



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TESIS DOCTORAL

**REVISIÓN DE LOS VALORES DEL ESPECTRO DE
ABSORCIÓN DE LA CAJA DE ESCENA EN
TEATROS MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL
MÉTODO DE SUPERFICIES DE RESPUESTA**

AUTORA

Blanca Pérez-Aguilar

DIRECTOR

Dr. Ignacio Guillén Guillamón

JUNIO 2023

七転び八起き

AGRADECIMIENTOS

En ocasiones suceden acontecimientos que ponen nuestra vida patas arriba. Los agradecimientos de hoy no son los mismos que serían si determinados sucesos no hubiesen ocurrido en los últimos meses. De repente lo fútil deja de preocuparnos y lo realmente importante se convierte en el centro de nuestro movimiento. Dicho esto, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a las personas e instituciones que me han ayudado para que hoy esta tesis vea la luz.

A Enrique Fayos director de Olympia Metropolitana, gestora de los teatros Olympia y Talía, y a los técnicos Óscar y Tortosa. A José Luís Gasent por hacer posible la visita al Teatro de la Banda Primitiva de Lliria. A Roberto García, director adjunto de Artes Escénicas del Institut Valencià de Cultura del que depende el Teatro Principal de Valencia, y a Francisco Beltrán de la Oficina Técnica. A Ximo Rojo y a Isabel del Servicio de Acción Cultural del teatro El Musical. A todos ellos y a las personas relacionadas que posibilitaron que las visitas y las mediciones acústicas se realizaran, muchas gracias.

A Carlos Montesinos, Eduardo de Miguel y Juan de Dios Pérez, por facilitarme documentación gráfica y constructiva de los espacios.

A mi director de tesis por su apoyo y sus consejos durante la elaboración de esta tesis.

A los compañeros y amigos, en especial a Eugenio por hacer la revisión de este texto.

A mi familia por estar siempre, por ayudarme en el camino, cada uno en la forma en que ha podido, todas ellas necesarias y significativas.

Y especialmente a Joaquín, a Marcos y a Julio, por la paciencia y la alegría, por ser mi todo, sin vosotros nada de esto tendría sentido.

ABSTRACT

The acoustic behavior of a room is determined, among other factors, by the acoustic absorption coefficient of the interior surfaces that make it up. The absorption coefficient is found through laboratory tests or proposals from the scientific literature.

In theaters, the volume of the stage house is usually equivalent to the volume of the room itself, if not greater; and it is connected to the room through the proscenium opening. To calculate the acoustic behavior of a theater, the volume of the fly tower is not considered, but instead it is replaced in the model by the surface of the stage opening. Since the proscenium opening is a large recess, it is not possible to find its absorption values in the laboratory; that's why they are taken from the scientific literature. It is not known how the different authors who have proposed values for the absorption coefficient of the stage opening have found these values.

In the present work, the absorption coefficient of the proscenium opening of six theaters of different characteristics and periods has been found. For this, graphic and constructive information of the spaces has been compiled, standardized acoustic measurements have been made with the stage opening opened and closed, and three-dimensional computer models that have been calibrated with the on-site measurements have been prepared. In the first phase, the model has been calibrated with the stage opening closed and in the second one the process has been repeated with the stage opening opened. The adjustment of the virtual models has been carried out using the response surface method. This method has allowed to consider up to two constructive solutions with unknown acoustic behavior. This way it has been possible to deduce the absorption coefficient of the stage opening in each case.

Finally, the coefficients of the proscenium opening found in each theater have been compared with those proposed by several authors. In addition, the influence of the absorption of the stage opening in each model has been evaluated. Noting that the values proposed in the reference works are adequate in old theaters, but not in modern ones, where they are valid only in medium and high frequencies.

RESUMEN DE LA TESIS

El comportamiento acústico de una sala viene determinado, entre otros factores, por el coeficiente de absorción acústica de las soluciones constructivas de las superficies interiores que lo forman. El coeficiente de absorción se halla a través de ensayos de laboratorio o de las propuestas de la literatura científica.

