambios constructivos en las propiedades acústicas de una determinada sala y la mejora de la acústica de salas de una infraestructura ya existente.

Respecto a los procesos de cálculo, ODEON obtiene respuestas al impulso haciendo uso de tres métodos (véase 9.5.1): ISM (*Image Source Method*), ESM (*Early-Scattering Method*) y RRM (*Ray-Radiosity Method*). En el reflectograma (véase 4.3) existen dos zonas diferenciadas, la de las primeras reflexiones o reflexiones tempranas, y la zona de reflexiones tardías. Así, para calcular esas primeras reflexiones se utilizan de manera combinada los métodos ISM y ESM, mientras que para las reflexiones tardías se aborda el cálculo con el método RRM.

Además de poder obtener curvas de decaimiento de energía y una inmensa lista de parámetros acústicos para el estudio y análisis de las características de una sala, ODEON permite realizar auralización, de manera que es posible escuchar el resultado de la simulación acústica del modelo y analizar de manera subjetiva las características acústicas en diferentes puntos de una sala.

### 3. Especificaciones y restricciones de diseño

Para diseñar un modelo acústico virtual se deben tener en cuenta algunas pautas para lograr resultados coherentes y satisfactorios. Las especificaciones y restricciones con las que cuenta este proyecto se incorporan en el siguiente listado:

- Es necesario realizar una serie de mediciones acústicas *in situ* para poder tener los datos de referencia con los que comparar los parámetros acústicos simulados y poder efectuar el ajuste del modelo acústico virtual. Para llevar a cabo tales mediciones se ha de seguir la norma en la que se especifican los procedimientos concretos para ese tipo de medidas, la UNE-EN ISO 3382-1 [12].
- Las dimensiones de los planos de los que se parte para generar el modelo geométrico tridimensional del teatro deben reflejar, de manera razonable, las dimensiones reales del teatro. En caso de no ser así, hay que levantar los planos del teatro desde cero.
- Para garantizar la validez del modelo geométrico en 3D, aquellos elementos del teatro cuyo tamaño sea muy inferior a las longitudes de onda de las frecuencias de interés, no se deben representar. Concretamente, las irregularidades geométricas no representadas en este proyecto son aquellas con dimensión menor a la longitud de onda de 1 kHz, que se intentan replicar mediante el ajuste del coeficiente de dispersión.
- El modelo acústico virtual debe quedar ajustado empleando como criterio de ajuste una diferencia entre valores simulados y medidos menor al JND (indicado en la ISO 3382-1) lo cual se considera un ajuste excelente. Como criterio menos restrictivo, se acepta una diferencia de entre 1 y 2 JND's, calificando el ajuste como aceptable.
- El resultado de la sala simulada tras el ajuste del modelo, así como las modificaciones o nuevos diseños que se planteen, se han de poder escuchar como si se estuviera físicamente en el recinto por medio de auralizaciones.



## 4. Acústica de salas: conceptos y definiciones

En esta sección se definen y explican los diferentes parámetros acústicos que se emplean para ajustar el modelo y analizar acústicamente el teatro. Estos parámetros aparecen definidos en la norma UNE-EN ISO 3382-1:2009: Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos [12]. Los parámetros que se incluyen a continuación son: el tiempo de reverberación (RT), EDT (*Early Decay Time*), tiempo central (Ts) y calidez acústica (BR) y brillo (Br); parámetros asociados a las primeras reflexiones como la claridad de la voz y claridad de la música ( $C_{50}$  y  $C_{80}$  respectivamente) y la definición ( $D_{50}$ ); también se incluye la fuerza sonora (G) y la eficiencia lateral (LF); parámetros asociados a la inteligibilidad de la palabra como el índice de transmisión del habla (STI), y %ALCons (*Percentage Articulation Loss of Consonants*); y, por último, el JND (*Just Noticeable Difference*).

Además, previamente, algunos conceptos clave en el mundo de la acústica, y a los que se hace referencia en repetidas ocasiones a lo largo de la memoria, también se incluyen en este apartado. Los conceptos son en concreto la respuesta al impulso, la curva de decaimiento energético, el reflectograma, el coeficiente de absorción, el coeficiente de dispersión y la auralización.

### 4.1. Respuesta al impulso

La respuesta al impulso se trata de un concepto que se refiere a la evolución que sufre la presión acústica, medida en un determinado punto de una sala, cuando se excita el propio recinto, en otro punto del mismo, con una señal conocida como impulso de Dirac.

A la hora de poner en práctica la medida de la respuesta al impulso, puesto que emitir una delta de Dirac verdadera no es posible (pues se trata de una función ideal), se excita el recinto con sonidos cortos transitorios. Los típicamente empleados son un disparo de una pistola de fogeo o la explosión que genera pinchar un globo. Además de estas técnicas, existen alternativas, como emplear una señal MLS (*Maximum-Length Sequence*), que consiste en hacer uso de una señal tal como un periodo de secuencias de máxima longitud, o como utilizar otra señal de espectro plano, como es el caso de un barrido sinusoidal. Mediante estas alternativas la respuesta medida se transforma en una respuesta al impulso.

En la figura 8 se muestra una de las respuestas al impulso medidas y empleadas en este proyecto a modo de ejemplo, para tener una referencia de su representación habitual. En el eje de abscisas se representa tiempo, mientras que en el de ordenadas se representa presión sonora.

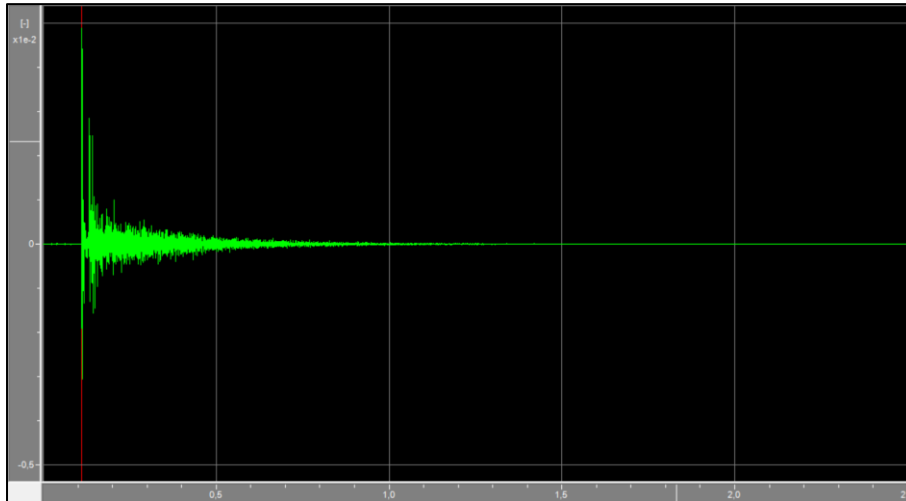


Figura 8. Respuesta al impulso de uno de los puntos de medición en el teatro.

## 4.2. Curva de decaimiento energético

Se trata de una curva que muestra cómo decae la energía sonora a lo largo del tiempo en un determinado punto de medida en una sala, tras apagar una fuente que excita el recinto con ruido continuo (se conoce también como curva ETC (*Energy Time Curve*)). La energía pasa de encontrarse en un estado estacionario a poseer una envolvente que sigue una caída exponencial en el tiempo. Si se representa en escala logarítmica la energía (pasa a ser nivel de energía en dB), la envolvente presenta entonces la forma propia de una recta decreciente, como se puede advertir en la figura 9.

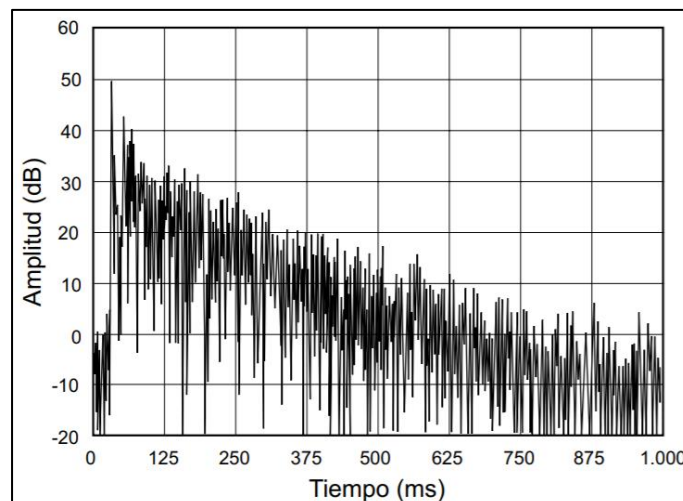


Figura 9. Curva ETC medida en un punto de un recinto [13].

Las salas presentan características acústicas distintas en función de la frecuencia, por lo que para cada banda de frecuencias existe un decaimiento de la energía diferente. Así pues, en el punto en el que se mida la respuesta al impulso se derivan de ella las diferentes curvas ETC para cada banda de frecuencia,

como se realiza en ODEON. En la figura 10 se puede observar un ejemplo de estas curvas obtenidas mediante el software en cuestión.

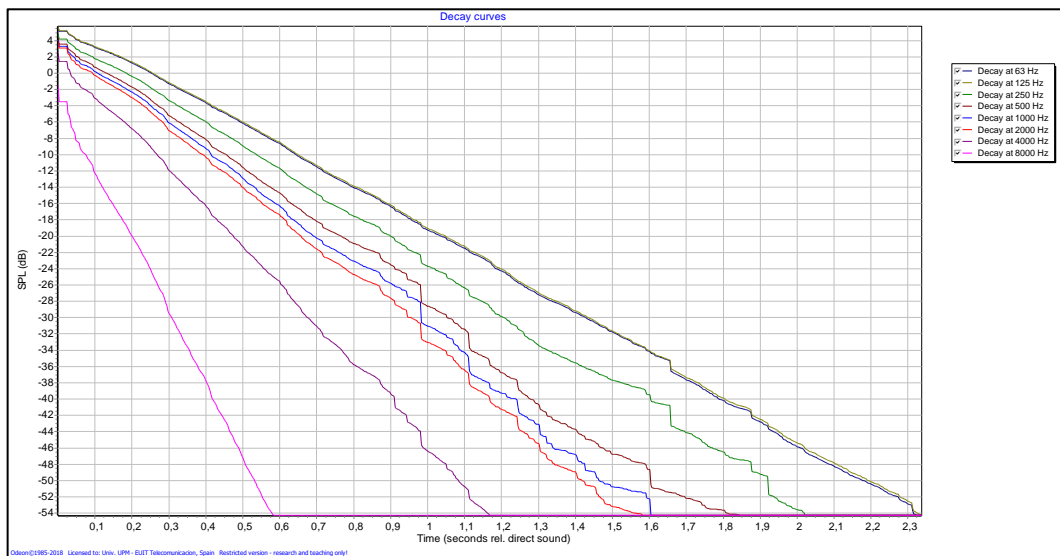


Figura 10. Curvas de decaimiento energético por cada banda de octava obtenidas en ODEON para un punto determinado del teatro.

### 4.3. Reflectograma

La acústica geométrica supone la propagación del sonido en forma de rayos sonoros, despreciando las propiedades ondulatorias. Con la intención de registrar la llegada de esos rayos a un determinado punto de una sala, se utiliza el reflectograma (también llamado ecograma). Esta herramienta se trata de una representación gráfica temporal de la llegada de los rayos sonoros junto con su nivel energético correspondiente.

Al analizar la evolución de los rayos sonoros en un punto de un recinto sometido a estudio, se distinguen dos zonas: la primera recibe el nombre de primeras reflexiones (o reflexiones tempranas) y la segunda suele llamarse zona de reflexiones tardías, conocida también como cola reverberante. Los rayos que no reflejan en ninguna superficie y que, por lo tanto, viajan directamente desde la fuente sonora al receptor, son los que conforman el sonido directo. Las primeras reflexiones llegan inmediatamente después del sonido directo. Normalmente, el número de incidencias contra superficies de la sala antes de llegar al receptor para considerar a ese rayo como reflexión temprana es menor o igual que 3. Ésto se conoce como el orden de la reflexión. Si una reflexión es de orden 7, significa que ha incidido sobre 7 superficies antes de alcanzar el receptor, y como es superior a 3, se considera a ese rayo como parte de la cola reverberante.

Además, si se observa la figura 11, se aprecia cómo los rayos que tardan más en llegar al receptor poseen menos energía, ya que han ido perdiendo parte de ella debido a las diferentes incidencias sobre superficies de la sala, que cuentan con materiales que absorben parte de esa energía.

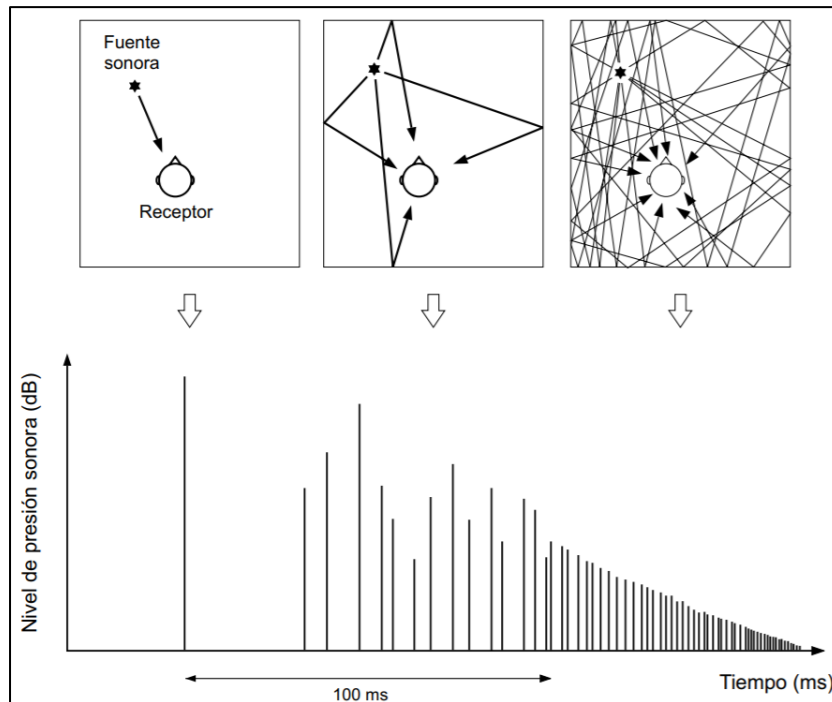


Figura 11. Representación esquemática de llegada de rayos directos, primeras reflexiones y cola reverberante, y reflectograma asociado a un punto receptor en una sala [13].

#### 4.4. Coeficiente de absorción ( $\alpha$ )

Los materiales de las superficies de una sala son capaces de absorber la energía sonora. El grado de absorción de cada uno de ellos queda definido mediante el coeficiente de absorción, expresado con la letra griega  $\alpha$ . La definición de  $\alpha$  es la relación entre la energía absorbida por el material en cuestión y la energía que incide sobre él, como se expresa en la expresión (1).

$$\alpha = \frac{\text{Energía absorbida}}{\text{Energía incidente}} \quad (1)$$

Los valores del coeficiente de absorción están comprendidos entre 0 y 1, de modo que un material completamente reflectante poseerá un  $\alpha = 0$  y un material totalmente absorbente tendrá un  $\alpha = 1$ . El valor de  $\alpha$  depende de las propiedades físicas del material y varía con la frecuencia. Es decir, cuando se proporciona información sobre la absorción de un material, se informa sobre el valor del  $\alpha$  para las diferentes bandas de frecuencia (normalmente en bandas de octava desde la de 125 Hz hasta la de 4 kHz).

#### 4.5. Coeficiente de dispersión ( $s$ )

La reflexión de un rayo sonoro al incidir en una superficie puede ser de dos tipos diferentes: bien reflexiones especulares (en las que el ángulo reflejado es igual al ángulo de incidencia) o bien reflexiones difusas (donde el ángulo reflejado es independiente del ángulo de incidencia).

Partiendo de lo anterior, se puede definir el coeficiente de dispersión ( $s$ ) como la proporción de energía sonora que no se refleja de forma especular. Al igual que el coeficiente de absorción,  $s$  (de *scattering coefficient* en inglés) posee un valor entre 0 y 1. Si  $s = 0$ , entonces toda la energía reflejada en la superficie con dicho coeficiente de dispersión lo hace especularmente; si  $s = 1$ , la reflexión de toda la energía sonora en esa superficie será difusa.

A modo de ejemplo, la figura 12 ilustra la definición anterior. En ella aparece una superficie irregular (*rough surface*) y hay rayos sonoros que se reflejan especularmente y otros que se dispersan al incidir en la superficie.

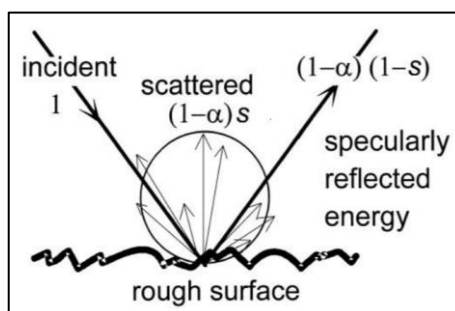


Figura 12. Gráfico explicativo del coeficiente de dispersión, con el sonido incidente normalizado a 1 [14].

#### 4.6. Tiempo de reverberación (RT)

El tiempo de reverberación, RT (*Reverberation Time*) al expresarlo de forma abreviada, se define como el tiempo (en segundos) que transcurre desde que la fuente emisora de sonido cesa su emisión hasta el momento en el que el nivel de presión sonora, SPL (*Sound Pressure Level*), cae 60 dB con respecto al valor que poseía inicialmente con la fuente encendida.

Gracias a este parámetro se puede cuantificar la reverberación de un recinto para diferentes bandas de frecuencia. Normalmente, a medida que disminuye la frecuencia el RT aumenta. Las razones principales de que se dé esta situación son la absorción provocada por el aire (notable en recintos grandes y en alta frecuencia, sobre todo) y las características de mayor absorción a frecuencias altas de los materiales empleados en las superficies de los recintos.

Habitualmente, si se quiere establecer un valor único de RT para una sala, dicho valor suele obtenerse como la media de los RT de las bandas de octava de 500 Hz y de 1 kHz, y se representa como  $RT_{mid}$ , haciendo referencia a las frecuencias medias.

Cuando se habla de una sala “viva” se está queriendo indicar que posee un RT grande (como puede ser el caso de una iglesia,  $RT_{mid}$  entre 2,0 s y 3,0 s). En cambio, si se dice que un determinado recinto es “apagado” (como es el caso de un estudio de grabación,  $RT_{mid}$  entre 0,2 s y 0,4 s) se está indicando que el RT es pequeño.

En cuanto al cálculo del tiempo de reverberación, existen diferentes teorías y fórmulas, pero el método clásico y aceptado en todo el mundo es la expresión planteada por Sabine. Dicha fórmula (2) la obtuvo aplicando la teoría acústica estadística (despreciando el efecto de absorción del aire).

$$RT = 0,161 \frac{V}{A_{total}} \quad s \quad (2)$$

En la expresión anterior,  $V$  representa el volumen de la sala (en  $m^3$ ) y  $A_{total}$  (en sabines, correspondiendo 1 sabin a la absorción de  $1 m^2$  de ventana abierta) representa la absorción total del recinto. Ésta se calcula realizando la suma de los productos de la superficie que ocupa en la sala cada material por el coeficiente de absorción del mismo (3).

$$A_{total} = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n \quad \text{sabin} \quad (3)$$

Al calcular el RT con la fórmula de Sabine para cada banda de frecuencia, esos valores obtenidos son únicos para el recinto (no se tiene en cuenta la posición del receptor dentro de la sala). Es por ello que este cálculo se suele efectuar para tener una aproximación y una idea principal del valor del RT en cada frecuencia, ya que sólo es válido para salas con geometría regular y con un coeficiente de absorción medio inferior a 0,4.

En la práctica, el RT se calcula a partir de la curva de decaimiento energético obtenida en un punto de la sala. Esta curva presenta irregularidades, ya que en ningún recinto real existe un campo sonoro completamente difuso. Sería necesario obtener la curva ETC infinitas veces para conseguir una curva promedia sin esas irregularidades. Como esto no es viable, se aplica el método de Schroeder, que consiste en hallar la curva promedio anterior integrando las contribuciones energéticas asociadas a una única curva ETC (la integración normalmente se realiza desde un tiempo entre 1 y 3 segundos hasta el instante inicial). Además, cabe destacar que, para obtener el RT representativo de una sala se han de promediar los valores medidos en diferentes puntos de la sala [13]. En la figura 13 aparece un ejemplo que ilustra la explicación anterior.

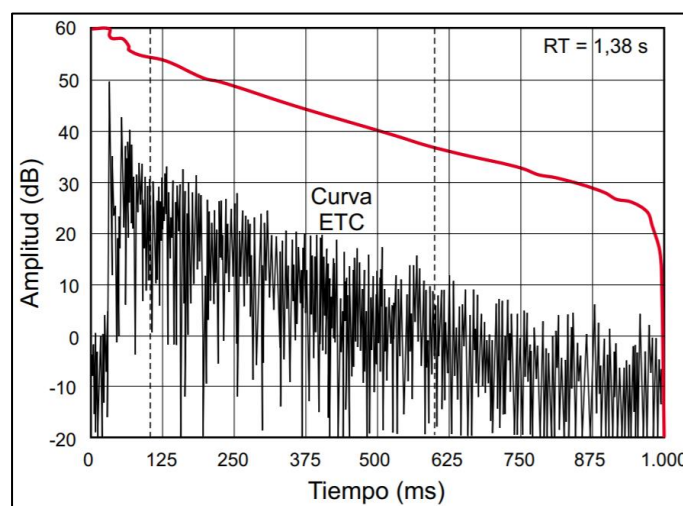


Figura 13. Curva ETC y curva obtenida de la integración de la ETS (color rojo) empleada para calcular el RT [13].

En la figura 13 se advierte que no se puede observar la caída de 60 dB de nivel de presión sonora necesaria para hallar el valor del RT. Para solucionar este problema, se toma como referencia una caída de 20 dB (la tercera parte de 60 dB). Se emplea el tramo de curva roja que es más recto. Dejando un

margen de 5 dB respecto al máximo nivel, se toma desde 55 dB hasta 35 dB. El tiempo transcurrido entre esos dos niveles se multiplica por 3, obteniendo el resultado del RT extrapolado, que en este caso se representa como  $T_{20}$ . Siguiendo el mismo procedimiento, con una caída de 30 dB se halla el conocido como  $T_{30}$ . En la figura 14 se muestra un ejemplo del cálculo del RT utilizando diferentes márgenes en la caída del nivel.

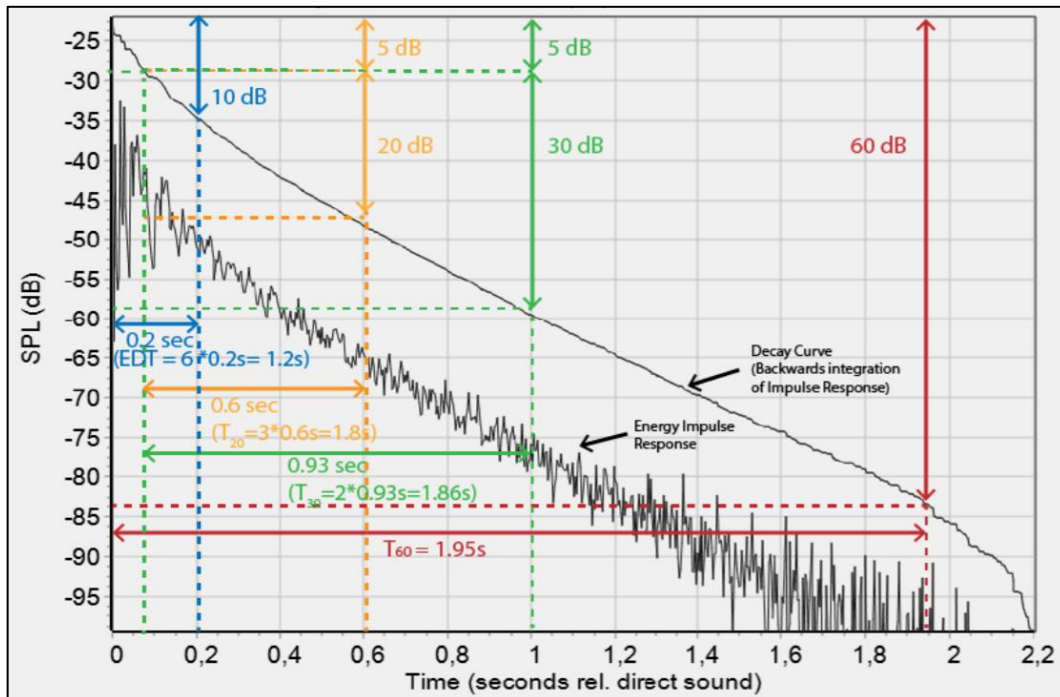


Figura 14. Diferentes caídas de nivel empleadas para obtener RT. En amarillo  $T_{20}$ , en verde  $T_{30}$ , en rojo  $T_{60}$  [11].

Respecto a los valores recomendados del RT, para actividades teatrales se aconseja que  $RT_{mid}$  esté entre 0,7 y 1,2 s, mientras que para sala de conciertos se sugiere que  $RT_{mid}$  se esté entre 1,8 y 2 s.

#### 4.7. EDT (Early Decay Time)

El EDT (en español se traduce como tiempo de caída temprana) se define como seis veces el tiempo que transcurre desde que la fuente sonora emisora se apaga hasta que el nivel de presión sonora cae 10 dB.

En principio, si la difusión del sonido en la sala fuera perfecta, el decaimiento de energía sería una línea recta en escala logarítmica y el valor de EDT coincidiría con el de RT. Sin embargo, en la práctica, no se da esa situación de difusión perfecta, y, en consecuencia, la curva de decaimiento energético puede contar en puntos distintos de la sala con una doble pendiente. Así, RT y EDT pueden tener valores notablemente diferentes [13]. A modo de ejemplo se incluye la figura 15, que demuestra esta diferencia visualmente.

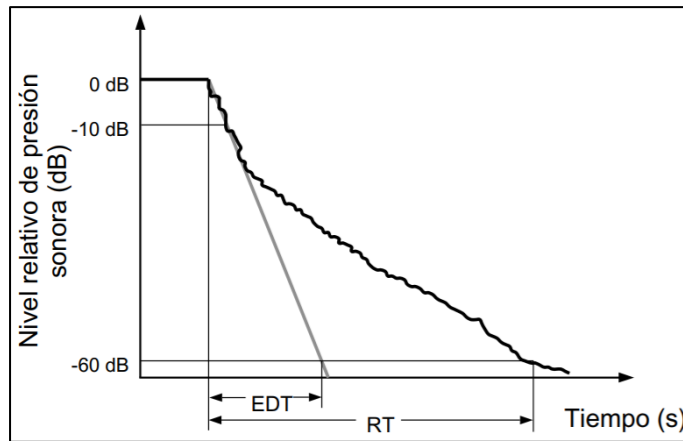


Figura 15. Diferencia entre EDT y RT [13].

El EDT proporciona más información relativa a la impresión subjetiva de viveza de la sala que el RT. Es decir, en los puntos de la sala en los que el EDT sea sustancialmente más grande que el RT, el recinto resultaría, subjetivamente hablando, más vivo que lo indicado por el valor de RT. Para los puntos con valor de EDT significativamente más pequeño que el de RT, la sala se percibiría más apagada que lo esperado del valor de RT [13].

Con la intención de garantizar una buena difusión del sonido en una sala ocupada, el valor promedio de los EDT en las bandas de 500 Hz y 1 kHz debe encontrarse, para representaciones teatrales entre  $0,6RT_{mid}$  y  $0,75RT_{mid}$ , y para salas de concierto entre  $0,9RT_{mid}$  y  $RT_{mid}$ .

#### 4.8. Tiempo central (Ts)

También denominado centro de gravedad, se define como el momento de primer orden del área situada bajo la curva de decaimiento energético. Indica la “distancia” en milisegundos desde el origen temporal hasta el “centro de gravedad” de la curva de decaimiento energético. El valor de Ts se obtiene mediante la fórmula (4).

$$T_s = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_{t_e}^{\infty} p^2(t) dt} \quad ms \quad (4)$$

Este parámetro informa acerca de la nitidez del sonido en puntos determinados de la sala, y posee gran relación con el EDT. Además, se calcula en cada banda de frecuencias comprendida desde 125 Hz y 4 kHz [13].

#### 4.9. Calidez acústica (BR) y brillo (Br)

La calidez acústica BR (*Bass Rate*) y el brillo (Br) son dos parámetros que se obtienen a partir del RT y que proporcionan una idea de la respuesta de la sala a baja y alta frecuencia.

Se habla de una sala cálida cuando ésta presenta una buena respuesta a frecuencias graves. Normalmente, como medida objetiva de la calidez se utiliza la relación entre la suma de los RT a frecuencias bajas y la suma de los RT a frecuencias medias, tal y como se indica en la expresión (5).

$$BR = \frac{RT(125 \text{ Hz}) + RT(250 \text{ Hz})}{RT(500 \text{ Hz}) + RT(1 \text{ kHz})} \quad (5)$$

El valor de BR para teatro puede estar entre 0,9 y 1,3 ambos incluidos; para música se recomienda que esté entre 1,1 y 1,35 ambos incluidos.

Por otro lado, se dice que el sonido de una sala es brillante si presenta buena respuesta en alta frecuencia. El brillo de una sala depende fundamentalmente de la relación entre la suma de los RT a frecuencias altas y la suma de los RT a frecuencias medias, tal y como se indica en la expresión (6).

$$Br = \frac{RT(2 \text{ kHz}) + RT(4 \text{ kHz})}{RT(500 \text{ Hz}) + RT(1 \text{ kHz})} \quad (6)$$

Este parámetro tiene que ser lo más alto posible, siendo su máximo 1. Es prácticamente imposible alcanzar tal valor debido a la absorción del aire, por lo que se recomienda que al menos sea igual o superior a 0,8 [13].

#### 4.10. Claridad de la voz ( $C_{50}$ ) y claridad musical ( $C_{80}$ )

$C_{50}$  indica la inteligibilidad de la palabra y la música cantada. El parámetro se define como la relación entre la energía sonora que recibe el oyente durante los primeros 50 ms (incluyendo en ese tiempo la llegada también del sonido directo y las primeras reflexiones). Cuanto más grande sea el valor de  $C_{50}$  mayor es la inteligibilidad y sonoridad en el punto de medida.

$C_{80}$  permite valorar el grado de separación apreciable entre sonidos diferentes de una composición musical por parte del oyente en un determinado lugar de la sala, la claridad musical. Definición y cálculo son semejantes al caso de  $C_{50}$ , con la diferencia de que el límite temporal pasa de ser 50 ms a ser 80 ms.

La expresión (7) muestra la fórmula para la obtención de ambos parámetros, siendo  $t_e$  el tiempo límite (50 ms u 80 ms) en función de cuál de los dos parámetros se pretenda hallar.

$$C_{t_e} = 10 \log \frac{\int_0^{0,050} p^2(t) dt}{\int_{t_e}^{\infty} p^2(t) dt} \quad dB \quad (7)$$

Ambos parámetros se calculan para las bandas de frecuencia desde 125 Hz hasta 4 kHz. Además, cabe mencionar que estos dos parámetros varían con el tiempo de reverberación, disminuyendo a medida que el RT aumenta.

Como valores recomendados de  $C_{50}$ , se recomienda que sea mayor que 2 dB para salas en las que se represente teatro. En el caso de  $C_{80}$ , para sala de conciertos debe estar entre -2 y 4 dB ambos incluidos.

#### 4.11. Definición ( $D_{50}$ )

La definición (del alemán *Deutlichkeit*),  $D_{50}$ , es la relación entre la energía que recibe el oyente en los primeros 50 ms (incluyendo en ese tiempo la llegada también del sonido directo y las primeras reflexiones) y la energía total que le llega al mismo. En la fórmula (8) está expresada dicha relación.

$$D_{50} = \frac{\text{Energía hasta 50 ms}}{\text{Energía total}} = \frac{\int_0^{0,050} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (8)$$

La inteligibilidad de la palabra y la sonoridad serán mejores cuanto mayor sea el valor de la definición (para una sala ocupada en cada banda de frecuencia debe ser mayor que 0,5). Además,  $D_{50}$  y  $C_{50}$  están relacionados mediante la expresión (9), por lo que si se conoce  $C_{50}$  en una determinada banda de frecuencia se puede obtener de manera inmediata  $D_{50}$  y viceversa [13].

$$D_{50} = \frac{1}{1 + 10^{-\frac{C_{50}}{10}}} \quad (9)$$

#### 4.12. Fuerza sonora ( $G$ )

La fuerza sonora,  $G$ , se trata de la diferencia entre el nivel de presión sonora producido por una fuente omnidireccional en un determinado punto de la sala ( $L_{pE}$ ), y el nivel de presión sonora, producido por la misma fuente, medido a 10 m estando situada ésta en campo libre. La expresión (10) se aplica para su cálculo.

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} = L_{pE} - L_{pE,10} \quad dB \quad (10)$$

Este parámetro indica el grado de amplificación producido por la sala, el cual depende de la distancia entre oyente y escenario, la energía asociada a las reflexiones tempranas, el nivel de campo reverberante y el estado de ocupación del recinto.

Si se utiliza una fuente sonora cuyo nivel de potencia acústica es conocido, la fuerza sonora se puede obtener empleando la fórmula (11), en la que  $L_p$  es el nivel de presión acústica medido en cada punto de medición y  $L_w$  es el nivel de potencia acústica de la fuente [12].

$$G = L_p - L_w + 31 \text{ dB} \quad (11)$$

En cuanto a valores concretos de  $G$ , Beranek recomienda un valor de  $G$  (promedio de las bandas de 500 Hz y 1kHz,  $G_{mid}$ ) para sala vacía de entre 4,0 y 5,5 dB, ambos incluidos [13].

#### 4.13. Eficiencia lateral (LF)

Este parámetro, LF (*Lateral energy Fraction*), se define como la relación entre la energía que llega lateralmente al oyente en los primeros 80 ms desde que llega el sonido directo (excluyendo a éste) y la

energía recibida por el oyente en todas direcciones en el mismo intervalo de tiempo. Normalmente, se emplea el valor medio de los LF de las bandas de octava de 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz y 1 kHz, y se denomina  $LF_{E4}$ . Se ha de cumplir que el  $LF_{E4}$  de la sala sea mayor o igual a 0,19. Además, cuanto mayor sea este valor, mayor grado de espacialidad del sonido se tendrá [13].

#### 4.14. Índice de transmisión del habla (STI)

El STI (*Speech Transmission Index*) es un parámetro que cuantifica el grado de inteligibilidad de la palabra en una escala de 0 (inteligibilidad nula) a 1 (inteligibilidad óptima). La obtención del STI se basa en la reducción de los distintos índices de modulación “m” del habla en relación con la reverberación y ruido de fondo de la sala en cuestión.

El cálculo se trata de un proceso complejo. La expresión correspondiente a la reducción del índice “m” se denomina función de transferencia de modulación, MTF (*Modulation Transfer Function*),  $m(F_0, F_m)$ . Para obtener las MTF se emplean 14 frecuencias de modulación  $F_m$ , y cada una produce un efecto de modulación sobre 7 bandas de octava  $F_0$  (de 125 Hz a 8 kHz). En total resultan 98 valores de  $m(F_0, F_m)$ ,  $14 \times 7 = 98$ . Sin entrar en las fórmulas empleadas (pues no es objetivo de este proyecto adentrarse en los parámetros acústicos) se convierten los índices a relaciones señal/ruido aparentes  $(S/N)_{ap}$ , quedando los 98 valores hallados truncados entre -15 y 15 dB. Acto seguido, para cada banda de octava se calcula el promedio de las 14 relaciones señal/ruido anteriores  $\overline{(S/N)_{ap}}(F_0)$ . Como penúltimo paso se obtiene la relación señal/ruido aparente promedio global  $\overline{(S/N)_{ap}}$  (cada banda de octava tiene una ponderación, en función de su contribución a la inteligibilidad). Finalmente, el valor del STI se calcula mediante la expresión (12) [13].

$$STI = \frac{\overline{(S/N)_{ap}} + 15}{30} \quad (12)$$

La calidad de la inteligibilidad resultante del STI se clasifica según lo indicado en la norma UNE-EN IEC 60268-16:2020 [15] (tabla 1).

Tabla 1. Valoración de la inteligibilidad del habla para una sala en función del valor del STI [15].

STI	Valoración
0,00 - 0,30	Mala
0,30 - 0,45	Pobre
0,45 - 0,60	Aceptable
0,60 - 0,75	Buena
0,75 - 1,00	Excelente

#### 4.15. %ALCons (Percentage Articulation Loss of Consonants)

%ALCons, en español Porcentaje de Pérdida de Articulación de Consonantes, nace derivado de experimentos (que llevó a cabo el investigador holandés Peutz) que pretendían determinar el porcentaje de consonantes no entendidas bien por los oyentes (respecto al número total de consonantes emitidas)

en un determinado recinto con ruido de fondo y reverberación. Sirviéndose de la teoría estadística, Peutz dedujo que la obtención de %ALCons en un punto de una sala se podía determinar conociendo el RT y la diferencia entre nivel de presión sonora directo y reverberante ( $L_D - L_R$ ) [13]. La figura 16 muestra la gráfica de obtención del %ALCons conociendo los valores comentados. De dicha figura se deduce que cuanto mayor sea el nivel reverberante respecto al directo, peor será la inteligibilidad.

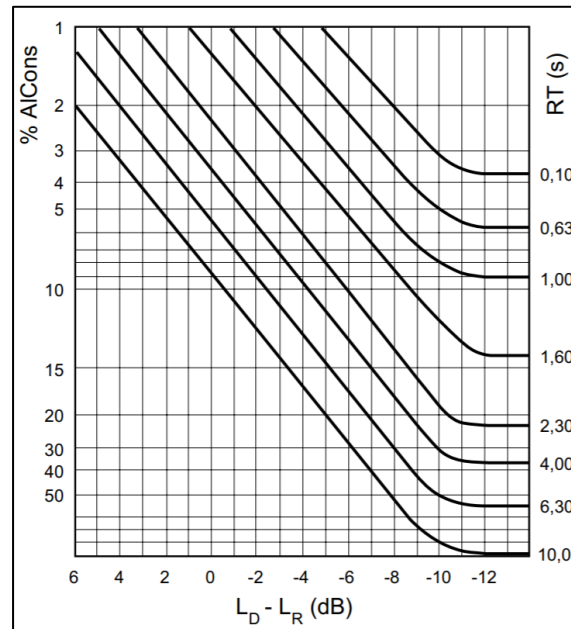


Figura 16. Obtención del %ALCons a partir de RT y de  $L_D - L_R$  [13].

En la tabla 2 se muestra cómo valorar la inteligibilidad de la palabra en función del valor obtenido para el %ALCons. Habitualmente, el cálculo de este parámetro se efectúa para la banda de 2 kHz, ya que se trata de la banda de máxima contribución a la inteligibilidad de la palabra.

Tabla 2. Valoración de la inteligibilidad del habla para una sala en función del valor del %ALCons [13].

%ALCons	Valoración
0,0 - 1,4	Excelente
1,6 - 4,8	Buena
5,3 - 11,4	Aceptable
12,0 - 24,2	Pobre
27,0 - 46,5	Mala

#### 4.16. JND (Just Noticeable Difference)

Este parámetro es un estimador que hace referencia a la mínima variación que es capaz de detectar y distinguir el oído humano entre dos estímulos diferentes. Este umbral subjetivo se emplea para cuantificar la precisión acústica de la simulación (las diferencias se extraen entre las mediciones *in situ* y los resultados simulados). Existen unos determinados valores de JND en función del parámetro

acústico que se trate, los cuales se especifican en la UNE-EN ISO 3382-1 [12]. En la figura 17 se incluye el extracto de la tabla A.1 de la norma anterior.

Tabla A.1 – Magnitudes acústicas agrupadas según los aspectos del oyente				
Aspecto subjetivo del oyente	Magnitud acústica	Promediado en frecuencia de número único <sup>a</sup> Hz	Umbral diferencial ( <i>Just noticeable difference, JND</i> )	Rango típico <sup>b</sup>
Nivel sonoro subjetivo	Fuerza sonora, $G$ , en decibelios	500 a 1 000	1 dB	-2 dB; +10 dB
Reverberación percibida	Tiempo de reverberación inicial ( <i>Early decay time, EDT</i> ) en segundos	500 a 1 000	Rel. 5 %	1,0 s; 3,0 s
Claridad del sonido percibida	Claridad, $C_{80}$ , en decibelios	500 a 1 000	1 dB	-5 dB; +5 dB
	Definición, $D_{50}$	500 a 1 000	0,05	0,3; 0,7
	Tiempo central, $T_s$ , en milisegundos	500 a 1 000	10 ms	60 ms; 260 ms
Ancho aparente de la fuente ( <i>Apparent source width, ASW</i> )	Fracción de energía lateral precoz, $J_{LF}$ o $J_{LFC}$	125 a 1 000	0,05	0,05; 0,35
Envolvente del oyente ( <i>Listener envelopment, LEV</i> )	Nivel sonoro lateral final, $L_f$ , en decibelios	125 a 1 000	Desconocido	-14 dB; +1 dB
<sup>a</sup> El promediado en frecuencia de número único indica la media aritmética para las bandas de octava, excepto para $L_f$ , que se debe promediar energéticamente [véase la ecuación (A.17)]. <sup>b</sup> Valores promediados en frecuencia en posiciones únicas en salas de conciertos y en salas polivalentes vacías hasta 25 000 m <sup>3</sup> .				

Figura 17. Valores de JND para diferentes magnitudes acústicas (extracto de la UNE-EN ISO 3382-1) [12].

Si la diferencia entre la medida *in situ* de un determinado parámetro y el valor del mismo parámetro simulado se encuentra por debajo de ese umbral (1 JND) la simulación se considera excelente. Si esa diferencia se encuentra entre una y dos veces el JND, entonces la simulación se toma como buena [16].

#### 4.17. Auralización

Se trata de un proceso con el cual se hace posible realizar una escucha de forma virtual, en cualquier punto de un recinto, de una señal de voz o musical. Una vez se tiene un modelo acústico virtual ajustado, se puede escuchar mediante el uso de altavoces o auriculares, preferiblemente, la sensación que provoca el diseño creado o las modificaciones de una determinada sala.

Para generar una auralización baural<sup>3</sup> el punto de partida es una señal de excitación con información para ambos oídos (estéreo) grabada en cámara anecoica<sup>4</sup>. Tal señal viaja a través de un sistema que

<sup>3</sup> El término baural hace referencia a la escucha que realiza a través de los dos oídos simultáneamente.