En teatros habitualmente el volumen de la caja de escena es equiparable sino superior al volumen de la sala propiamente dicho, y se comunica con la sala a través de la boca de escena. Para calcular el comportamiento acústico de un teatro no se tiene en cuenta el volumen de la caja de escena, sino que éste se sustituye en el modelo por la superficie de la boca de escena. El coeficiente de absorción de la boca de escena se toma de la literatura científica. Siendo la boca de escena un gran vacío, no es posible encontrar sus valores de absorción en laboratorio. Se desconoce cómo los distintos autores que han propuesto valores para el coeficiente de absorción de la boca de escena han llegado a dichos valores.

En el presente trabajo se ha hallado el coeficiente de absorción de la boca de escena de seis teatros de diferentes características y épocas. Para ello, se ha recopilado información gráfica y constructiva de los espacios, se han realizado mediciones acústicas normalizadas con la boca de escena abierta y cerrada, y se han elaborado modelos informáticos tridimensionales que han sido calibrados con las mediciones tomadas “in situ”. En una primera fase se ha calibrado el modelo con la boca de escena cerrada y en una segunda se ha repetido el proceso con la boca de escena abierta. El ajuste de los modelos virtuales se ha ejecutado mediante el empleo del método de las superficies de respuesta. Este método ha permitido considerar hasta dos soluciones constructivas con comportamiento acústico desconocido. De esta forma se ha podido deducir el coeficiente de absorción de la boca de escena en cada caso.

Finalmente, los coeficientes de la boca de escena hallados en cada teatro se han comparado con los propuestos por diversos autores. Además, se ha evaluado la influencia de la absorción de la boca de escena en cada modelo. Constatando que los valores propuestos en las obras de referencia son adecuados en teatros antiguos, no así en los modernos en los que son válidos sólo en frecuencias medias y altas.

RESUM DE LA TESI

El comportament acústic d'un espai ve determinat, entre altres factors, pel coeficient d'absorció acústica de les solucions constructives de les superfícies interiors que el formen. El coeficient d'absorció és troba mitjançant assajos de laboratori o de les propostes de la literatura científica.

En teatres habitualment el volum de la caixa d'escena és equiparable, sinó superior al volum de la sala, i es comunica amb la sala mitjançant la boca d'escena. Per calcular el comportament acústic d'un teatre no es té en compte el volum de la caixa d'escena, sinó que es substitueix al model per la superfície de la boca d'escena. Com que la boca d'escena és un gran buit, no és possible trobar els seus valors d'absorció al laboratori. Per la qual cosa els seus valors es prenen de la literatura científica. Es desconeix com els autors que han proposat valors per al coeficient d'absorció de la boca d'escena han arribat a aquests valors.

En aquest treball s'ha trobat el coeficient d'absorció de la boca d'escena de sis teatres de característiques i èpoques diferents. Per fer-ho, s'ha recopilat informació gràfica i constructiva dels espais, s'han realitzat mesures acústics normalitzades amb la boca d'escena oberta i tancada, i s'han elaborat models informàtics tridimensionals que han estat calibrats amb les mesures preses "in situ". En una primera fase el model s'ha calibrat amb la boca d'escena tancada i en una segona s'ha repetit el procés amb la boca d'escena oberta. L'ajust dels models virtuals s'ha executat mitjançant la utilització del mètode de les superfícies de resposta. Aquest mètode ha permès considerar fins a dues solucions constructives amb un comportament acústic desconegut. D'aquesta manera, s'ha pogut deduir el coeficient d'absorció de la boca d'escena en cada cas.

Finalment, els coeficients de la boca d'escena trobats a cada teatre s'han comparat amb els proposats per diversos autors. A més, s'ha avaluat la influència de l'absorció de la boca d'escena a cada model. Constatant que els valors proposats a les obres de referència són adequats en teatres antics, no així als moderns en què són vàlids només en freqüències mitjanes i altes.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	3
ABSTRACT.....	4
RESUMEN DE LA TESIS	5
RESUM DE LA TESI	6
INDICE DE FIGURAS	10
INDICE DE TABLAS	20
1 INTRODUCCIÓN. OBJETIVOS Y ESTRUCTURA.....	33
1.1 Objetivos.....	35
1.2 Estructura de la Tesis	36
2 MARCO TEÓRICO	38
2.1 Historia y Evolución de los Teatros.....	38
2.2 La acústica como ciencia	43
2.3 Acústica en Teatros.....	46
2.4 La absorción de la boca de escena en la literatura.....	51
2.5 Parámetros de calidad acústica	55
2.5.1 Tiempo de reverberación.....	55
2.5.2 TR_{10} , TR_{20} , TR_{30} y EDT.....	56
2.5.3 Calidez	56
2.5.4 Brillo	57
2.5.5 Claridad	57
2.5.6 Definición	58
2.5.7 STI/RASTI.....	58
2.6 Método de las Superficies de Respuesta	59
3 METODOLOGÍA	62

3.1	Mediciones de parámetros acústicos in situ.....	64
3.2	Simulación. Modelo virtual de las salas.....	65
3.3	Calibrado de los modelos mediante el empleo del RSM.	66
3.3.1	Casos particulares.....	72
3.3.2	Obtención de los coeficientes de absorción de la boca de escena.....	73
3.4	Selección de salas.....	73
4	RESULTADOS	76
4.1	Sala 1. Teatro Principal de Valencia	77
4.1.1	Descripción de la sala	77
4.1.2	Medición de parámetros	84
4.1.3	Aplicación del método de superficies de respuesta	87
4.1.4	Resultados.....	122
4.2	Sala 2. Teatro Olympia. Valencia	124
4.2.1	Descripción de la sala	124
4.2.2	Medición de parámetros	133
4.2.3	Aplicación del método de superficies de respuesta	136
4.2.4	Resultados.....	158
4.3	Sala 3. Teatro Talía. Valencia.....	160
4.3.1	Descripción de la sala	160
4.3.2	Medición de parámetros	169
4.3.3	Aplicación del método de superficies de respuesta	171
4.3.4	Resultados.....	190
4.4	Sala 4. Teatro de la Banda Primitiva de Llíria.....	193
4.4.1	Descripción de la sala	193
4.4.2	Medición de parámetros	200

4.4.3	Aplicación del método de superficies de respuesta	204
4.4.4	Resultados.....	246
4.5	Sala 5. Teatro El Musical. Valencia.....	249
4.5.1	Descripción de la sala.....	249
4.5.2	Medición de parámetros	256
4.5.3	Aplicación del método de superficies de respuesta	260
4.5.4	Resultados.....	290
4.6	Sala 6. Auditori Alfons Roig. Facultad de Bellas Artes. UPV. Valencia	292
4.6.1	Descripción de la sala.....	292
4.6.2	Medición de parámetros	299
4.6.3	Aplicación del método de superficies de respuesta	303
4.6.4	Resultados.....	338
4.7	Resumen de los resultados obtenidos y discusión	340
4.7.1	Sobre el empleo del RSM.....	340
4.7.2	La absorción de la boca de escena. Investigadores y modelos virtuales	341
5	CONCLUSIONS AND FUTURE PERSPECTIVES	352
5.1	Conclusions.....	352
5.2	Future perspectives	353
6	REFERENCIAS.....	354
7	BIBLIOGRAFÍA.....	359
8	ANEXO.....	364