<sup>4</sup> Una cámara anecoica es una sala diseñada para absorber la totalidad de las reflexiones producidas por las ondas sonoras en todas sus superficies.

genera la salida binaural simulada, que posee dos componentes, una para el oído izquierdo ( $Y_L$ ) y otra para el derecho ( $Y_R$ ).

El proceso que realiza dicho sistema tiene dos partes: la primera considera la influencia del recinto, y está representada por la respuesta al impulso de la sala, BRIR (*Binaural Room Impulse Response*), que se calcula utilizando el modelo acústico virtual de la misma. La otra parte considera al individuo, y se representa mediante las funciones de transferencia asociadas a la cabeza, HRTF (*Head Related Transfer Functions*), Éstas permiten simular la influencia del torso y la cabeza del oyente en la escucha, teniendo en cuenta el modelo de percepción binaural humano. La señal de excitación se convoluciona con las respuestas al impulso anteriores para obtener la salida para cada oído. En la figura 18 queda ilustrado el proceso.

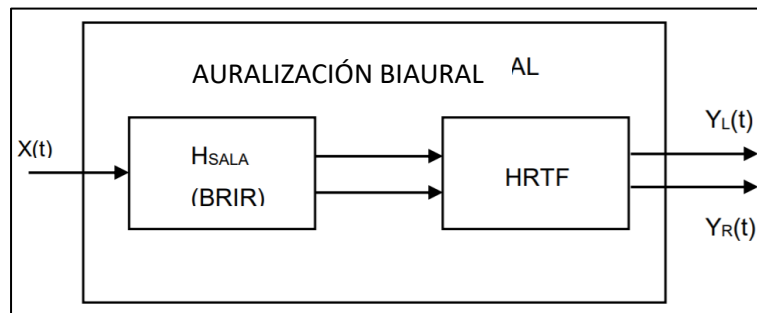


Figura 18. Diagrama de bloques del proceso de auralización [16].

## 5. Descripción del desarrollo del proyecto

Este cuarto apartado de la memoria está dedicado a mostrar una visión global del proceso a seguir durante este proyecto, presentando, a continuación, una breve explicación sobre las diferentes fases que conforman el desarrollo del mismo.

El proyecto se divide en dos partes diferenciadas: la primera se trata de generar el modelo acústico virtual del Teatro Auditorio Buero Vallejo de Guadalajara (TABV), mientras que la segunda se basa en emplear la herramienta que supone dicho modelo para obtener resultados sobre la acústica de la sala y diseñar una concha acústica comprobando su funcionamiento.

### 5.1. Fases para generar el modelo acústico virtual

A grandes rasgos, el proceso para crear el modelo acústico virtual se divide en diferentes fases, que se comentan a continuación: la base del proyecto es la construcción de un modelo geométrico en tres dimensiones de la sala que se pretende estudiar mediante un software de diseño 3D (SketchUp). Una vez se cuenta con dicho modelo geométrico, se pasa a trabajar con él en el software de modelado acústico (ODEON). Lo primero que hay que realizar dentro del software es el ajuste del modelo, escogiendo los materiales de las superficies de la sala. Para poder comprobar si las características acústicas del modelo simulado son semejantes a las del recinto real, se ha de haber tomado una serie de mediciones acústicas *in situ*, que permitan comparar los resultados virtuales con los reales. Finalmente, tras las modificaciones pertinentes, el modelo queda ajustado, y ya se dispone del modelo acústico virtual.

### 5.2. Fases de empleo del modelo acústico virtual

Con la herramienta de simulación lista, se puede comenzar a trabajar en la siguiente etapa del proyecto, en la que se llevan a cabo diferentes tareas: la primera, es analizar diferentes parámetros acústicos de la sala y comprobar la calidad acústica de la misma, ya que los resultados que se obtengan del modelo generado reflejan el comportamiento que tendría el recinto en la realidad. Además, se va a analizar la inteligibilidad de la sala teniendo en cuenta también el funcionamiento del sistema electroacústico del teatro. Por otra parte, se propone el diseño de una concha acústica para el teatro, y, por último, se llevan a cabo auralizaciones, para poder percibir la sensación de escucha en diferentes situaciones en el recinto.

Finalmente, se presentan los resultados, tanto de la calidad acústica de la sala como de las auralizaciones realizadas y del diseño de la concha acústica y su funcionamiento.



## 6. Características básicas del Teatro Auditorio Buero Vallejo

El recinto sobre el que se desarrolla este proyecto se trata de un teatro y auditorio público en la ciudad de Guadalajara (España). Con un estilo arquitectónico contemporáneo, fue construido durante el periodo de tiempo comprendido entre los años 1998 y 2002, y su inauguración tuvo lugar el 20 de diciembre de 2002.

El edificio en sí posee un pequeño salón de actos, una sala polivalente para exposiciones y otros actos y la sala principal, la cual se simula virtualmente y es analizada en esta memoria. En la mayoría de las ocasiones se va a hablar de teatro haciendo referencia a la sala principal, simplemente por una cuestión de agilidad en la lectura.

### 6.1. Funcionalidad del teatro

En cuanto a su funcionalidad, la sala principal del teatro acoge diferente tipo de actividades, como son representaciones teatrales, eventos musicales, actos institucionales, conferencias, etc.

### 6.2. Aforo y dimensiones

El teatro posee un aforo de 1003 butacas, distribuyéndose 634 en la platea y 369 en el anfiteatro. La superficie con la que cuenta es aproximadamente de 1386 m<sup>2</sup>, de los cuales 465 m<sup>2</sup> pertenecen al escenario, y el volumen de la sala se encuentra en torno a 13700 m<sup>3</sup>. También posee un foso de orquesta de 19 m de ancho y 4,60 m de fondo [17].

### 6.3. Materiales y forma de la sala

La sala presenta una homogeneidad de materiales notable, puesto que tanto las paredes y otras superficies laterales como el techo poseen el mismo tipo de material (a excepción de la caja escénica). Las paredes del fondo y de separación entre platea y anfiteatro presentan una estructura difractante formada por listones de madera. El suelo es del mismo material en todas las secciones (a excepción de la caja escénica de nuevo). Las butacas están tapizadas en asiento y respaldo, y el resto de las partes son de madera. Además, no existen ventanas (sólo hay vanos debidos a las cabinas de control de platea y anfiteatro) ni elementos destinados a la ornamentación (años después de la apertura del teatro se incluyeron cortinas en las paredes y moqueta en algunas zonas del suelo, pero con una función más bien acústica que decorativa). A modo de breve descripción de los materiales principales (consultados en el estudio acústico del teatro realizado por H. Arau [18]), se incluye la siguiente lista:

- Suelo de la zona de audiencia → madera de densidad tipo roble y secciones con moqueta
- Paredes de la zona de audiencia → madera contrachapada
- Petos de platea y anfiteatro → madera contrachapada
- Foso de músicos → madera contrachapada
- Techo → madera contrachapada
- Cortinas → terciopelo color verde
- Suelo del escenario → madera de pino

- Paredes laterales y de fondo del escenario → bloques de hormigón

Respecto a la forma del recinto, el diseño de las superficies laterales de la sala está pensado para que no existan grandes superficies paralelas entre sí, lo que favorece la acústica del recinto. Concretamente se disponen un conjunto de planchas de madera contrachapada escalonadas, describiendo una curva desde la boca del escenario hasta el final de la sala, mejorando la dispersión del sonido. Además, el techo está diseñado con una forma que se puede asemejar al “casco de un barco invertido”, lo que provoca que la parte más alta del mismo se encuentre aproximadamente en la mitad de la zona de audiencia, entre el fin de la platea y el inicio del anfiteatro. Cabe mencionar, en relación a la caja escénica, existe un entramado metálico (estructura que cubre mecanismos de telones y bambalinas) en una de las paredes.

En las figuras 19, 20, y 21, que se presentan a continuación, se muestra el teatro a través de diferentes fotografías, las cuales fueron tomadas en la visita realizada a la infraestructura para efectuar mediciones acústicas. En ellas se pueden apreciar algunas de las características y partes comentadas a lo largo de este quinto apartado, así como los materiales de la zona de audiencia y la caja escénica.



*Figura 19. Vista del teatro desde el anfiteatro*



*Figura 20. Vista del teatro desde el escenario*



*Figura 21. Vista panorámica de la caja escénica del teatro*



## 7. Mediciones *in situ*

A lo largo de este apartado se detalla el proceso de toma de medidas en el Teatro Auditorio Buero Vallejo, que tuvo lugar el 17 de febrero de 2021. Como se ha comentado en secciones anteriores, las mediciones *in situ* son necesarias para ajustar el modelo virtual, comparando entre parámetros extraídos de la simulación y parámetros extraídos de las mediciones reales. Concretamente, se mide la respuesta al impulso en diferentes puntos distribuidos por la sala, siguiendo lo establecido en la norma UNE-EN ISO 3382-1 [12].

### 7.1. Equipamiento

Para realizar medidas acústicas se necesita equipo hardware y software. A continuación, se presenta la instrumentación empleada y sus respectivos modelos.

- Software generador de señal → DIRAC Room Acoustic Software 6.0 [19]
- Interfaz de audio de emisión → tarjeta de sonido RMF Fireface UXF
- Etapa de potencia → amplificador de potencia Brüel & Kjær 2716C
- Fuente sonora → fuente omnidireccional Brüel & Kjær 4292-L
- Receptor acústico → micrófono DPA 4006A



Figura 22. Izq: fuente omnidireccional Brüel & Kjær 4292-L; dcha: micrófono DPA 4006A.

- Interfaz de audio de recepción → tarjeta de sonido RMF Fireface UXF
- Software de medida → DIRAC Room Acoustic Software 6.0
- Software de grabación → Reaper [20]

## 7.2. Posiciones de medida

Siguiendo lo que indica la UNE-EN ISO 3382-1 [12], se distribuyen las posiciones de micrófono y de fuente para llevar a cabo las medidas.

La norma establece que las posiciones de fuente deben ubicarse donde se situarían generalmente las fuentes sonoras naturales en el recinto, que deben emplearse al menos dos posiciones diferentes y que la altura del centro acústico de la fuente ha de ser 1,5 m sobre el nivel del suelo.

En cuanto a las posiciones de micrófono, la norma indica que se tienen que situar en lugares representativos de posiciones donde habitualmente se encuentren los oyentes en el recinto. Además, la distancia entre dichas posiciones debe ser de al menos 2 m, y de 1 m respecto a la superficie reflectante más cercana. La altura respecto al suelo conviene que sea de 1,2 m (altura del oído del oyente medio sentado).

Así pues, las posiciones de fuente utilizadas en el teatro han sido 3, colocadas en el escenario a 1,5 m de altura. Por otro lado, se han distribuido 32 posiciones de micrófono repartidas entre platea y anfiteatro (18 y 14 respectivamente), colocadas a una altura de 1,2 m del suelo. Además, para caracterizar y conocer la influencia de la caja escénica, se han ubicado otras 3 posiciones de micrófono en el escenario, éstas a la misma altura de la fuente, 1,5 m.

Para visualizar la distribución completa de todas las posiciones tanto de fuente como de micrófono, en las figuras 23 y 24 se añaden dos imágenes en planta, de las butacas del teatro y del escenario (posiciones de fuente en color rojo, posiciones de micrófono en color azul).

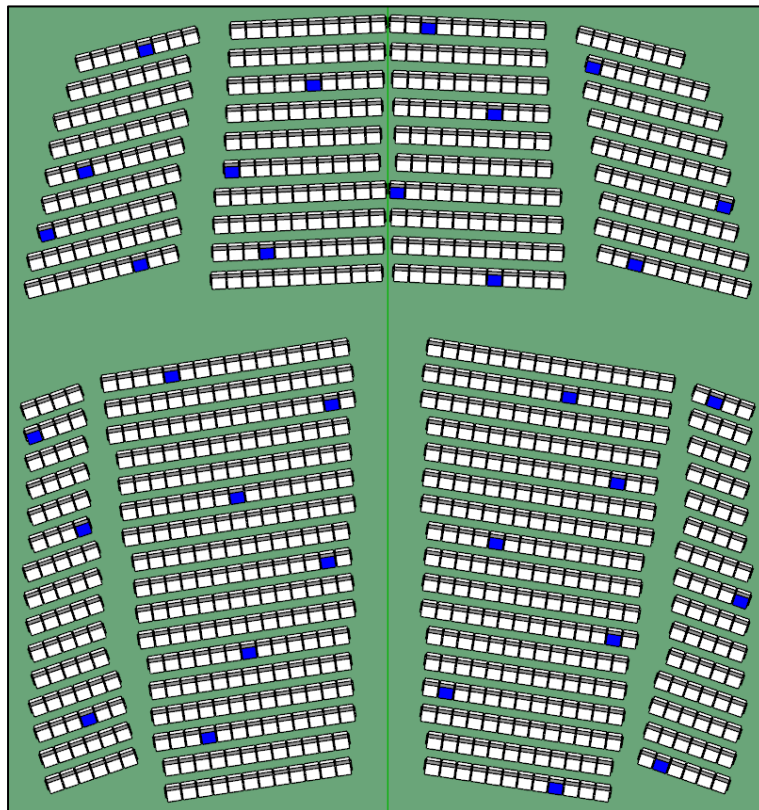


Figura 23. Posiciones de micrófono en la zona de audiencia (parte inferior platea, parte superior anfiteatro).

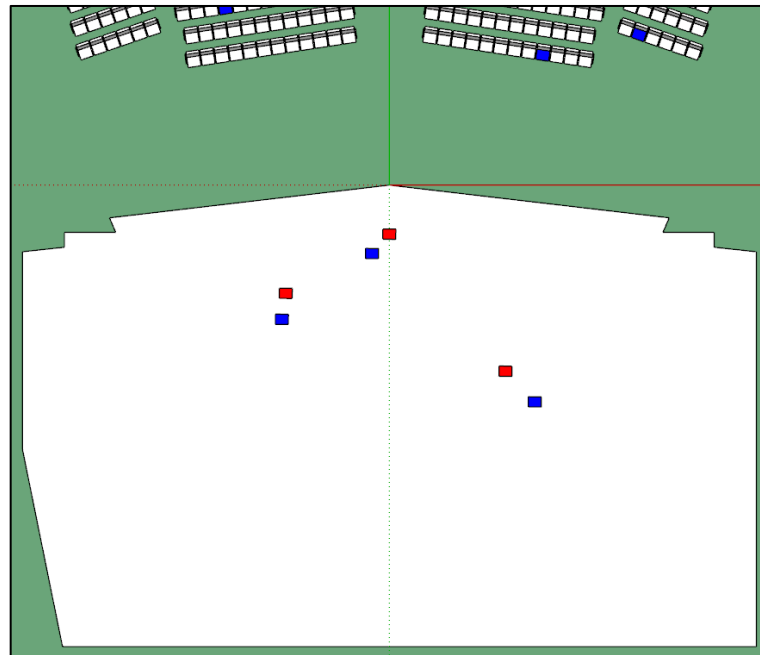


Figura 24. Posiciones de fuente y micrófono en el escenario.

### 7.3. Condiciones de medida

Respecto a las condiciones de medida, haciendo uso de un medidor de condiciones atmosféricas, en el interior del teatro la temperatura durante las mediciones fue de 16,2 °C, con una humedad relativa del 33 %.

En cuanto al estado de ocupación del teatro durante la medida, es de inocupación.

En referencia al estado de la caja escénica durante el proceso de medición, se ha de considerar que las bambalinas se encontraban desplegadas, y el telón abierto.

Sobre el estado de la zona de audiencia, las butacas se encontraban con el asiento elevado, y las cabinas de control de la platea contaban con estores opacos extendidos.

### 7.4. Procedimiento y método de medición

En la parte 1 de la ISO 3382, se describen dos métodos diferentes para efectuar las mediciones: el método del ruido interrumpido y el método de la respuesta al impulso integrada. Este último es el utilizado en este proyecto.

#### 7.4.1. Señal de excitación

Como señal de excitación se ha empleado un barrido sinusoidal que cubre las bandas de octava de 125 Hz a 8 kHz. En cada combinación fuente-micrófono se ha emitido un barrido exponencial de 3 s de duración (se efectúan tres promedios).

La fuente que excita el recinto debe producir un nivel de presión acústica de pico tal que: garantice el comienzo de la curva de decaimiento energético por encima de 35 dB del ruido de fondo, en la banda de frecuencia correspondiente, para obtener  $T_{20}$ . Para el caso de  $T_{30}$  se requieren 45 dB por encima del ruido de fondo. Para comprobar estos requisitos en cada banda de frecuencia, se ha calculado la relación respuesta al impulso a ruido, INR (*Impulse Response to Noise Ratio*), con el software Dirac 6.0, haciendo uso de las respuestas al impulso medidas en cada combinación fuente-micrófono. El resultado se presenta en tres tablas del Anexo I de este documento. Como se puede ver en esa tabla, para las bandas de frecuencia de 125 Hz a 8 kHz el valor de INR permite obtener  $T_{20}$  de modo preciso (la banda de 63 Hz no cumple con el criterio, por lo que no se pueden considerar como fiables los datos obtenidos en ella). Para el caso de  $T_{30}$ , no se puede asegurar lo mismo (observar banda de 1 kHz), por lo que no se van a hacer cálculos de dicho parámetro.

#### 7.4.2. Procedimiento de medición

Como se ha dicho ya, se excita la sala mediante barrido exponencial y se mide en todas las posiciones de micrófono para cada posición de fuente (todas las combinaciones fuente-micrófono).

La señal de excitación se genera con Dirac 6.0, que se envía al amplificador de potencia a través de la interfaz de audio de emisión. Tras la amplificación, la señal llega a la fuente omnidireccional y se emite. La señal captada por el micrófono se manda a la interfaz de audio de recepción, y desde ésta, la señal pasa al ordenador, donde se registra la medición en Dirac 6.0 y se graba la respuesta al impulso con Reaper. En la figura 25, se muestra el diagrama de bloques del sistema de medición, en el que las conexiones entre equipos se hacen por XLR.

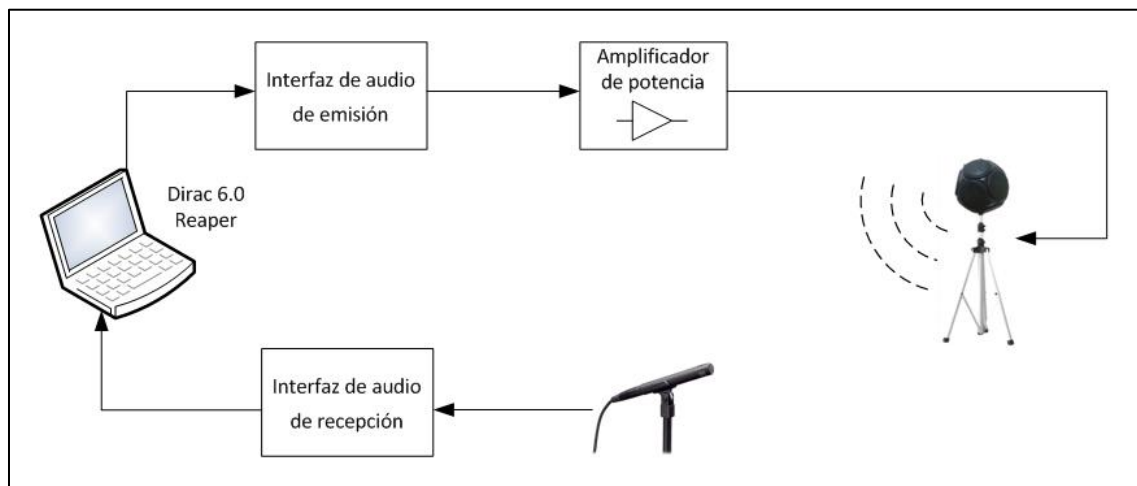


Figura 25. Diagrama de bloques del montaje para las mediciones en el teatro.

En total se tiene un conjunto de 105 respuestas al impulso, que proceden de las mediciones de cada posición de fuente con las 35 posiciones de micrófono (3 posiciones de fuentes x 35 posiciones de micrófono = 105 combinaciones).

Además de las respuestas al impulso, se ha medido el ruido de fondo durante veinte minutos, para poder tener los datos de nivel de ruido en cada banda de frecuencia y poder efectuar cálculos de inteligibilidad.

En cuanto a los resultados de parámetros acústicos obtenidos de las respuestas impulso medidas, en apartados venideros se presentan y se comentan.



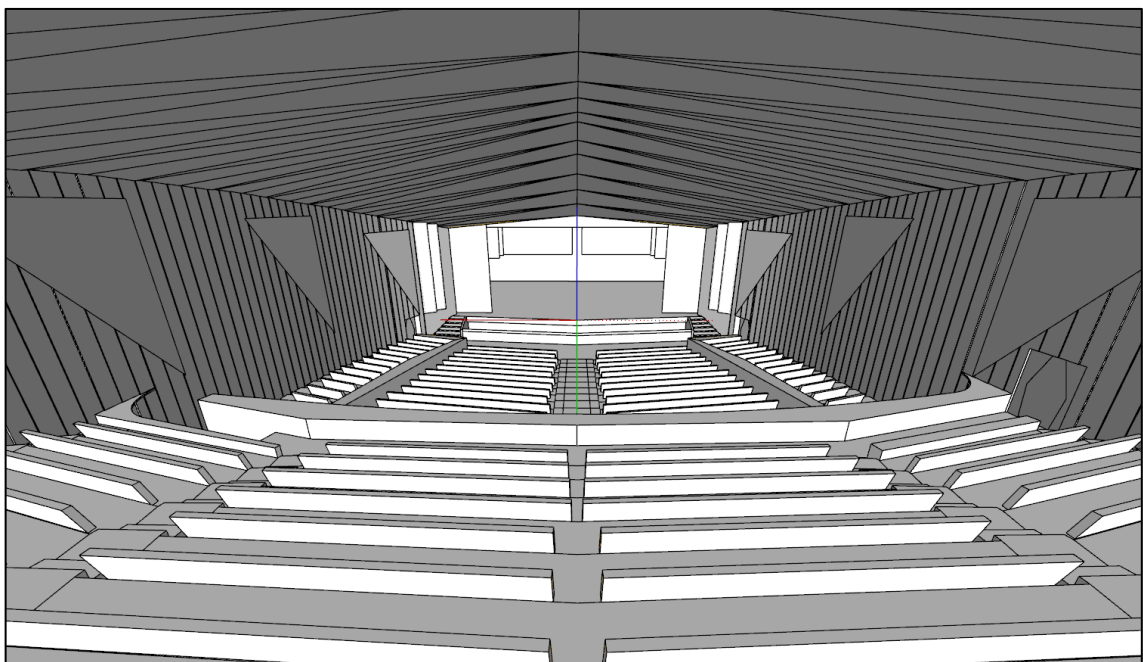
## 8. Modelo geométrico tridimensional

El modelo tridimensional del teatro se genera mediante el software de diseño 3D SketchUp [21]. Esta herramienta, de la empresa Trimble, está basada en caras, y entre sus características destaca su sencillez de uso, además de ser un software bastante intuitivo.

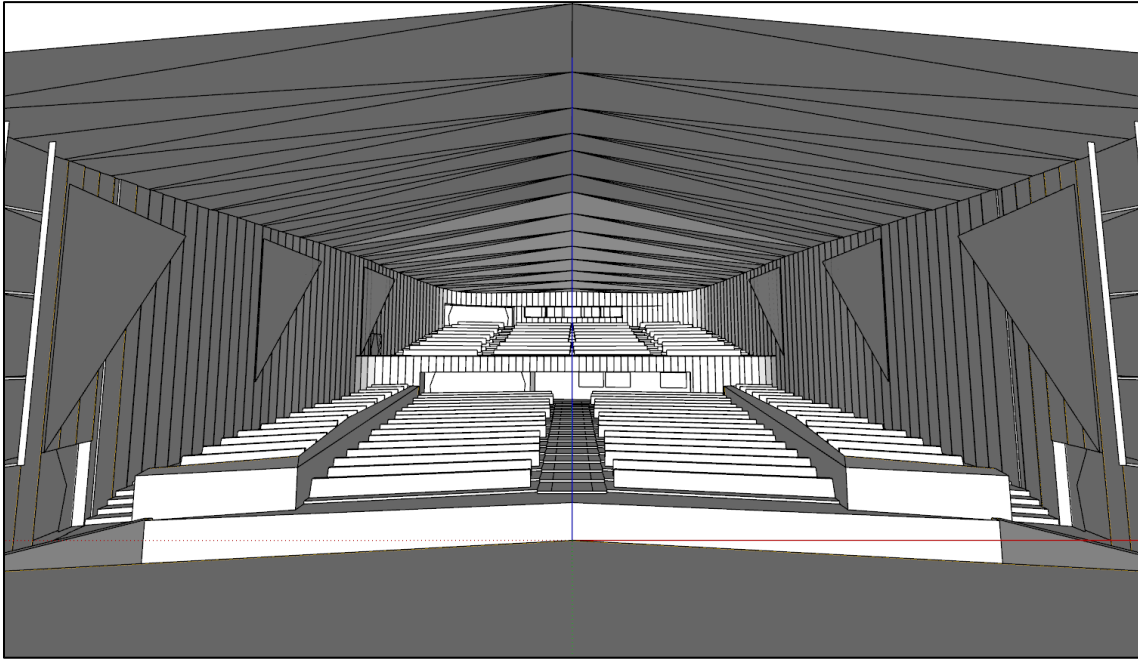
Para crear el modelo del recinto en cuestión se ha partido de los planos del proyecto de edificación del teatro, los cuales se han solicitado al archivo municipal del Ayuntamiento de Guadalajara. A modo de comprobación, el día de la visita al teatro para llevar a cabo las mediciones acústicas, se tomaron medidas de algunas dimensiones significativas. Mediante un metro láser y una cinta métrica se chequearon algunas cotas de los planos, confirmando que la información que proporcionaban era correcta. Además, algunas cotas que no estaban reflejadas en dichos documentos se midieron en el propio teatro, para tener todos los datos y construir de manera adecuada el modelo.

Con toda la información lista, lo primero que se hace es importar los planos de planta y perfil en formato DXF en SketchUp, para a partir de ellos comenzar a levantar el modelo geométrico (el formato original del documento de los planos es PDF, y se ha convertido a DXF mediante el software Inkscape). Durante el proceso de modelado en 3D se evita recrear los detalles que presentan las superficies del teatro, ya que acústicamente no son significativos (concretamente, los detalles que no han sido representados son los listones de madera que componen las estructuras difractantes del fondo del teatro y de la pared). Las butacas de platea y anfiteatro se han recreado como respaldos continuos. Por último, se ha de destacar que, para facilitar el trabajo posterior, las diferentes superficies se han organizado en diferentes capas o etiquetas, según su material.

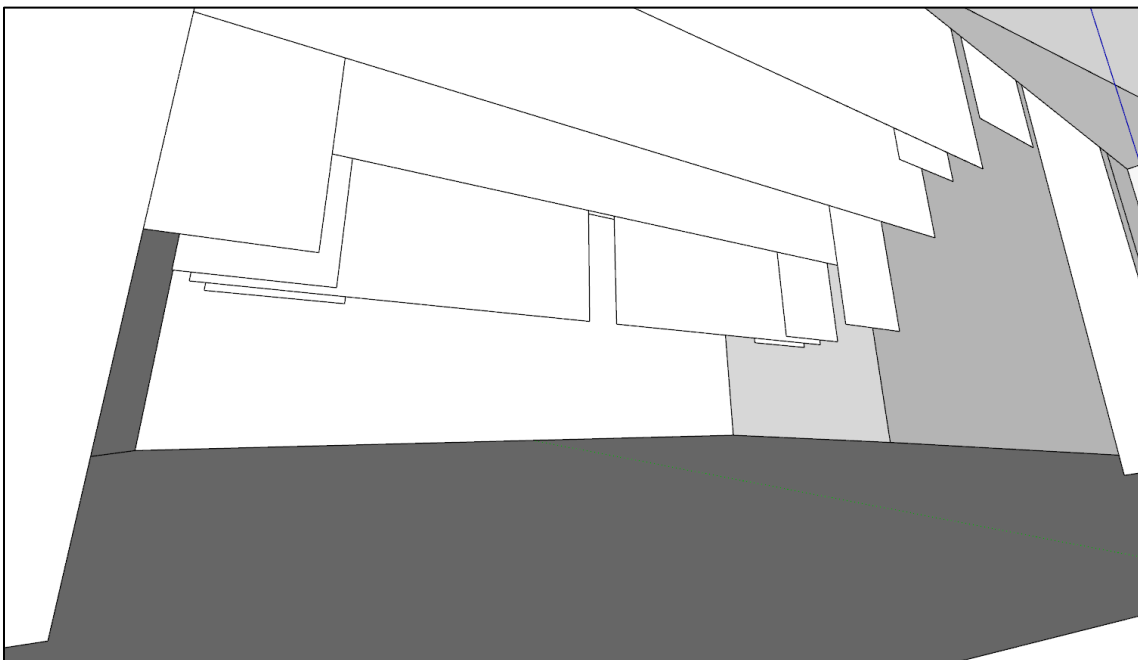
En las figuras 26, 27 y 28 se incluyen las vistas del teatro diseñado en SketchUp desde el anfiteatro, desde el escenario y la vista de la caja escénica respectivamente.



*Figura 26. Vista desde el anfiteatro del modelo 3D del teatro en SketchUp.*



*Figura 27. Vista desde el escenario del modelo 3D del teatro en SketchUp.*



*Figura 28. Vista de la caja escénica del modelo 3D del teatro en SketchUp.*

## 9. Modelo acústico virtual

Este epígrafe, clave en el proyecto, describe y desarrolla todo el proceso que se realiza en ODEON para conseguir hacer del modelo 3D de SketchUp un modelo acústico con el que se pueda trabajar y obtener resultados que simulen lo que ocurriría en el teatro real.

A modo de resumen del proceso, que se va a detallar en diferentes puntos, las tareas que se han de completar son las siguientes: el primer paso consiste en importar el modelo creado en SketchUp a ODEON, comprobando que no hay errores; después, hay que situar las posiciones de fuente y de micrófono que se utilizaron en la medición *in situ*; el tercer paso se trata de definir las mediciones a realizar dentro de ODEON, añadiendo las respuestas al impulso medidas *in situ* para poder comparar resultados; acto seguido, hay que asignar los materiales a todas las superficies del modelo, para ajustar el modelo virtual respecto a la sala real. Como penúltimo paso, hay que establecer la correcta configuración de cálculo en ODEON. Por último, a base de hallar parámetros acústicos e intentar que las diferencias sean las menores posibles (aplicando los cambios de materiales apropiados), finalmente se llega al modelo acústico virtual ajustado, con el que ya se pueden realizar las simulaciones de manera fiel a la realidad.

### 9.1. Importación del modelo de SketchUp a ODEON

Para importar el modelo tridimensional a ODEON, se utiliza un *plug-in* llamado SU2Odeon, que agiliza el proceso, abriendo el modelo directamente en el software de simulación y evitando ciertos errores que se pueden cometer al hacer una importación habitual. En la figura 29 muestra el aspecto del modelo recién importado en ODEON.

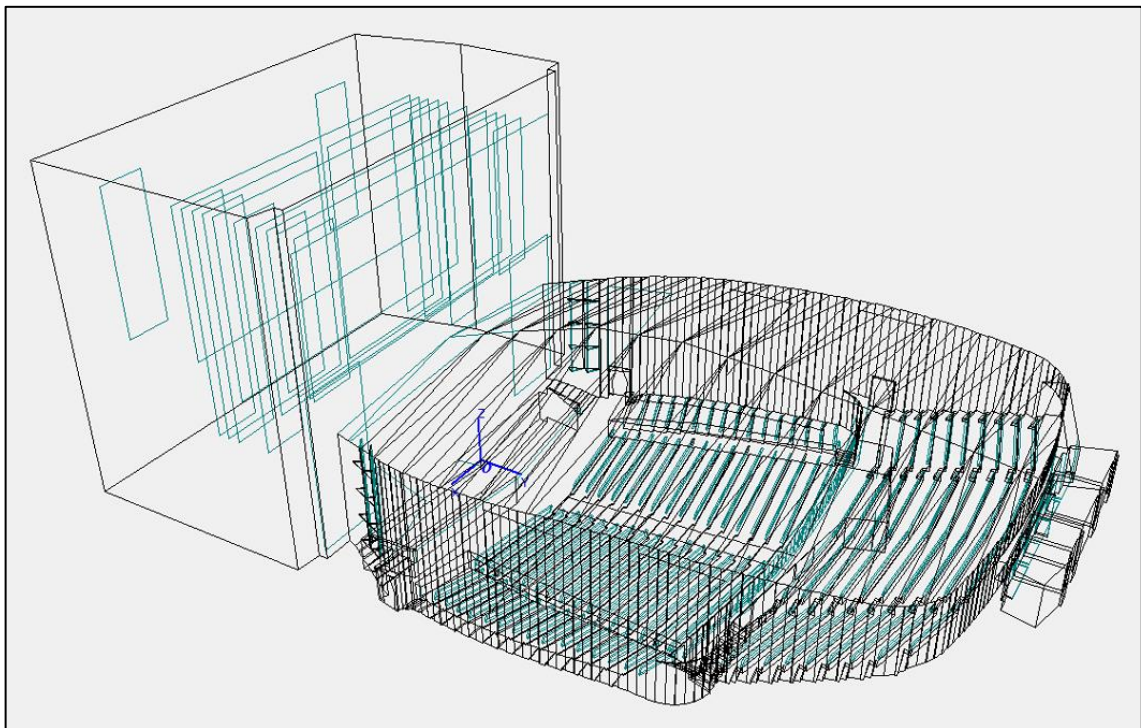


Figura 29. Modelo 3D de SketchUp importado a ODEON.

Una vez en ODEON, lo primero que se ha de comprobar es que la sala esté completamente cerrada, sin agujeros por los que pueda escapar el sonido. Para ello, es necesario saber que, al espacio abierto, ODEON le asigna el color negro en la visualización de los materiales de la sala (a los demás materiales les asigna otro color en función de la absorción). Teniendo esto en cuenta, la idea es aplicar un solo material a todas las superficies del recinto, de manera que todas cambien de color y así detectar un posible hueco mediante el color negro. En la figura 30 se ilustra la comprobación escogiendo un material de color morado y visualizando el modelo con la herramienta *3D OpenGL* de ODEON. Tras una búsqueda exhaustiva en el recinto, se corrobora que el modelo es un volumen cerrado.

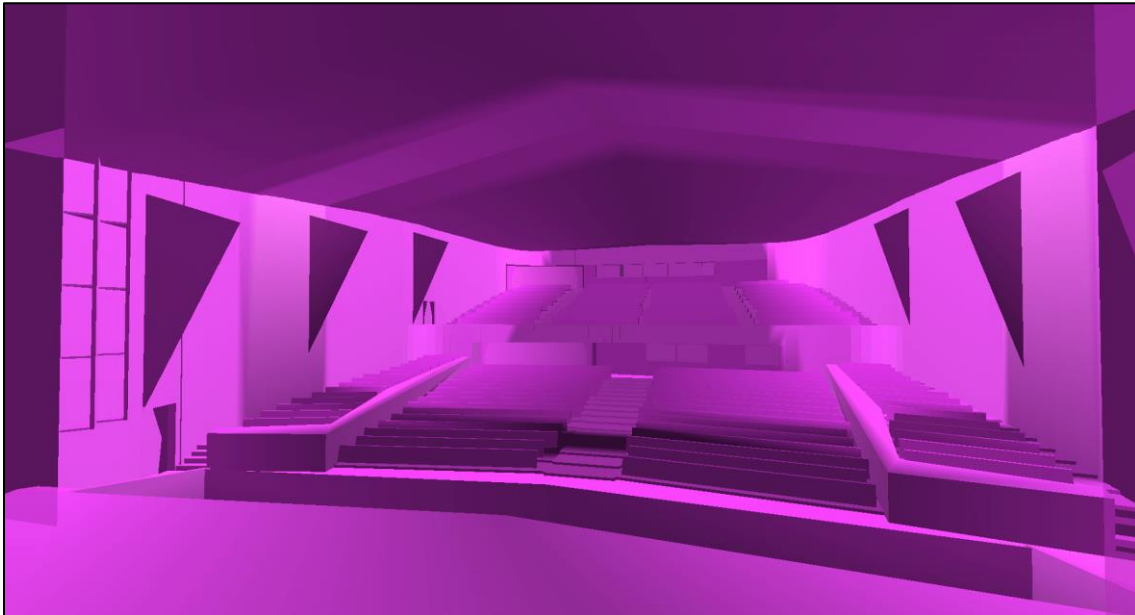


Figura 30. Comprobación de que el modelo es un volumen cerrado.

## 9.2. Definición de posiciones de fuente y micrófono en ODEON

Para definir las posiciones de fuente y de micrófono, se utiliza la pestaña *Source Receiver List* (lista de fuentes y receptores) del software. En ella se añaden las 3 posiciones de fuente, llamadas F1, F2 y F3, y las 35 posiciones de micrófono, denominadas M1, M2, M3, etc. Las posiciones de la M1 a la M18 se ubican en la platea, de la M19 a la M32 en el anfiteatro y las tres del escenario son la M35, M36 y M37. En la figura 31, los puntos rojos simbolizan las posiciones de fuente y los azules las de micrófono.

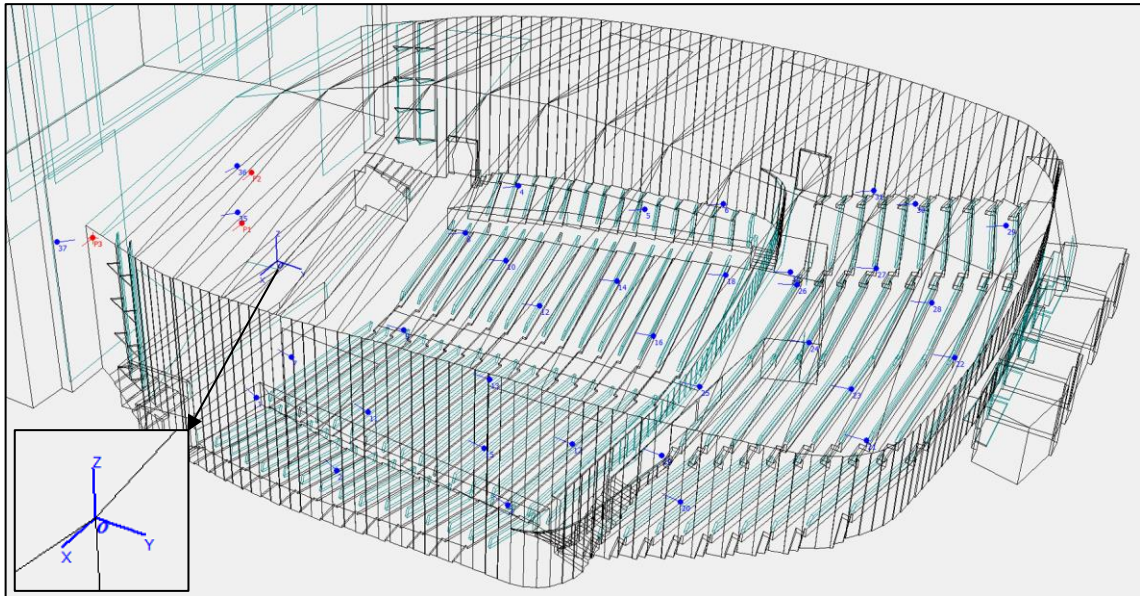


Figura 31. Posiciones de fuente (puntos de color rojo) y micrófono (puntos de color azul).

Además, en dicha figura se puede apreciar el eje de coordenadas de ODEON. El origen se encuentra en el pico del proscenio<sup>5</sup>, de modo que, respecto a ese punto, en la tabla 3 se incluyen las coordenadas de todas las posiciones, tanto de fuente como de micrófono definidas.

Por otro lado, en cuanto a las características de la fuente sonora (figura 32), como se trata de una fuente omnidireccional, al crear las tres posiciones de fuente se ha seleccionado la opción Omni.SO8, y se ha configurado una potencia de 31 dB en cada octava, con intención de obtener más tarde el parámetro G, que equivaldría al nivel de presión sonora, SPL (véase 4.12).

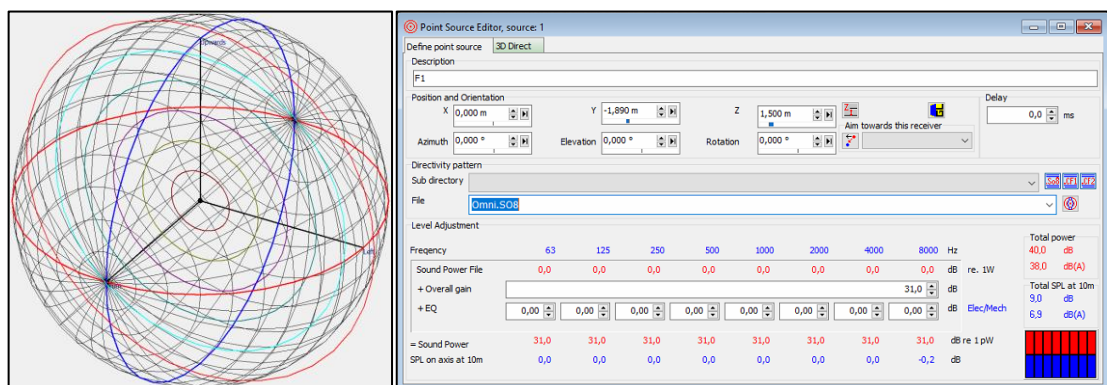


Figura 32. Fuente sonora omnidireccional en ODEON. Izq: directividad (1 kHz); dcha: configuración.

<sup>5</sup> El proscenio es la parte del escenario de un teatro que se encuentra más cerca del público.