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Teatro griego de Epidauro en Grecia	38
Figura 2. Teatro romano en Bosra (Siria).....	39
Figura 3. Teatro Circo de Albacete. Vista de patio de butacas y concha del techo	42
Figura 4. Ejemplo de teatro con "thrust-stage".....	43
Figura 5. Superficie de respuesta	60
Figura 6. Representación de región de superficie de respuesta.	60
Figura 7. Diagrama del diseño de la investigación.....	63
Figura 8. Teatro Principal. Ejemplos de superficie de respuesta, a la izquierda telón bajado a 2000Hz a la derecha telón subido a 4000 Hz	66
Figura 9. Ejemplo de representación mediante región de superficie de respuesta.....	70
Figura 10. Vista de la sala	79
Figura 11. Vista del escenario	79
Figura 12. Butacas platea	80
Figura 13. Vista lateral	80
Figura 14. Lámpara	81
Figura 15. Vista palcos	81
Figura 16. Sección (Fuente: MIRE).....	82
Figura 17. Planta (Fuente:MIRE).....	82
Figura 18. Modelo virtual de la sala	87
Figura 19. Captura del test 3D Billard realizado en ODEON	87
Figura 20. Captura del test rayos perdidos.....	88
Figura 21. Captura del test aristas únicas.....	88
Figura 22. Representación gráfica del TR ₃₀ medido "in situ" con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables y la modelización inicial.....	89
Figura 23.. Comparativa TR ₃₀ . Medición "in situ", modelización y resultados tras aplicación del RSM	94
Figura 24. Superficie de respuesta a 125 Hz.....	95
Figura 25. Superficie de respuesta a 250 Hz.....	96
Figura 26.. Superficie de respuesta a 500 Hz.....	97

Figura 27. Superficie de respuesta a 1000 Hz	98
Figura 28. Superficie de respuesta a 2000 Hz	99
Figura 29. Superficie de respuesta a 4000 Hz	100
Figura 30. Representación gráfica del TR ₃₀ medido “in situ” con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables, la modelización inicial, y la modelización de la combinación 1	102
Figura 31. Espectro de absorción de las butacas de platea (bibliografía- azul- y aplicación RSM-verde-)	103
Figura 32. Espectro de absorción paredes cubiertas con cortinas separadas de la misma (bibliografía-rojo- y aplicación RSM- morado-)	103
Figura 33. Comparativa TR ₃₀ , medición "in situ" con telón subido y modelización inicial con boca de escena abierta	106
Figura 34. Comparativa TR ₃₀ . Medición in situ, modelización, y resultados TR ₃₀ tras aplicación RSM....	110
Figura 35. Superficie de respuesta a 125 Hz.....	111
Figura 36. Superficie de respuesta a 250 Hz.....	112
Figura 37. Superficie de respuesta a 500 Hz.....	113
Figura 38. Superficie de respuesta a 1000 Hz.....	114
Figura 39. Superficie de respuesta a 2000 Hz.....	115
Figura 40. Superficie de respuesta a 4000 Hz.....	116
Figura 41. Representación gráfica del TR ₃₀ medido “in situ” con telón subido, los límites superior e inferior aceptables, la modelización inicial, y la modelización de la combinación 1	118
Figura 42. Espectro de las paredes cubiertas con cortinas (bibliografía-azul- y aplicación RSM- gris-)...	119
Figura 43. Espectro de la boca de escena (bibliografía-rojo- y aplicación RSM- amarillo-).....	119
Figura 44. Comparativa TR ₃₀ telón bajado, medición real con límites superior e inferior aceptables, resultado obtenido en modelo con telón bajado tras análisis con telón subido	120
Figura 45. Comparativa TR ₃₀ telón subido. Medición real con límites superior e inferior, modelo ajustado, y modelos empleando los coeficientes de absorción de boca de escena de distintos autores	123
Figura 46. Comparativa TR ₃₀ con telón subido con distintos valores de absorción para la boca de escena	123
Figura 47. Vista de la sala	126
Figura 48. Vista del escenario	126
Figura 49. Vista de palcos	127