Tabla 3. Coordenadas de los puntos de fuente y micrófono

Posición	Coordenadas (m)		
	Micrófono (M)	X	Y
1	9,560	5,604	1,200
2	12,376	11,402	1,200
3	11,461	18,422	1,200
4	-10,481	7,236	1,200
5	-10,657	13,933	1,200
6	-12,394	17,194	1,200
7	5,886	4,805	1,200
8	-6,284	6,592	1,200
9	2,017	8,164	1,200
10	-4,859	9,579	1,200
11	7,929	10,034	1,200
12	-2,074	12,770	1,200
13	3,785	13,434	1,200
14	-5,274	15,053	1,200
15	8,070	15,553	1,200
16	-1,942	18,330	1,200
17	6,373	18,585	1,200
18	-7,588	19,329	1,200
19	8,679	23,260	1,200
20	11,811	25,302	1,200
21	7,193	30,214	1,200
22	1,425	31,597	1,200
23	3,758	28,562	1,200
24	0,321	25,796	1,200
25	3,752	22,710	1,200
26	-4,251	23,661	1,200
27	-5,490	26,532	1,200
28	-2,608	29,592	1,200
29	-8,484	30,836	1,200
30	-10,613	26,540	1,200
31	-11,962	24,322	1,200
32	-4,422	23,260	1,200
35	-0,666	-2,635	1,500
36	-4,142	-5,165	1,500
37	5,608	-8,345	1,500
Fuente (F)	X	Y	Z relativa al suelo
1	0,000	-1,890	1,500
2	-3,992	-4,165	1,500
3	4,478	-7,165	1,500

### 9.3. Definición de mediciones en ODEON

En ODEON existe una sección llamada *Job List* (lista de trabajo), en la que se pueden realizar medidas de las combinaciones fuente-micrófono elegidas. Las dos opciones principales son obtener la respuesta de un receptor individual (*single point response*) u obtener la respuesta de varios receptores en conjunto (*multi point response*).

Para más tarde realizar el ajuste, se establecen tres trabajos en la lista. En cada uno de ellos está activa una de las fuentes, y se calculan respuestas múltiples de todos los receptores existentes, ya que mediante dicho cálculo se obtienen los parámetros promedio de todas las posiciones de micrófono. Como último paso se importan las respuestas al impulso medidas *in situ* para cada combinación de fuente-micrófono, lo que permite calcular parámetros acústicos con los que comparar los simulados.

#### 9.4. Asignación inicial de materiales

ODEON posee una pestaña de lista de materiales, en la que se permite asignar materiales, de la base de datos del propio software o de creación propia, a las diferentes superficies del modelo. Gracias a que las superficies en SketchUp se agruparon, según su material, en etiquetas, es posible asignar un material de manera global a cada conjunto de superficies definido.

Para esta primera asignación de materiales se toma como referencia el estudio acústico del teatro realizado por H. Arau [18], en el cual se incluyen los coeficientes de absorción de los materiales de la sala. Aquellos que no están reflejados en dicho estudio se han propuesto utilizando materiales de la base de datos de ODEON y materiales existentes en el mercado. En la tabla 4 aparecen los materiales aplicados a cada superficie con sus respectivos coeficientes de absorción para cada banda de octava. En amarillo se muestran los extraídos del estudio acústico y en verde los empleados de la base de datos de ODEON, el resto en azul.

Tabla 4. Asignación inicial de materiales en ODEON.

Superficie	Descripción	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
TECHO 1	Madera contrachapada	0,25	0,25	0,20	0,12	0,08	0,05	0,04	0,04
TECHO 2	Madera contrachapada	0,22	0,22	0,17	0,11	0,06	0,05	0,04	0,04
TECHO 3	Madera contrachapada	0,19	0,19	0,14	0,09	0,05	0,04	0,04	0,04
SUELO ESCENARIO	Madera de pino	0,15	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,04	0,04
SUELO AUDIENCIA	Madera densidad tipo roble	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
BUTACAS	Tapizado y madera	0,41	0,41	0,60	0,77	0,88	0,82	0,70	0,70
PAREDES	Madera contrachapada	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
ESTRUCTURA DIFRACTANTE	Madera contrachapada	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
CORTINAS	Terciopelo	0,15	0,15	0,35	0,55	0,73	0,70	0,65	0,65
TELÓN	Terciopelo	0,15	0,15	0,35	0,55	0,73	0,70	0,65	0,65
PAREDES ESCENARIO	Bloques de hormigón	0,10	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0,08
ALFOMBRA VERDE	Moqueta	0,09	0,09	0,08	0,21	0,26	0,27	0,37	0,37
ESTORES CABINAS CONTROL	Lona sintética	0,03	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35	0,35
BAMBALINAS	Cortina de tela	0,22	0,22	0,49	0,96	0,98	0,96	0,99	0,99
INTERIOR CABINAS CONTROL	Panel acústico perforado MDF	0,20	0,20	0,80	0,85	0,80	0,60	0,50	0,50

A continuación, en las figuras de la 33 a la 37, se especifican las distintas superficies de la tabla 4 de manera visual.

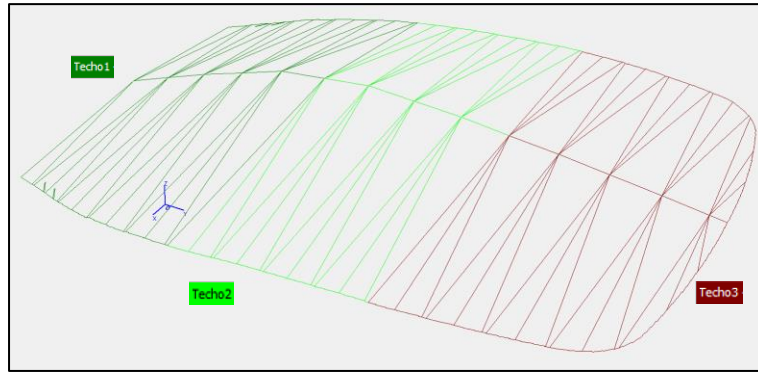


Figura 33. Superficies TECHO 1, TECHO 2 y TECHO 3.

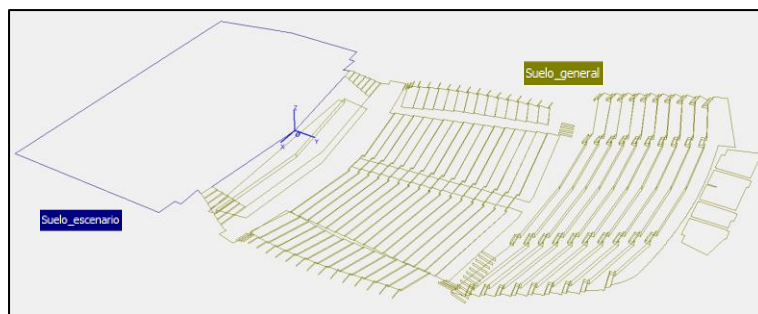


Figura 34. Superficies SUELO ESCENARIO Y SUELO AUDIENCIA.

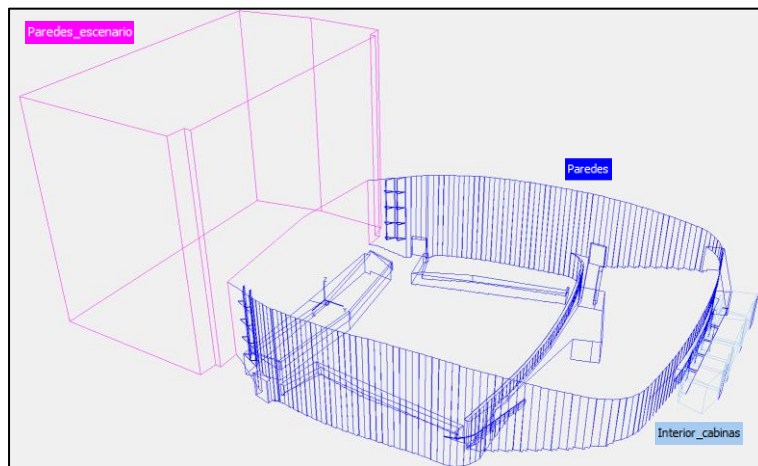


Figura 35. Superficies PAREDES, PAREDES ESCENARIO E INTERIOR CABINAS CONTROL.

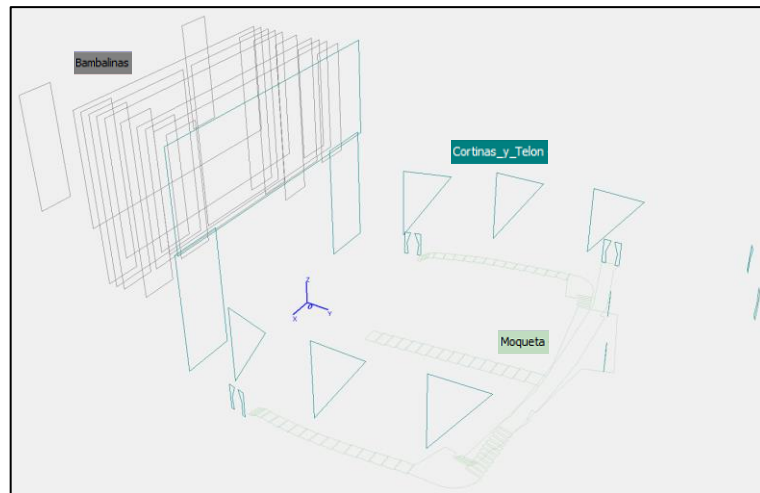


Figura 36. Superficies BAMBALINAS, CORTINAS, TELÓN y ALFOMBRA VERDE.

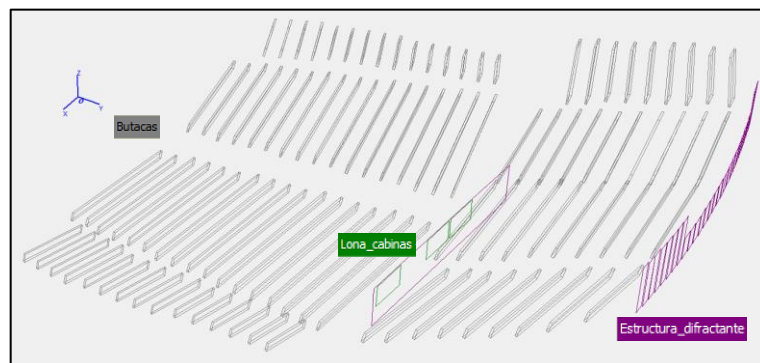


Figura 37. Superficies BUTACAS, ESTRUCTURA DIFRACTANTE y ESTORES CABINAS CONTROL

ODEON también permite asignar el coeficiente de dispersión (véase 4.5) de cada superficie en el modelo de manera individual. De hecho, ofrece una tabla de recomendaciones del valor del coeficiente de dispersión para diferentes tipos de superficies (figura 38). Esa tabla se ha tenido en cuenta para realizar la asignación en el modelo.

Material	Scattering coefficient at mid-frequency (707 Hz)
Audience area	0.6–0.7
Rough building structures, 0.3–0.5 m deep	0.4–0.5
Bookshelf, with some books	0.3
Brickwork with open joints	0.1–0.2
Brickwork, filled joints but not plastered	0.05–0.1
Smooth surfaces, general	0.02–0.05
Smooth painted concrete	0.005–0.02

Figura 38. Tabla extraída del manual de ODEON, con las sugerencias de coeficiente de dispersión a frecuencias medias en función del tipo de superficie [11].

Por defecto, todas las superficies del modelo cuentan con un  $s = 0,01$ , correspondiente a la categoría general de superficies lisas. La mayoría de las superficies se han mantenido con ese valor. Sin embargo, ha habido otras en las que se ha alterado el coeficiente para representar de manera más realista las irregularidades que presentan y que afectan a la reflexión de los rayos sonoros. Los cambios concretos se han realizado para simular el efecto de las estructuras difractantes, las butacas elevadas, el plegado de las cortinas y el telón, la estructura metálica en uno de los laterales de la caja escénica y los bloques de hormigón con los que están construidas las paredes de la caja escénica. En la figura 39 se incluye una fotografía de todas estas superficies concretas, y en la tabla 5 se indican los coeficientes de dispersión aplicados a cada una de ellas.

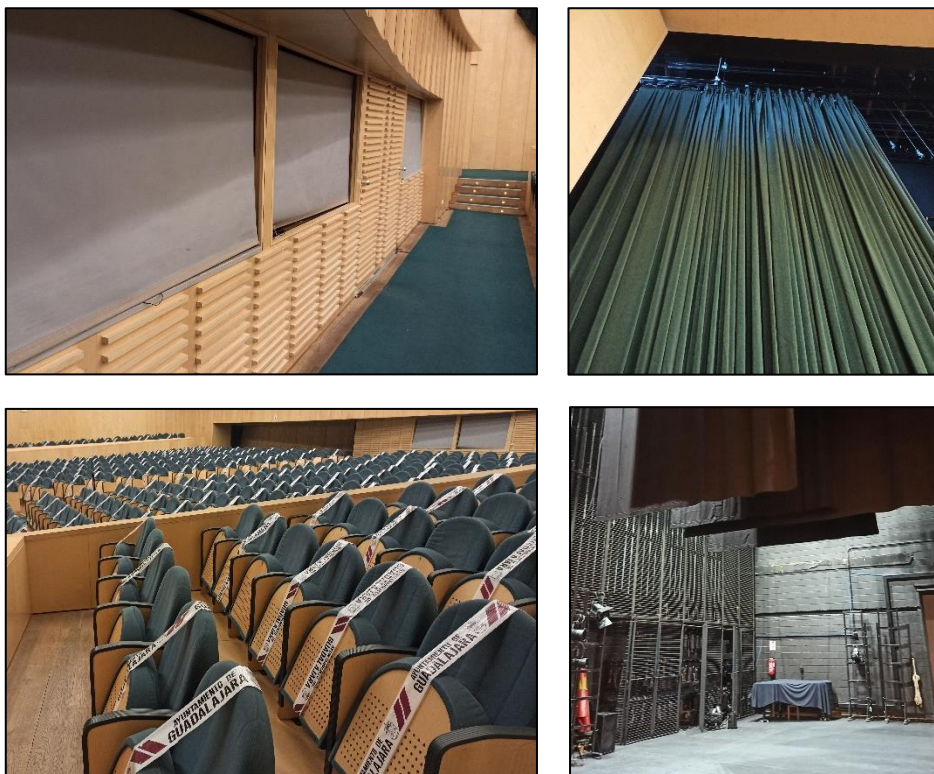


Figura 39. Superficies con coeficiente de dispersión alterado respecto al establecido por defecto. Sup.izq: estructura difractante; sup.dcha: telón; inf.izq: butacas elevadas; inf.dcha: estructura metálica y bloques de hormigón de la caja escénica.

Tabla 5. Coeficientes de dispersión aplicados a las superficies del modelo.

Tipo de superficie	Coefficiente de dispersión, s
Estructura difractante	0,300
Butacas	0,400
Cortinas y telón	0,400
Estructura metálica	0,450
Bloques de hormigón	0,075
Superficies restantes	0,010

Como última tarea a realizar en la asignación de materiales, hay que aplicar la transparencia adecuada a las superficies que lo requiera. El coeficiente de transparencia comprende valores de 0 a 1, siendo 1 la transparencia total. ODEON propone un coeficiente de transparencia de 0,5 para simulación de cortinas. En este proyecto, se emplea dicho valor para las cortinas, el telón y las bambalinas.

## 9.5. Configuración de cálculo de ODEON

Para poder efectuar cálculos acústicos con el modelo en ODEON es necesario establecer una determinada configuración con la que trabaje el software. Sin embargo, es fundamental conocer primero la manera de proceder de ODEON al realizar cálculos y así obtener una configuración adecuada y óptima.

### 9.5.1. Proceso de cálculo de ODEON

Como se ha comentado en el apartado 2 de este documento, ODEON obtiene respuestas al impulso haciendo uso de tres métodos: ISM (*Image Source Method*), ESM (*Early-Scattering Method*) y RRM (*Ray-Radiosity Method*).

ODEON está basado en acústica geométrica, y, por tanto, como ya se ha explicado, el sonido se trata en forma de rayos. A un determinado punto de medida llegan rayos directos, después las primeras reflexiones (reflexiones tempranas) y por último la cola reverberante (reflexiones tardías). Conforme se producen más reflexiones se pierde energía, por la absorción de los materiales y del aire.

Para distinguir la zona de primeras reflexiones de la zona de reflexiones tardías, es necesario utilizar un orden de transición. Si el orden de transición es 2, por ejemplo, significa que los rayos que se reflejen en más de dos superficies antes de llegar al punto de medida se consideran parte de la cola reverberante. Bien, pues para calcular las reflexiones tempranas (antes de alcanzar el orden de transmisión establecido) se utilizan los métodos ISM y ESM de forma combinada. Para el cálculo de reflexiones tardías, se emplea el método RRM.

A continuación, se describen de manera breve los tres métodos:

- ISM: en español se traduce como método de fuente imagen. Precisamente emplea el cálculo de fuentes imagen<sup>6</sup>, por lo que considera las reflexiones especulares de los rayos sonoros.
- ESM: en español llamado método de dispersión temprana, se encarga de las reflexiones difusas, teniendo en cuenta el valor del coeficiente de dispersión de las superficies en las que inciden los rayos.
- RRM: método de radiosidad de rayos, que mejora al habitual método de trazado de rayos. El proceso de cálculo se divide en dos partes: *rendering*, parte en la que sólo se almacena información geométrica y en la que no hay ninguna implicación de datos de materiales ni de la posición del receptor; y *gathering*, parte en la que el receptor recoge la información de los rayos que lo alcanzan y la incorpora al reflectograma.

---

<sup>6</sup> Una fuente imagen es el reflejo de una fuente sonora en un recinto respecto al muro en el que incide un rayo sonoro emitido por dicha fuente. Si se traza una línea desde la fuente imagen que pase por el punto de impacto del rayo en el muro, se obtiene la dirección de reflexión especular del rayo.

En la figura 40 se añade un extracto del manual de ODEON, que muestra un reflectograma esquemático, en el que se indica la separación de la zona de primeras reflexiones de la zona de reflexiones tardías mediante el orden de transición. El eje de abscisas representa el orden de la reflexión, y el eje de ordenadas la energía sonora. Además, se incluyen los métodos utilizados para calcular cada zona del reflectograma, aunque en realidad los tres métodos pueden superponerse en el tiempo, ya que el orden de transición puede afectar a las reflexiones en diferentes momentos.

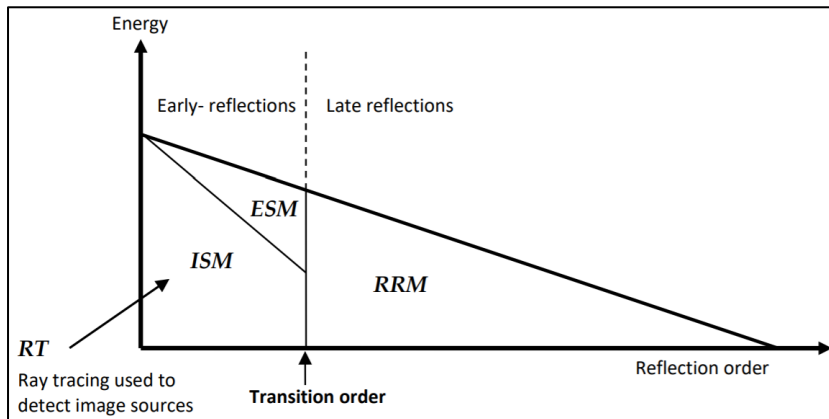


Figura 40. Métodos empleados por ODEON para el cálculo de reflexiones [11].

### 9.5.2. Ajuste de la configuración de cálculo de ODEON

La configuración fundamental consiste en indicar la longitud de la respuesta al impulso y el número de rayos tardíos utilizados en el cálculo. En cuanto a las primeras reflexiones, se establece el orden de transición y el número de rayos tempranos empleados.

La longitud de la respuesta al impulso se ha dispuesto en 3000 ms para que, con margen, supere al tiempo de reverberación estimado en todas las bandas de frecuencia, mostrado en la figura 41.

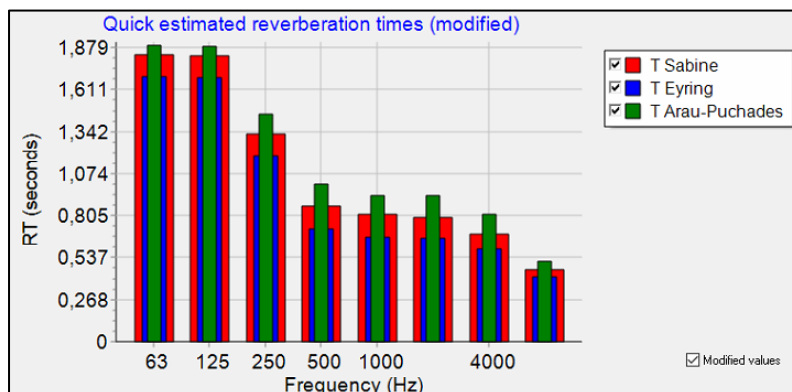


Figura 41. Herramienta de estimación rápida del tiempo de reverberación en ODEON.

Para establecer el número de rayos tardíos, el orden de transición y el número de rayos tempranos, se utiliza la herramienta *investigation of simulation parameters*, que permite realizar dos pruebas: testear el número de rayos tardíos y el orden de transición más adecuado en términos de menor error promedio medido en JND's, (véase 4.16) y testear el número de rayos tempranos y orden de transición óptimo también según el menor error promedio en JND's. Los resultados obtenidos con esta herramienta se presentan en las figuras 42 y 43. De ellos se extrae un resultado de compromiso, buscando el mínimo error para un número de rayos no excesivamente alto. Se decide escoger un número de rayos tardíos de 25000, un número de rayos tempranos de 20000 y un orden de transición de 2.

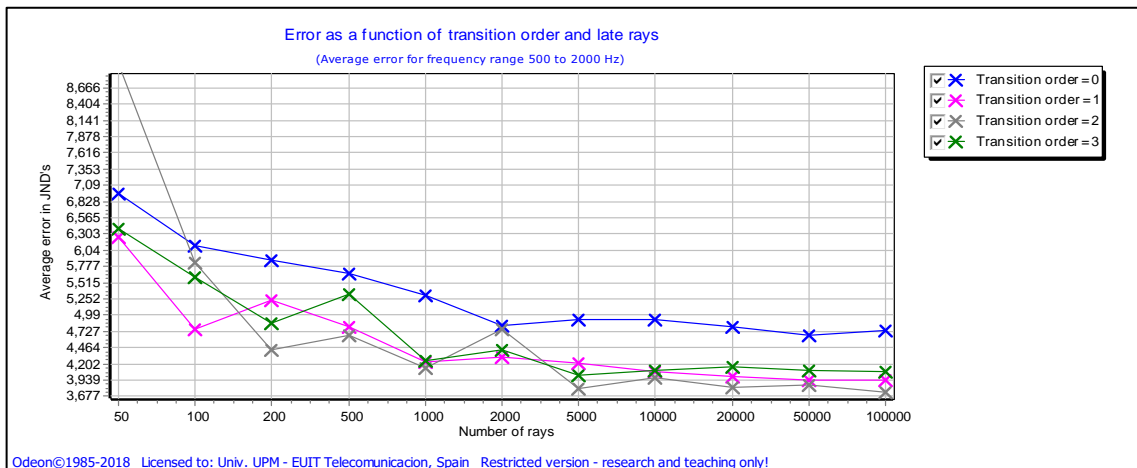


Figura 42. Compromiso entre orden de transición y número de rayos tardíos.

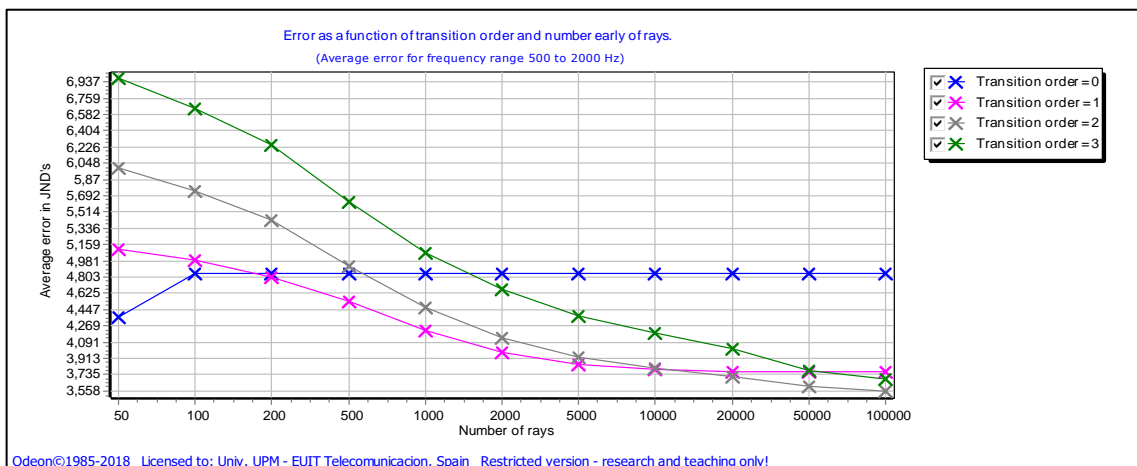


Figura 43. Compromiso entre orden de transición y número de rayos tempranos.

Como configuración de las condiciones atmosféricas, se ajusta la temperatura en el recinto y la humedad relativa del aire con los datos medidos en el teatro, 16,2 C y 33 % respectivamente. El ruido de fondo aún no se incluye, pues es necesario para cálculos de inteligibilidad, no para ajustar el modelo. En la figura 44 se adjuntan capturas de pantalla de toda la configuración en ODEON.

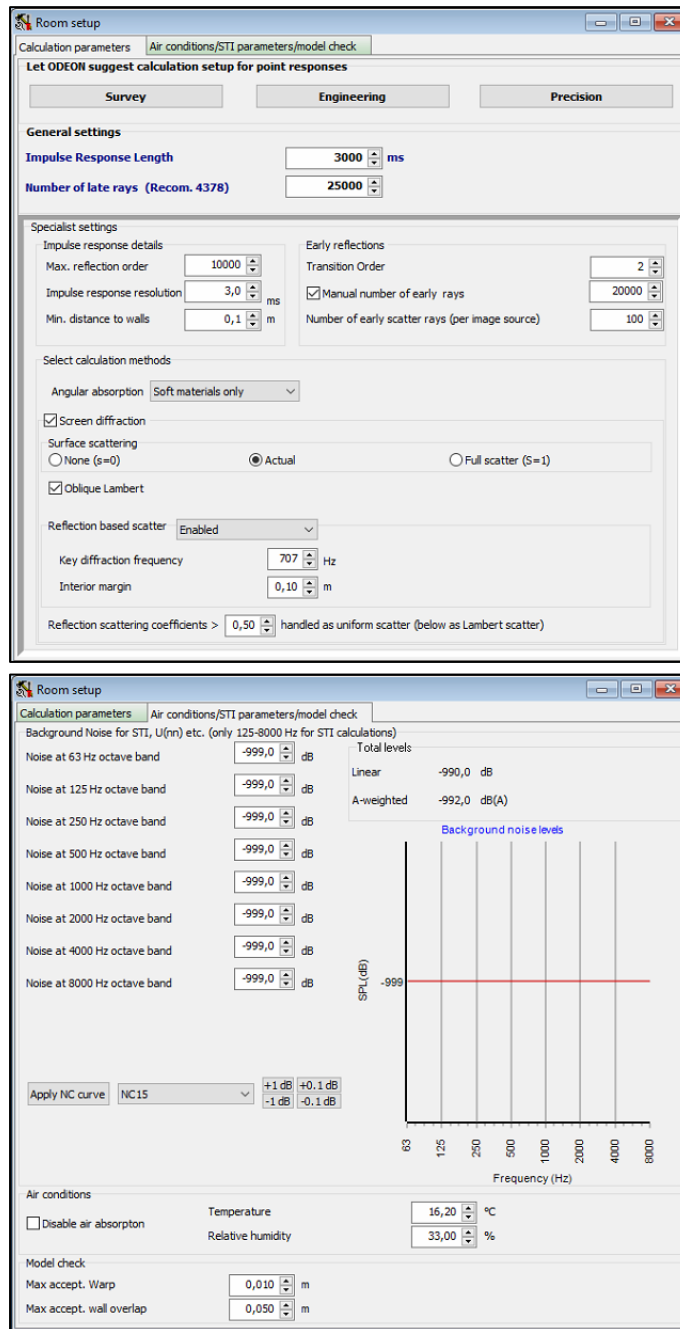


Figura 44. Configuración de cálculo en ODEON.

## 9.6. Ajuste del modelo acústico

Para ajustar el modelo en ODEON, se parte de la asignación inicial de materiales, y como parámetros acústicos de ajuste se van a emplear  $T_{20}$  (véase 4.6), EDT (véase 4.7),  $T_s$  (véase 4.8),  $D_{50}$  (véase 4.11) y  $C_{80}$  (véase 4.10).

Puesto que hay tres posiciones de fuente establecidas, en cada una de manera independiente se calcula la respuesta de todas las posiciones de micrófono. Para comparar resultados simulados y medidos, ODEON proporciona el valor promedio, de todas las posiciones de receptor, de los parámetros acústicos en cada banda de octava. Esos valores promedio los aporta tanto de las respuestas multipunto simuladas

como de las medidas reales, ya que se han importado previamente las respuestas al impulso medidas *in situ* de todas las combinaciones fuente-micrófono.

En cuanto al criterio de ajuste, la diferencia entre valores simulados y medidos se evalúa haciendo uso de los umbrales de JND que aparecen en la ISO 3382-1. Además, a pesar de contar con tres situaciones que comparar (una por cada fuente activa), se va a tener más en cuenta los resultados de la fuente 1 para ajustar, ya que es la que se encuentra más cerca de la audiencia, y por tanto la emisión se ve menos condicionada por lo que ocurre en la caja escénica. A pesar de ello, a lo largo del documento se incluyen los resultados de los cálculos indicando la posición de fuente que se ha empleado. La información completa de todos los resultados del proceso de ajuste del modelo se adjunta en el Anexo II de este documento.

A modo de resumen, el trabajo de ajuste del modelo ha consistido en un proceso de ensayo error hasta dar con los resultados satisfactorios. Partiendo de la asignación inicial de materiales, se han llevado a cabo dos modificaciones de los materiales del modelo hasta llegar al modelo final ajustado. Los detalles de cada fase de cambio se comentan en los siguientes puntos.

### 9.6.1. Modelo con asignación inicial de materiales

En primer lugar, se obtienen los valores promedio de los diferentes parámetros acústicos, tanto simulados como medidos, que se muestran en la tabla 6 se en promedio para cada banda de octava. En rojo se muestran los valores simulados (S) y en azul los valores medidos (M).

Tabla 6. Parámetros acústicos promedio del modelo inicial para la fuente 1.

Parámetro	63 Hz		125 Hz		250 Hz		500 Hz		1 kHz		2 kHz		4 kHz		8 kHz	
	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M
<b>T<sub>20</sub> (s)</b>	2,32	2,73	2,33	2,46	1,98	1,99	1,74	1,59	1,68	1,57	1,63	1,54	1,25	1,38	0,68	1,02
<b>EDT (s)</b>	2,38	2,31	2,40	1,70	2,04	1,44	1,77	1,27	1,69	1,48	1,58	1,46	1,17	1,15	0,50	0,62
<b>Ts (ms)</b>	144	126	146	104	119	86	102	71	95	78	89	81	66	65	32	40
<b>D<sub>50</sub></b>	0,41	0,48	0,40	0,53	0,45	0,58	0,50	0,61	0,52	0,60	0,54	0,57	0,62	0,63	0,80	0,75
<b>C<sub>80</sub> (dB)</b>	0,00	2,50	0,00	3,30	1,00	3,80	1,90	4,50	2,30	4,00	2,60	3,40	4,40	4,70	9,70	7,50

Para conocer la calidad del ajuste con esta configuración de materiales, se calcula la diferencia entre resultados en términos de JND. Los umbrales que se establecen en la ISO 3382-1 para los parámetros empleados se incluyen en la tabla 7. Algunas diferencias, como la de T<sub>20</sub>, son relativas, por lo que se ha tomado como referencia el valor medido y se ha calculado la diferencia relativa respecto al valor simulado.

Tabla 7. Umbral JND para cada parámetro empleado en el ajuste.

Parámetro	Umbral diferencial (JND)
T <sub>20</sub> (s)	5% rel.
EDT (s)	5% rel.
Ts (ms)	10 ms
D <sub>50</sub>	5% abs.
C <sub>80</sub> (dB)	1 dB abs.

En la tabla 8, se representan las diferencias entre valores medidos y simulados en JND's. Un ajuste excelente se da cuando la diferencia es de 1 JND o menor, si la diferencia está entre 1 y 2 JND's el ajuste se considera aceptable y si supera esos valores el modelo no se puede dar por ajustado, y hay que modificarlo.

Tabla 8. Diferencia en JND's entre parámetros medidos y simulados promedio del modelo inicial para la fuente 1.

Parámetro	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
<b>T<sub>20</sub> (s)</b>	3,00	1,06	0,10	1,89	1,40	1,17	1,88	6,67
<b>EDT (s)</b>	0,61	8,24	8,33	7,87	2,84	1,64	0,35	3,87
<b>Ts (ms)</b>	1,80	4,20	3,30	3,10	1,70	0,80	0,10	0,80
<b>D<sub>50</sub></b>	1,40	2,60	2,60	2,20	1,60	0,60	0,20	1,00
<b>C<sub>80</sub> (dB)</b>	2,50	3,30	2,80	2,60	1,70	0,80	0,30	2,20

Como era de esperar, el modelo necesita modificaciones para lograr un ajuste más adecuado. Es importante, sobre todo, conseguir un buen ajuste a frecuencias medias. En el caso de la banda de 500 Hz, el error existente es demasiado amplio para la mayoría de los parámetros.

Con la intención de comprobar la influencia de la posición de la fuente en los resultados obtenidos, se muestra en la tabla 9 y 10 la misma información anterior, pero para la fuente 3, que es la que se ubica más metida en la caja escénica.

Tabla 9. Parámetros acústicos promedio del modelo inicial para la fuente 3.

Parámetro	63 Hz		125 Hz		250 Hz		500 Hz		1 kHz		2 kHz		4 kHz		8 kHz	
	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M
<b>T<sub>20</sub> (s)</b>	2,36	2,52	2,37	2,60	2,04	2,30	1,82	1,73	1,77	1,63	1,68	1,56	1,29	1,39	0,72	1,02
<b>EDT (s)</b>	2,65	2,48	2,66	2,48	2,28	2,12	2,00	1,62	1,93	1,61	1,82	1,61	1,39	1,36	0,65	0,80
<b>Ts (ms)</b>	176	144	177	169	147	123	125	96	118	89	108	92	77	70	32	38
<b>D<sub>50</sub></b>	0,32	0,40	0,32	0,36	0,36	0,48	0,41	0,51	0,43	0,53	0,45	0,50	0,54	0,59	0,77	0,72
<b>C<sub>80</sub> (dB)</b>	-1,70	1,10	-1,70	-0,80	-0,60	1,60	0,40	2,70	0,80	3,10	1,30	2,50	3,30	4,30	9,00	7,70

Tabla 10. Diferencia en JND's entre parámetros medidos y simulados promedio del modelo inicial para la fuente 3.

Parámetro	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
<b>T<sub>20</sub> (s)</b>	1,27	1,77	2,26	1,04	1,72	1,54	1,44	5,88
<b>EDT (s)</b>	1,37	1,45	1,51	4,69	3,98	2,61	0,44	3,75
<b>Ts (ms)</b>	3,20	0,80	2,40	2,90	2,90	1,60	0,70	0,60
<b>D<sub>50</sub></b>	1,60	0,80	2,40	2,00	2,00	1,00	1,00	1,00
<b>C<sub>80</sub> (dB)</b>	2,80	0,90	2,20	2,30	2,30	1,20	1,00	1,30

Para la fuente 3 y el parámetro T<sub>20</sub>, la diferencia en las bandas de 250 Hz y 500 Hz es notable. El ajuste pasa de ser muy bueno a 250 Hz (0,1 JND's) a ser mucho peor (2,26 JND's). En la banda de 500 Hz pasa al revés, para la fuente 1 el ajuste era de 1,89 mientras que para la fuente 3 mejora hasta 1,04.

Para estudiar más en profundidad lo que sucede en la caja escénica, se analizan los resultados de los tres puntos de micrófono situados en el escenario. Concretamente, utilizando la fuente 3, se visualizan el  $T_{20}$  en los puntos de micrófono M35, M36 y M37. En la tabla 11 se recogen los valores de  $T_{20}$  medidos y simulados para las tres posiciones anteriores. A la vista de los resultados, los valores medidos presentan diferencias grandes respecto a los valores promedio ( $T_{20}$  disminuye considerablemente en frecuencias medias), y el ajuste en términos de JND es muy pobre (tabla 12). Ésto puede ser un indicio de que el problema de ajuste de la simulación lo esté provocando la caja escénica.

Tabla 11.  $T_{20}$  en las posiciones de micrófono en el escenario del modelo inicial para la fuente 3.

Posición de micrófono	63 Hz		125 Hz		250 Hz		500 Hz		1 kHz		2 kHz		4 kHz		8 kHz	
	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M
M35	2,25	*,**	2,26	2,38	1,95	2,41	1,69	1,69	1,63	1,36	1,54	1,39	1,20	1,24	0,67	0,94
M36	2,24	*,**	2,24	2,58	1,95	2,69	1,68	1,67	1,64	1,29	1,5	1,29	1,12	1,25	0,67	1,01
M37	2,09	*,**	2,09	2,29	1,79	2,09	1,54	1,80	1,52	1,56	1,44	1,27	1,11	1,25	0,61	0,36

Tabla 12. Diferencia en JND's entre  $T_{20}$  medido y simulado en las posiciones de micrófono en el escenario del modelo inicial para la fuente 3.

Posición de micrófono	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
M35	-	1,02	3,81	0,04	4,01	2,20	0,69	5,83
M36	-	2,61	5,50	0,16	5,40	3,33	2,01	6,80
M37	-	1,71	2,87	2,85	0,54	2,70	2,28	14,11

Con la intención de ajustar correctamente el comportamiento de la caja escénica, se propone calcular tres respuestas multipunto (tres trabajos en la lista de ODEON, uno por posición de fuente sonora) sólo con las posiciones de micrófono del escenario y utilizar el optimizador genético de materiales de ODEON.

### 9.6.2. Primera modificación de materiales

Esta primera modificación de materiales afecta sólo a las superficies de la caja escénica. Antes de hablar de la configuración elegida para la optimización de materiales en ODEON, conviene conocer los principios de funcionamiento de esta herramienta, que se explican en el Anexo III de este documento.

Una vez conocida la metodología, la configuración de trabajo del optimizador genético es la siguiente:

- Parámetro de ajuste  $\rightarrow T_{20}$
- Variabilidad de los coeficientes de absorción  $\rightarrow$  50% materiales de la caja escénica, 0% los materiales restantes (coeficientes de absorción fijos)
- Combinaciones fuente-micrófono utilizadas  $\rightarrow$  F1M35, F1M36, F1M37, F2M35, F2M36, F2M37, F3M35, F3M36, F3M37

Con esta configuración, se ha dejado correr la herramienta hasta completar las generaciones de la 0 a la 9 incluida (10 generaciones en total). En la figura 45 se muestra una captura de ODEON tras finalizar el proceso de optimización. Las diferencias en JND's de cada banda de octava resultante de la

optimización se observan con el gráfico de barras verdes (ajuste obtenido) y rojas (ajuste original) superpuestas.

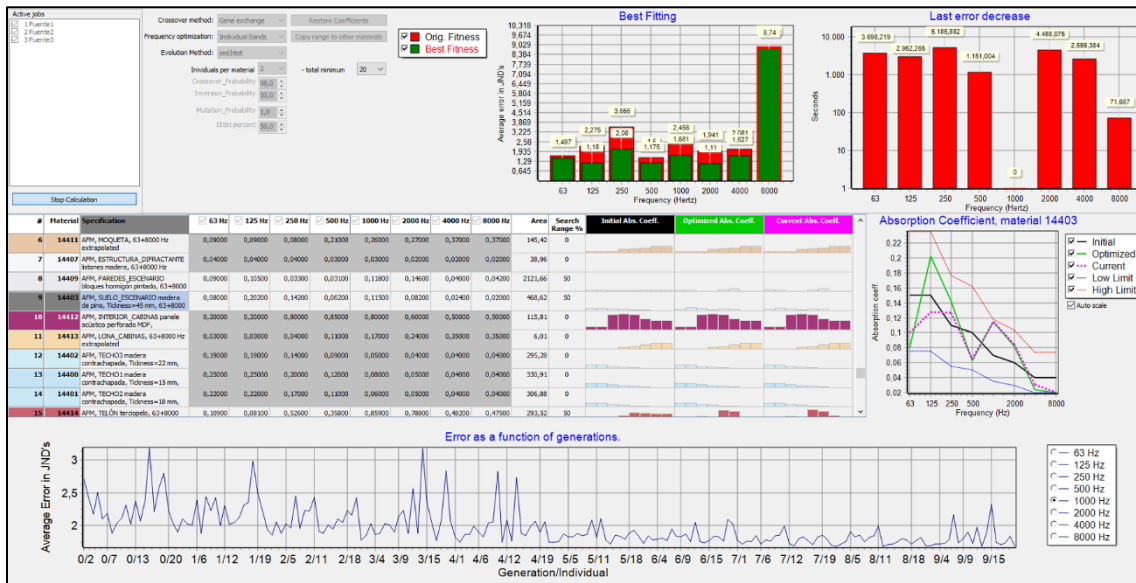


Figura 45. Proceso de optimización genética de materiales de la caja escénica en ODEON.

Los materiales del modelo tras la optimización genética son los presentados en la tabla 13. Los materiales modificados por los algoritmos genéticos son sólo los de la caja escénica, que aparecen resaltados en color naranja, el resto han permanecido fijos.

Tabla 13. Materiales del modelo tras la primera modificación.

Superficie	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
TECHO 1	0,25	0,25	0,20	0,12	0,08	0,05	0,04	0,04
TECHO 2	0,22	0,22	0,17	0,11	0,06	0,05	0,04	0,04
TECHO 3	0,19	0,19	0,14	0,09	0,05	0,04	0,04	0,04
SUELO ESCENARIO	0,08	0,20	0,14	0,06	0,12	0,08	0,02	0,02
SUELO AUDIENCIA	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
BUTACAS	0,41	0,41	0,60	0,77	0,88	0,82	0,70	0,70
PAREDES	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
ESTRUCTURA DIFRACTANTE	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
CORTINAS	0,15	0,15	0,35	0,55	0,73	0,70	0,65	0,65
TELÓN	0,11	0,08	0,53	0,36	0,86	0,79	0,48	0,48
PAREDES ESCENARIO	0,09	0,11	0,03	0,03	0,12	0,15	0,04	0,04
ALFOMBRA VERDE	0,09	0,09	0,08	0,21	0,26	0,27	0,37	0,37
ESTORES CABINAS CONTROL	0,03	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35	0,35
BAMBALINAS	0,25	0,12	0,27	0,93	0,99	0,97	0,97	0,97
INTERIOR CABINAS CONTROL	0,20	0,20	0,80	0,85	0,80	0,60	0,50	0,50

Para comprobar el funcionamiento de los nuevos materiales en la sala, se asignan sobre el modelo original. Se vuelven a calcular respuestas multipunto, una por cada posición de fuente y cada una con

todas las posiciones de micrófono. De nuevo, se hallan los valores promedio simulados y medidos, y se obtiene la diferencia en JND's, exactamente como se ha procedido anteriormente (tablas 14 y 15).