Figura 50. Vista planta primera. Butacas y pavimento	127
Figura 51. Vista planta primera. Techo.....	128
Figura 52. Cuadros acolchados.....	128
Figura 53. Cuadros acolchados.....	129
Figura 54. Cuadros acolchados.....	129
Figura 55. Decorado del techo y falso lucernario	130
Figura 56. Planta (Fuente: Carlos Montesinos)	131
Figura 57. Sección (Fuente: Carlos Montesinos)	131
Figura 58. Captura del test 3D Billard realizado en Odeon	136
Figura 59. Captura del test rayos perdidos.....	136
Figura 60. Captura del test aristas únicas	137
Figura 61. Representación gráfica del TR ₃₀ medido “in situ” con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables y la modelización inicial.....	138
Figura 62. Comparativa TR ₃₀ . Medición "in situ", modelización y resultados tras aplicación del RSM	143
Figura 63. Superficie de respuesta a 125 Hz.....	144
Figura 64. Superficie de respuesta a 250 Hz.....	145
Figura 65 . Superficie de respuesta a 500 Hz.....	146
Figura 66. Superficie de respuesta a 1000 Hz.....	147
Figura 67. Superficie de respuesta a 2000 Hz.....	148
Figura 68. Superficie de respuesta a 4000 Hz.....	149
Figura 69. Representación gráfica del TR ₃₀ medido “in situ” con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables, la modelización inicial, y la modelización de la combinación 1	151
Figura 70. Representación gráfica del TR ₃₀ medido “in situ” con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables, la modelización inicial, y la modelización de la combinación 2	152
Figura 71 . Espectro de absorción del techo de la zona general (bibliografía- azul- y aplicación RSM-verde-).....	153
Figura 72. Espectro de absorción de las divisiones de los palcos con estructura de madera, forro de tela y, presumiblemente, aislamiento en su interior (bibliografía-rojo- y aplicación RSM- morado-).....	153
Figura 73.Espectro de absorción de las butacas (antes-cian- y después- naranja-)	154

Figura 74. Comparativa TR ₃₀ , medición "in situ" con telón subido y modelización inicial con boca de escena abierta	157
Figura 75 . Comparativa TR ₃₀ telón subido. Medición real con límites superior e inferior, modelo ajustado, y modelos empleando los coeficientes de absorción de boca de escena de distintos autores	159
Figura 76. Comparativa TR ₃₀ con telón subido con distintos valores de absorción para la boca de escena	159
Figura 77. Vista del escenario.....	162
Figura 78. Vista de la sala	163
Figura 79. Lámpara decorativa	163
Figura 80. Decoración sobre boca de escena	164
Figura 81. Butacas anfiteatro	164
Figura 82. Butacas de palcos	165
Figura 83. Palcos.....	165
Figura 84. Instalaciones pavimento platea	166
Figura 85. Planta (Fuente: Carlos Vicente Montesinos)	167
Figura 86. Sección (Fuente: Carlos Vicente Montesinos)	167
Figura 87. Posición de la fuente y los receptors en el modelo.....	172
Figura 88. Captura del test 3D Billard realizado en Odeon	172
Figura 89. Captura del test rayos perdidos.....	172
Figura 90. Captura del test aristas únicas.....	173
Figura 91. Representación gráfica del TR ₃₀ medido "in situ" con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables y la modelización inicial.....	174
Figura 92. Comparativa TR ₃₀ . Medición "in situ", modelización y resultados tras aplicación del RSM	179
Figura 93. Superficie de respuesta a 125 Hz.....	180
Figura 94. Superficie de respuesta a 250 Hz.....	181
Figura 95 . Superficie de respuesta a 500 Hz	182
Figura 96. Superficie de respuesta a 1000 Hz.....	183
Figura 97. Representación gráfica del TR ₃₀ medido "in situ" con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables, la modelización inicial, y la modelización de la combinación 1	185
Figura 98. Espectro de absorción de las butacas (bibliografía- azul- y aplicación RSM-verde-).....	186