Tabla 14. Parámetros acústicos promedio del modelo con la primera modificación para la fuente 1.

Parámetro	63 Hz		125 Hz		250 Hz		500 Hz		1 kHz		2 kHz		4 kHz		8 kHz	
	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M
<b>T<sub>20</sub> (s)</b>	2,35	2,73	2,56	2,46	2,21	1,99	1,80	1,59	1,64	1,57	1,59	1,54	1,28	1,38	0,68	1,02
<b>EDT (s)</b>	2,41	2,31	2,60	1,70	2,22	1,44	1,84	1,27	1,63	1,48	1,54	1,46	1,19	1,15	0,51	0,62
<b>T<sub>s</sub> (ms)</b>	147	126	158	104	130	86	106	71	92	78	87	81	67	65	32	40
<b>D<sub>50</sub></b>	0,40	0,48	0,39	0,53	0,44	0,58	0,49	0,61	0,53	0,60	0,55	0,57	0,61	0,63	0,80	0,75
<b>C<sub>80</sub> (dB)</b>	-0,10	2,50	-0,30	3,30	0,60	3,80	1,60	4,50	2,50	4,00	2,80	3,40	4,30	4,70	9,60	7,50

Tabla 15. Diferencia en JND's entre parámetros medidos y simulados promedio del modelo con la primera modificación para la fuente 1.

Parámetro	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
<b>T<sub>20</sub> (s)</b>	2,78	0,81	2,21	2,64	0,89	0,65	1,45	6,67
<b>EDT (s)</b>	0,87	10,59	10,83	8,98	2,03	1,10	0,70	3,55
<b>T<sub>s</sub> (ms)</b>	2,10	5,40	4,40	3,50	1,40	0,60	0,20	0,80
<b>D<sub>50</sub></b>	1,60	2,80	2,80	2,40	1,40	0,40	0,40	1,00
<b>C<sub>80</sub> (dB)</b>	2,60	3,60	3,20	2,90	1,50	0,60	0,40	2,10

Contemplando los resultados, entre el modelo inicial y el actual que contiene la primera modificación de materiales, se consigue un mejor ajuste, en líneas generales, para las frecuencias de 1 kHz y 2 kHz en todos los parámetros tras la modificación. Sin embargo, el ajuste ha empeorado para las frecuencias de 250 Hz y 500 Hz si se observa el parámetro T<sub>20</sub>, por ejemplo. En estas bandas y para la fuente 1, el modelo inicial poseía un JND para T<sub>20</sub> de 0,10 y 1,06 respectivamente, mientras que el modelo modificado presenta un JND para T<sub>20</sub> de 0,81 y 2,21.

En vista de este empeoramiento, se cambia la estrategia de ajuste, intentando mejorar la absorción en bajas frecuencias y en la octava de 500 Hz principalmente, ya que los parámetros simulados relacionados con el tiempo de reverberación como T<sub>20</sub> y EDT se hallan por encima de los medidos a pesar del primer intento de modificación.

### 9.6.3. Segunda modificación de materiales y modelo acústico ajustado

Se decide partir de nuevo del modelo inicial, ya que los resultados obtenidos tras la aplicación del optimizador no son favorables. Ahora se busca realizar un ajuste manual, buscando materiales que mejoren, como se ha dicho, la absorción en baja frecuencia y en la octava de 500 Hz. También se pretende corregir aquellos materiales cuya elección no haya sido la acertada inicialmente y puedan generar dificultades en el ajuste.

Se han visualizado los coeficientes de absorción de todos los materiales de la sala inicial para buscar dónde se pueden plantear los cambios de absorción (figura 46). También se ha comprobado la absorción de cada material en m<sup>2</sup>, que se adjunta en la tabla 16.

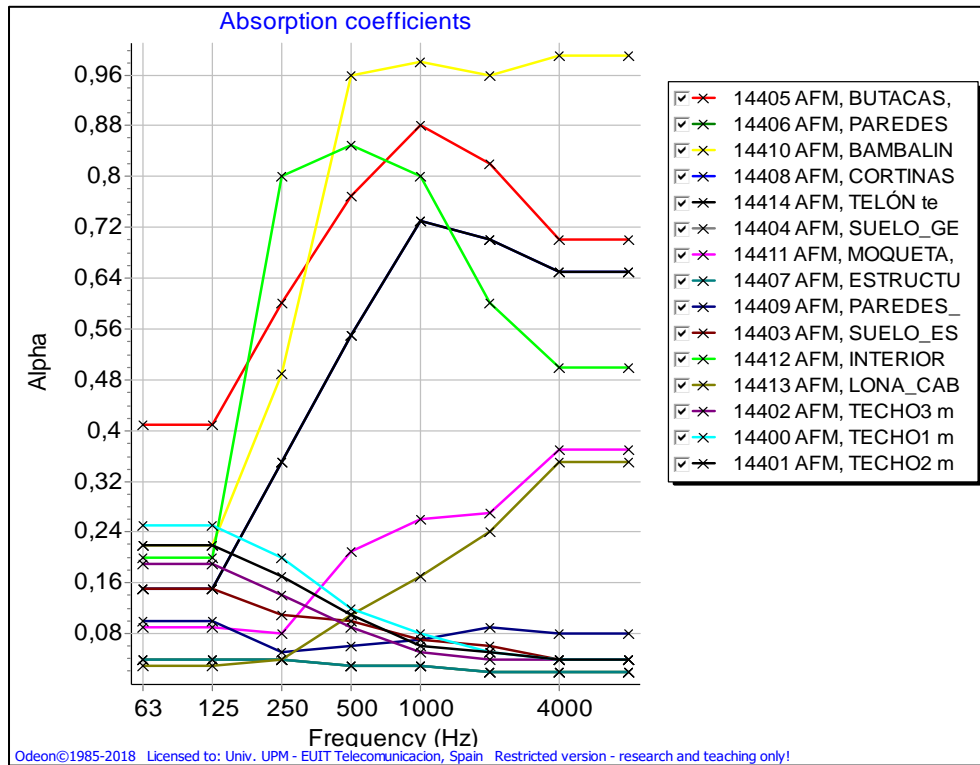


Figura 46. Coeficiente de absorción de los materiales de la sala en bandas de octava del modelo inicial.

Tabla 16. Absorción acústica de cada material de la sala en el modelo inicial.

Absorción acústica (m <sup>2</sup> )	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
ABSORCIÓN DEL AIRE	2,6	7,5	16,1	29,3	66,2	205,0	719,2	2318,7
TECHO 1	82,7	82,7	66,2	39,7	26,5	16,5	13,2	13,2
TECHO 2	67,5	67,5	52,2	33,8	18,4	15,3	12,3	12,3
TECHO 3	56,1	56,1	41,3	26,6	14,8	11,8	11,8	11,8
SUELO ESCENARIO	70,3	70,3	51,5	46,9	32,8	28,1	18,7	18,7
SUELO AUDIENCIA	32,0	32,0	32,0	24,0	24,0	16,0	16,0	16,0
BUTACAS	221,9	221,9	324,8	416,8	476,3	443,9	378,9	378,9
PAREDES	36,7	36,7	36,7	27,5	27,5	18,3	18,3	18,3
ESTRUCTURA DIFRACTANTE	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8	0,5	0,5	0,5
CORTINAS	12,4	12,4	29,0	45,6	60,5	58,0	53,8	53,8
TELÓN	44,0	44,0	102,7	161,4	214,3	205,5	190,8	190,8
PAREDES ESCENARIO	212,2	212,2	106,1	127,3	148,5	190,9	169,7	169,7
ALFOMBRA VERDE	11,4	11,4	10,1	26,6	32,9	34,2	46,8	46,8
ESTORES CABINAS CONTROL	0,2	0,2	0,2	0,7	1,0	1,4	2,1	2,1
BAMBALINAS	355,7	355,7	792,3	1552,2	1584,6	1552,2	1600,7	1600,7
INTERIOR CABINAS CONTROL	7,1	7,1	28,4	30,2	28,4	21,3	17,8	17,8

Lo primero que se advierte de la información anterior, es que el material de las bambalinas (color amarillo en la figura 46) presenta un salto muy grande de absorción de bajas a medias frecuencias, a partir de las cuales el coeficiente de absorción es extremadamente alto. Además, se puede comprobar en la tabla 16 cómo las bambalinas provocan mucha absorción en media y alta frecuencia. Es por esto que se decide aplicar otro material a las bambalinas, menos absorbente en medias y altas frecuencias para que la influencia de la caja escénica en el global de la sala sea menor. También se busca que los problemas que las bambalinas pudieran estar causando en el proceso de ajuste debido a esa absorción desmedida desaparezcan en la medida de lo posible.

Por otra parte, se comprobó *in situ* durante las mediciones en el teatro que, al golpear el suelo de la audiencia, se generaban resonancias a baja frecuencia, lo que se traduce en mayor absorción de dichas frecuencias. Para simular tal característica de manera adecuada y obtener algo más de absorción a baja frecuencia (objetivo de esta segunda tanda de modificaciones), se realizan cambios en los materiales del suelo de la audiencia y la alfombra verde (moqueta) que en varias zonas lo cubre.

Como última modificación para aumentar la absorción en baja frecuencia, se emplea otro material para simular el contrachapado de las paredes y las estructuras difractantes del teatro. El objetivo es conseguir coeficientes de absorción mayores de la octava de 500 Hz hacia abajo. La superficie de paredes y estructuras difractantes (simplemente son las mismas paredes con listones de madera añadidos para favorecer la difusión) es muy significativa en el recinto. Por esa razón, la modificación que se lleva a cabo no necesita ser muy brusca. Con un cambio suave de material, la absorción de la sala en baja frecuencia se va a ver notablemente alterada, por la cantidad de metros cuadrados en los que se aplica el cambio.

Por último, si se observan las tablas 6 y 9 de nuevo, se puede advertir cómo en alta frecuencia, concretamente en las bandas de 4 kHz y 8 kHz, los valores de  $T_{20}$  y EDT simulados se encuentran algo por debajo de los medidos. Para mejorar tal ajuste, se realiza un ligero cambio del material del telón a uno con algo menos de absorción en alta frecuencia. El telón no posee una superficie extremadamente grande, por lo que el efecto producido por el cambio es reducido.

En todos los cambios planteados en las líneas anteriores se sustituye el material del modelo inicial por uno de la base de datos de ODEON. En la tabla 17 se presentan los materiales del modelo tras este segundo conjunto de modificaciones. Se resaltan los materiales alterados respecto al modelo inicial, desde el que se ha partido de nuevo, en color naranja.

Tabla 17. Materiales del modelo tras la segunda modificación.

Superficie	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
TECHO 1	0,25	0,25	0,20	0,12	0,08	0,05	0,04	0,04
TECHO 2	0,22	0,22	0,17	0,11	0,06	0,05	0,04	0,04
TECHO 3	0,19	0,19	0,14	0,09	0,05	0,04	0,04	0,04
SUELO ESCENARIO	0,15	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,04	0,04
SUELO AUDIENCIA	0,15	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07	0,07
BUTACAS	0,41	0,41	0,60	0,77	0,88	0,82	0,70	0,70
PAREDES	0,28	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11	0,11
ESTRUCTURA DIFRACTANTE	0,28	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11	0,11
CORTINAS	0,15	0,15	0,35	0,55	0,73	0,70	0,65	0,65
TELÓN	0,07	0,07	0,31	0,49	0,81	0,66	0,54	0,54
PAREDES ESCENARIO	0,10	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0,08
ALFOMBRA VERDE	0,08	0,08	0,27	0,39	0,34	0,48	0,63	0,63
ESTORES CABINAS CONTROL	0,03	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35	0,35
BAMBALINAS	0,07	0,07	0,31	0,49	0,75	0,70	0,60	0,60
INTERIOR CABINAS CONTROL	0,20	0,20	0,80	0,85	0,80	0,60	0,50	0,50

Con los nuevos materiales aplicados sobre el modelo acústico inicial, se vuelven a calcular respuestas multipunto, una por cada posición de fuente y cada una con todas las posiciones de micrófono. De nuevo, se hallan los valores promedio simulados y medidos, y se obtiene la diferencia en JND's, tal y como se ha procedido previamente (tablas 18 y 19).

Tabla 18. Parámetros acústicos promedio del modelo final para la fuente 1.

Parámetro	63 Hz		125 Hz		250 Hz		500 Hz		1 kHz		2 kHz		4 kHz		8 kHz	
	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M
T <sub>20</sub> (s)	2,55	2,73	2,55	2,46	1,92	1,99	1,68	1,59	1,60	1,57	1,50	1,54	1,18	1,38	0,65	1,02
EDT (s)	2,39	2,31	2,39	1,70	1,81	1,44	1,59	1,27	1,56	1,48	1,40	1,46	1,03	1,15	0,45	0,62
T <sub>s</sub> (ms)	129	126	130	104	98	86	85	71	85	78	76	81	57	65	29	40
D <sub>50</sub>	0,48	0,48	0,48	0,53	0,53	0,58	0,56	0,61	0,55	0,60	0,59	0,57	0,66	0,63	0,83	0,75
C <sub>80</sub> (dB)	1,30	2,50	1,20	3,30	2,40	3,80	3,00	4,50	2,90	4,00	3,60	3,40	5,30	4,70	10,50	7,50

Tabla 19. Diferencia en JND's entre parámetros medidos y simulados promedio del modelo final para la fuente 1.

Parámetro	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
T <sub>20</sub> (s)	1,32	0,73	0,70	1,13	0,38	0,52	2,90	7,25
EDT (s)	0,69	8,12	5,14	5,04	1,08	0,82	2,09	5,48
T <sub>s</sub> (ms)	0,30	2,60	1,20	1,40	0,70	0,50	0,80	1,10
D <sub>50</sub>	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,40	0,60	1,60
C <sub>80</sub> (dB)	1,20	2,10	1,40	1,50	1,10	0,20	0,60	3,00

Para evaluar el ajuste obtenido, se consideran las bandas de octava de 125 Hz a 4 kHz, excluyendo la de 63 Hz y la de 8 kHz. En el caso de la banda de 63 Hz, hay diferentes puntos de micrófono para los que no se ha registrado el valor de la respuesta al impulso en la medición *in situ*, y la INR para esta banda

no supera los 35 dB necesarios para hallar con precisión  $T_{20}$ . Respecto a la banda de 8 kHz, la absorción provocada por del aire es muy grande, predomina sobre la que pueda causar cualquier material de la sala, y afecta significativamente en los resultados obtenidos.

Según los resultados de la tabla 19, las diferencias en JND's entre valores simulados y medidos para cada parámetro acústico evaluado se consideran aceptables en términos generales.

Para  $T_{20}$ ,  $T_s$ ,  $D_{50}$  y  $C_{80}$  se ha logrado un ajuste para las bandas de 125 Hz a 4 kHz de entre 0 y 2 JND's para la mayoría de los casos, salvo en la banda de 4 kHz de  $T_{20}$  (JND de 2,90) y en la banda de 125 Hz de  $T_s$  (JND de 2,60). En estos dos casos el ajuste supera los 2 JND's, pero no en exceso.

Respecto al EDT, el ajuste de las bandas de 1, 2 y 4 kHz es aceptable, como en los parámetros anteriores. Sin embargo, para las octavas de 125, 250 y 500 Hz, el ajuste es malo, superando los 5 JND's. El EDT es difícil de ajustar, porque se trata de un parámetro que depende mucho de la posición exacta de micrófono en la que se mida en la sala. Por ello, puede presentar valores muy cambiantes. Además, se obtiene a partir de una zona bastante irregular de la curva de decaimiento energético (la caída de los 10 primeros dB), en la que no hay una tendencia recta clara, de ahí la disparidad entre valores medidos y simulados en las octavas de 125, 250 y 500 Hz.

Tras este breve análisis, se concluye dando por ajustado el modelo. De aquí en adelante, la asignación de materiales del modelo acústico virtual con la que se trabaja es la que aparece en la tabla 17.



## 10. Calidad acústica de la sala

Para analizar la calidad acústica del Teatro Auditorio Buero Vallejo, se estudia un conjunto de parámetros acústicos utilizados habitualmente para cuantificarla. Se va a hablar del tiempo de reverberación (RT) (véase 4.6), EDT (*Early Decay Time*) (véase 4.7), calidez acústica (BR) y brillo (Br) (véase 4.9), claridad de la música ( $C_{80}$ ) (véase 4.10), definición ( $D_{50}$ ) (véase 4.11), fuerza sonora (G) (véase 4.12), eficiencia lateral (LF) (véase 4.13), índice de transmisión del habla (STI) (véase 4.14), y %ALCons (*Percentage Articulation Loss of Consonants*) (véase 4.15).

Los parámetros acústicos se obtienen utilizando el modelo acústico virtual recientemente ajustado. Para realizar los cálculos de todos ellos (excepto del STI y %ALCons) se configura una respuesta multipunto en ODEON, con la posición de fuente 1 y las posiciones de micrófono de la M1 a la M32, todas las de la zona de audiencia (no se consideran las tres posiciones del escenario). Para excitar el recinto, se usa la misma fuente omnidireccional que para el ajuste del modelo, con las mismas características de potencia (véase 9.2).

En el caso del STI y %ALCons, con los que se estudia la inteligibilidad de la sala, se van a realizar dos análisis diferentes: el primero, con una fuente sonora con las características de una persona hablando a viva voz situada en el proscenio; el segundo, consiste en la evaluación de la inteligibilidad con el sistema de refuerzo sonoro del teatro en funcionamiento.

Este teatro de Guadalajara, como ya se ha mencionado, es multifuncional. Dependiendo de a qué actividad esté destinado un recinto, existen unos parámetros acústicos óptimos. En este proyecto se van a comparar los valores obtenidos con los valores establecidos como óptimos para dos tipos de actividades: teatro y conferencias, por un lado, y conciertos por otro. En ambos casos se define también una respuesta multipunto en ODEON con todos los puntos de micrófono de la zona de audiencia.

### 10.1. Tiempo de reverberación (RT)

El tiempo de reverberación óptimo de una sala depende del volumen de ésta y de la actividad que se pretenda desarrollar en ella. Este criterio se refiere a  $RT_{mid}$ , existiendo fórmulas (13) que lo expresan en función del volumen y la actividad de uso [22].

$$\text{Teatro y conferencias: } RT_{mid} \text{ óptimo máximo} = 0,368 \cdot V^{0,1505} \quad s$$

$$RT_{mid} \text{ óptimo mínimo} = 0,264 \cdot V^{0,1394} \quad s$$

$$\text{Concierto: } RT_{mid} \text{ óptimo máximo} = 0,600 \cdot V^{0,1325} \quad s$$

$$RT_{mid} \text{ óptimo mínimo} = 0,4225 \cdot V^{0,1331} \quad s$$

Para evaluar el tiempo de reverberación de la sala se obtiene  $T_{20}$  y a partir de los valores de las bandas de frecuencia de 500 Hz y 1 kHz, se calcula  $RT_{mid}$ . En la figura 47 se representa el  $T_{20}$  promedio simulado en ODEON. Con la tabla 20 se complementa la figura anterior, con los datos concretos.

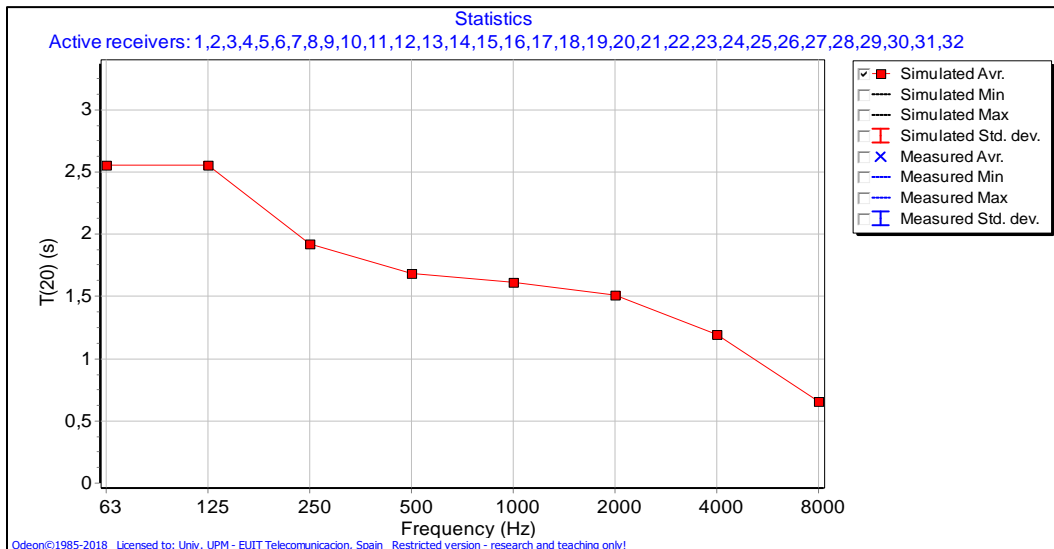


Figura 47. Valores simulados promedio de  $T_{20}$  de la sala.

Tabla 20. Valores simulados promedio de  $T_{20}$  de la sala.

Parámetro	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
$T_{20}$ (s)	2,56	2,55	1,92	1,68	1,61	1,51	1,19	0,66

El  $RT_{mid}$  del recinto es 1,65 s. Si la sala posee un volumen de aproximadamente 13700 m<sup>3</sup>, el intervalo de  $RT_{mid}$  óptimo para teatro y conferencias va de 0,97 a 1,54 s, mientras que, para sala de conciertos, el intervalo abarca de 1,50 a 2,12 s. En vista del resultado y de los intervalos, la configuración de la sala funciona mejor para el desarrollo de actividad musical, aunque es cierto que  $RT_{mid}$  se encuentra en la parte baja del intervalo óptimo para conciertos.

## 10.2. EDT (Early Decay Time)

Con la intención de garantizar una buena difusión del sonido en una sala, el valor promedio de los EDT en las bandas de 500 Hz y 1 kHz ( $EDT_{mid}$ ) debe encontrarse, para representaciones teatrales entre  $0,6RT_{mid}$  y  $0,75RT_{mid}$ , y para salas de concierto entre  $0,9RT_{mid}$  y  $RT_{mid}$  [18].

Para actividad de teatro y conferencias, el intervalo óptimo de  $EDT_{mid}$  va de 0,99 a 1,23 s, y, para el caso de concierto, el  $EDT_{mid}$  ha de estar entre 1,48 y 1,65 s.

En la figura 48 aparece la representación gráfica del EDT promedio de todas las posiciones de micrófono. Los datos de dicha gráfica se incluyen en la tabla 21.

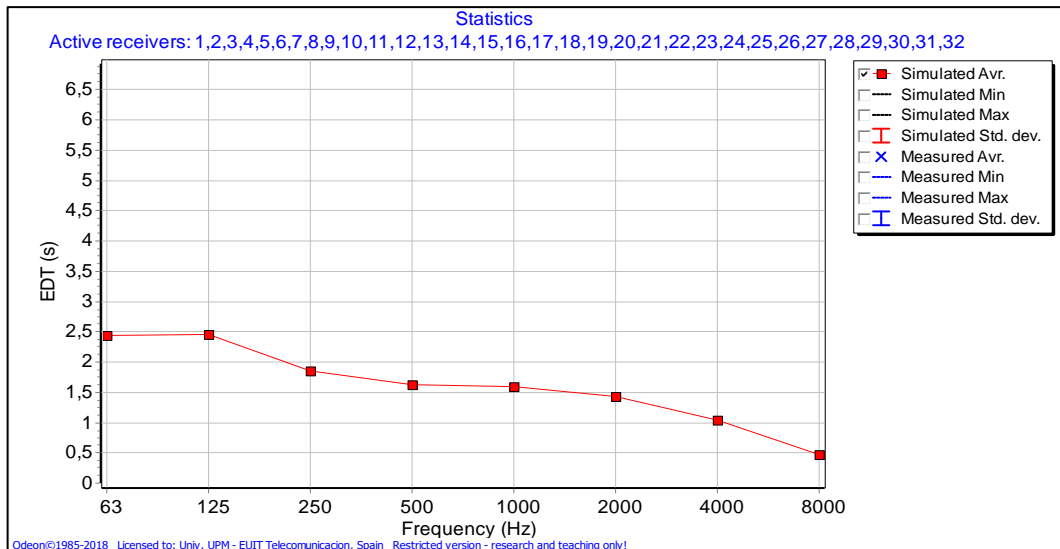


Figura 48. Valores simulados promedio de EDT de la sala.

Tabla 21. Valores simulados promedio de EDT de la sala.

Parámetro	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
EDT (s)	2,44	2,45	1,86	1,63	1,6	1,44	1,05	0,46

El resultado de  $EDT_{mid}$  es 1,62 s, lo que está dentro del intervalo óptimo para las salas de concierto, y, esta vez, en la parte alta del intervalo. El EDT promedio es sutilmente inferior al RT promedio en todas las bandas (excepto en 4 kHz), lo que supone una percepción de la sala ligeramente más apagada que lo que indica el RT.

### 10.3. Calidez acústica (BR) y brillo (Br)

El valor recomendado de BR para teatro y conferencias es de entre 0,90 y 1,30 ambos incluidos; para conciertos se aconseja que esté entre 1,10 y 1,35 ambos incluidos también [18].

Si se efectúa el cálculo de BR a partir de los valores promedio de  $T_{20}$ , se obtiene un valor de 1,36, que supera por muy poco el límite superior para salas de conciertos, por lo que se puede decir que, a pesar de ello, la respuesta en graves de la sala es aceptable, aunque no se cumple el criterio en promedio.

En cuanto al brillo (Br), se recomienda que al menos sea igual o superior a 0,8 debido a que es prácticamente imposible alcanzar su valor máximo de 1, debido a la absorción provocada por el aire en alta frecuencia.

Realizando el cálculo a partir del  $T_{20}$  promedio, el valor de Br es 0,82, por lo que se cumple el criterio y se puede afirmar la buena respuesta en alta frecuencia de la sala.

### 10.4. Claridad de la música ( $C_{80}$ )

El parámetro  $C_{80}$ , resulta relevante para sala de conciertos, puesto que con él se evalúa la claridad musical. Los valores recomendados para una sala de este tipo están entre -2 y 4 dB [18]. Los valores promedio resultantes de la simulación de ODEON se muestran en la figura 49 y en la tabla 22.

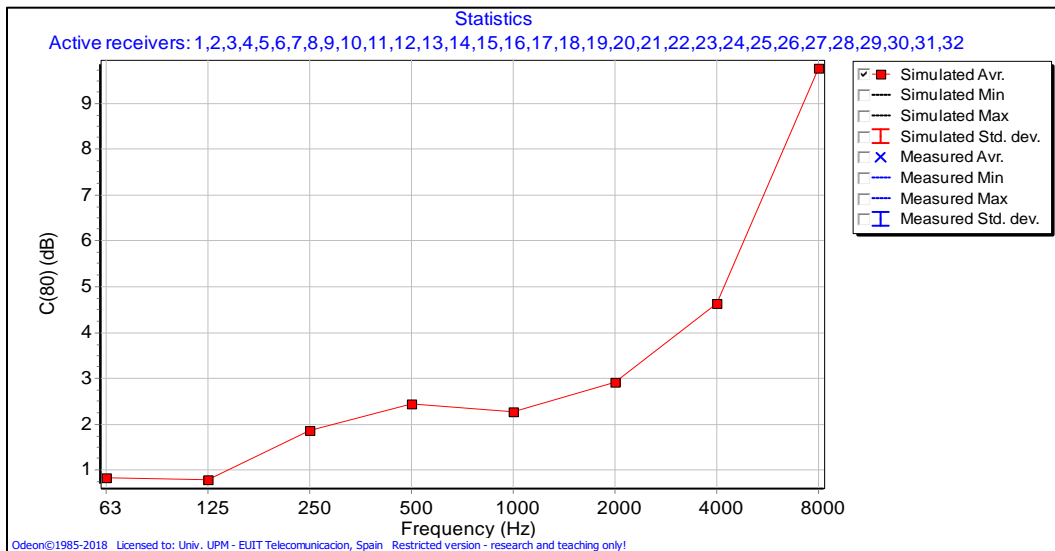


Figura 49. Valores simulados promedio de  $C_{80}$  de la sala.

Tabla 22. Valores simulados promedio de  $C_{80}$  de la sala.

Parámetro	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
$C_{80}$ (dB)	0,8	0,8	1,9	2,4	2,3	2,9	4,6	9,8

Según los valores que se pueden apreciar en la tabla 22, todas las bandas de octava consideradas (125 Hz - 4 kHz) se encuentran dentro del intervalo recomendado para la calidad musical en salas de conciertos excepto la de 4 kHz. En esa banda se supera el límite recomendad ligeramente. Ésto significa que la energía sonora inmediata es superior a la tardía en esa banda en promedio, y que el sonido es muy claro; es decir, dentro de los primeros 80 ms se producen muchas más reflexiones provenientes de paredes y techos próximos al oyente que reflexiones generales debidas a superficies restantes de la sala.

### 10.5. Definición ( $D_{50}$ )

Cuanto más elevado sea el valor de este parámetro, mejor será la inteligibilidad de la palabra y la sonoridad en el punto considerado de la sala, por lo que tiene más sentido utilizarlo para analizar el caso de la actividad teatral.

El valor que se recomienda superar en cada banda de frecuencias es 0,5 [13].

En la figura 50 y la tabla 23 se muestran los valores promedio de  $D_{50}$ , obtenidos con el modelo acústico en ODEON.

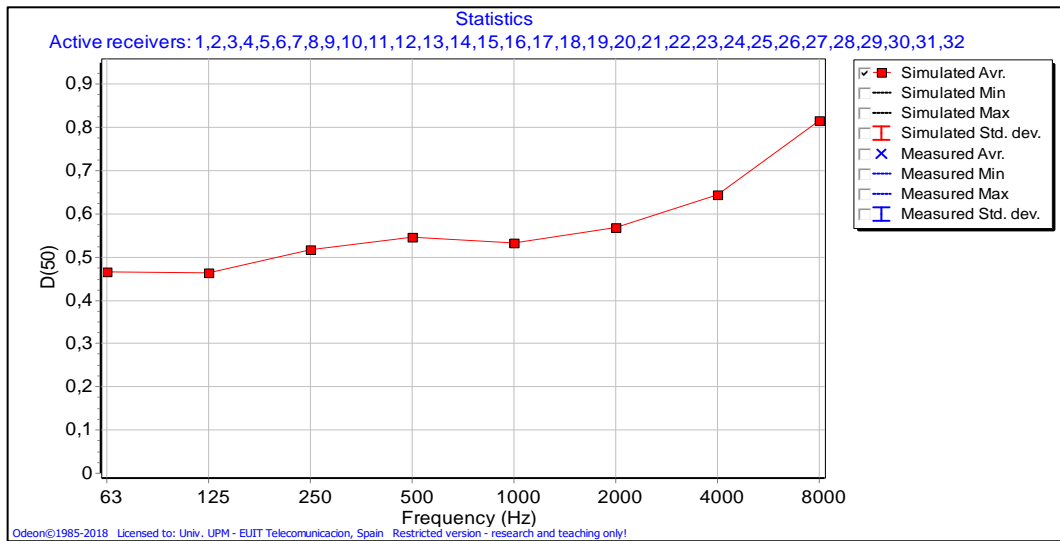


Figura 50. Valores simulados promedio de  $D_{50}$  de la sala.

Tabla 23. Valores simulados promedio de  $D_{50}$  de la sala.

Parámetro	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
$D_{50}$	0,47	0,46	0,52	0,55	0,53	0,57	0,64	0,82

El criterio se cumple en todas las bandas de octava, excepto en la de 125 Hz (la de 63 Hz no se tiene en cuenta, al igual que la de 8 kHz). Además, las demás bandas no cuentan con un valor mucho más elevado de 0,5, lo que indica que la sala no está preparada especialmente para la expresión hablada. La tendencia se confirma, ya que los parámetros analizados hasta ahora sugieren que la acústica del recinto funciona mejor para actividades musicales.

## 10.6. Fuerza sonora (G)

En ODEON este parámetro se halla en como el nivel de presión sonora total ( $SPL_t$ ). La razón es que para una fuente emisora omnidireccional con una potencia de 31 dB por cada banda de octava, el  $SPL_t$  equivale a G (véase 4.12). Por eso es por lo que se configuró la fuente previamente con esos 31 dB.

En cuanto a valores concretos de G, Beranek recomienda un valor de  $G_{mid}$  (promedio de las bandas de 500 Hz y 1kHz) de entre 4,0 y 5,5 dB (ambos incluidos), para sala vacía [13].

En la figura 51 se representan los valores promedio de G en la sala calculados por ODEON. Se complementa la información con los datos en la tabla 24.

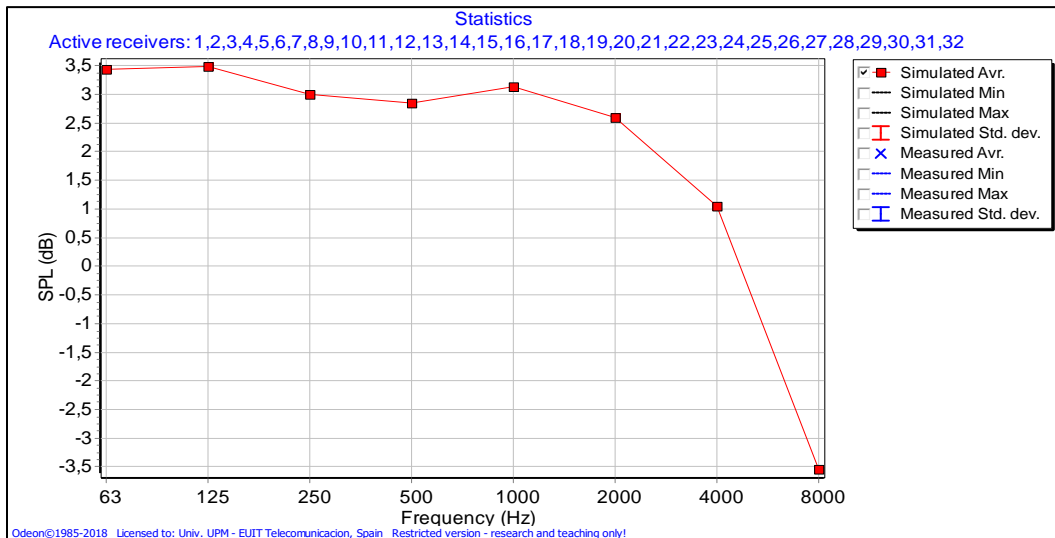


Figura 51. Valores simulados promedio de G de la sala.

Tabla 24. Valores simulados promedio de G de la sala.

Parámetro	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
G (dB)	3,40	3,50	3,00	2,80	3,10	2,60	1,00	-3,50

De la tabla 24 se extrae un  $G_{mid}$  de 2,95 dB, por lo que no se cumple el criterio establecido. Se está por debajo de lo recomendado, lo que indica que el grado de amplificación de la sala es peor de lo esperado en una sala de conciertos.

### 10.7. Eficiencia lateral (LF)

Habitualmente se emplea el valor medio de los LF de las bandas de octava de 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz y 1 kHz, pasando a denominarse  $LF_{E4}$ . Se ha de cumplir que el  $LF_{E4}$  de la sala sea mayor o igual a 0,190. Además, cuanto mayor sea este valor mayor grado de espacialidad del sonido se tendrá [13].

El valor promedio de todas las posiciones de micrófono empleadas que proporciona ODEON para cada banda de octava se presenta en la figura 52 gráficamente y en la tabla 25 analíticamente.

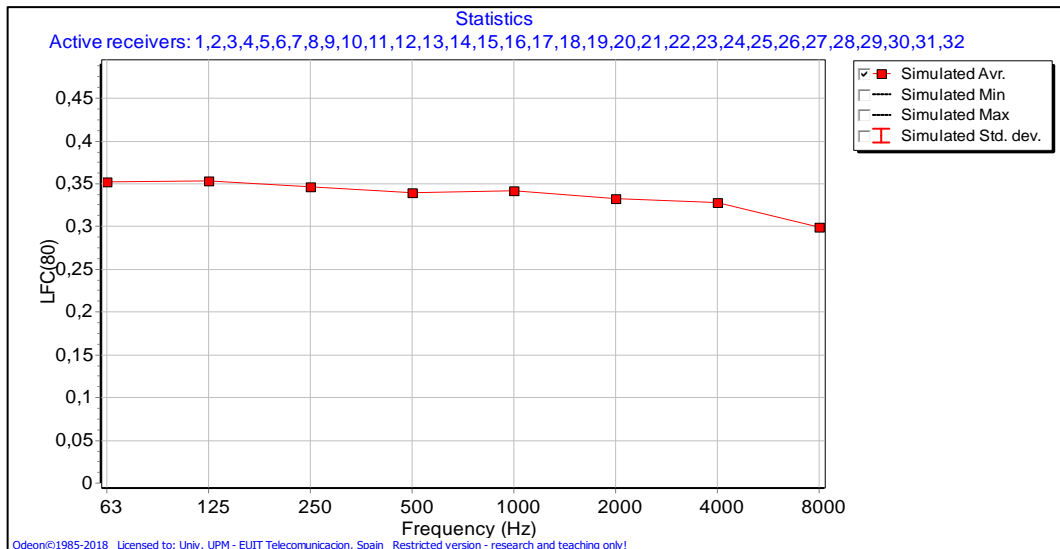


Figura 52. Valores simulados promedio de LF de la sala.

Tabla 25. Valores simulados promedio de LF de la sala.

Parámetro	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
LF	0,352	0,354	0,347	0,340	0,342	0,333	0,328	0,299

Haciendo uso de los datos que proporciona la tabla anterior, se calcula  $LF_{E4}$ , y el resultado obtenido es 0,346. Como es superior a 0,190 el criterio establecido se cumple.

## 10.8. Índice de transmisión del habla (STI) y %ALCons

Para conocer la inteligibilidad de la sala se van a calcular tanto STI como %ALCons. Como se ha comentado ya, el análisis se efectúa en dos escenarios diferentes: el primero de ellos con una persona hablando de viva voz en la parte anterior del escenario, cerca del público, y el segundo con el sistema de refuerzo sonoro del teatro funcionando.

Para obtener correctamente la inteligibilidad de la sala, se introducen en ODEON los valores medidos in situ del ruido de fondo para cada banda de octava. Puesto que la medición del ruido se realizó durante veinte minutos en los cuales no se guardó silencio absoluto (se continuó realizando otras medidas) se va a estimar el ruido mediante el percentil 95<sup>7</sup>. En la tabla 26 se presentan los datos de tal percentil en cada banda de frecuencia.

<sup>7</sup> El percentil 95 hace referencia al nivel superado en cada banda de octava durante el 95 % del tiempo transcurrido en la medición.

Tabla 26. Niveles de ruido de fondo obtenido aplicando el percentil 95.

Percentil 95 del nivel de ruido de fondo, $L_{Zeq95}$ (dB)							
63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 k Hz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
41,0	28,9	23,8	17,8	13,1	12,5	12,8	15,6

### 10.8.1. Persona hablando a viva voz

Para simular el habla humana, se dispone, en la simulación, una fuente sonora de la base de datos de ODEON. El nombre concreto del archivo que la contiene es BB93\_RAISE\_NATURAL.S08, y se añade en la posición de fuente 1 radiando hacia el público. Esta fuente incorpora las características tanto de potencia como de directividad de una persona hablando en voz alta. En la figura 53 se añaden las propiedades de la fuente.

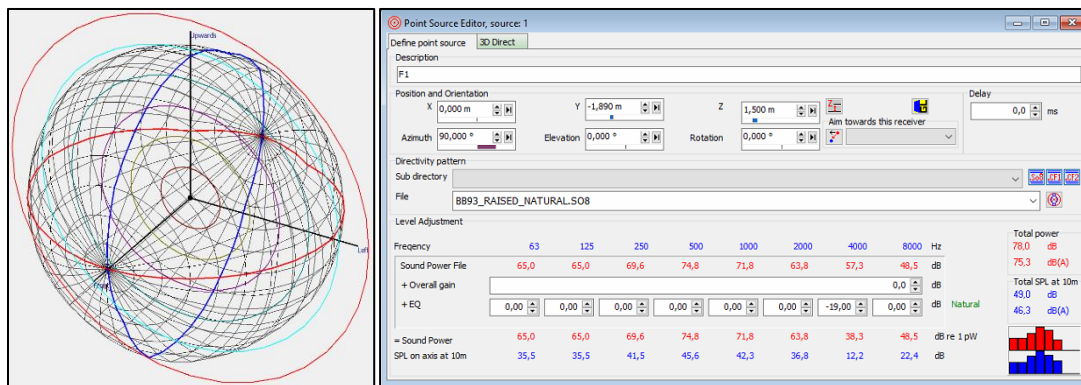


Figura 53. Fuente sonora BB93\_RAISE\_NATURAL.S08 en ODEON. Izq: directividad (1 kHz); dcha: configuración.

Tras la simulación empleando todas las posiciones de micrófono (M1 - M32), el resultado obtenido pasa STI y %ALCons (valor promedio y máximo y mínimo) se encuentra en la tabla 27.

Tabla 27. Valores simulados de STI y %ALCons de la sala con una persona hablando a viva voz.

Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo
STI	0,5	0,57	0,65
%ALCons	5,7	8,7	12,3

Según los criterios de STI y %ALCons (véase 4.14 y 4.15), la inteligibilidad del habla en promedio en la sala con una persona hablando en voz alta en el proscenio es aceptable (0,57 está en el intervalo de 0,45 a 0,60), al igual que el porcentaje de pérdida de consonantes (el promedio 8,7% está incluido en el intervalo de 5,3% a 11,4%).

### 10.8.2. Sistema electroacústico

El sistema electroacústico del teatro cuenta con dos arrays lineales colgados del techo a la altura de la boca del escenario. También, se incluyen dos grandes altavoces para reproducción de baja frecuencia y, en el borde del suelo del escenario hay instaladas otras seis cajas más pequeñas, para reforzar medias y altas frecuencias. En la figura 54 se indican los diferentes componentes comentados rodeados en blanco.

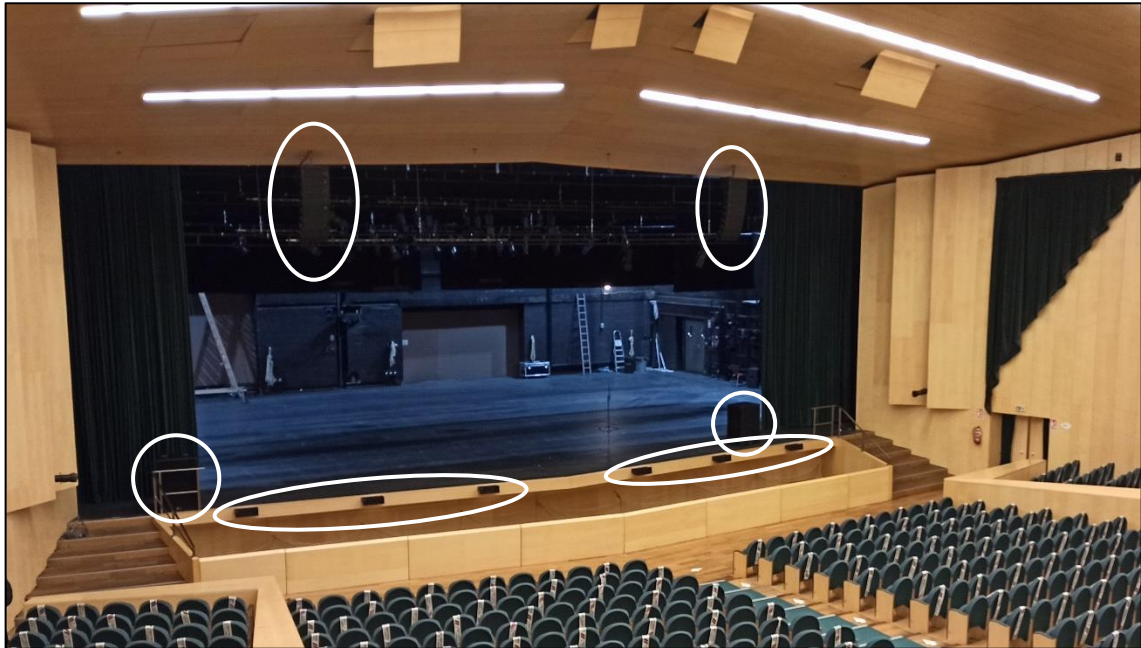


Figura 54. Sistema electroacústico del Teatro Auditorio Buero Vallejo de Guadalajara.

En ODEON se puede trabajar con fuentes que tengan las características de un determinado altavoz, caja de altavoces o, incluso, fuentes que simulen un array lineal, como es el caso.

Se utilizan dos archivos en formato CLF (*Common Loudspeaker Format*) que se emplean en la configuración de las fuentes, de los cuales se obtienen los datos de potencia y directividad. Para generar los arrays lineales y los altavoces que están junto al suelo del escenario, se emplea el módulo de array LS8800 de la casa *Superior Listening Systems* [23] (archivo SLS\_LS8800.CF2). En el caso de los *subwoofers*, se utiliza el modelo 21S-SUB de la casa *D&b Audiotechnik* [24] (archivo d&b audiotechnik-21S-SUB.CF2).

Cada array lineal está formado por nueve módulos, dispuestos en forma de jota. En la figura 55 se ilustra la configuración y la directividad del array. La potencia de cada caja se incluye en la figura 56, que es la misma que para las cajas que se disponen, del mismo modelo, en el suelo del escenario. También se añade la directividad de dicho módulo funcionando de manera individual.

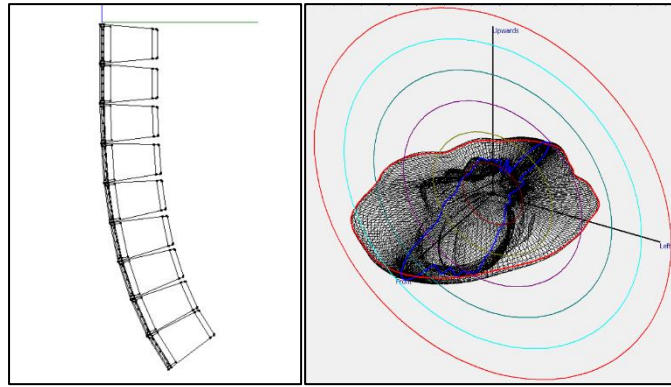


Figura 55. Izq: montaje del array lineal en jota; dcha: directividad del array lineal (1 kHz).

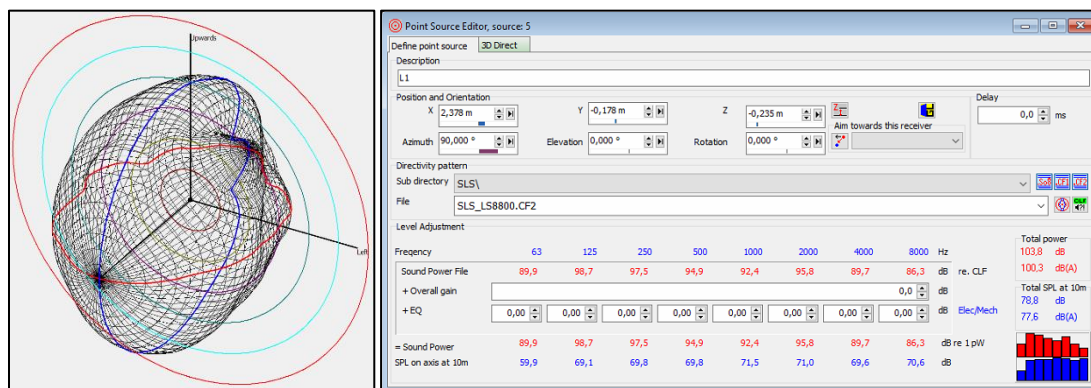


Figura 56. Fuente sonora SLS\_LS8800.CF2 en ODEON. Izq: directividad (1 kHz); dcha: configuración.

Para completar la información sobre el posicionamiento de los arrays, se adjunta la figura 57, en la que se muestra la configuración en ODEON de cada caja.

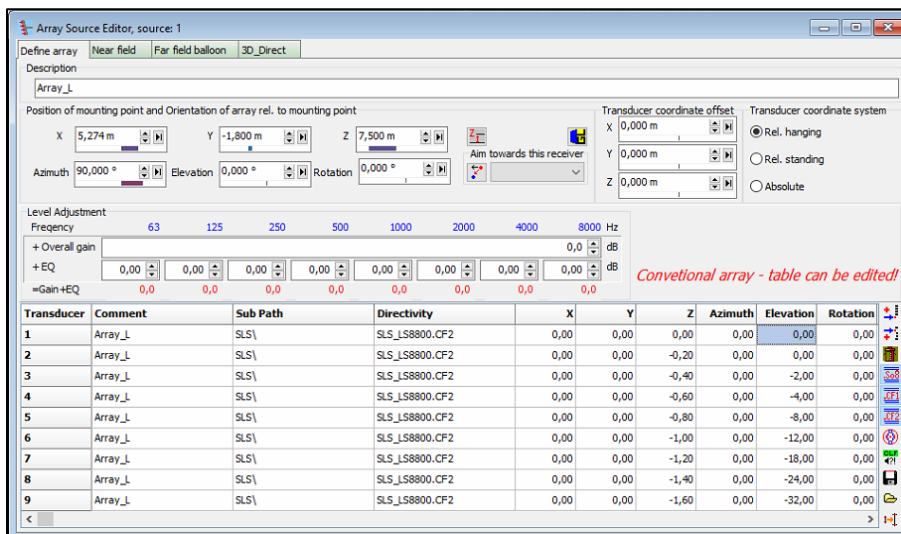


Figura 57. Configuración del array izquierdo situado en el modelo de la sala.

La distancia vertical entre cajas es de 0,2 m, y la coordenada es relativa al punto de anclaje del array, cuyas coordenadas se encuentran en la parte superior. En la columna *Elevation*, aparece la rotación aplicada a los diferentes módulos. El array derecho, se encuentra posicionado de manera simétrica al izquierdo, que es el que se muestra en la figura 57 respecto al eje Y.

Todo el sistema de refuerzo sonoro representado por el conjunto de fuentes sonoras definidas en ODEON, se muestra en la figura 58 (fuentes en color rojo).

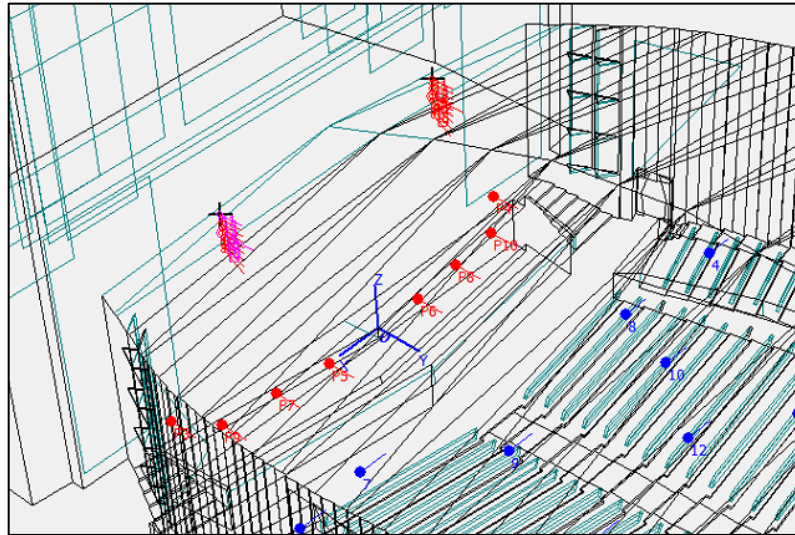


Figura 58. Sistema electroacústico del teatro en ODEON.

Realizando la simulación en ODEON con todo el conjunto de altavoces funcionando, se obtiene un valor promedio (posiciones de micrófono de la M1 a la M32) de STI y %ALCons que se muestra en la tabla 28, junto con los valores máximos y mínimos.

Tabla 28. Valores simulados de STI y %ALCons de la sala con el sistema electroacústico.

Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo
STI	0,57	0,62	0,74
%ALCons	3,7	6,7	8,6

Utilizando el sistema de refuerzo sonoro de la sala, se consiguen valores de STI y de %ALCons sustancialmente mejores. En cuanto al calificativo que le corresponde según el criterio de evaluación de STI y %ALCons, sigue siendo una inteligibilidad aceptable (de 5,3% a 11,4%) para %ALCons, aunque la mejora hace que en promedio pase de estar muy cerca de considerarse pobre, a estar muy cerca de considerarse como buena. En el caso del STI, el aumento supone una inteligibilidad del habla promedio buena (intervalo de 0,60 a 0,75).



## 11. Concha acústica

Tras analizar la sala acústicamente, a pesar de ser un a sala multidisciplinar, el recinto parece funcionar mejor para llevar a cabo actividades musicales. Los valores promedio de los parámetros acústicos estudiados se encuentran dentro de los valores recomendados para sala de conciertos. Con la intención de favorecer la acústica del teatro para este tipo de eventos, se propone el diseño de una concha acústica.

Una concha acústica es una estructura, normalmente desmontable, cuya función principal es evitar que la energía sonora que se emite desde el escenario hacia los laterales y hacia atrás se pierda. La absorción de bambalinas y telones, y el gran volumen y distancia entre paredes y techo de la caja escénica del teatro suponen una pérdida de energía sonora considerable. En cambio, al colocar la concha, se crean primeras reflexiones que refuerzan la escucha de los propios músicos y de la zona anterior de la platea.

Como consideraciones de diseño, cabe destacar las siguientes:

- El volumen de la concha debe formar parte del mismo espacio acústico de la sala.
- Las paredes laterales han de tener forma de abanico, es decir, la anchura entre paredes debe ir de mayor a menor desde la boca del escenario al final de la concha respectivamente.
- El techo de la estructura debe tener inclinación, de modo que la altura de la concha acústica disminuya desde la boca del escenario hasta la pared trasera de la misma.
- Las inclinaciones de paredes laterales y techo, se recomienda que sean de entre 10° y 15°, valores favorables para generar primeras reflexiones útiles, tanto para los músicos como para la parte anterior de la platea [13].

### 11.1. Diseño de la estructura

Teniendo en cuenta las indicaciones anteriores, se diseña la concha acústica en SketchUp, sobre el modelo geométrico tridimensional ya creado del teatro. Se eliminan de éste las superficies que componían la caja escénica, como las paredes laterales, el techo, las bambalinas y el telón. Partiendo de la boca del escenario, se continúa el volumen de la sala como se puede apreciar en la figura 59. Las paredes de la concha se estrechan, al igual que su techo, el cual continúa con la tónica a dos aguas que presenta el techo de la sala en la zona de audiencia.

Las medidas concretas de la estructura se pueden consultar en el Anexo IV, que incluye los planos del diseño de la concha acústica.

En cuanto al material con el que se cubre las superficies de la concha, se opta por continuar con la uniformidad de materiales en la sala. Se propone, por tanto, utilizar madera contrachapada de okume de un espesor de 12 mm en los distintos módulos que componen la concha desmontable.

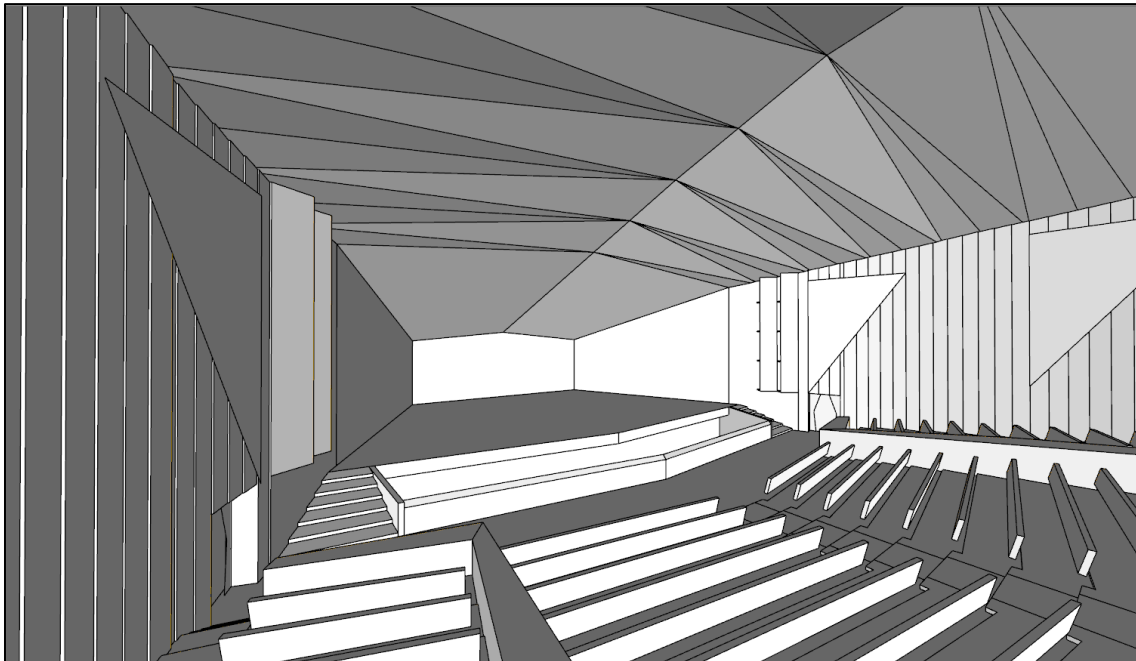


Figura 59. Vista de la concha acústica diseñada en el nuevo modelo 3D del teatro en SketchUp.

El nuevo modelo geométrico tridimensional que incorpora la concha se importa a ODEON igual que se hizo con el modelo original (figura 60). Se comprueba que el volumen esté correctamente cerrado, y se comienza a trabajar sobre él, preparándolo para poder realizar simulaciones.

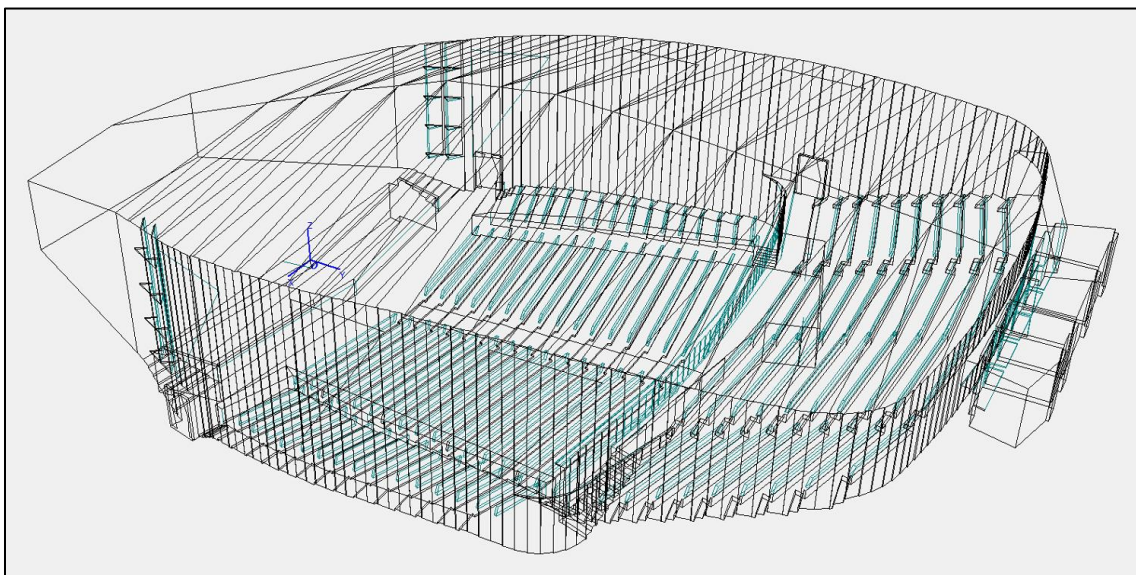


Figura 60. Modelo 3D con concha acústica de SketchUp importado a ODEON.

Al igual que en casos anteriores, hay que realizar una asignación de materiales a cada una de las superficies que conforman la geometría. Los materiales son los mismos que se han empleado en el modelo original ajustado, eliminando lógicamente aquellos utilizados en la caja escénica e incluyendo un material para la concha acústica. Puesto que el material elegido para la concha acústica en su diseño

ha sido madera contrachapada, el material aplicado en ODEON a tal estructura posee los mismos coeficientes de absorción que el de las paredes de la sala. En la tabla 29 se presentan los materiales de este nuevo modelo.

Tabla 29. Materiales del modelo con concha acústica.

Superficie	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
TECHO 1	0,25	0,25	0,20	0,12	0,08	0,05	0,04	0,04
TECHO 2	0,22	0,22	0,17	0,11	0,06	0,05	0,04	0,04
TECHO 3	0,19	0,19	0,14	0,09	0,05	0,04	0,04	0,04
SUELO ESCENARIO	0,15	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,04	0,04
SUELO AUDIENCIA	0,15	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07	0,07
BUTACAS	0,41	0,41	0,60	0,77	0,88	0,82	0,70	0,70
PAREDES	0,28	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11	0,11
ESTRUCTURA DIFRACTANTE	0,28	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11	0,11
CORTINAS	0,15	0,15	0,35	0,55	0,73	0,70	0,65	0,65
ALFOMBRA VERDE	0,08	0,08	0,27	0,39	0,34	0,48	0,63	0,63
ESTORES CABINAS CONTROL	0,03	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35	0,35
INTERIOR CABINAS CONTROL	0,20	0,20	0,80	0,85	0,80	0,60	0,50	0,50
CONCHA ACÚSTICA	0,28	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11	0,11

A continuación, se incorpora la fuente omnidireccional en la posición de fuente 1 con su respectiva configuración, y se añaden todas las posiciones de micrófono, de la M1 a la M32 del mismo modo que para el modelo con caja escénica (véase 9.2).

Antes de comenzar las mediciones, es necesario definir en la lista de trabajos de ODEON la respuesta multipunto, para obtener valores promedio de los parámetros que se obtengan. Además, la configuración del cálculo de ODEON (rayos tardíos, tempranos, orden de transición, etc.) es la misma que se ha establecido en el apartado 9.5.2.

Ahora, el software está listo para calcular, por lo que, igual que se ha hecho con el modelo acústico virtual ajustado, se va a analizar la calidad acústica del nuevo modelo, que incorpora la concha acústica.

## 11.2. Calidad acústica de la sala con la concha acústica diseñada

En este subapartado se procede de la misma manera que para el análisis de la calidad de la sala original llevado a cabo en el apartado 10 de este documento. Se obtienen los valores promedio de diferentes parámetros acústicos, que caracterizan la sala, y se comparan con los intervalos óptimos para representaciones teatrales y salas de conciertos.

Se debe mencionar que, la concha acústica se utiliza para actividades de carácter musical, por lo que, en principio, la comparación respecto a los valores óptimos para teatro no va a ser favorable. A pesar de ello, se calculan parámetros como  $D_{50}$  o STI, habituales en el análisis de la calidad para representaciones teatrales, para apreciar el efecto de la concha acústica, observando la diferencia respecto a los resultados de la sala original.

### 11.2.1. Tiempo de reverberación (RT)

Los intervalos óptimos para el  $RT_{mid}$  han cambiado respecto a la sala anterior, puesto que al eliminar la caja escénica e incorporar la concha acústica el volumen total de la sala es menor. Ese nuevo volumen ronda los  $9200\text{ m}^3$ , lo que significa tener un intervalo óptimo para teatro y conferencias entre 0,94 y 1,45 s, mientras que, para sala de conciertos, el intervalo óptimo es de 1,42 a 2,01 s.

Los valores promedio de  $T_{20}$  simulado son los que se presentan en la figura 61 de manera gráfica y en la tabla 30 de forma analítica. El  $RT_{mid}$  calculado a partir de esos datos es 1,65 s, que encaja dentro del intervalo para sala de conciertos, como se esperaba.

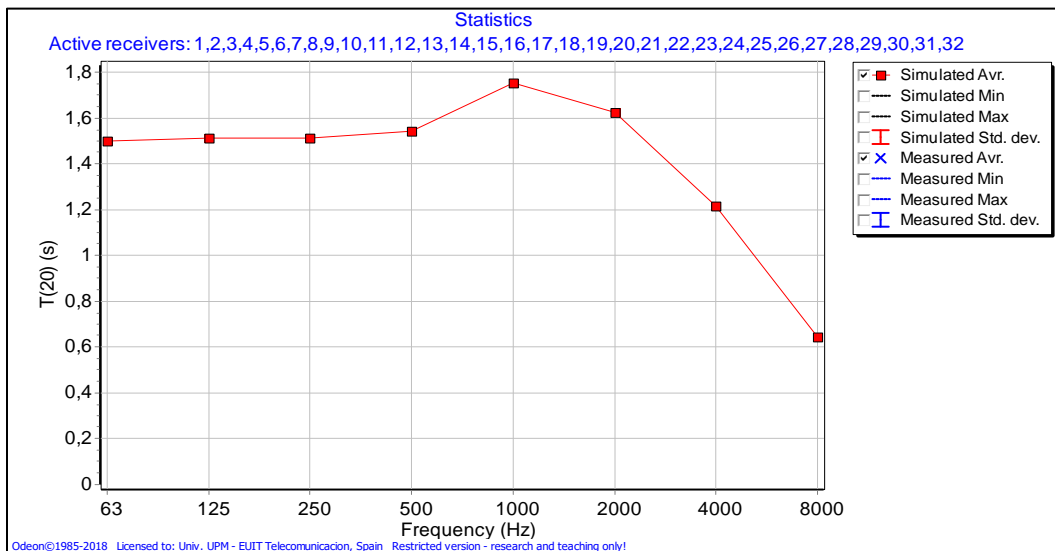


Figura 61. Valores simulados promedio de  $T_{20}$  de la sala con concha acústica.

Tabla 30. Valores simulados promedio de  $T_{20}$  de la sala con concha acústica.

Parámetro	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
$T_{20}$ (s)	1,50	1,51	1,51	1,54	1,76	1,63	1,22	0,64

El tiempo de reverberación, ahora es menor a baja frecuencia, puesto que la caja escénica con sus bloques de hormigón era menos absorbente en baja frecuencia que el contrachapado de la concha acústica. Sin embargo, a frecuencias medias (concretamente en la banda de 1 kHz) el tiempo de reverberación se ha incrementado, debido a la energía reflejada por la concha, que antes, a esas frecuencias medias, era absorbida por bambalinas y telones. Casualmente, el  $RT_{mid}$  coincide con el de la sala original.

### 11.2.2. EDT (Early Decay Time)

Partiendo del dato de  $RT_{mid}$  anterior, para representaciones teatrales el intervalo óptimo de  $EDT_{mid}$  está entre 0,99 a 1,23 s ( $0,6RT_{mid} - 0,75RT_{mid}$ ) y para salas de concierto entre 1,48 y 1,65 s ( $0,9RT_{mid} - RT_{mid}$ ).

En la figura 62 y tabla 31 se incorporan los valores promedio del EDT en la sala con concha acústica. Si se calcula  $EDT_{mid}$ , se obtiene un valor de 1,64 s, dentro de lo recomendado para sala de conciertos, aunque cerca del límite superior.

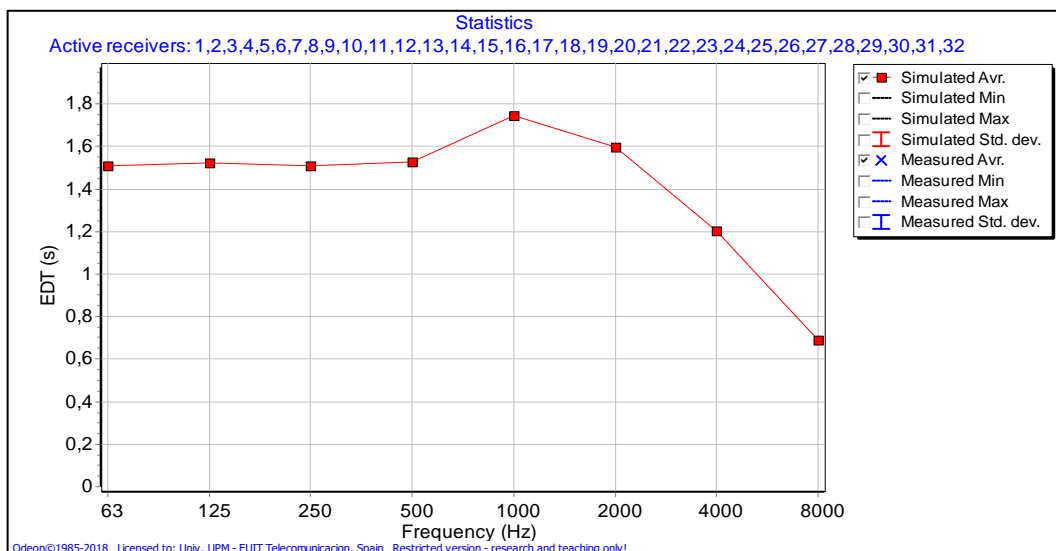


Figura 62. Valores simulados promedio de EDT de la sala con concha acústica.

Tabla 31. Valores simulados promedio de EDT de la sala con concha acústica.

Parámetro	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
EDT (s)	1,51	1,52	1,51	1,53	1,74	1,6	1,21	0,69

El EDT sigue la misma tendencia que el  $T_{20}$ , disminuyendo en baja frecuencia y aumentando en esa banda de 1 kHz respecto al EDT de la sala original, debido a lo comentado recientemente de la influencia de la caja escénica. En este caso, el  $EDT_{mid}$  (1,64 s) es ligeramente superior al de la sala con caja escénica (1,62 s).

### 11.2.3. Calidez acústica (BR) y brillo (Br)

El cálculo de BR a partir de los valores promedio de  $T_{20}$  da como resultado un valor de BR de 0,92. Debido a la caída del tiempo de reverberación en baja frecuencia, este parámetro se encuentra dentro del intervalo recomendado para teatro (entre 0,90 y 1,30), a diferencia de lo que ocurría en la sala sin concha, que superaba por poco el rango de valores para conciertos.

En cuanto al brillo (Br), para la sala con concha vale 0,86, superior al 0,82 obtenido en la sala original, y, por supuesto, por encima del 0,80 establecido como mínimo a superar o igualar.

A la vista de estos resultados, la concha acústica resta algo de calidez a la sala (aunque es cierto que la original era cálida en exceso), pero la hace más brillante.

### 11.2.4. Claridad de la música ( $C_{80}$ )

Los valores recomendados para este parámetro van de -2 a 4 dB. Sólo se evalúa para salas de conciertos, y para las bandas de 125 Hz a 4 kHz. En cualquier caso, estas bandas no se están teniendo en cuenta a lo largo de la memoria (véase 9.6.3). En la figura 63 y la tabla 32 se representan los valores promedio simulados del parámetro en cuestión.

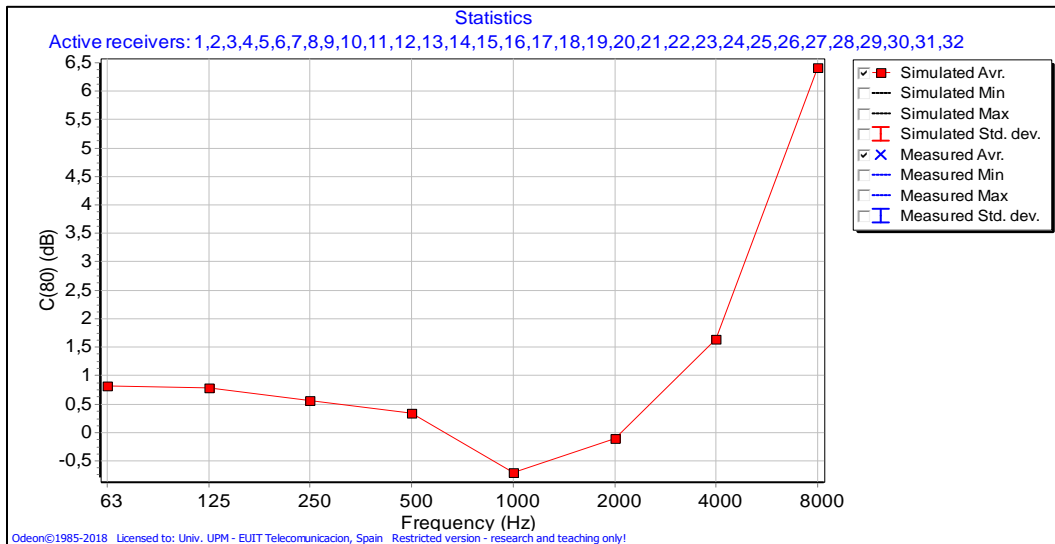


Figura 63. Valores simulados promedio de  $C_{80}$  de la sala con concha acústica.

Tabla 32. Valores simulados promedio de  $C_{80}$  de la sala con concha acústica.

Parámetro	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
$C_{80}$ (dB)	0,8	0,8	0,6	0,3	-0,7	-0,1	1,6	6,4

Como se puede advertir, la claridad de la música se encuentra para todas las bandas de octava dentro del intervalo recomendado. En la banda de 1 kHz, al haber aumentado el tiempo de reverberación, la claridad ha disminuido, pero aun así sigue siendo aceptable.

### 11.2.5. Definición ( $D_{50}$ )

Para una inteligibilidad de palabra adecuada, se requiere una definición mayor que 0,5. La concha ha provocado un aumento de energía sonora en la sala, ya que no se pierde ésta en la caja escénica. La definición relaciona la energía que llega al oyente en los primeros 50 ms y la energía total que le llega al mismo. Entonces, al haber aumentado la energía total, el cociente disminuye, de ahí los menores valores promedio respecto a los obtenidos en la sala sin concha.

La figura 64 ilustra  $D_{50}$  en las distintas bandas de octava, y la tabla 33 informa sobre los valores concretos, los cuales no superan el 0,5 requerido para actividades teatrales. Este resultado no es

preocupante para esta sala, ya que al incluir la concha se está pensando en la funcionalidad de sala de conciertos, y  $D_{50}$  es un parámetro pensado para evaluar la calidad de la sala como teatro.

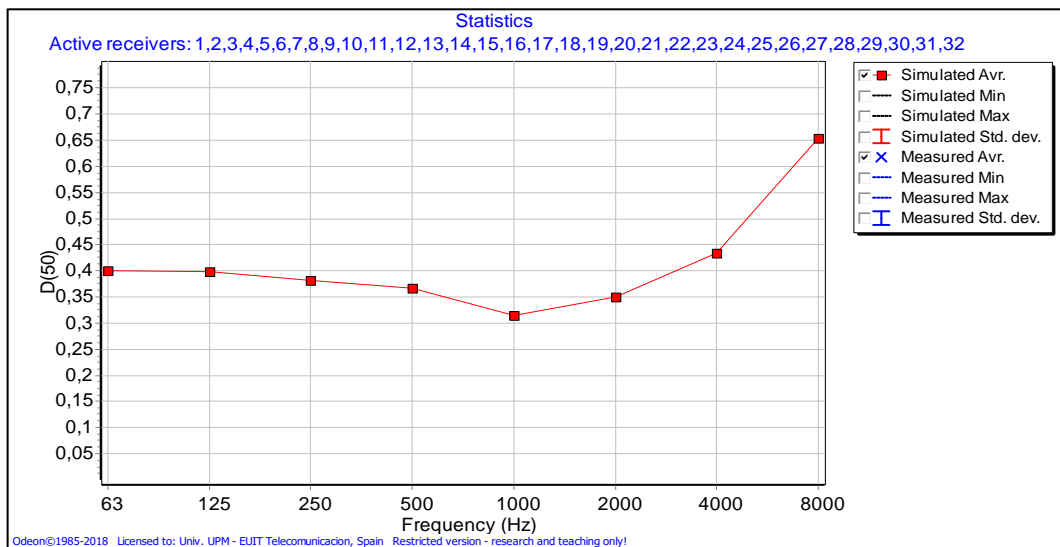


Figura 64. Valores simulados promedio de  $D_{50}$  de la sala con concha acústica.

Tabla 33. Valores simulados promedio de  $D_{50}$  de la sala con concha acústica.

Parámetro	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
$D_{50}$	0,40	0,40	0,38	0,37	0,32	0,35	0,43	0,65

### 11.2.6. Fuerza sonora (G)

El intervalo recomendado por Beranek para la sala vacía de  $G_{mid}$  es de 4,0 a 5,5 dB. En la figura 65 y tabla 34 aparecen los valores promedios de G simulados por octavas. Empleando esos datos, se halla  $G_{mid}$ , que vale 5,20 dB, cumpliendo con el criterio de Beranek.

Al emplear la concha acústica, se consigue un grado de amplificación mayor producido por el recinto. En cambio, en la sala original, con caja escénica, el valor resultante de G era 2,95 dB, que no cumplía con lo recomendado.

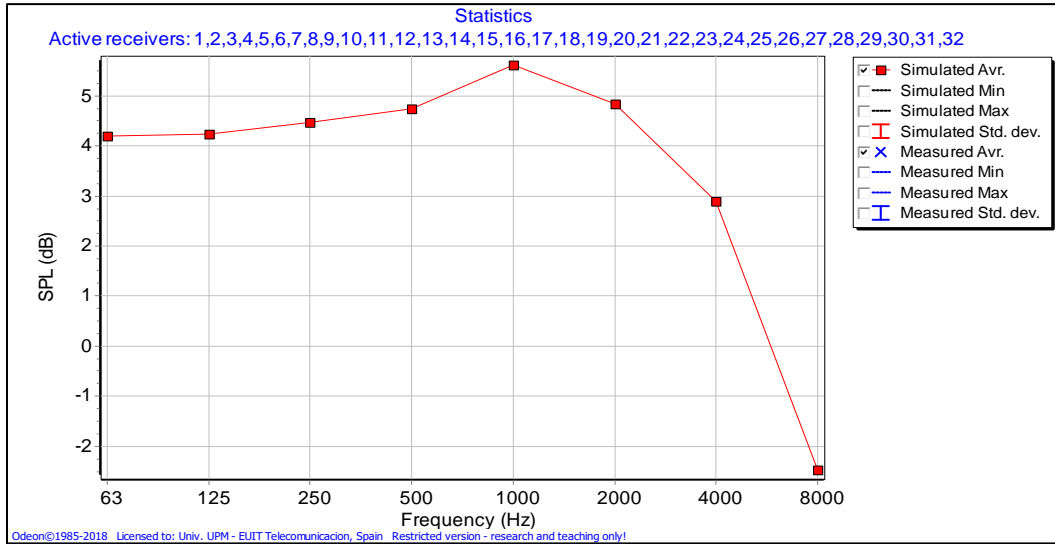


Figura 65. Valores simulados promedio de G de la sala con concha acústica.

Tabla 34. Valores simulados promedio de G de la sala con concha acústica.

Parámetro	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
G (dB)	4,20	4,20	4,50	4,80	5,60	4,80	2,90	-2,50

### 11.2.7. Eficiencia lateral (LF)

Por lo general, se utiliza el valor medio de los LF de las bandas de octava de 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz y 1 kHz. Si se calcula tal promedio, llamado  $LF_{E4}$ , con los datos de la tabla 35 (representados gráficamente en la figura 66) el valor resultante es de 0,231. La eficiencia lateral es menor que en el caso de la sala con caja escénica. Consecuentemente la espacialidad del sonido también se ve disminuida, pero, aun así, el criterio de igualar o superar 0,190 se cumple.

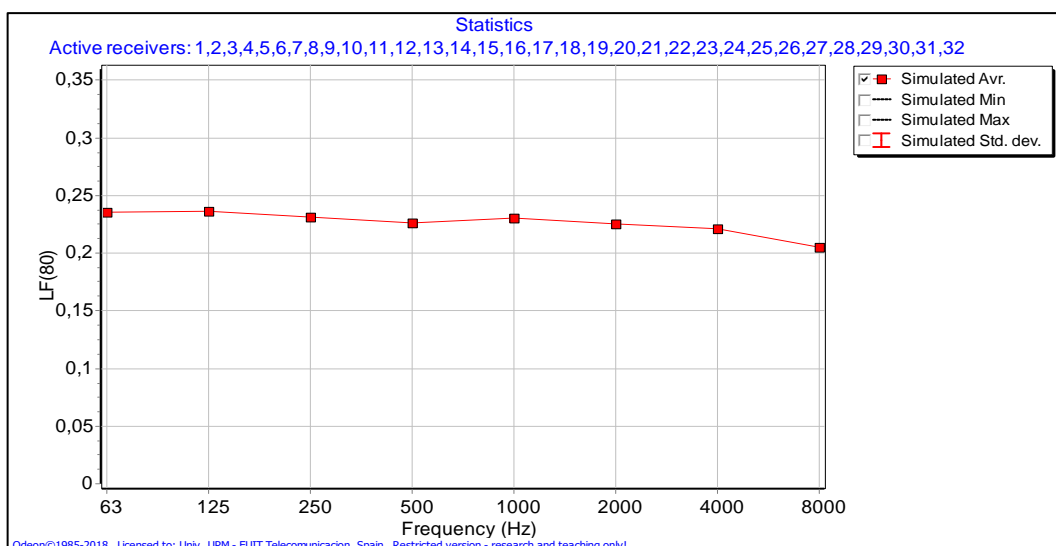


Figura 66. Valores simulados promedio de LF de la sala con concha acústica.

Tabla 35. Valores simulados promedio de LF de la sala con concha acústica.

Parámetro	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
LF	0,235	0,237	0,231	0,226	0,231	0,226	0,222	0,205

### 11.2.8. Índice de transmisión del habla (STI) y %ALCons

Como se ha hecho para la sala original simulada, se analiza tanto STI como %ALCons en dos situaciones diferentes: una con una fuente que simula una persona hablando en voz alta, y la otra utilizando el sistema electroacústico del teatro (para más detalle véase 10.8). Por supuesto, para evaluar la inteligibilidad se vuelve a tener en cuenta el ruido de fondo de la sala.

- **Persona hablando a viva voz:** el STI promedio obtenido en esta situación en ODEON es 0,53, considerado como aceptable (intervalo 0,45 - 0,60), y el %ALCons promedio simulado es de 10,4%, también de valoración aceptable (intervalo 5,3% - 11,4%). En la tabla 36 se incorporan los datos comentados.

Tabla 36. Valores simulados de STI y %ALCons de la sala con concha acústica con una persona hablando a viva voz.

Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo
STI	0,47	0,53	0,60
%ALCons	7,4	10,4	14,3

- **Sistema electroacústico:** en esta situación de estudio, el STI promedio simulado es 0,59, mientras que el %ALCons también en promedio de todas las posiciones de micrófono es 7,8%. De nuevo los dos parámetros se califican como aceptables. En la tabla 37 se pueden apreciar los datos anteriores.

*Tabla 37. Valores simulados de STI y %ALCons de la sala con concha acústica con el sistema electroacústico.*

<b>Parámetro</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Promedio</b>	<b>Máximo</b>
<b>STI</b>	0,53	0,59	0,72
<b>%ALCons</b>	4,0	7,8	10,4

En comparación con la sala original, la inteligibilidad empeora. La razón principal vuelve a ser el aumento del tiempo de reverberación a frecuencias medias, que dificulta la comprensión. Se reitera que la concha acústica está pensada para utilizarse actividades musicales, por ello no es tan relevante el STI o el %ALCons. Aun así, la inteligibilidad es aceptable con la concha instalada.

## 12. Auralizaciones y rejillas

Este epígrafe trata sobre las herramientas empleadas para el estudio de las características acústicas que poseen determinados puntos concretos dentro de la sala, tanto de la original con caja escénica como de la que tiene instalada la concha acústica.

Para conseguir información acerca de los lugares específicos del recinto se utiliza la auralización (véase 4.17) y las rejillas. Estas últimas son una especie de mapa, en el que se divide la superficie del escenario y de la audiencia en pequeñas zonas de recepción, representando con colores los valores obtenidos en cada una de ellas.

Los resultados obtenidos de la aplicación de estos dos métodos se comentan en el apartado 13 de este documento.

### 12.1. Auralizaciones realizadas

Las auralizaciones permiten percibir la sensación de escucha de como si se estuviera físicamente en un lugar determinado del recinto. Se ha empleado tanto el modelo de la sala original como el de la sala con concha acústica para analizar las mismas posiciones en ambos y, más tarde, además de describir las características de cada punto estudiado, poder comparar los resultados entre modelos.

Se llevan a cabo pruebas utilizando señales grabadas en cámara anecoica, obtenidas de la base de datos de ODEON. Por un lado, se utilizan tres señales de manera individual: un hombre hablando en inglés, un fragmento instrumental de piano y otro fragmento de saxofón; por otro lado, se emplean quince señales de manera conjunta, que son grabaciones de diferentes instrumentos miembros de una orquesta. Los puntos concretos en los que se auraliza son el M1, M12, M24 y M29, y para el caso de la orquesta, se añade un punto de escucha adicional llamado MDirector, que recrea la posición del director de la orquesta subido en su plataforma. En la tabla 38 se incluyen las coordenadas de las posiciones.