Figura 99.. Espectro de absorción del techo general de la sala (bibliografía-rojo- y aplicación RSM- morado-).....	186
Figura 100. Comparativa TR ₃₀ , medición "in situ" con telón subido y modelización inicial con boca de escena abierta	189
Figura 101. Comparativa TR ₃₀ telón subido. Medición real con límites superior e inferior, modelo ajustado, y modelos empleando los coeficientes de absorción de boca de escena de distintos autores	191
Figura 102. Comparativa TR ₃₀ con telón subido con distintos valores de absorción para la boca de escena	192
Figura 103. Vista del fondo de la sala	195
Figura 104. Vista del escenario	195
Figura 105. Platea	196
Figura 106. Platea bajo anfiteatro	196
Figura 107. Lámpara de techo	197
Figura 108. Primer anfiteatro	197
Figura 109. Segundo anfiteatro	198
Figura 110. Anfiteatro fondo	198
Figura 111. Planta. Posición de la fuente sonora en rojo y del micrófono en azul.....	199
Figura 112. Sección. Posición de la fuente en rojo y de la fuente en azul.....	199
Figura 113. Modelo virtual con posiciones de la fuente y receptores.	204
Figura 114. Captura del test 3D Billard realizado en Odeon	204
Figura 115. Captura del test rayos perdidos.....	205
Figura 116. Captura del test aristas únicas.....	205
Figura 117. Representación gráfica del TR ₃₀ medido "in situ" con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables y la modelización inicial.....	206
Figura 118 . Comparativa TR ₃₀ . Medición "in situ", modelización y resultados tras aplicación del RSM ..	211
Figura 119. Representación gráfica del TR ₃₀ medido "in situ" con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables y la modelización Ajuste 2	213
Figura 120. Comparativa TR ₃₀ . Medición "in situ", modelización y resultados tras aplicación del RSM ..	216
Figura 121. Comparativa TR ₃₀ . Medición "in situ", modelización y resultados tras aplicación del RSM ..	218
Figura 122. Comparativa TR ₃₀ . Medición "in situ", modelización y resultados tras aplicación del RSM ..	220

Figura 123. Superficie de respuesta a 125 Hz.....	221
Figura 124. Superficie de respuesta a 250 Hz.....	222
Figura 125. Superficie de respuesta a 500 Hz.....	223
Figura 126. Superficie de respuesta a 1000 Hz.....	224
Figura 127. Superficie de respuesta a 2000 Hz.....	225
Figura 128. Superficie de respuesta a 4000 Hz.....	226
Figura 129. Representación gráfica del TR ₃₀ medido "in situ" con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables, la modelización inicial, y la modelización de la combinación 1.....	228
Figura 130. Espectro de absorción del techo de la sala (bibliografía- azul- y aplicación RSM-verde-).....	229
Figura 131. Espectro de absorción marcos de tela acolchados en las paredes (bibliografía-rojo- y aplicación RSM- morado-).....	229
Figura 132. Comparativa TR ₃₀ , medición "in situ" con telón subido y modelización inicial con boca de escena abierta.....	232
Figura 133. Comparativa TR ₃₀ . Medición in situ, modelización, y resultados TR ₃₀ tras aplicación RSM..	234
Figura 134. Superficie de respuesta a 125 Hz.....	235
Figura 135. Superficie de respuesta a 250 Hz.....	236
Figura 136.. Superficie de respuesta a 500 Hz.....	237
Figura 137. Superficie de respuesta a 1000 Hz.....	238
Figura 138. Superficie de respuesta a 2000 Hz.....	239
Figura 139. Superficie de respuesta a 4000 Hz.....	240
Figura 140. Comparativa TR ₃₀ , medición "in situ" con telón subido y modelización inicial con boca de escena abierta.....	242
Figura 141. Comparativa TR ₃₀ , medición "in situ" con telón subido y modelización inicial con boca de escena abierta.....	243
Figura 142. Comparativa TR ₃₀ telón bajado, medición real con límites superior e inferior aceptables, resultado obtenido en modelo con telón bajado tras análisis con telón subido.....	244
Figura 143. Espectro de marcos acolchados en paredes (bibliografía-azul- y aplicación RSM- gris-).....	245
Figura 144 . Espectro de la boca de escena (bibliografía-naranja- y aplicación RSM- amarillo-).....	245
Figura 145. Comparativa TR ₃₀ telón subido. Medición real con límites superior e inferior, modelo ajustado, y modelos empleando los coeficientes de absorción de boca de escena de distintos autores.....	247