Tabla 38. Posiciones de auralización.

Posición	X (m)	Y (m)	Z (m)
M1	9,560	5,604	1,200
M12	-2,074	12,770	1,200
M24	0,321	25,796	1,200
M29	-8,484	30,836	1,200
MDirector	0,000	-1,890	1,700

Cada posición de la tabla anterior se ve reflejada en la figura 67, en la que se ilustra cada punto en el que se auraliza. En la zona de audiencia aparecen coloreadas las butacas de la M1 a la M29, mientras que MDirector se ubica en el escenario.

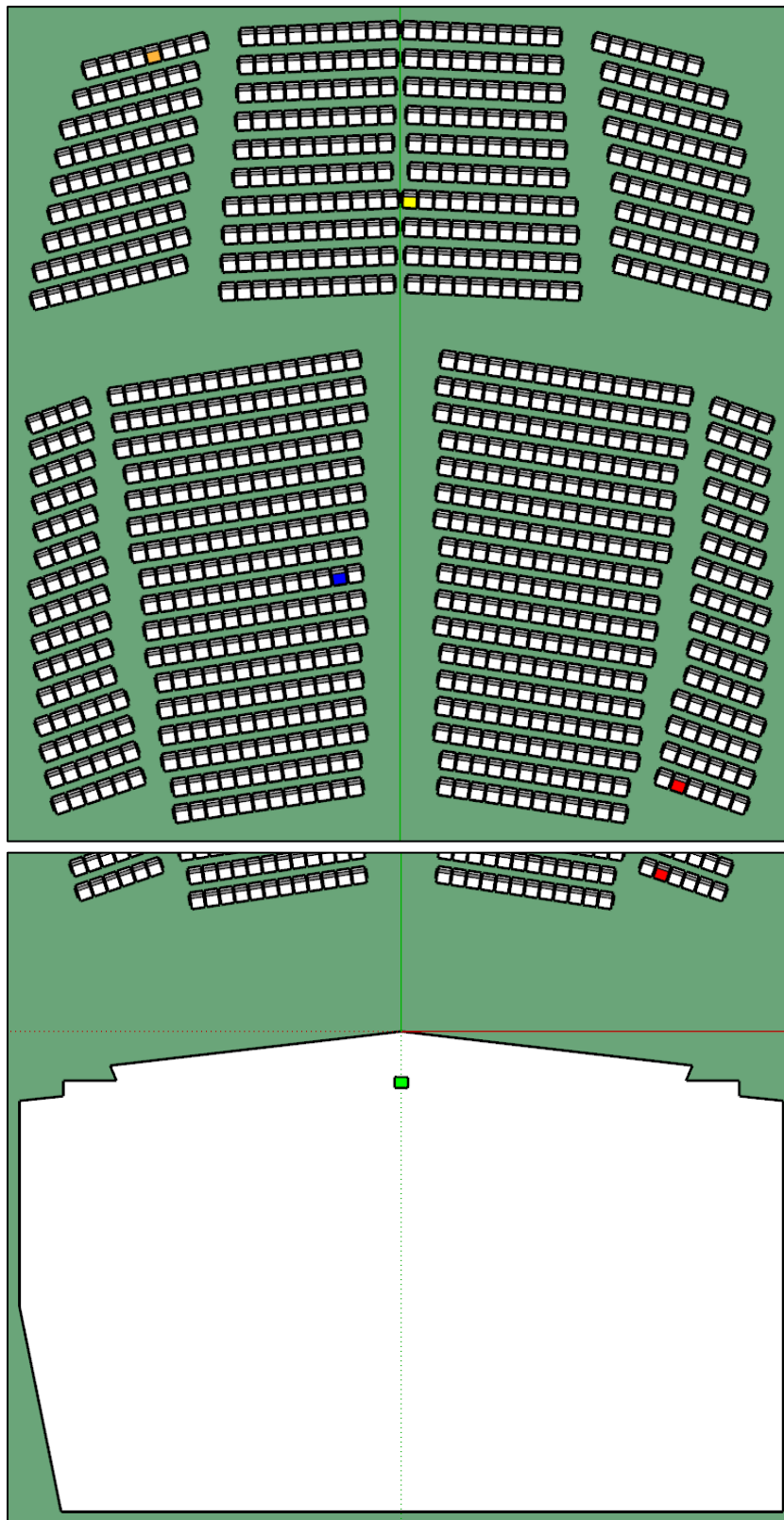


Figura 67. Posiciones de auralización.

En cuanto a la configuración del cálculo en ODEON, se establecen dos modelos (con y sin concha acústica) de alta resolución, en el que se aumenta el número de rayos tardíos (70048 para el modelo con

caja escénica y 100416 para el modelo con concha acústica) respecto a como se venía trabajando en apartados anteriores. Además, al igual que ocurre para realizar cálculos de inteligibilidad, para auralizar también se tiene en cuenta el ruido de fondo de la sala (véase 10.8). Las dos configuraciones aparecen en la figura 68.

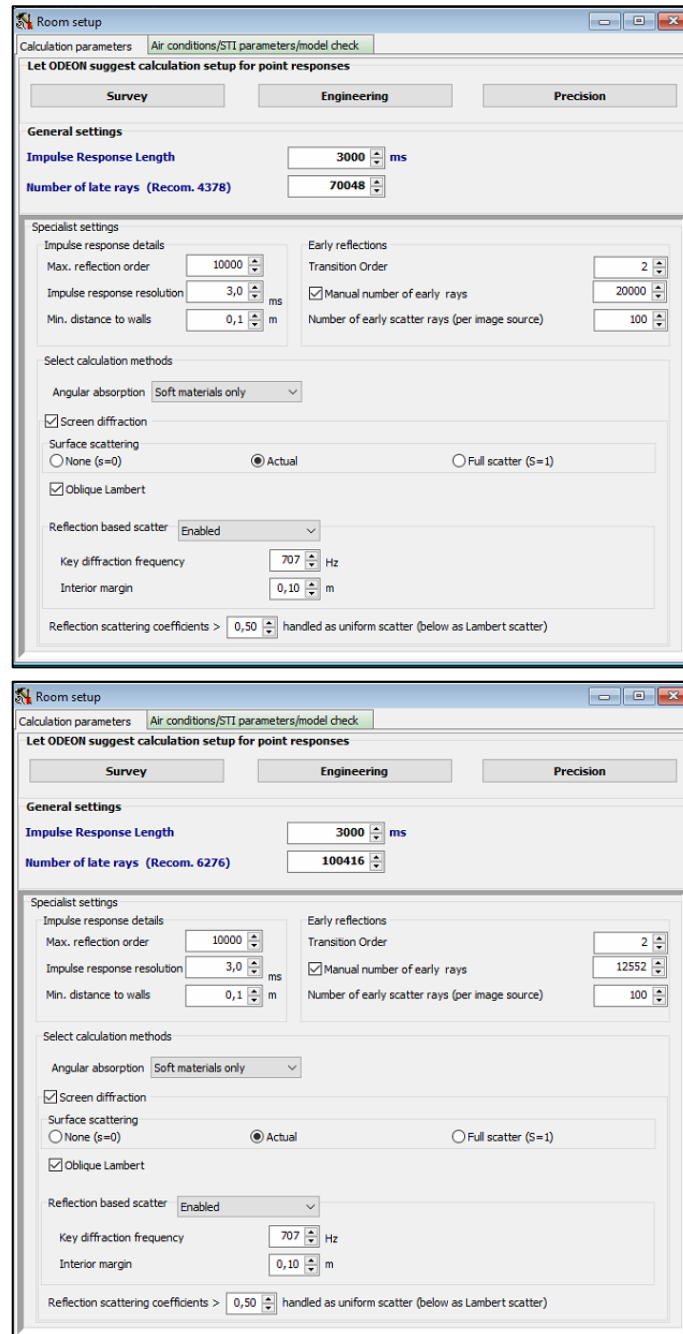


Figura 68. Configuraciones de cálculo de alta resolución para auralizaciones. Sup: modelo con caja escénica; inf: modelo con concha acústica.

### 12.1.1. Auralizaciones con grabaciones individuales

Como se ha comentado previamente, se utilizan tres grabaciones anecoicas de la base de datos de ODEON de forma independiente: un hombre hablando en inglés (archivo “Voice Sabine Short.wav”), un fragmento de piano de *Somewhere Over The Rainbow* (archivo “Piano Over the rainbow without intro Mic2.wav”) y un fragmento de jazz interpretado con saxofón (archivo “Alto\_sax Round midnight (Jazz).wav”). Las posiciones de oyente en las que se auraliza son la M1, M12, M24 y M29.

- **Hombre hablando en inglés:** la fuente sonora se coloca en el proscenio (coordenadas en metros:  $x = 0,000$ ;  $y = -1,890$ ;  $z = 1,500$ ) orientada hacia la audiencia. Los oyentes, a su vez, se orientan hacia la fuente sonora. Los archivos de auralización de esta señal se distinguen con la palabra Voz.
- **Fragmento de piano de *Somewhere Over The Rainbow*:** la fuente sonora se coloca más introducida en el escenario y a la altura de las cuerdas del piano (coordenadas en metros:  $x = 0,000$ ;  $y = -4,000$ ;  $z = 0,700$ ) orientada hacia la audiencia. Los oyentes, a su vez, se orientan hacia la fuente sonora. Los archivos de auralización de esta señal se distinguen con la palabra Piano.
- **Fragmento de jazz interpretado con saxofón:** la fuente sonora se coloca en el proscenio (coordenadas en metros:  $x = 0,000$ ;  $y = -1,890$ ;  $z = 1,500$ ) orientada hacia la audiencia. Los oyentes, a su vez, se orientan hacia la fuente sonora. Los archivos de auralización de esta señal se distinguen con la palabra Saxo.

Los archivos resultantes en formato WAV que se pueden escuchar (haciendo uso de auriculares) poseen un nombre autodescriptivo: primero se informa de la grabación utilizada, Voz, Piano o Saxo; después se incluye la posición y por último CE o CA, indicando si la auralización se ha hecho en la sala con Caja Escénica o con Concha Acústica.

### 12.1.2. Auralizaciones con conjunto de grabaciones

El conjunto de grabaciones se refiere concretamente a una orquesta. Se utilizan quince archivos grabados en cámara anecoica también proporcionados por ODEON, cada uno con la parte correspondiente de diferentes instrumentos. La obra interpretada es la Sinfonía nº 40 de Mozart.

Las posiciones de oyente en las que se auraliza son la M1, M12, M24, M29 y MDirector. Respecto a las fuentes sonoras, se añade una por cada grabación, por lo que se cuenta con quince en total. Se disponen siguiendo la organización habitual de la una orquesta sinfónica, orientadas hacia la audiencia. La figura 69 muestra la distribución de las fuentes sonoras numeradas que componen la orquesta en ODEON, y la tabla 39 cuenta con las coordenadas en las que está situado cada instrumento y con el nombre de los respectivos archivos en formato WAV para cada instrumento.

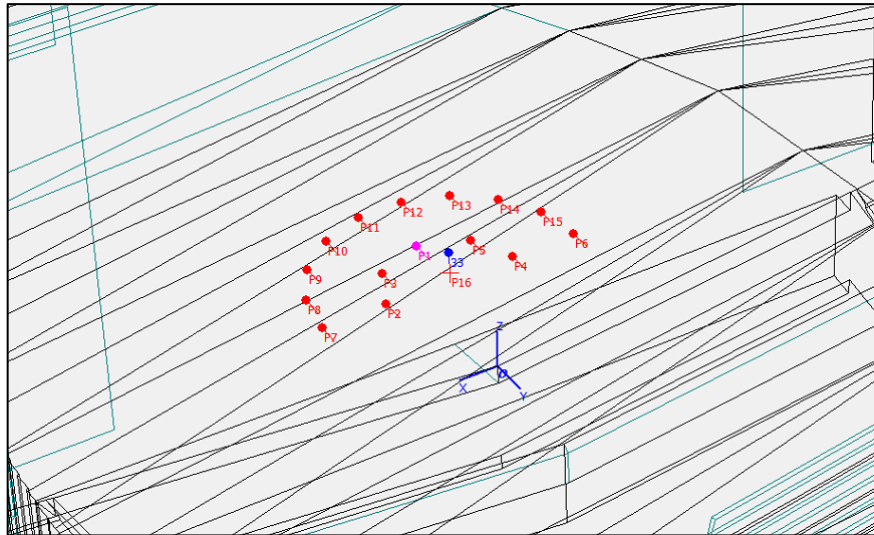


Figura 69. Fuentes sonoras distribuidas según la organización de una orquesta sinfónica (puntos rojos).

Tabla 39. Coordenadas de las fuentes sonoras que conforman la orquesta en ODEON.

Fuente	Instrumento	Nombre del archivo	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	violín 2	m_vl2.wav	0,000	-3,300	1,000
2	violín 1a	m_vl1a.wav	1,500	-1,890	1,000
3	violín 1b	m_vl1b.wav	1,061	-2,861	1,000
4	cello	m_vc.wav	-1,500	-1,890	1,000
5	viola	m_vla.wav	-1,061	-2,861	1,000
6	contrabajo	m_db.wav	-3,000	-1,890	1,000
7	clarinete 1	m_cl1.wav	3,000	-1,890	1,000
8	clarinete 2	m_cl2.wav	2,819	-2,916	1,000
9	trompa 1	m_hnB.wav	2,298	-3,818	1,000
10	trompa 2	m_hnG.wav	1,500	-4,488	1,000
11	flauta	m_fl.wav	0,521	-4,844	1,000
12	oboe 1	m_ob1.wav	-0,521	-4,844	1,000
13	oboe 2	m_ob2.wav	-1,500	-4,488	1,000
14	fagot 1	m_bsn1.wav	-2,298	-3,818	1,000
15	fagot 2	m_bsn2.wav	-2,819	-2,916	1,000

Tanto los oyentes situados en la audiencia como el oyente en la ubicación del director de la orquesta se orientan hacia la viola. La figura 69 muestra la distribución de las fuentes sonoras que componen la orquesta en ODEON.

La auralización final obtenida en cada punto, es una mezcla de las convoluciones realizadas con cada uno de los quince instrumentos, y el nombre de los archivos generados sigue la misma regla que para el apartado anterior: se identifican con la palabra Orquesta, después la posición de escucha y por último CE o CA.

## 12.2. Definición de rejillas en ODEON

Para visualizar cómo se reparten los valores de determinados parámetros acústicos en las diferentes partes de la sala, se configuran rejillas en ODEON. Estos mapas se definen en el software para los dos modelos de sala, con caja escénica y con concha acústica.

Se usa la misma disposición de fuentes sonoras con la que se ha trabajado para estudiar la calidad acústica (véase 9.2) y con modelos de baja resolución (4378 rayos tardíos para el modelo con caja escénica, 6276 para el modelo con concha acústica), cuya configuración aparece en la figura 70.

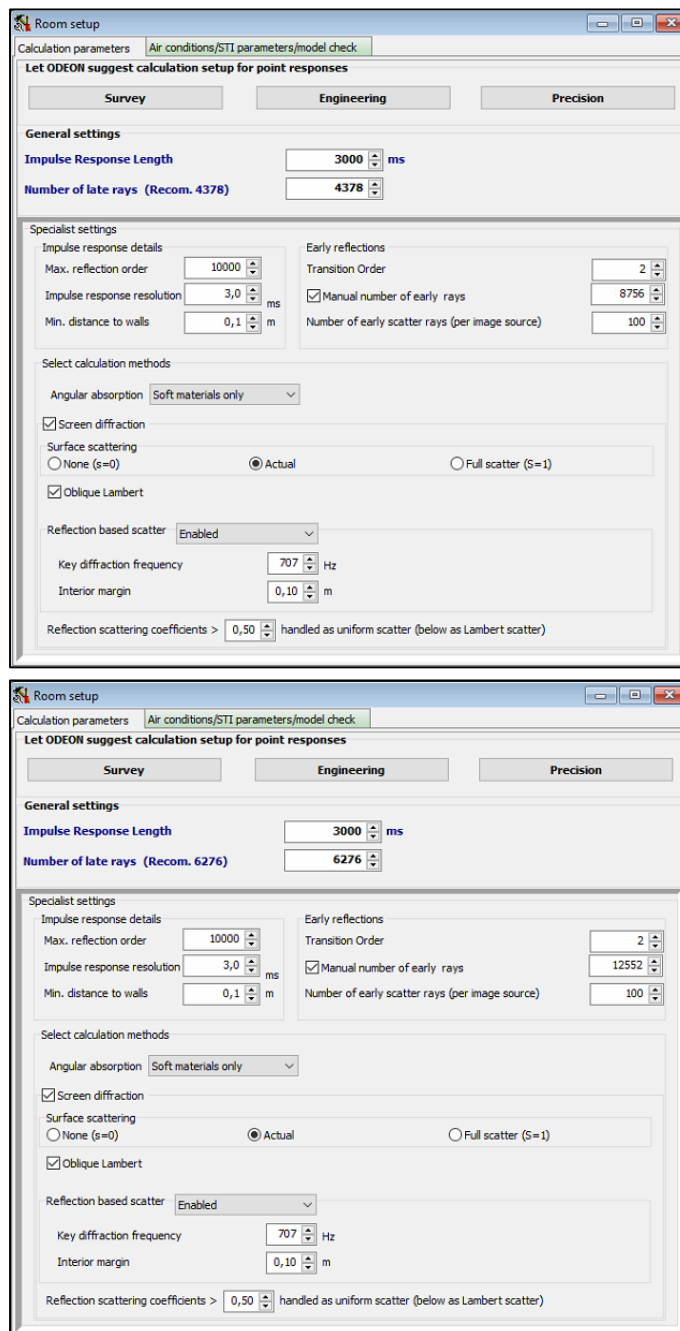


Figura 70. Configuraciones de cálculo de baja resolución para rejillas. Sup: modelo con caja escénica; inf: modelo con concha acústica.

La definición de la rejilla se ha llevado a cabo de manera que los receptores que cubren la sala se hallen distanciados entre ellos 1,2 m. La altura respecto a la superficie del suelo del conjunto de receptores es la del oído humano sentado, 1,2 m. En la figura 71 se puede apreciar la rejilla para las dos salas estudiadas. Cada cuadro de colores es la superficie representada por el receptor que se ubica en su centro.

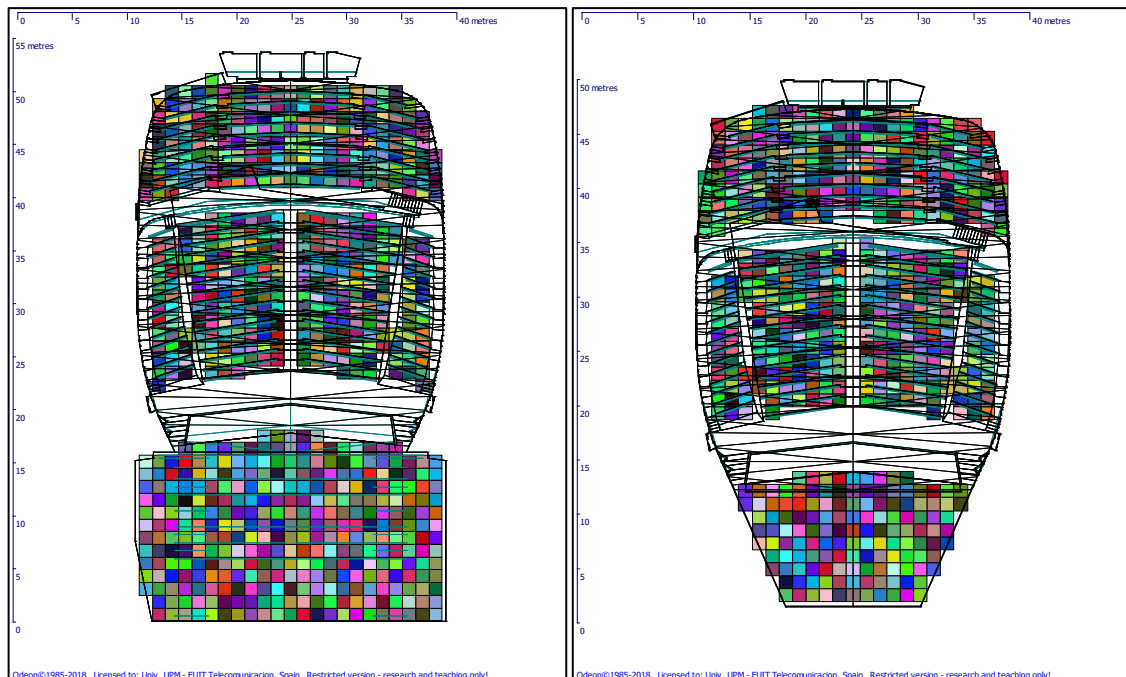


Figura 71. Definición de rejillas. Izq: sala con caja escénica; dcha: sala con concha acústica.

Utilizando esta herramienta, se calculan los mapas para  $T_{20}$ ,  $C_{80}$  y el nivel de presión sonora total ( $SPL_t$ ) en las bandas de octava de 500 Hz y 1 kHz (frecuencias medias), que son las más representativas. También se calculan rejillas del STI, para comprobar la inteligibilidad de ambas salas en las dos situaciones utilizadas previamente (un hombre hablando en el proscenio y con el sistema electroacústico en funcionamiento).



## 13. Resultados

El modelo acústico virtual ajustado del Teatro Auditorio Buero Vallejo es la herramienta con la que se han realizado los cálculos y pruebas en este proyecto. Se ha estudiado la calidad acústica de la sala original y la calidad acústica del de la sala introduciendo en ella una concha acústica, la cual se ha diseñado en este proyecto también.

Este apartado se trata de un compendio de lo obtenido en todas las pruebas y cálculos efectuados sobre el modelo acústico virtual. Se incluyen en él, de manera condensada, los resultados de los análisis de calidad acústica y las apreciaciones sobre las auralizaciones y su correspondencia con las rejillas generadas.

### 13.1. Calidad acústica de la sala original y de la sala con concha acústica

Las dos funcionalidades principales consideradas en la valoración de la acústica de las dos salas son la de teatro y conferencias y la de sala de conciertos. A continuación, se resumen los valores óptimos para los distintos parámetros acústicos indicados según el criterio acústico y los obtenidos mediante cálculo para los dos tipos de actividades y las dos salas. Todos los valores calculados son reflejo de lo que ocurre en promedio en el recinto, y en función de ellos se valora el cumplimiento o no de los requisitos que establecen los criterios utilizados.

#### 13.1.1. Valoración de la calidad acústica para la sala original

En las tablas siguientes se muestran los valores promedio calculados, el criterio de calidad y si se cumple éste o no. La tabla 40 evalúa la funcionalidad de teatro, la 41 la de sala de conciertos.

Tabla 40. Valoración de la calidad acústica de la sala original para funcionalidad como teatro.

Parámetro	Cálculo	Criterio	¿Cumple?
Tiempo de reverberación	$RT_{mid} = 1,65$ s	$0,97$ s < $RT_{mid}$ < $1,54$ s	No
EDT	$EDT_{mid} = 1,62$ s	$0,99$ s < $EDT_{mid}$ < $1,23$ s	No
Calidez acústica	$BR = 1,36$	$0,90 \leq BR \leq 1,30$	No
Brillo	$Br = 0,82$	$Br \geq 0,80$	Sí
Definición	$0,45 < D_{50} < 0,65$	$D_{50} > 0,50$	No
Fuerza sonora	$G_{mid} = 2,95$ dB	$4,00$ dB < $G$ < $5,50$ dB	Sí
Eficiencia lateral	$LF = 0,346$	$LF > 0,190$	Sí
Índice de inteligibilidad del habla	$STI_{voz} = 0,57$	$STI \geq 0,65$	No*
	$STI_{sist.electroacústico} = 0,62$		No*
%ALCons	$\%ALCons_{voz} = 6,7$ %	$\%ALCons \leq 5,0$ %	No*
	$\%ALCons_{sist.electroacústico} = 8,7$ %		No*

- No\*: la única octava en la que no se cumple el criterio para  $D_{50}$  es la de 125 Hz, con un valor de 0,46, debido al alto tiempo de reverberación de la sala en baja frecuencia. Por otra parte, los criterios de STI y %ALCons son para sala ocupada. Con la sala vacía la reverberación siempre es mayor, por lo que la inteligibilidad empeora. Aun así, están dentro del intervalo considerado como aceptable.

Tabla 41. Valoración de la calidad acústica de la sala original para funcionalidad como sala de conciertos.

Parámetro	Cálculo	Criterio	¿Cumple?
Tiempo de reverberación	$RT_{mid} = 1,65 \text{ s}$	$1,50 \text{ s} < RT_{mid} < 2,12 \text{ s}$	Sí
EDT	$EDT_{mid} = 1,62 \text{ s}$	$1,48 \text{ s} < EDT_{mid} < 1,65 \text{ s}$	Sí
Calidez acústica	$BR = 1,36$	$1,10 \leq BR \leq 1,35$	No*
Brillo	$Br = 0,82$	$Br \geq 0,80$	Sí
Claridad de la música	$0 \text{ dB} < C_{80} < 5 \text{ dB}$	$-2 \text{ dB} < C_{80} < 4 \text{ dB}$	No*
Fuerza sonora	$G_{mid} = 2,95 \text{ dB}$	$4,00 \text{ dB} < G < 5,50 \text{ dB}$	Sí
Eficiencia lateral	$LF = 0,346$	$LF > 0,190$	Sí

- No\*: la calidez acústica calculada supera por 0,01 el límite superior del criterio, lo cual resulta aceptable, nada descabellado.  $C_{80}$  sólo se sale del criterio en la banda de 4 kHz, con un valor de 4,6 dB, por lo que la claridad de la música, en términos generales, es buena.

La comparación entre tablas deja claro que la sala con la caja escénica, tal cual existe en la realidad, funciona mejor como sala de conciertos.

### 13.1.2. Valoración de la calidad acústica para la sala con concha acústica

Igual que en el apartado anterior, ahora, en las tablas 42 y 43 se evalúa la funcionalidad de teatro y sala de conciertos respectivamente para el recinto con la concha acústica instalada.

Tabla 42. Valoración de la calidad acústica de la sala con concha acústica para funcionalidad como teatro.

Parámetro	Cálculo	Criterio	¿Cumple?
Tiempo de reverberación	$RT_{mid} = 1,65 \text{ s}$	$0,94 \text{ s} < RT_{mid} < 1,45 \text{ s}$	No
EDT	$EDT_{mid} = 1,64 \text{ s}$	$0,99 \text{ s} < EDT_{mid} < 1,23 \text{ s}$	No
Calidez acústica	$BR = 0,92$	$0,90 \leq BR \leq 1,30$	Sí
Brillo	$Br = 0,86$	$Br \geq 0,80$	Sí
Definición	$0,31 < D_{50} < 0,44$	$D_{50} > 0,50$	No
Fuerza sonora	$G_{mid} = 5,20 \text{ dB}$	$4,00 \text{ dB} < G < 5,50 \text{ dB}$	Sí
Eficiencia lateral	$LF = 0,231$	$LF > 0,190$	Sí
Índice de inteligibilidad del habla	$STI_{voz} = 0,53$	$STI \geq 0,65$	No*
	$STI_{sist.electroacústico} = 0,59$		No*
%ALCons	$\%ALCons_{voz} = 10,4 \%$	$\%ALCons \leq 5,0 \%$	No*
	$\%ALCons_{sist.electroacústico} = 7,8 \%$		No*

- No\*: de nuevo, remarcar que los criterios de STI y %ALCons son para salas ocupadas.

Tabla 43. Valoración de la calidad acústica de la sala con concha acústica para funcionalidad como sala de conciertos.

Parámetro	Cálculo	Criterio	¿Cumple?
Tiempo de reverberación	$RT_{mid} = 1,65 \text{ s}$	$1,42 \text{ s} < RT_{mid} < 2,01 \text{ s}$	Sí
EDT	$EDT_{mid} = 1,64 \text{ s}$	$1,48 \text{ s} < EDT_{mid} < 1,65 \text{ s}$	Sí
Calidez acústica	$BR = 0,92$	$1,10 \leq BR \leq 1,35$	Sí
Brillo	$Br = 0,86$	$Br \geq 0,80$	Sí
Claridad de la música	$-1 \text{ dB} < C_{80} < 2 \text{ dB}$	$-2 \text{ dB} < C_{80} < 4 \text{ dB}$	Sí
Fuerza sonora	$G_{mid} = 5,20 \text{ dB}$	$4,00 \text{ dB} < G < 5,50 \text{ dB}$	Sí
Eficiencia lateral	$LF = 0,231$	$LF > 0,190$	Sí

A la vista de los datos de las tablas, la concha acústica favorece aún más la funcionalidad de sala de conciertos. En la sala original,  $C_{80}$  y  $BR$  no se cumplían por una pequeña diferencia con el límite superior de sus respectivos criterios. Dicha diferencia se ha corregido con la instalación de la concha, estando todos los valores promedio de los parámetros dentro de sus intervalos óptimos.

## 13.2. Escucha de auralizaciones

El propósito de este apartado es comentar la sensación que se tiene al escuchar las auralizaciones en los diferentes puntos de la sala. Se habla de los cuatro puntos de escucha en la zona de audiencia (M1, M12, M24 y M29) y del que simula la ubicación del director de orquesta (MDirector).

### 13.2.1. Posición de oyente M1

M1 está situada en el patio de butacas, en la primera fila de la sección lateral izquierda según se mira al escenario.

Se trata de una posición en la que se nota perfectamente la lateralidad respecto a la emisión sonora del escenario. El nivel recibido es bastante elevado, debido a la cercanía del escenario, y, además, es mayor por el oído izquierdo, debido al efecto de la pared lateral cercana. La inteligibilidad del habla es buena, y, respecto a la claridad de la música, es posible distinguir los diferentes instrumentos con facilidad.

La diferencia de escucha con y sin concha acústica radica en el tiempo de reverberación. La sensación es de una sala más viva con la concha acústica que con la caja escénica, lo cual es lógico. Además, a frecuencias altas, el sonido en la sala con concha acústica brilla más que sin ella.

### 13.2.2. Posición de oyente M12

Esta posición se ubica en la novena fila del patio de butacas, pegada al pasillo central.

El sonido se recibe con menos nivel, debido a que la distancia al escenario es mayor, pero lo que realmente es característico de este punto es la mala inteligibilidad del habla, es bastante pobre respecto a la posición M1. Con la claridad musical pasa parecido, los diferentes sonidos se distinguen peor que para la posición M1.

El efecto que tiene la concha acústica sobre esta posición es empeorar más tanto la inteligibilidad como la claridad musical, porque el tiempo de reverberación a frecuencias medias aumenta.

### 13.2.3. Posición de oyente M24

M24 se sitúa en la cuarta fila del anfiteatro, concretamente en el punto más centrado de esa fila.

A pesar de estar más lejos, la percepción es la de que el sonido llega con más nivel que en la posición M12, probablemente gracias a las reflexiones provocadas por el techo y su característica forma. La inteligibilidad del habla es bastante buena, similar a la de la posición M1, y, por supuesto, que la de la posición M12. En cuanto a la música, se escucha con claridad, de manera semejante al punto M1.

Al escuchar desde esta posición en la sala con la concha acústica, el aumento de tiempo de reverberación favorece más aún la percepción de la calidad del sonido, aportándole el cuerpo que quizá en la sala original le falte.

### 13.2.4. Posición de oyente M29

M29 se halla en la última fila de la sección derecha del anfiteatro. Dentro de la fila, es la butaca más centrada.

Se percibe algo más de nivel por el oído derecho, efecto de la cercanía a la pared, y la inteligibilidad del habla es aceptable, superando a la posición M12 en ese aspecto. La claridad musical no alcanza el nivel de M12 o M1, pero es posible distinguir instrumentos con relativa facilidad.

La sensación con la concha acústica es bastante parecida, aunque, de nuevo, la sensación es de más brillo en alta frecuencia.

### 13.2.5. Posición de oyente MDirector

Esta posición es la que pretende simular la sensación del director cuando está en el escenario, sobre su plataforma, dirigiendo a los músicos.

En ella se distingue la ubicación de los distintos instrumentos con mucha claridad.

Con la orquesta en la sala original, la sensación del director es de un sonido apagado, al que le falta cuerpo. Esta característica mejora notablemente en la sala con concha acústica. El “silencio” existente por momentos en la sala original ahora está relleno, lo cual permite estar más en contacto con el recinto.

## 13.3. Correspondencia entre auralizaciones y rejillas

Las rejillas permiten comprobar, de manera aproximada, las características acústicas de cada punto de la sala. Aprovechando estos mapas se comprueba si las sensaciones percibidas mediante la escucha de las auralizaciones realmente simulan lo que ocurre en el recinto acústicamente hablando.

La comparación se va a realizar con dos parámetros relevantes para actividades teatrales y musicales respectivamente: STI y  $C_{80}$ .

Tras escuchar las auralizaciones, la inteligibilidad ha resultado ser mejor en los puntos M1 y M24, algo peor en M29, aunque aceptable, y muy mala en M12. En la figura 72 se muestra la rejilla de STI para la sala original con círculos negros que señalan las posiciones de auralización. Los valores se representan siguiendo una escala de colores que aparece en la parte derecha de la figura. Se puede observar cómo la zona de la posición M12 presenta un color azul claro lo que significa un valor de STI de en torno a 0,49. En efecto, la inteligibilidad ahí es muy pobre, por lo que se confirma la percepción de la auralización. En cambio, en la zona de M1 los tonos son rojizos y anaranjados, y en M24 anaranjado y amarillentos, corroborando de nuevo la correspondencia entre auralización y rejilla.

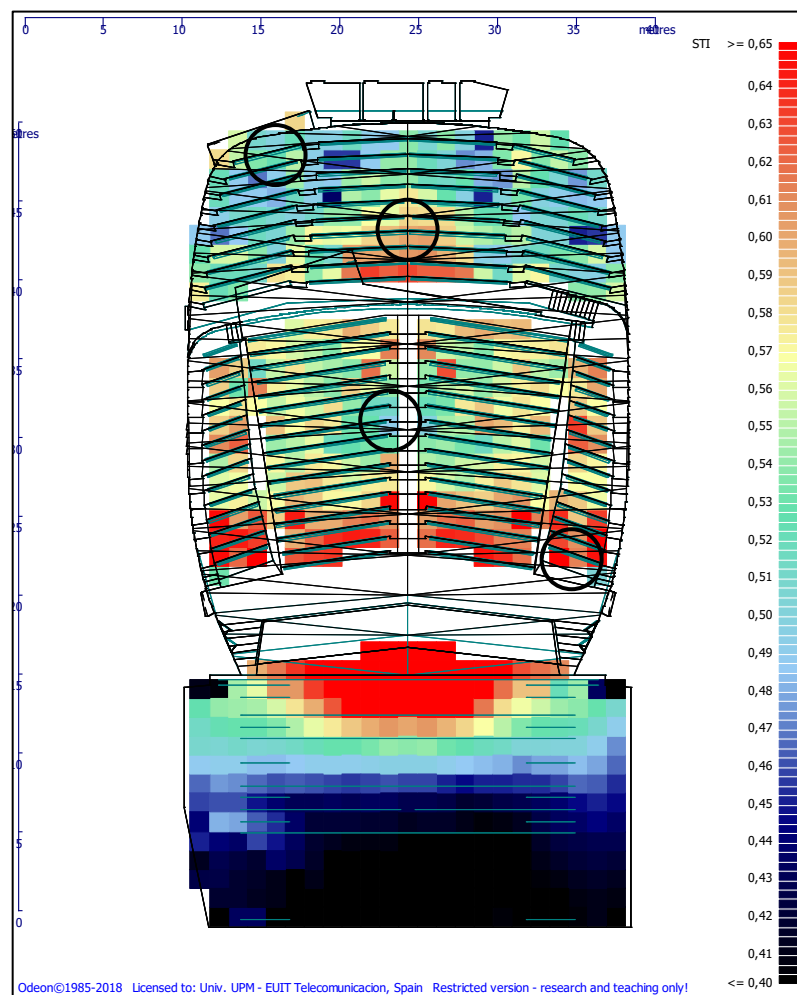


Figura 72. Rejilla de STI evaluado con voz para la sala original.

Si se visualiza la rejilla de  $C_{80}$  para la banda de frecuencia de 500 Hz (figura 73), de nuevo se advierte cómo en las posiciones M1 y M24, la claridad de la música es superior a la de M12. M29 es una posición que cuenta con una claridad aceptable para encontrarse en esa zona superior derecha, en la que  $C_{80}$  apenas supera 1 dB. Aun así, en torno a M12, el valor es parecido a la zona que rodea M29, predominando el azul oscuro.

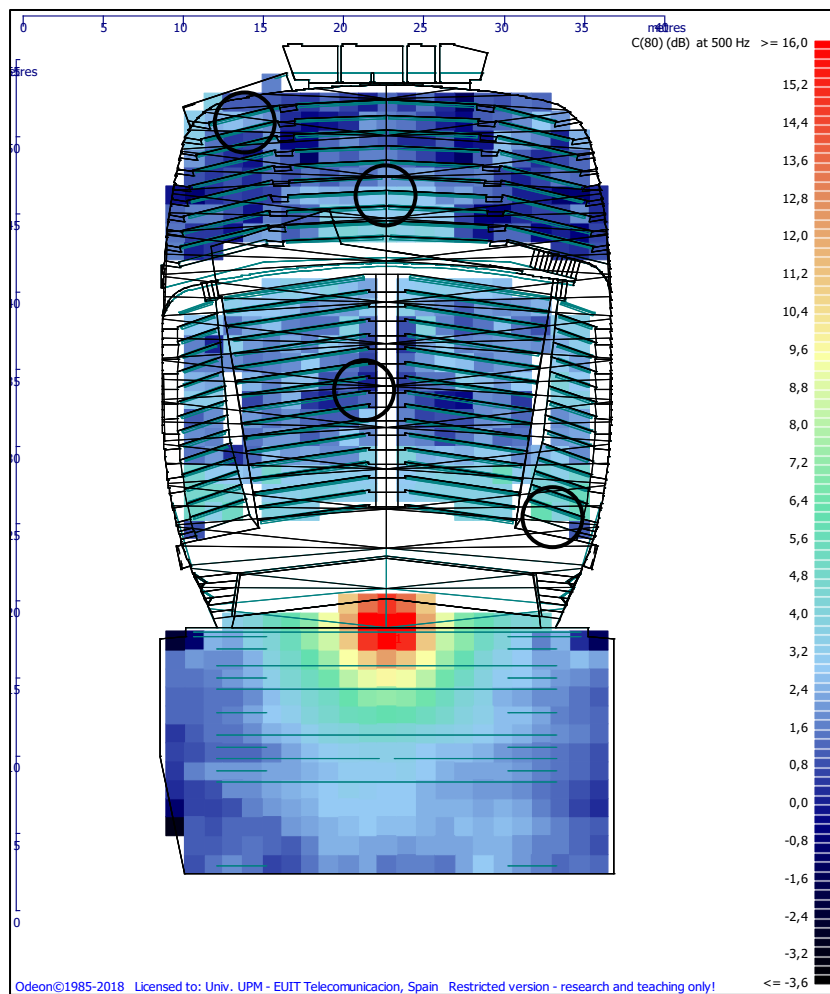


Figura 73. Rejilla de  $C_{80}$  en la octava de 500 Hz para la sala original.

En general, hay dos zonas, claramente definidas, en las que la acústica es de mayor calidad que en el resto de la sala. La primera zona es todo el sector que se encuentra próximo al escenario, de las filas 1 a la 4 aproximadamente; la segunda zona se encuentra en el anfiteatro, en la sección central. Es una especie de triángulo, cuya base está formada por la zona central de la primera fila y el vértice opuesto a dicha base se halla en el centro de la fila 6 aproximadamente.

En el área restante la calidad acústica se ve reducida. Especialmente, existe otro triángulo en la zona central de la platea, que toca las filas 8, 9, 10, 11 y 12, donde la inteligibilidad y la claridad musical empeoran significativamente.

En el Anexo V de este documento se adjuntan todas las rejillas obtenidas, y, en efecto, la sensación de escucha de las auralizaciones se asemeja bastante a los resultados presentados los mapas de los diferentes parámetros acústicos.

## 14. Presupuesto

El presupuesto necesario para llevar a cabo el proyecto está basado en el coste requerido para la construcción de la concha acústica y su instalación.

La concha acústica, al ser desmontable, está compuesta por una serie de módulos de madera contrachapada de okume, de espesor 12 mm, que conforman las paredes y el techo. EL precio del metro cuadrado de tal material es de 17 €/m<sup>2</sup>. La superficie total es de la concha es de 368,49 m<sup>2</sup>, de los cuales 180,77 m<sup>2</sup> pertenecen a paredes laterales y 187,22 m<sup>2</sup> al techo. Los módulos utilizados tienen un largo de 2,50 m y un ancho de 1,22 m, por lo que su precio es de 51,85 €. En total se requieren 120 de ellos.

Para llevar a cabo la instalación en la caja escénica del teatro se necesitan los servicios de diez operarios que, además, puedan trabajar en altura. La instalación se realiza empleando varios *trusses*<sup>8</sup> del teatro, uno para cada pared lateral y el fondo y otro para el techo. Estos soportes metálicos se descuelgan mediante las poleas de la caja escénica, y a ellos se anclan los módulos de madera de la concha. La duración del montaje y posterior desmontaje de toda la estructura se estima en torno a las diez horas de trabajo (cinco horas para montaje y otras cinco el desmontaje).

El cálculo del presupuesto se presenta en la tabla 44.

Tabla 44. Presupuesto para la concha acústica diseñada.

Concepto	Unidades	Precio/unidad	Horas	Precio/hora	Costes parciales
Módulo de madera contrachapada de okume (12 mm)	120,00 €	51,85 €	-	-	6.222,00 €
Mano de obra (10 operarios de montaje)	-	-	10	600,00 €	6.000,00 €
					<b>Coste total</b>
					12.222,00 €

<sup>8</sup> Un *truss* es una estructura metálica empleada en los escenarios, para instalar equipo de iluminación u otros elementos de la caja escénica.



## 15. Conclusiones

Este proyecto nace de la necesidad de poder estudiar y trabajar sobre la acústica existente del Teatro Auditorio Buero Vallejo de Guadalajara sin tener que realizar mediciones *in situ*. La razón es que estas mediciones requieren de un equipamiento muy costoso económicamente hablando, y, si se han de efectuar repetidamente, además de coste económico, existe un coste temporal. Por eso, ante este problema, se plantea la solución del diseño de un modelo acústico virtual del teatro, con el cual poder analizar las características acústicas de la sala utilizando un software por ordenador.

El proyecto ha consistido en el desarrollo de dos grandes partes. En la primera, se ha perseguido el objetivo fundamental de lograr un diseño válido del modelo acústico virtual del teatro. En la segunda, se ha empleado el modelo en cuestión como herramienta de cálculo y pruebas, para analizar acústicamente la sala e incluir mejoras como el diseño de una concha acústica.

A su vez, la primera parte se ha dividido en varias fases. Lo primero ha sido realizar las mediciones *in situ*, para utilizarlas en un futuro en el ajuste del modelo. La segunda fase ha continuado con el modelado 3D de la sala, utilizando el software SketchUp, partiendo de los planos de construcción del teatro. La última fase de esta primera parte ha consistido en el ajuste del modelo acústico virtual, haciendo uso del modelo 3D creado en el software de simulación acústica ODEON. Tras varios intentos, se ha conseguido un ajuste aceptable del modelo, obteniendo diferencias de entre 0 y 2 JND's entre los valores promedio de parámetros acústicos simulados y medidos. En este punto la primera parte ha terminado, y se considera como válido el modelo acústico virtual diseñado.

La segunda parte también se ha separado en varias fases. Con la herramienta de trabajo lista, se ha analizado la calidad acústica de la sala. A pesar de ser una sala multifuncional, los parámetros acústicos calculados han desvelado que la funcionalidad óptima del recinto es la de sala de conciertos. En vista de este resultado, se ha decidido proponer un diseño de concha acústica, que favorece acústicamente el desarrollo de actividades musicales. De nuevo, se ha analizado la calidad de la sala con esta mejora instalada, y el resultado ha sido favorable, pues se ha conseguido que todos los parámetros acústicos evaluados se encuentren dentro de los intervalos de valores óptimos recomendados. Otro tipo de pruebas que se han llevado a cabo han sido la generación de auralizaciones, con las que apreciar subjetivamente el funcionamiento de la sala en puntos concretos, y la obtención de rejillas, para poder visualizar las características acústicas del recinto en toda la superficie del teatro. Comparando los resultados de ambos métodos de estudio, se ha comprobado que las características acústicas percibidas con las auralizaciones se reflejan en las rejillas, lo cual es indicativo de la coherencia de los datos.

Del análisis de las rejillas, se ha detectado que existen algunas butacas en el teatro que poseen una calidad acústica pobre. Buscar y proponer soluciones para solventarlo supone dejar abiertas líneas de investigación futuras.



## 16. Referencias

- [1] L. Savioja and U. Svensson, "Overview of geometrical room acoustic modeling techniques", *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 138, no. 2, pp. 708-730, 2015.
- [2] W. C. Sabine, "Theatre Acoustics", in *Collected Papers on Acoustics*, Ed. Cambridge: Harvard University Press, pp. 180-182, 1922.
- [3] F. Spandöck, "Akustische Modellversuche", *Annalen der Physik*, vol. 412, no. 4, pp. 345-360, 1934.
- [4] J. Rindel, "Modelling in auditorium acoustics From ripple tank and scale models to computer simulations", *Revista de Acústica*, vol. 33, no. 3-4, pp. 31-35, 2002.
- [5] B. Atal and M. Schroeder, "Study of Sound Decay Using Ray-Tracing Techniques on a Digital Computer", *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 41, no. 6, pp. 1598-1598, 1967.
- [6] M. Schroeder, "Digital Simulation of Sound Transmission in Reverberant Spaces", *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 47, no. 2, pp. 424-431, 1970.
- [7] A. Krokstad, S. Strøm and S. Sørsdal, "Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 8, no. 1, pp. 118-125, 1968.
- [8] "Previous versions - ODEON Room Acoustics Software", ODEON Room Acoustics Software, 2021. [En línea]. Disponible: <https://odeon.dk/product/whats-new/previous-versions/>. [Consultado: 20- Jun- 2021].
- [9] "Software - EASE - Enhanced Acoustic Simulator for Engineers", Ease.afmg.eu, 2021. [En línea]. Disponible: <https://ease.afmg.eu/>. [Consultado: 20- Jun- 2021].
- [10] "CATT-Acoustic ", Catt.se, 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.catt.se/>. [Consultado: 20- Jun- 2021].
- [11] "User Manual - ODEON Room Acoustics Software", ODEON Room Acoustics Software, 2021. [En línea]. Disponible: <https://odeon.dk/downloads/user-manual/>. [Consultado: 20- Jun- 2021].
- [12] UNE-EN ISO 3382-1:2009: Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos.
- [13] A. Carrión Isbert, *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona: Edicions UPC, Universitat Politècnica de Catalunya, 1998.
- [14] P. D'Antonio and B. Rife, "The state of the art in the measurement of acoustical coefficients", 2011.
- [15] UNE-EN IEC 60268-16:2020: Equipos para sistemas electroacústicos. Parte 16: Evaluación objetiva de la inteligibilidad del habla mediante el índice de transmisión del habla.
- [16] M. Abad Sorbet, "Estudio Acústico y Electroacústico de la sala de conciertos Ritmo y Compás (Madrid)", Trabajo Fin de Máster, Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones, UPM, Madrid, España, 2013.
- [17] "Teatro - Teatro Buero Vallejo (Guadalajara)", Teatro Buero Vallejo (Guadalajara), 2021. [Online]. Disponible: <http://www.teatrobuerovallejo.com/teatro/>. [Consultado: 17- Jun- 2021].

- [18] H. Arau, "Estudio Acústico del Teatro-Auditorio de Guadalajara", Estudi Acústic H. Arau, Travessera de Dalt, 118 3<sup>o</sup>-1<sup>a</sup> - Barcelona (Barcelona) - 08024- España, 2001.
- [19] "DIRAC - Room Acoustic Software | Brüel & Kjær", Bksv.com, 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.bksv.com/en/analysis-software/acoustic-analysis-software/room-acoustics-software-dirac>. [Consultado: 03- Jul- 2021].
- [20] "REAPER | Audio Production Without Limits", Reaper.fm, 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.reaper.fm/>. [Consultado: 03- Jul- 2021].
- [21] "Software de diseño 3D | Modelado 3D en la web | SketchUp", Drupal, 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.sketchup.com/es>. [Consultado: 03- Jul- 2021].
- [22] H. Arau, "Dependencia del Tiempo de Reverberación con el tamaño de audiencia en salas de pública concurrencia", Revista de Acústica, vol. 28, pp. 7-12, 1997.
- [23]"SLS LS8800 - Torrence Sound", Torrence Sound, 2021. [En línea]. Disponible: <https://torrencesound.com/product/sls-ls8800/>. [Consultado: 08- Jul- 2021]
- [24]"Subwoofer 21S para alto rendimiento | d&b audiotechnik", Dbaudio.com, 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.dbaudio.com/global/es/productos/serie/serie-xs/subwoofer-21s/>. [Consultado: 8- Jul- 2021]

## ANEXO I. INR de las mediciones *in situ*

En esta primera sección adicional, se incluyen tres tablas, 45, 46 y 47 en las que se presenta la relación respuesta al impulso a ruido obtenida con Dirac 6 de todas las combinaciones fuente-micrófono medidas *in situ*. El código de colores se explica en la tabla 48.

*Tabla 45. INR para medidas con la fuente 1.*

Posición	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
F1M1	25	46	53	50	43	48	53	54
F1M2	26	50	53	48	39	46	53	51
F1M3	24	48	50	45	38	45	54	48
F1M4	28	49	50	44	34	40	51	51
F1M5	29	48	54	44	35	44	53	51
F1M6	28	47	53	45	34	43	53	51
F1M7	30	47	53	51	42	43	58	51
F1M8	30	47	52	43	32	43	50	51
F1M9	31	51	54	45	37	50	57	54
F1M10	30	48	53	44	38	45	52	53
F1M11	31	49	54	47	38	49	52	51
F1M12	31	51	50	45	39	47	52	52
F1M13	32	52	52	46	41	47	53	53
F1M14	27	48	53	42	38	45	52	52
F1M15	27	49	51	44	40	43	45	43
F1M16	28	47	58	46	37	44	53	52
F1M17	25	47	50	47	40	43	50	53
F1M18	28	45	49	47	36	42	51	50
F1M19	26	44	51	47	37	46	53	50
F1M20	24	45	54	48	38	45	54	50
F1M21	27	50	50	46	37	45	52	51
F1M22	29	49	52	46	40	46	54	50
F1M23	29	50	52	48	39	46	55	51
F1M24	30	52	51	45	41	44	51	51
F1M25	27	49	52	47	37	46	54	51
F1M26	29	49	53	47	39	46	55	53
F1M27	23	46	51	47	36	44	53	49
F1M28	24	50	52	45	38	46	55	53
F1M29	25	48	52	47	38	46	54	51
F1M30	22	43	50	44	39	44	54	50
F1M31	22	45	51	47	35	43	53	49
F1M32	20	47	52	44	35	44	53	49
F1M35	33	50	57	51	41	40	53	51
F1M36	33	50	57	51	41	40	53	51
F1M37	24	39	42	37	29	39	43	40

Tabla 46. INR para medidas con la fuente 2.

Posición	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
F2M1	23	40	50	46	40	47	51	51
F2M2	26	47	52	46	42	46	53	52
F2M3	20	45	48	48	41	45	52	51
F2M4	27	45	51	41	38	45	49	49
F2M5	26	44	50	43	34	45	52	51
F2M6	27	46	52	42	37	46	50	50
F2M7	27	46	52	42	37	46	50	50
F2M8	34	46	51	47	33	45	53	49
F2M9	30	47	51	48	40	48	51	49
F2M10	30	43	52	44	37	50	53	52
F2M11	28	47	51	46	42	48	53	50
F2M12	28	44	52	45	41	48	54	52
F2M13	28	47	51	46	41	46	52	51
F2M14	31	45	49	45	40	44	53	52
F2M15	27	48	53	46	42	48	53	50
F2M16	27	49	47	44	40	49	54	51
F2M17	24	45	52	48	43	47	54	51
F2M18	28	45	46	41	40	47	52	50
F2M19	27	42	50	46	38	46	54	50
F2M20	24	48	54	50	40	48	55	50
F2M21	27	46	50	47	39	48	56	50
F2M22	31	49	52	47	41	46	54	51
F2M23	29	46	54	49	39	45	54	51
F2M24	28	43	48	45	38	46	54	51
F2M25	29	48	53	46	37	46	54	51
F2M26	25	47	51	43	35	43	52	49
F2M27	26	45	51	46	37	42	49	47
F2M28	25	45	52	46	39	46	55	51
F2M29	25	48	50	47	37	43	54	49
F2M30	26	44	50	43	39	42	50	44
F2M31	28	45	48	43	35	44	54	50
F2M32	19	47	53	43	35	42	53	49
F2M35	30	39	50	55	47	53	58	56
F2M36	35	55	56	50	39	47	58	61
F2M37	24	41	47	48	44	53	55	53

Tabla 47. INR para medidas con la fuente 3.

Posición	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
F3M1	26	47	52	46	42	46	53	52
F3M2	27	44	49	47	40	46	50	45
F3M3	25	46	48	47	41	47	52	49
F3M4	26	45	49	42	33	46	49	47
F3M5	25	42	48	41	36	41	47	45
F3M6	26	43	50	46	36	45	51	48
F3M7	28	44	50	45	34	46	55	50
F3M8	26	42	48	40	36	47	49	46
F3M9	29	44	51	41	35	48	56	51
F3M10	27	43	51	42	34	45	50	48
F3M11	26	46	47	44	39	42	42	46
F3M12	27	45	47	44	38	46	51	49
F3M13	27	45	47	44	38	46	51	49
F3M14	27	45	49	44	35	41	50	46
F3M15	26	44	51	44	40	45	50	47
F3M16	28	43	48	44	39	46	52	48
F3M17	29	45	49	46	40	46	51	48
F3M18	24	43	48	43	38	42	51	47
F3M19	25	46	50	46	38	44	52	48
F3M20	26	45	50	48	37	46	53	50
F3M21	25	48	52	49	38	46	54	49
F3M22	30	45	50	46	37	46	55	51
F3M23	24	43	50	50	40	47	54	50
F3M24	26	48	51	47	38	43	50	48
F3M25	24	44	48	46	39	47	53	48
F3M26	27	41	47	45	35	41	50	48
F3M27	24	45	51	47	36	45	54	49
F3M28	23	46	50	46	36	43	53	50
F3M29	23	47	49	47	37	45	54	50
F3M30	22	44	49	46	35	43	51	47
F3M31	24	48	49	43	33	44	53	49
F3M32	20	42	48	43	34	44	53	48
F3M35	28	43	47	45	40	53	56	51
F3M36	25	45	46	48	39	50	55	51
F3M37	32	51	54	50	39	46	56	59

Tabla 48. Criterios para evaluar INR.

INR $\geq$ 45 dB
35 dB $\leq$ INR < 45 dB
INR < 35 dB



## ANEXO II. Parámetros acústicos obtenidos durante el proceso de ajuste del modelo acústico virtual en ODEON

Se incluyen en este anexo, a continuación, los valores promedio de parámetros medidos y simulados y las diferencias en JND's entre ellos, obtenidos con las tres posiciones de fuente.

Se presentan, en primer lugar, para el caso del modelo con la asignación de materiales inicial.

Tabla 49. Parámetros acústicos promedio del modelo inicial para la fuente 1.

Parámetro	63 Hz		125 Hz		250 Hz		500 Hz		1 kHz		2 kHz		4 kHz		8 kHz	
	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M
<b>T<sub>20</sub> (s)</b>	2,32	2,73	2,33	2,46	1,98	1,99	1,74	1,59	1,68	1,57	1,63	1,54	1,25	1,38	0,68	1,02
<b>EDT (s)</b>	2,38	2,31	2,40	1,70	2,04	1,44	1,77	1,27	1,69	1,48	1,58	1,46	1,17	1,15	0,50	0,62
<b>Ts (ms)</b>	144	126	146	104	119	86	102	71	95	78	89	81	66	65	32	40
<b>D<sub>50</sub></b>	0,41	0,48	0,40	0,53	0,45	0,58	0,50	0,61	0,52	0,60	0,54	0,57	0,62	0,63	0,80	0,75
<b>C<sub>80</sub> (dB)</b>	0,00	2,50	0,00	3,30	1,00	3,80	1,90	4,50	2,30	4,00	2,60	3,40	4,40	4,70	9,70	7,50

Tabla 50. Diferencia en JND's entre parámetros medidos y simulados promedio del modelo inicial para la fuente 1.

Parámetro	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
<b>T<sub>20</sub> (s)</b>	3,00	1,06	0,10	1,89	1,40	1,17	1,88	6,67
<b>EDT (s)</b>	0,61	8,24	8,33	7,87	2,84	1,64	0,35	3,87
<b>Ts (ms)</b>	1,80	4,20	3,30	3,10	1,70	0,80	0,10	0,80
<b>D<sub>50</sub></b>	1,40	2,60	2,60	2,20	1,60	0,60	0,20	1,00
<b>C<sub>80</sub> (dB)</b>	2,50	3,30	2,80	2,60	1,70	0,80	0,30	2,20

Tabla 51. Parámetros acústicos promedio del modelo inicial para la fuente 2.

Parámetro	63 Hz		125 Hz		250 Hz		500 Hz		1 kHz		2 kHz		4 kHz		8 kHz	
	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M
<b>T<sub>20</sub> (s)</b>	2,38	2,87	2,39	2,68	2,39	2,20	1,84	1,69	1,77	1,61	1,69	1,56	1,27	1,38	0,69	1,01
<b>EDT (s)</b>	2,52	2,29	2,53	2,29	2,53	1,84	1,87	1,45	1,77	1,45	1,66	1,47	1,22	1,17	0,51	0,66
<b>Ts (ms)</b>	153	140	154	139	154	101	106	78	98	79	91	79	65	62	29	36
<b>D<sub>50</sub></b>	0,40	0,44	0,39	0,46	0,39	0,56	0,49	0,59	0,51	0,59	0,54	0,58	0,62	0,64	0,81	0,76
<b>C<sub>80</sub> (dB)</b>	0,00	1,20	-0,10	0,90	-0,10	2,80	2,00	4,00	2,40	4,10	2,80	3,70	4,70	5,10	10,20	8,40

Tabla 52. Diferencia en JND's entre parámetros medidos y simulados promedio del modelo inicial para la fuente 2.

Parámetro	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
<b>T<sub>20</sub> (s)</b>	3,41	2,16	1,73	1,78	1,99	1,67	1,59	6,34
<b>EDT (s)</b>	2,01	2,10	7,50	5,79	4,41	2,59	0,85	4,55
<b>Ts (ms)</b>	1,30	1,50	5,30	2,80	1,90	1,20	0,30	0,70
<b>D<sub>50</sub></b>	0,80	1,40	3,40	2,00	1,60	0,80	0,40	1,00
<b>C<sub>80</sub> (dB)</b>	1,20	1,00	2,90	2,00	1,70	0,90	0,40	1,80

Tabla 53. Parámetros acústicos promedio del modelo inicial para la fuente 3.

Parámetro	63 Hz		125 Hz		250 Hz		500 Hz		1 kHz		2 kHz		4 kHz		8 kHz	
	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M
<b>T<sub>20</sub> (s)</b>	2,36	2,52	2,37	2,60	2,04	2,30	1,82	1,73	1,77	1,63	1,68	1,56	1,29	1,39	0,72	1,02
<b>EDT (s)</b>	2,65	2,48	2,66	2,48	2,28	2,12	2,00	1,62	1,93	1,61	1,82	1,61	1,39	1,36	0,65	0,80
<b>Ts (ms)</b>	176	144	177	169	147	123	125	96	118	89	108	92	77	70	32	38
<b>D<sub>50</sub></b>	0,32	0,40	0,32	0,36	0,36	0,48	0,41	0,51	0,43	0,53	0,45	0,50	0,54	0,59	0,77	0,72
<b>C<sub>80</sub> (dB)</b>	-1,70	1,10	-1,70	-0,80	-0,60	1,60	0,40	2,70	0,80	3,10	1,30	2,50	3,30	4,30	9,00	7,70

Tabla 54. Diferencia en JND's entre parámetros medidos y simulados promedio del modelo inicial para la fuente 3.

Parámetro	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
<b>T<sub>20</sub> (s)</b>	1,27	1,77	2,26	1,04	1,72	1,54	1,44	5,88
<b>EDT (s)</b>	1,37	1,45	1,51	4,69	3,98	2,61	0,44	3,75
<b>Ts (ms)</b>	3,20	0,80	2,40	2,90	2,90	1,60	0,70	0,60
<b>D<sub>50</sub></b>	1,60	0,80	2,40	2,00	2,00	1,00	1,00	1,00
<b>C<sub>80</sub> (dB)</b>	2,80	0,90	2,20	2,30	2,30	1,20	1,00	1,30

En segundo lugar, se muestran los parámetros promedio (medidos y simulados) del modelo con la primera modificación de materiales aplicada.

Tabla 55. Parámetros acústicos promedio del modelo con la primera modificación para la fuente 1.

Parámetro	63 Hz		125 Hz		250 Hz		500 Hz		1 kHz		2 kHz		4 kHz		8 kHz	
	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M
<b>T<sub>20</sub> (s)</b>	2,35	2,73	2,56	2,46	2,21	1,99	1,80	1,59	1,64	1,57	1,59	1,54	1,28	1,38	0,68	1,02
<b>EDT (s)</b>	2,41	2,31	2,60	1,70	2,22	1,44	1,84	1,27	1,63	1,48	1,54	1,46	1,19	1,15	0,51	0,62
<b>Ts (ms)</b>	147	126	158	104	130	86	106	71	92	78	87	81	67	65	32	40
<b>D<sub>50</sub></b>	0,40	0,48	0,39	0,53	0,44	0,58	0,49	0,61	0,53	0,60	0,55	0,57	0,61	0,63	0,80	0,75
<b>C<sub>80</sub> (dB)</b>	-0,10	2,50	-0,30	3,30	0,60	3,80	1,60	4,50	2,50	4,00	2,80	3,40	4,30	4,70	9,60	7,50

Tabla 56. Diferencia en JND's entre parámetros medidos y simulados promedio del modelo con la primera modificación para la fuente 1.

Parámetro	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
<b>T<sub>20</sub> (s)</b>	2,78	0,81	2,21	2,64	0,89	0,65	1,45	6,67
<b>EDT (s)</b>	0,87	10,59	10,83	8,98	2,03	1,10	0,70	3,55
<b>Ts (ms)</b>	2,10	5,40	4,40	3,50	1,40	0,60	0,20	0,80
<b>D<sub>50</sub></b>	1,60	2,80	2,80	2,40	1,40	0,40	0,40	1,00
<b>C<sub>80</sub> (dB)</b>	2,60	3,60	3,20	2,90	1,50	0,60	0,40	2,10

Tabla 57. Parámetros acústicos promedio del modelo con la primera modificación para la fuente 2.

Parámetro	63 Hz		125 Hz		250 Hz		500 Hz		1 kHz		2 kHz		4 kHz		8 kHz	
	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M
<b>T<sub>20</sub> (s)</b>	2,41	2,87	2,61	2,68	2,30	2,20	1,90	1,69	1,72	1,61	1,64	1,56	1,30	1,38	0,70	1,01
<b>EDT (s)</b>	2,56	2,29	2,77	2,29	2,39	1,84	1,95	1,45	1,69	1,45	1,59	1,47	1,25	1,17	0,52	0,66
<b>Ts (ms)</b>	156	140	169	139	140	101	111	78	94	79	87	79	67	62	30	36
<b>D<sub>50</sub></b>	0,39	0,44	0,38	0,46	0,43	0,56	0,48	0,59	0,53	0,59	0,55	0,58	0,61	0,64	0,81	0,76
<b>C<sub>80</sub> (dB)</b>	-0,20	1,20	-0,50	0,90	0,60	2,80	1,70	4,00	2,70	4,10	3,10	3,70	4,50	5,10	10,10	8,40

Tabla 58. Diferencia en JND's entre parámetros medidos y simulados promedio del modelo con la primera modificación para la fuente 2.

Parámetro	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
<b>T<sub>20</sub> (s)</b>	3,21	0,52	0,91	2,49	1,37	1,03	1,16	6,14
<b>EDT (s)</b>	2,36	4,19	5,98	6,90	3,31	1,63	1,37	4,24
<b>Ts (ms)</b>	1,60	3,00	3,90	3,30	1,50	0,80	0,50	0,60
<b>D<sub>50</sub></b>	1,00	1,60	2,60	2,20	1,20	0,60	0,60	1,00
<b>C<sub>80</sub> (dB)</b>	1,40	1,40	2,20	2,30	1,40	0,60	0,60	1,70

Tabla 59. Parámetros acústicos promedio del modelo con la primera modificación para la fuente 3.

Parámetro	63 Hz		125 Hz		250 Hz		500 Hz		1 kHz		2 kHz		4 kHz		8 kHz	
	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M
<b>T<sub>20</sub> (s)</b>	2,40	2,52	2,61	2,60	2,28	2,30	1,88	1,73	1,73	1,63	1,65	1,56	1,32	1,39	0,73	1,02
<b>EDT (s)</b>	2,68	2,48	2,91	2,48	2,52	2,12	2,08	1,62	1,87	1,61	1,77	1,61	1,42	1,36	0,66	0,80
<b>Ts (ms)</b>	180	144	195	169	164	123	131	96	112	89	104	92	79	70	33	38
<b>D<sub>50</sub></b>	0,31	0,40	0,30	0,36	0,34	0,48	0,39	0,51	0,44	0,53	0,47	0,50	0,53	0,59	0,76	0,72
<b>C<sub>80</sub> (dB)</b>	-1,80	1,10	-2,20	-0,80	-1,10	1,60	0,10	2,70	1,20	3,10	1,60	2,50	3,10	4,30	8,80	7,70

Tabla 60. Diferencia en JND's entre parámetros medidos y simulados promedio del modelo con la primera modificación para la fuente 3.

Parámetro	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
<b>T<sub>20</sub> (s)</b>	0,95	0,08	0,17	1,73	1,23	1,15	1,01	5,69
<b>EDT (s)</b>	1,61	3,47	3,77	5,68	3,23	1,99	0,88	3,50
<b>Ts (ms)</b>	3,60	2,60	4,10	3,50	2,30	1,20	0,90	0,50
<b>D<sub>50</sub></b>	1,80	1,20	2,80	2,40	1,80	0,60	1,20	0,80
<b>C<sub>80</sub> (dB)</b>	2,90	1,40	2,70	2,60	1,90	0,90	1,20	1,10

En tercer y último lugar, se adjuntan valores promedio de los parámetros (medidos y simulados) del modelo final ajustado tras la segunda modificación.

Tabla 61. Parámetros acústicos promedio del modelo final para la fuente 1.

Parámetro	63 Hz		125 Hz		250 Hz		500 Hz		1 kHz		2 kHz		4 kHz		8 kHz	
	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M
<b>T<sub>20</sub> (s)</b>	2,55	2,73	2,55	2,46	1,92	1,99	1,68	1,59	1,60	1,57	1,50	1,54	1,18	1,38	0,65	1,02
<b>EDT (s)</b>	2,39	2,31	2,39	1,70	1,81	1,44	1,59	1,27	1,56	1,48	1,40	1,46	1,03	1,15	0,45	0,62
<b>Ts (ms)</b>	129	126	130	104	98	86	85	71	85	78	76	81	57	65	29	40
<b>D<sub>50</sub></b>	0,48	0,48	0,48	0,53	0,53	0,58	0,56	0,61	0,55	0,60	0,59	0,57	0,66	0,63	0,83	0,75
<b>C<sub>80</sub> (dB)</b>	1,30	2,50	1,20	3,30	2,40	3,80	3,00	4,50	2,90	4,00	3,60	3,40	5,30	4,70	10,50	7,50

Tabla 62. Diferencia en JND's entre parámetros medidos y simulados promedio del modelo final para la fuente 1.

Parámetro	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
<b>T<sub>20</sub> (s)</b>	1,32	0,73	0,70	1,13	0,38	0,52	2,90	7,25
<b>EDT (s)</b>	0,69	8,12	5,14	5,04	1,08	0,82	2,09	5,48
<b>Ts (ms)</b>	0,30	2,60	1,20	1,40	0,70	0,50	0,80	1,10
<b>D<sub>50</sub></b>	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,40	0,60	1,60
<b>C<sub>80</sub> (dB)</b>	1,20	2,10	1,40	1,50	1,10	0,20	0,60	3,00

Tabla 63. Parámetros acústicos promedio del modelo final para la fuente 2.

Parámetro	63 Hz		125 Hz		250 Hz		500 Hz		1 kHz		2 kHz		4 kHz		8 kHz	
	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M
<b>T<sub>20</sub> (s)</b>	2,63	2,73	2,62	2,46	1,99	1,99	1,75	1,59	1,68	1,57	1,55	1,54	1,21	1,38	0,67	1,02
<b>EDT (s)</b>	2,61	2,31	2,61	1,70	1,98	1,44	1,72	1,27	1,66	1,48	1,50	1,46	1,11	1,15	0,47	0,62
<b>Ts (ms)</b>	144	126	144	104	107	86	91	71	89	78	79	81	57	65	27	40
<b>D<sub>50</sub></b>	0,45	0,48	0,45	0,53	0,51	0,58	0,55	0,61	0,54	0,60	0,58	0,57	0,66	0,63	0,83	0,75
<b>C<sub>80</sub> (dB)</b>	0,90	2,50	0,90	3,30	2,20	3,80	3,00	4,50	3,00	4,00	3,70	3,40	5,50	4,70	10,90	7,50

Tabla 64. Diferencia en JND's entre parámetros medidos y simulados promedio del modelo final para la fuente 2.

Parámetro	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
<b>T<sub>20</sub> (s)</b>	0,73	1,30	0,00	2,01	1,40	0,13	2,46	6,86
<b>EDT (s)</b>	2,60	10,71	7,50	7,09	2,43	0,55	0,70	4,84
<b>Ts (ms)</b>	1,80	4,00	2,10	2,00	1,10	0,20	0,80	1,30
<b>D<sub>50</sub></b>	0,60	1,60	1,40	1,20	1,20	0,20	0,60	1,60
<b>C<sub>80</sub> (dB)</b>	1,60	2,40	1,60	1,50	1,00	0,30	0,80	3,40

Tabla 65. Parámetros acústicos promedio del modelo final para la fuente 3.

Parámetro	63 Hz		125 Hz		250 Hz		500 Hz		1 kHz		2 kHz		4 kHz		8 kHz	
	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M
<b>T<sub>20</sub> (s)</b>	2,62	2,73	2,61	2,46	1,97	1,99	1,73	1,59	1,68	1,57	1,56	1,54	1,23	1,38	0,70	1,02
<b>EDT (s)</b>	2,81	2,31	2,80	1,70	2,12	1,44	1,88	1,27	1,83	1,48	1,68	1,46	1,30	1,15	0,61	0,62
<b>Ts (ms)</b>	174	126	174	104	129	86	111	71	109	78	96	81	69	65	30	40
<b>D<sub>50</sub></b>	0,35	0,48	0,35	0,53	0,41	0,58	0,45	0,61	0,45	0,60	0,49	0,57	0,57	0,63	0,78	0,75
<b>C<sub>80</sub> (dB)</b>	-1,10	2,50	-1,10	3,30	0,40	3,80	1,20	4,50	1,30	4,00	2,00	3,40	3,90	4,70	9,50	7,50

Tabla 66. Diferencia en JND's entre parámetros medidos y simulados promedio del modelo final para la fuente 3.

Parámetro	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
<b>T<sub>20</sub> (s)</b>	0,81	1,22	0,20	1,76	1,40	0,26	2,17	6,27
<b>EDT (s)</b>	4,33	12,94	9,44	9,61	4,73	3,01	2,61	0,32
<b>Ts (ms)</b>	4,80	7,00	4,30	4,00	3,10	1,50	0,40	1,00
<b>D<sub>50</sub></b>	2,60	3,60	3,40	3,20	3,00	1,60	1,20	0,60
<b>C<sub>80</sub> (dB)</b>	3,60	4,40	3,40	3,30	2,70	1,40	0,80	2,00



## ANEXO III. Optimizador de materiales genético de ODEON

Esta herramienta permite optimizar los coeficientes de absorción de determinados materiales de una sala para ajustar la diferencia entre mediciones reales y simuladas en JND's. La optimización se realiza mediante la función de ajuste (13) para los parámetros acústicos que se desee. En ella,  $\varepsilon$  es el valor del ajuste en JND's;  $[Par_i^k]_S$  y  $[Par_i^k]_M$  representan el parámetro acústico  $i$  simulado y medido (respectivamente) para la combinación fuente-micrófono  $k$ ;  $K$  es el número total de combinaciones fuente-micrófono, e  $I$  es el número de parámetros acústicos utilizados.

$$\varepsilon[JND] = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I [Par_i^k]_S - [Par_i^k]_M}{K \cdot I} \quad (13)$$

Además, se permite al usuario elegir el grado de variabilidad de los coeficientes de absorción en las distintas bandas de frecuencia respecto a los que tenía el material original. Una variación de 0% respecto al original significa dejar fijo ese material, mientras que una variación de 100% deja total libertad a la herramienta para cambiar los coeficientes de absorción.

El optimizador de materiales de ODEON está fundamentado en algoritmos genéticos (GA, del inglés *Genetic Algorithms*). Los GA están basados en los procesos biológicos de los organismos, concretamente en la selección natural que establece la teoría de la evolución de Darwin.

La herramienta de ODEON cuenta con ocho algoritmos genéticos que trabajan de manera independiente para cada banda de octava. Si se realiza el símil evolutivo, un individuo consiste en el conjunto de coeficientes de absorción de los diferentes materiales de la sala para una banda de octava, y un coeficiente de absorción para una banda de frecuencia concreta de un material es un gen. En la tabla 67 aparecen todos los términos genéticos trasladados a la optimización acústica.

Tabla 67. Símil de los términos genéticos para la optimización acústica de materiales.

Términos genéticos	Analogía para optimización de materiales
Gen	Coefficiente de absorción de un material para una banda de frecuencia específica
Cromosoma	Conjunto de genes que caracterizan a un individuo
Individuo	Lista de genes (coeficientes de absorción) asociados a un cromosoma
Población	Conjunto de individuos, todas las combinaciones de materiales para una generación
Generación	Fase del proceso evolutivo correspondiente a una población
Evolución	Proceso de obtención de nuevos conjuntos de materiales

El proceso de trabajo del GA comienza con la creación de todos los individuos de la población con coeficientes de absorción que varían aleatoriamente dentro del rango de variabilidad especificado por el usuario. Esta primera fase es la denominada generación 0. Tras ella, comienza el proceso de evolución, filtrando los mejores individuos como padres y produciendo hijos que, probablemente, hereden algunas de las ventajas de sus padres. El proceso continúa, generación tras generación, hasta que el usuario considere resultados satisfactorios y lo detenga [11].



## ANEXO IV. Planos de la concha acústica diseñada

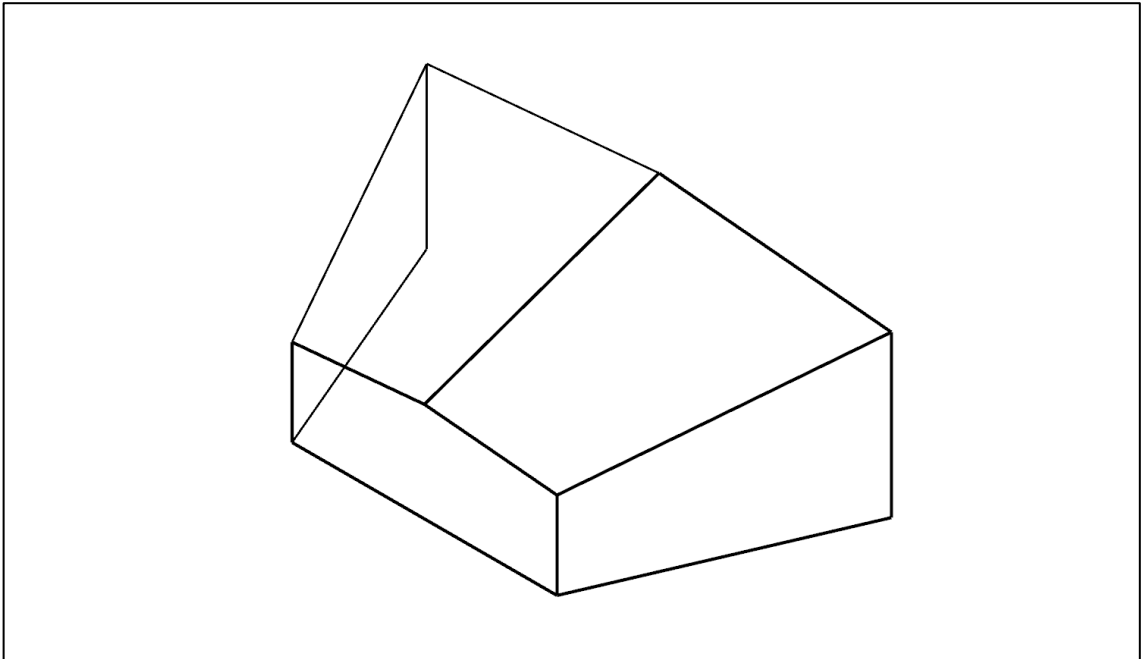


Figura 74. Vista 3D de la concha acústica diseñada.

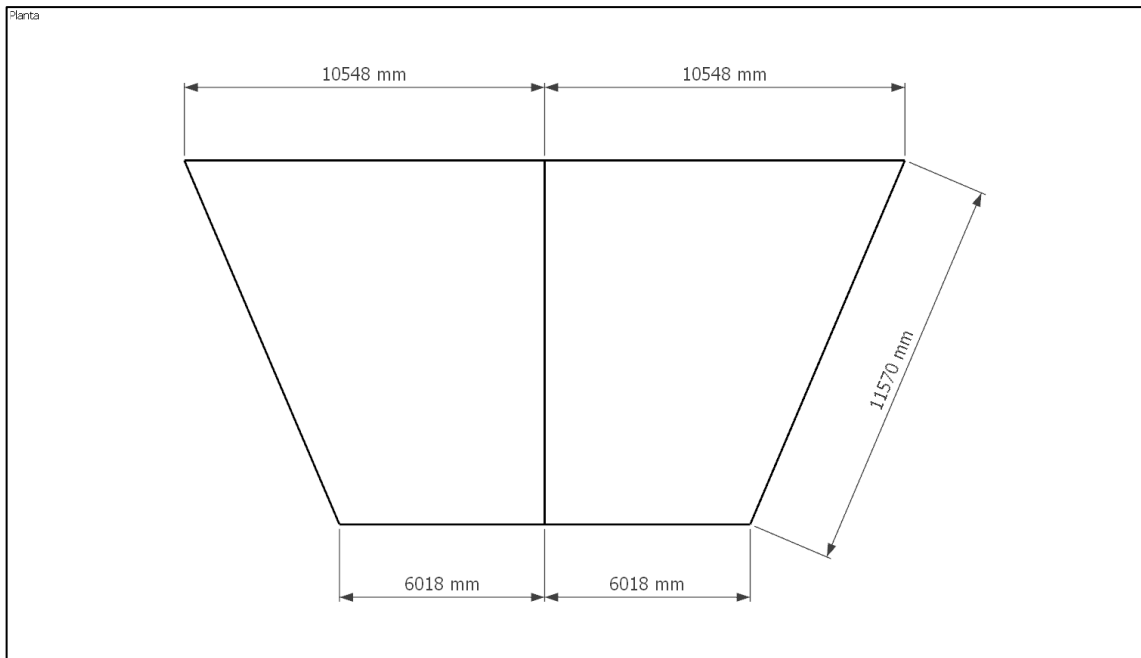


Figura 75. Planta de la concha acústica diseñada.

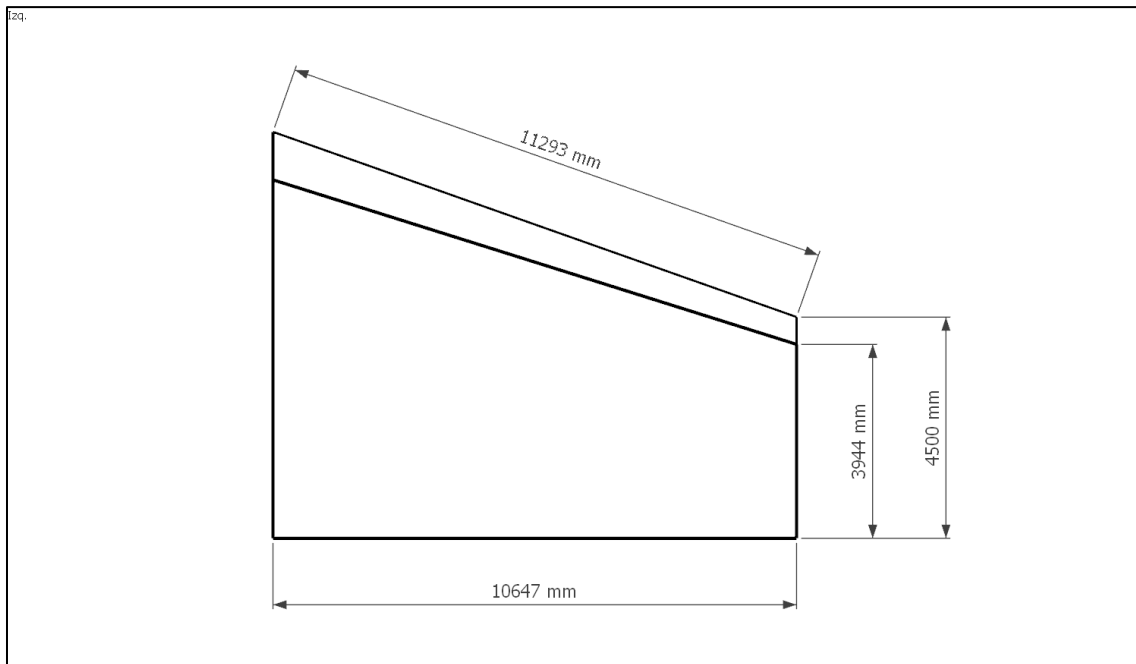


Figura 76. Perfil de la concha acústica diseñada.

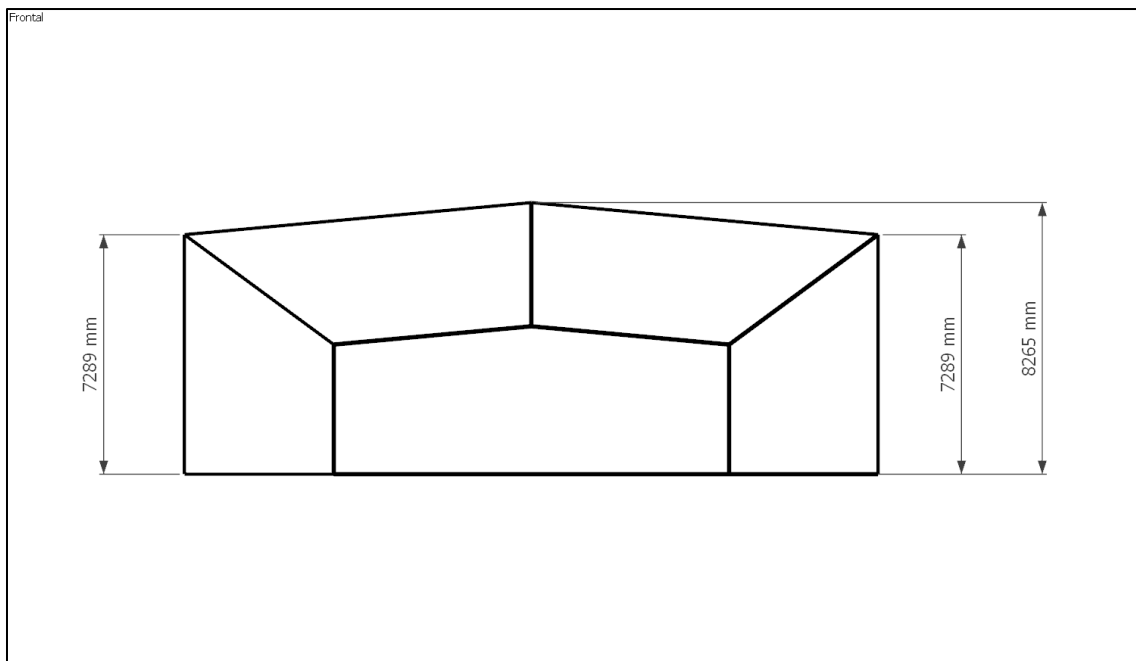


Figura 77. Alzado de la concha acústica diseñada.

## ANEXO V. Rejillas de diferentes parámetros acústicos obtenidas para la sala original y la sala con concha acústica

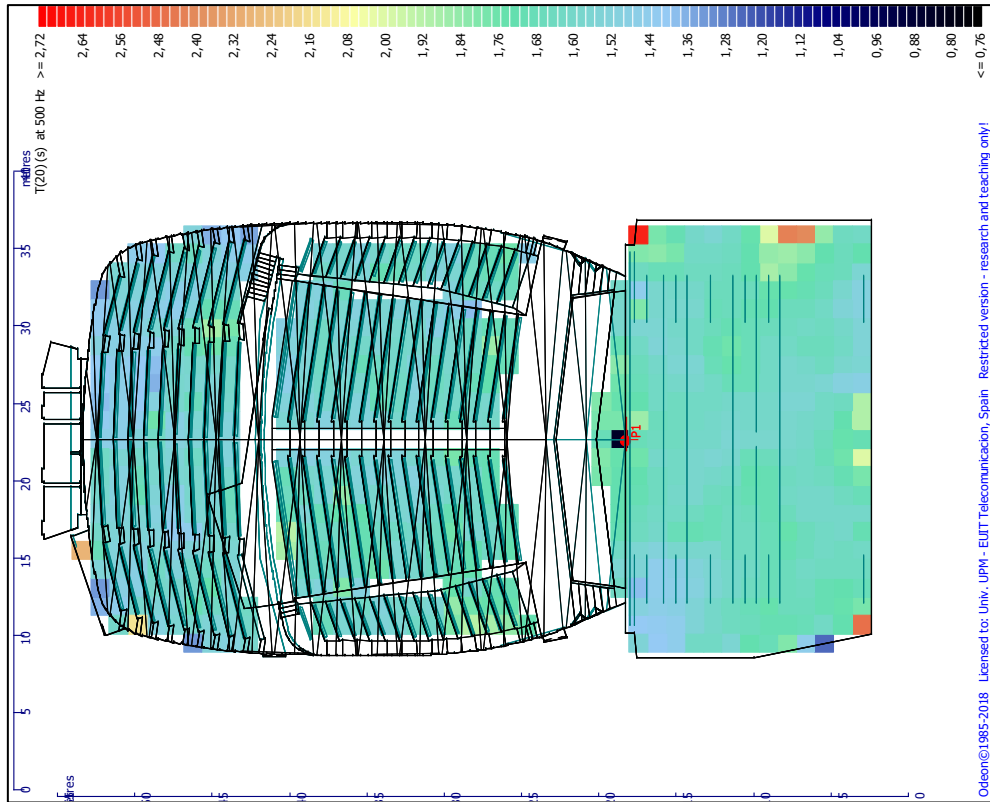


Figura 78. Rejilla de  $T_{20}$  en la octava de 500 Hz para la sala original.

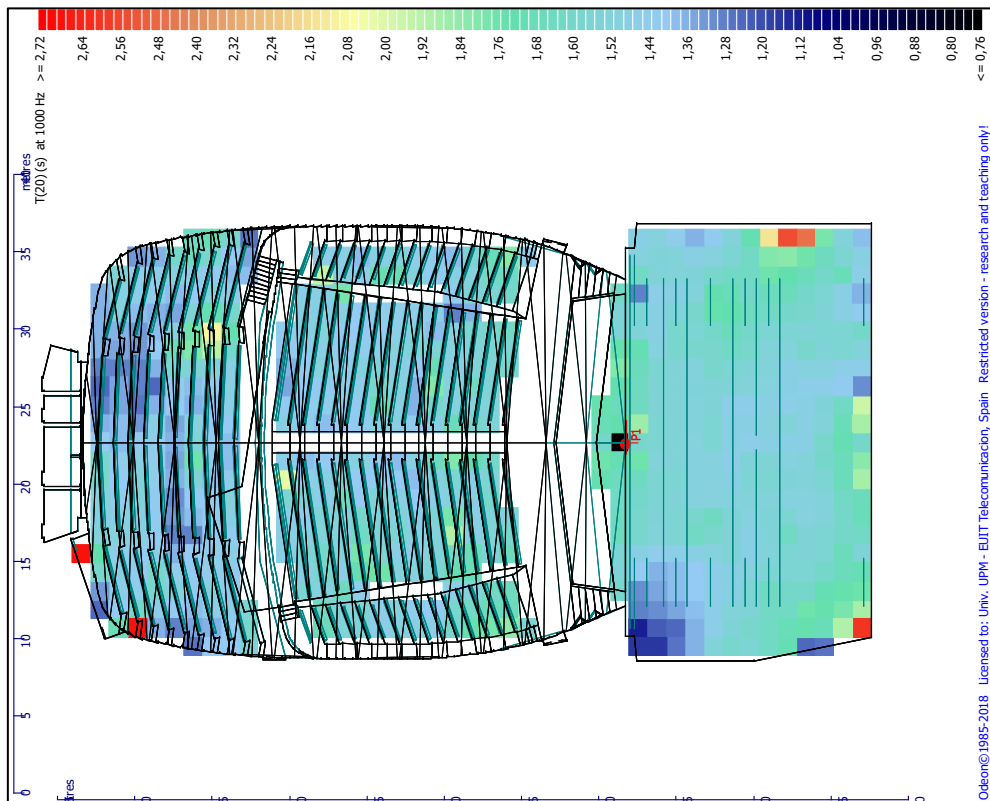


Figura 79. Rejilla de  $T_{20}$  en la octava de 1 kHz para la sala original.

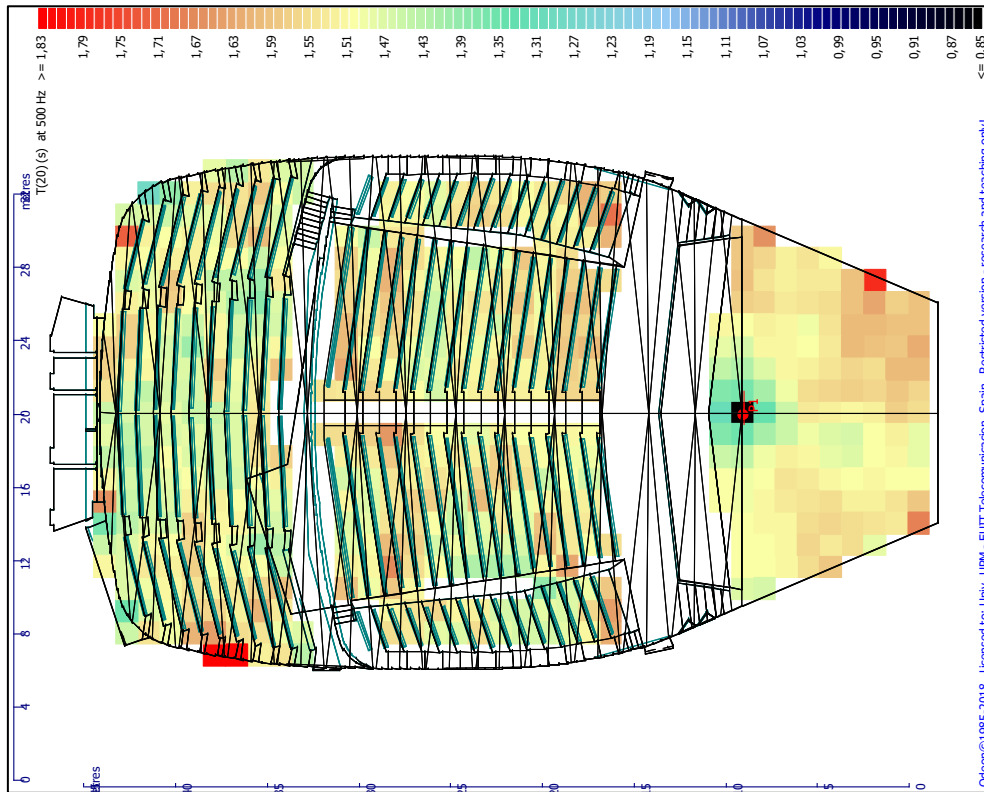


Figura 80. Rejilla de  $T_{20}$  en la octava de 500 Hz para la sala con concha acústica.

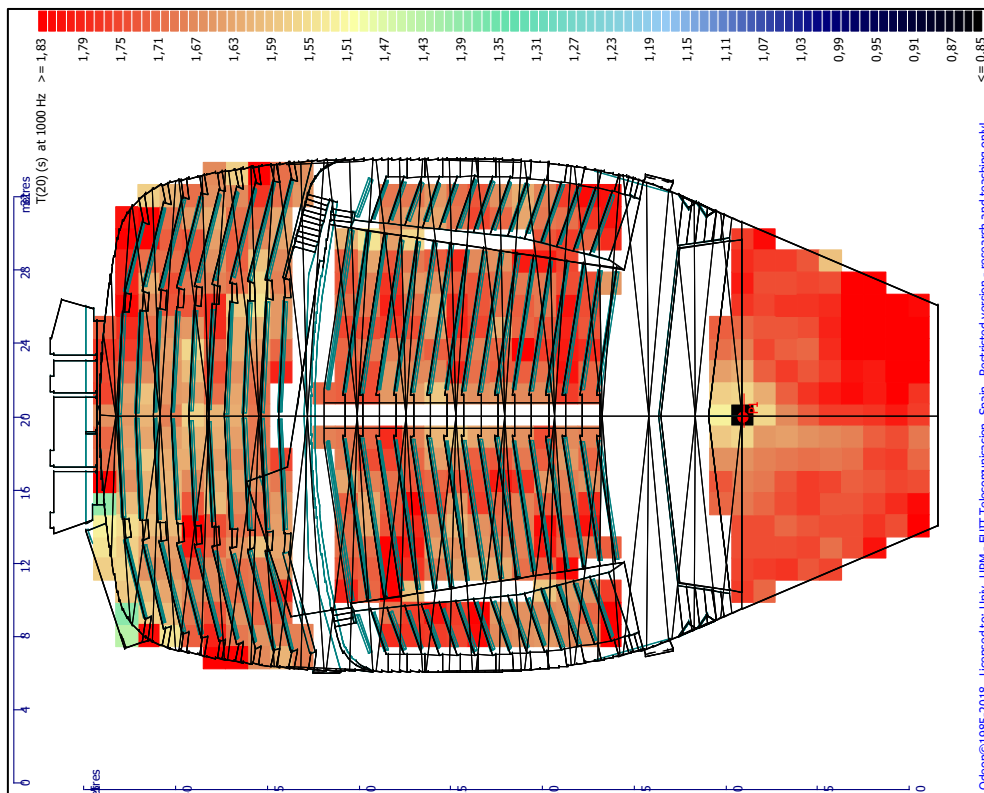


Figura 81. Rejilla de  $T_{20}$  en la octava de 1 kHz para la sala con concha acústica.

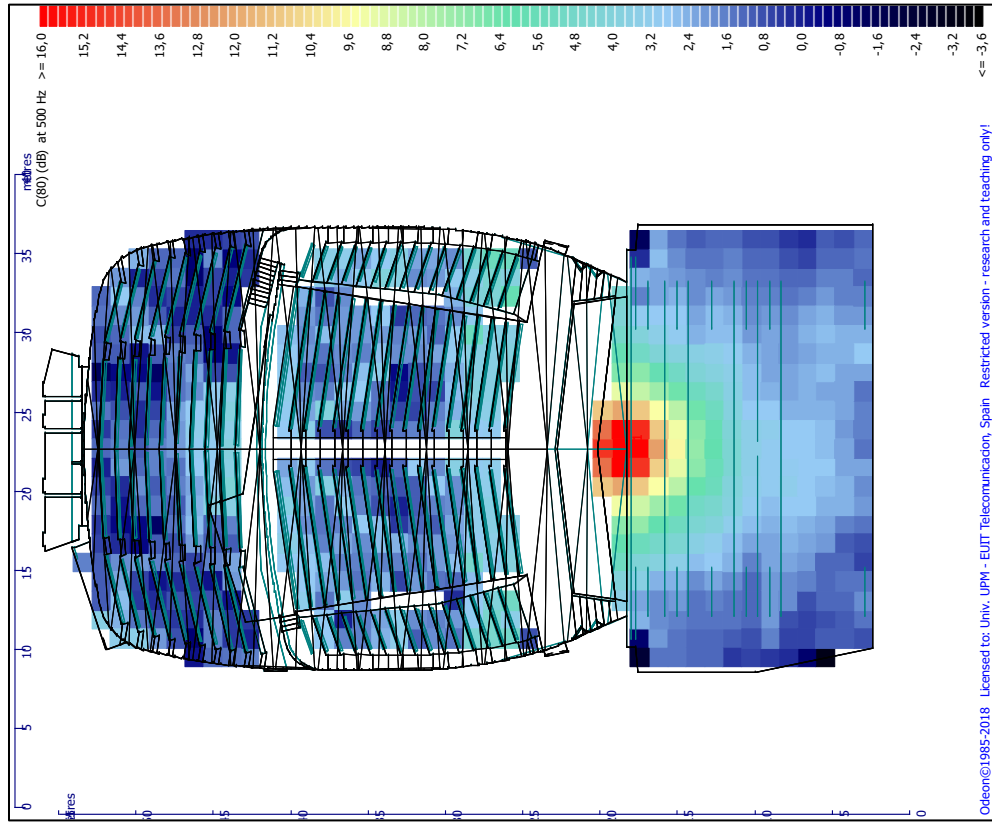


Figura 82. Rejilla de  $C_{80}$  en la octava de 500 Hz para la sala original.

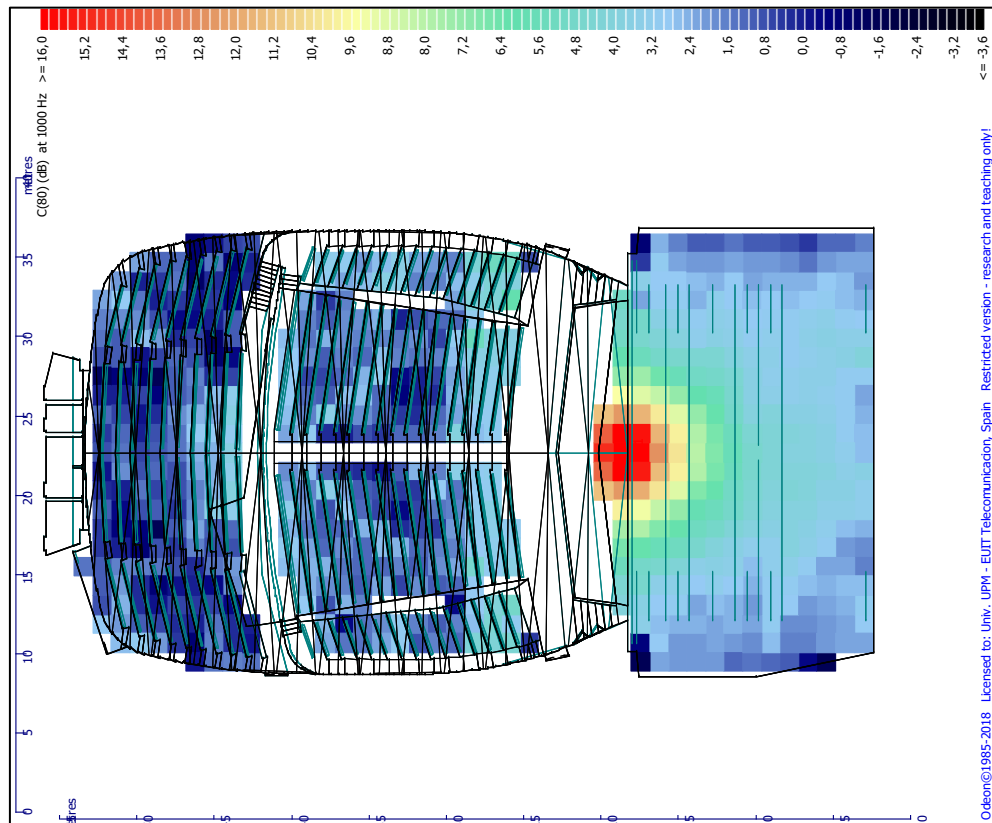


Figura 83. Rejilla de  $C_{80}$  en la octava de 1 kHz para la sala original.

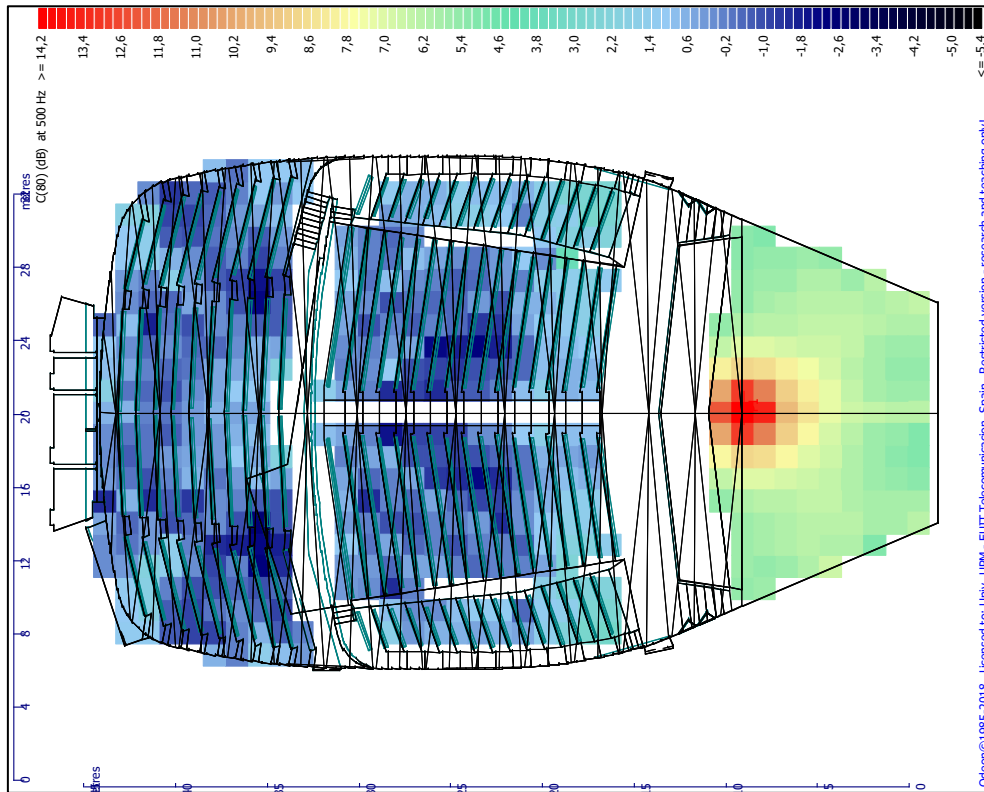


Figura 84. Rejilla de  $C_{80}$  en la octava de 500 Hz para la sala con concha acústica.

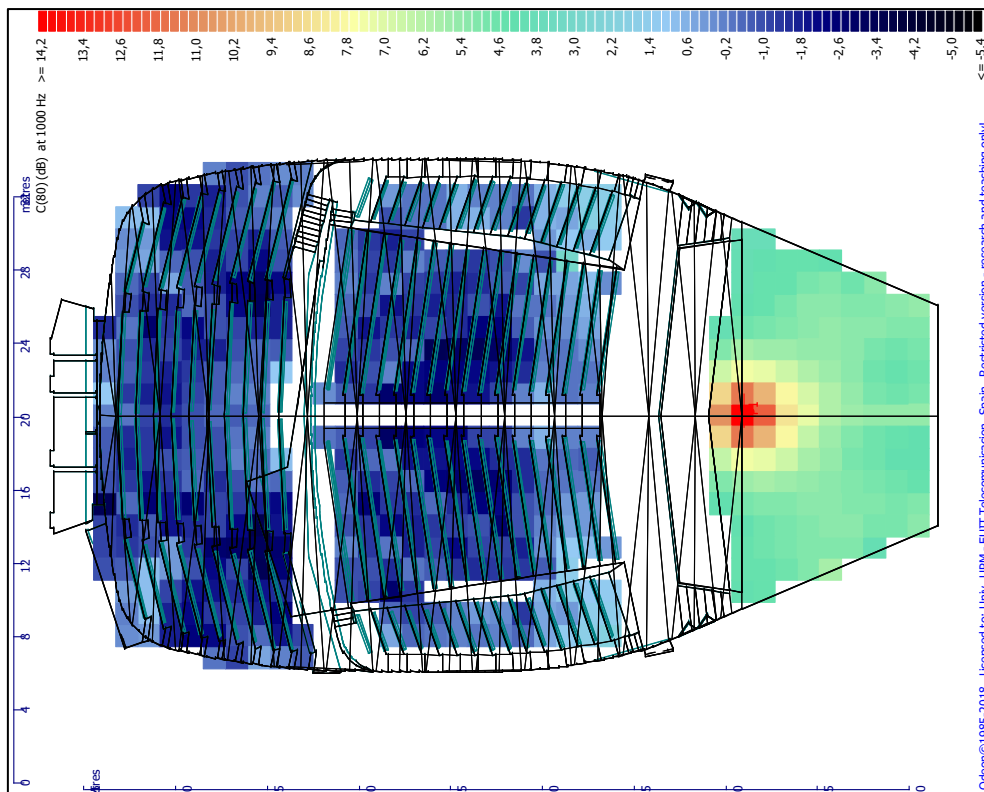


Figura 85. Rejilla de  $C_{80}$  en la octava de 1 kHz para la sala con concha acústica.

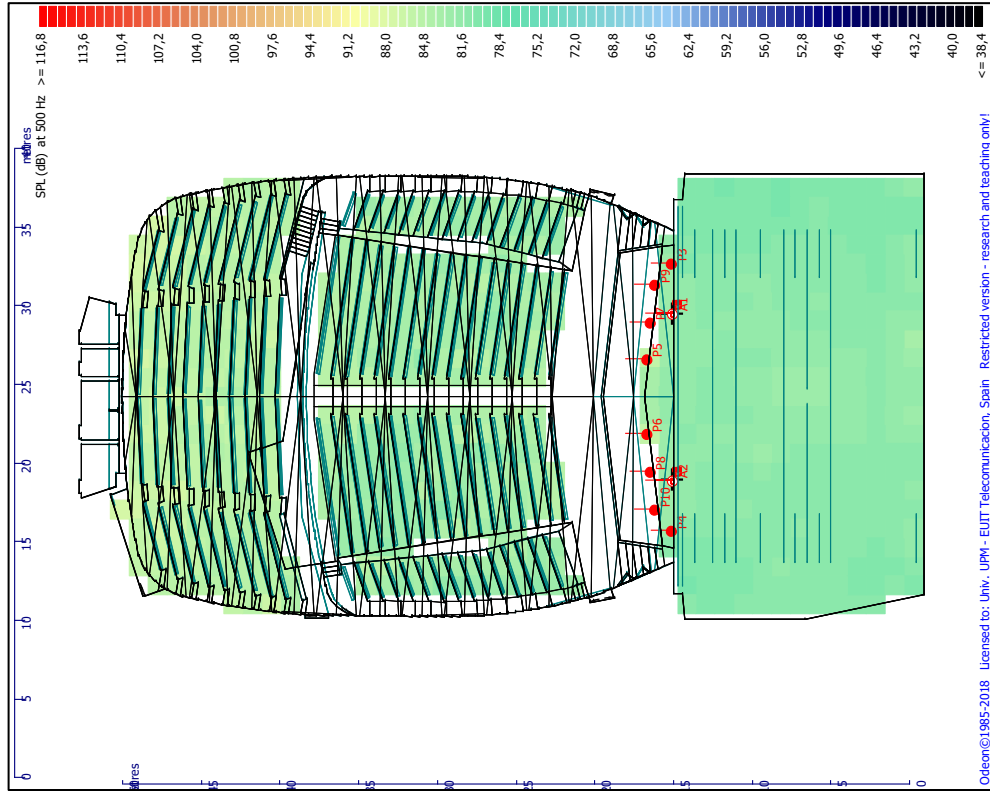


Figura 86. Rejilla de  $SPL_L$  en la octava de 500 Hz para la sala original.

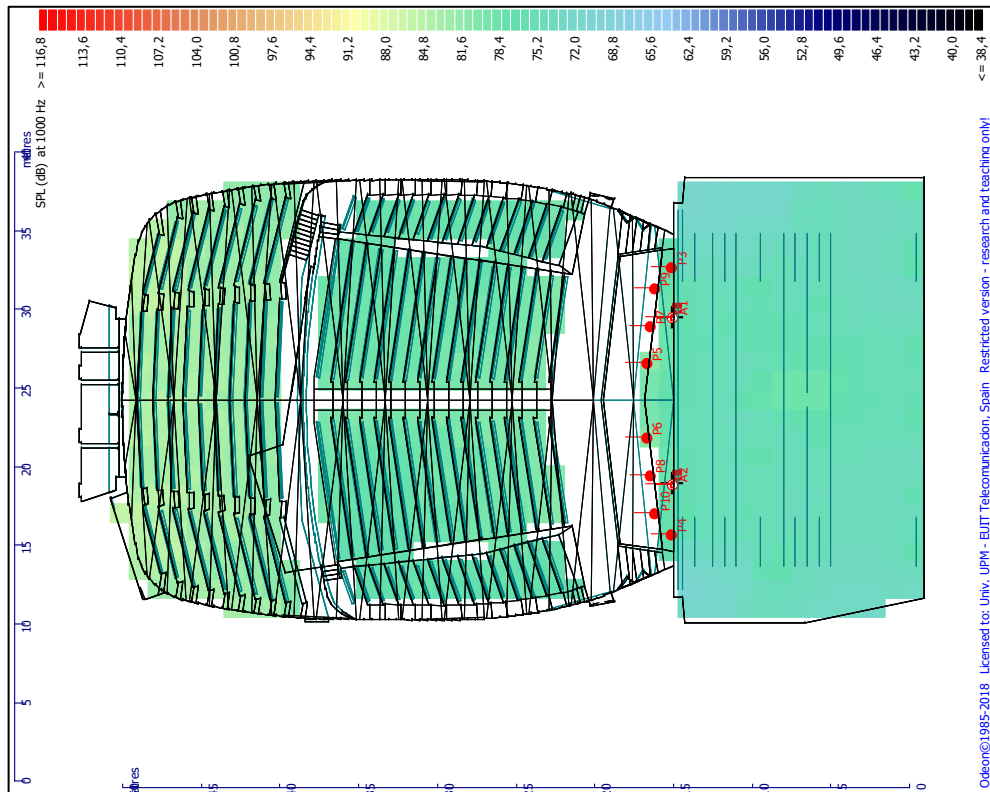


Figura 87. Rejilla de  $SPL_L$  en la octava de 1 kHz para la sala original.

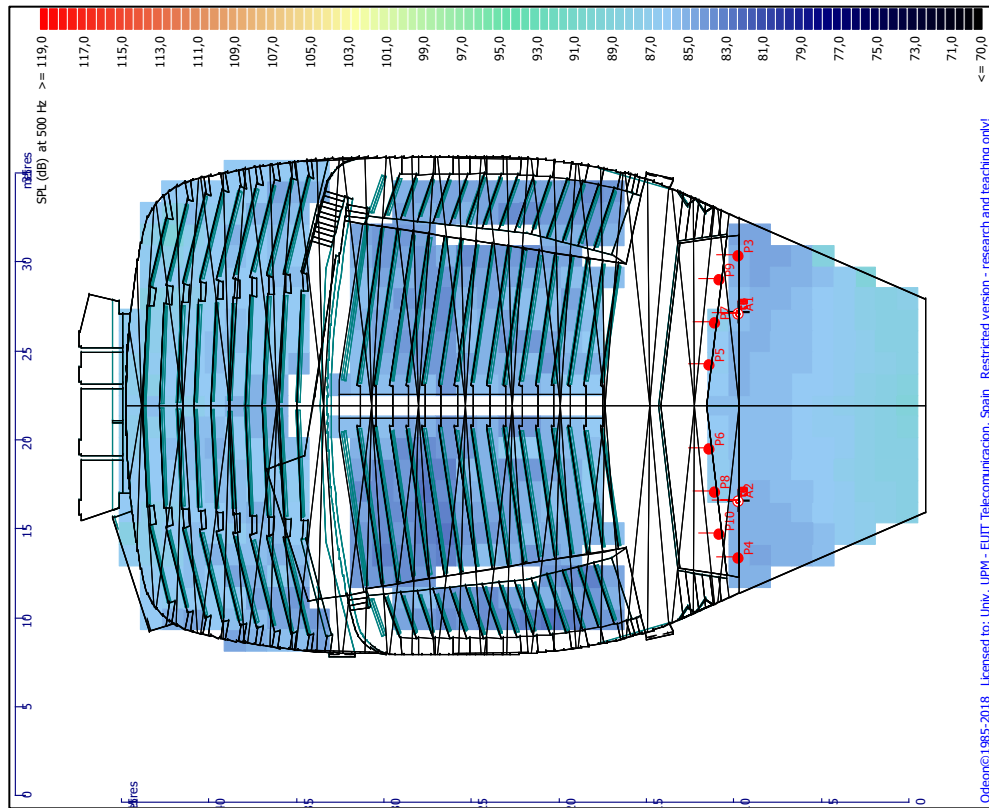


Figura 88. Rejilla de  $SPL_L$  en la octava de 500 Hz para la sala con concha acústica.

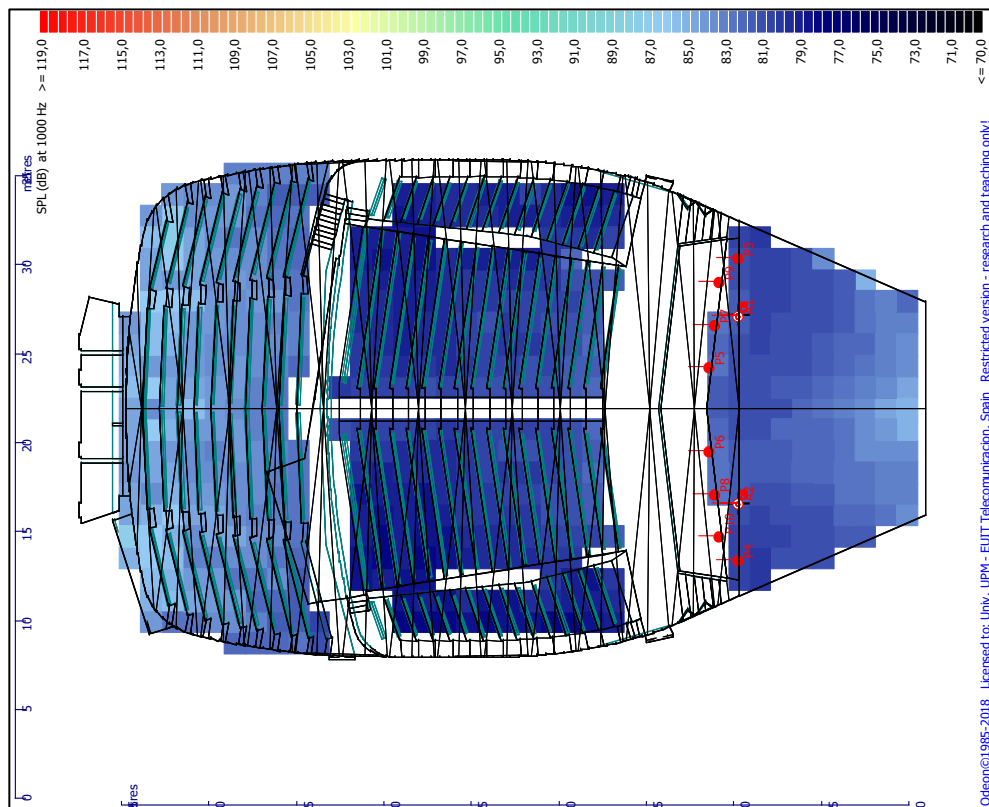


Figura 89. Rejilla de  $SPL_L$  en la octava de 1 kHz para la sala con concha acústica.

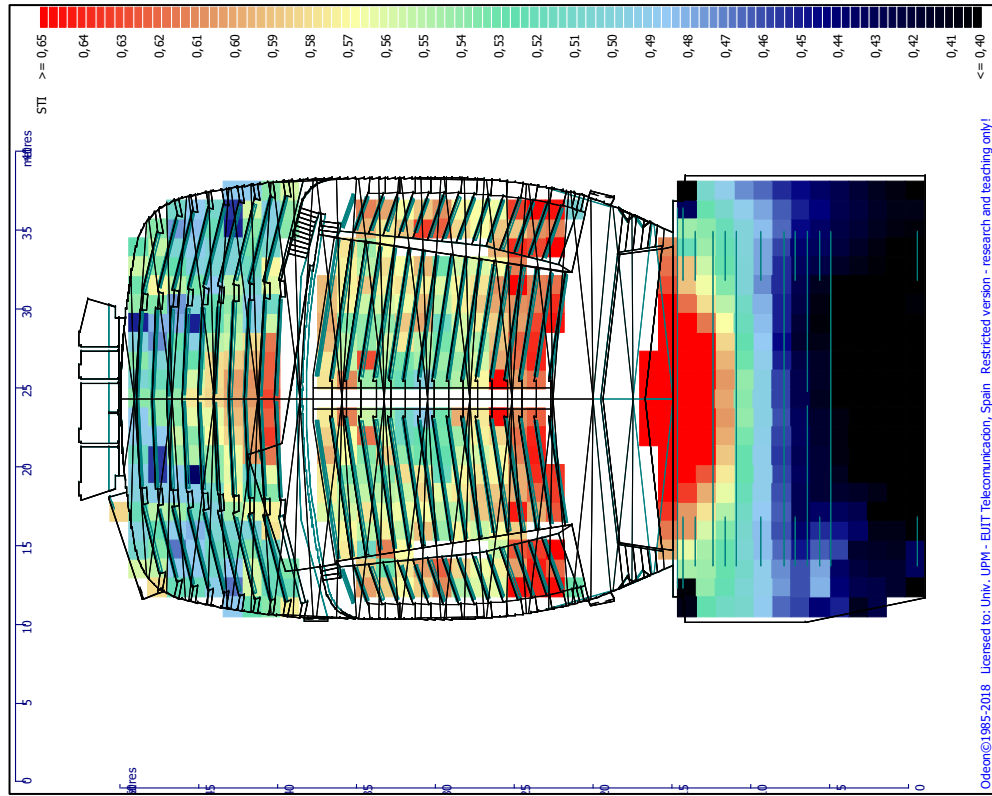


Figura 90. Rejilla de STI evaluado con voz para la sala original.

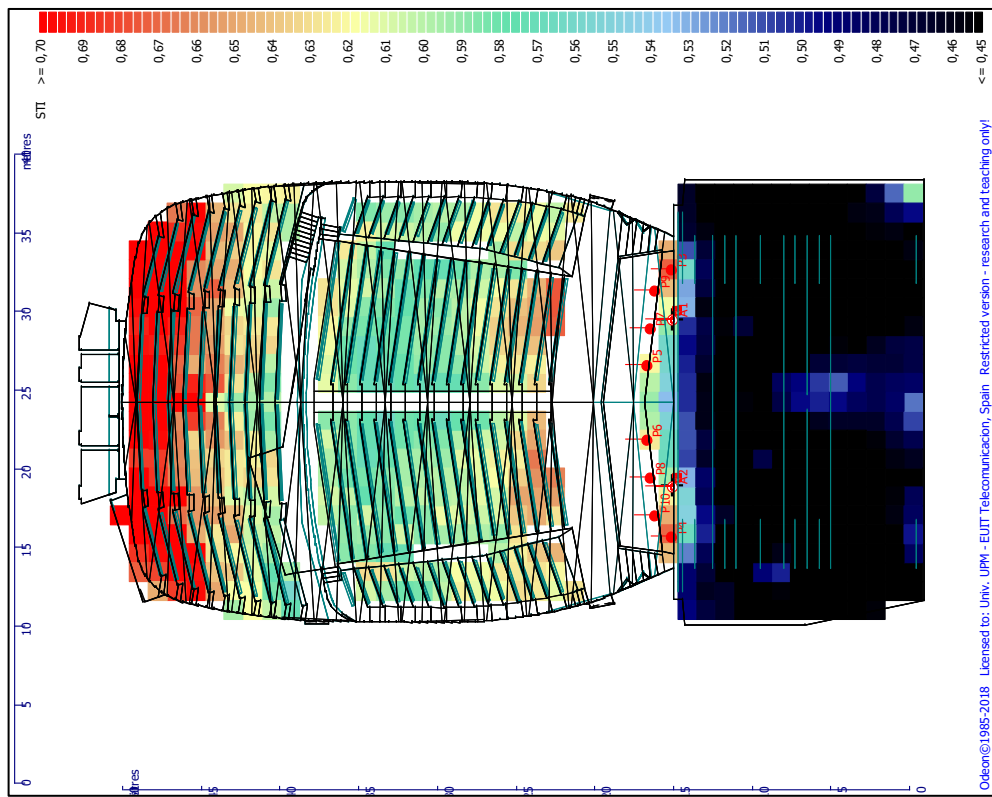


Figura 91. Rejilla de STI evaluado con sistema electroacústico para la sala original.

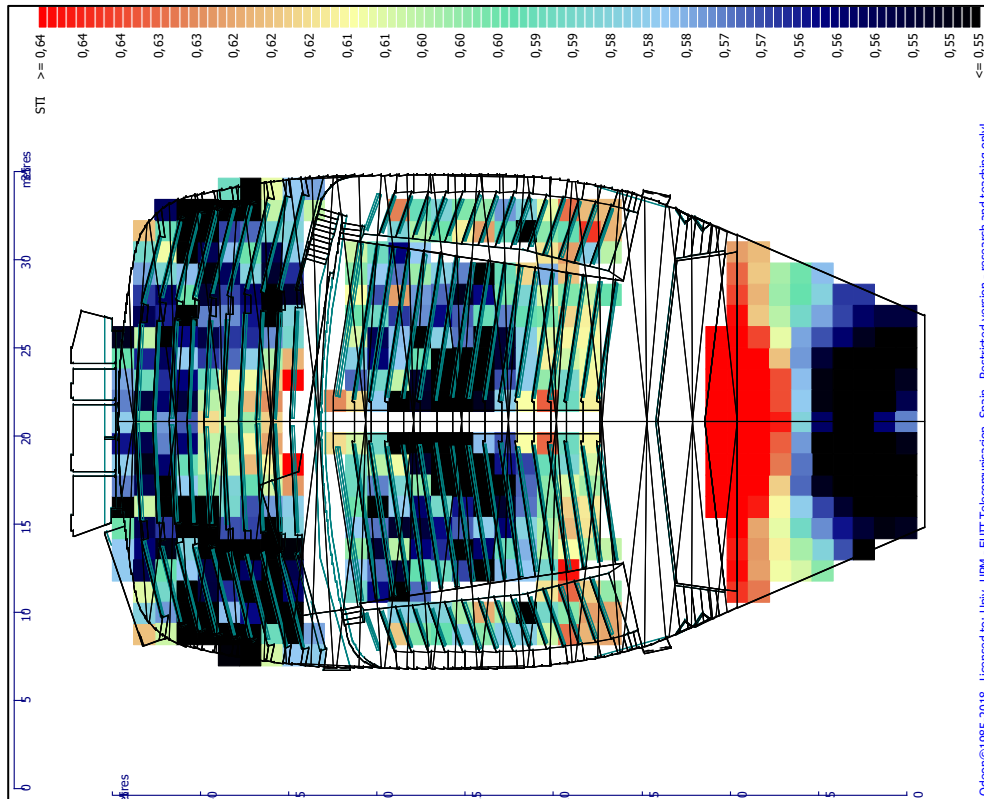


Figura 92. Rejilla de STI evaluado con voz para la sala con concha acústica.

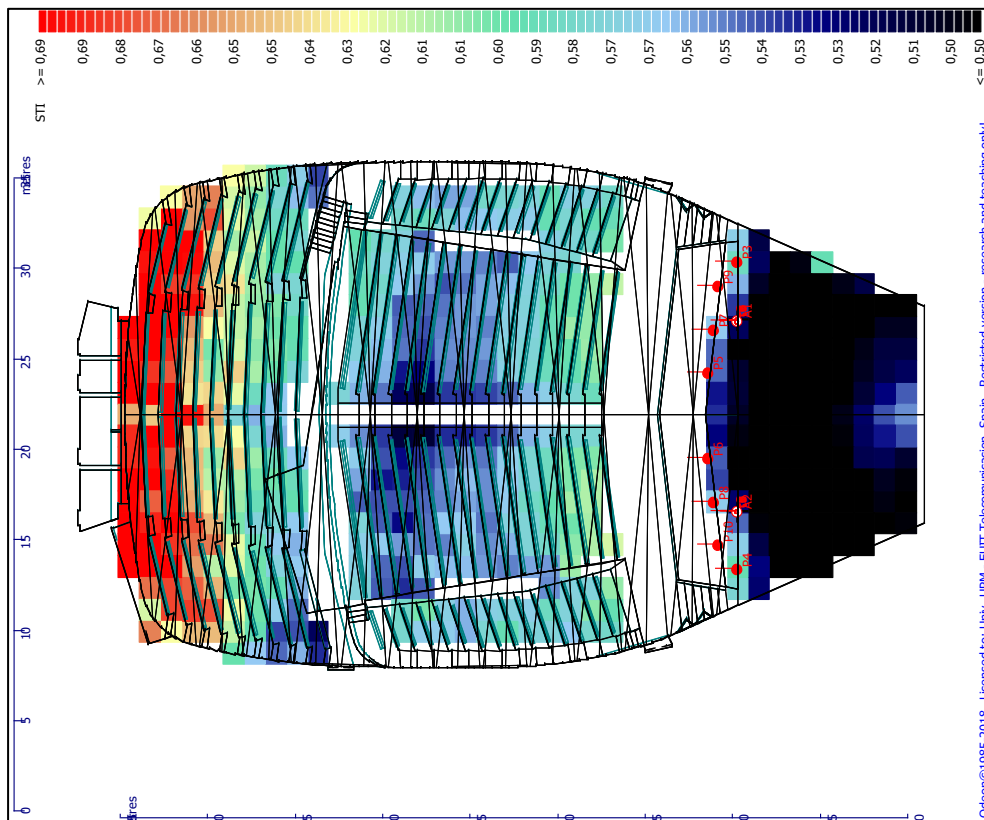


Figura 93. Rejilla de STI evaluado con sistema electroacústico para la sala con concha acústica.