Figura 146. Comparativa TR ₃₀ con telón subido con distintos valores de absorción para la boca de escena	248
Figura 147. Vista de la boca de escena.....	251
Figura 148. Vista de la sala	252
Figura 149. Hormigón visto paramentos verticales.....	252
Figura 150. Lamas de madera techo.....	253
Figura 151. Cabina	253
Figura 152. Lucernarios laterales y butacas	254
Figura 153. Planta. Posición de la fuente en rojo y de los receptores en azul	255
Figura 154. Sección. Posición de la fuente en rojo y de los receptores en azul.	255
Figura 155. Modelo virtual de la sala	260
Figura 156. Captura del test 3D Billard realizado en Odeon	260
Figura 157. Captura del test rayos perdidos.....	261
Figura 158. Captura del test aristas únicas	261
Figura 159. Representación gráfica del TR ₃₀ medido “in situ” con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables y la modelización inicial.....	262
Figura 160. Comparativa TR ₃₀ . Medición "in situ", modelización y resultados tras aplicación del RSM ..	266
Figura 161. Superficie de respuesta a 125 Hz.....	267
Figura 162. Superficie de respuesta a 250 Hz.....	268
Figura 163. Superficie de respuesta a 500 Hz.....	269
Figura 164. Superficie de respuesta a 1000 Hz.....	270
Figura 165. Superficie de respuesta a 2000 Hz.....	271
Figura 166. Superficie de respuesta a 4000 Hz.....	272
Figura 167. Representación gráfica del TR ₃₀ medido “in situ” con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables, la modelización inicial, y la modelización de la combinación 1.....	274
Figura 168. Espectro de absorción de las butacas (bibliografía- azul- y aplicación RSM-verde-).....	275
Figura 169 . Espectro de absorción techo (bibliografía-rojo- y aplicación RSM- morado-).....	275
Figura 170. Comparativa TR ₃₀ , medición "in situ" con telón subido y modelización inicial con boca de escena abierta	278
Figura 171. Comparativa TR ₃₀ . Medición in situ, modelización, y resultados TR ₃₀ tras aplicación RSM..	281

Figura 172. Superficie de respuesta a 125 Hz.....	282
Figura 173. Superficie de respuesta a 250 Hz.....	283
Figura 174. Superficie de respuesta a 1000 Hz.....	284
Figura 175. Superficie de respuesta a 2000 Hz.....	285
Figura 176. Representación gráfica del TR ₃₀ medido “in situ” con telón subido, los límites superior e inferior aceptables, la modelización inicial, y la modelización de la combinación 1.....	287
Figura 177. Comparativa TR ₃₀ telón bajado, medición real con límites superior e inferior aceptables, resultado obtenido en modelo con telón bajado tras análisis con telón subido	288
Figura 178. Espectro de absorción del techo (bibliografía-azul- y aplicación RSM- gris-)......	288
Figura 179. Figura 61. Espectro de absorción de la boca de escena (bibliografía-rojo- y aplicación RSM- morado-)......	289
Figura 180. Comparativa TR ₃₀ telón subido. Medición real con límites superior e inferior, modelo ajustado, y modelos empleando los coeficientes de absorción de boca de escena de distintos autores.	291
Figura 181. Comparativa TR ₃₀ con telón subido con distintos valores de absorción para la boca de escena	291
Figura 182. Vista del fondo de la sala	294
Figura 183. Vista del escenario.....	294
Figura 184. Lateral	295
Figura 185. Butacas y cabina	295
Figura 186. Fondo de la sala	296
Figura 187. Detalle de los materiales del fondo de la sala	296
Figura 188. Vista lateral de la sala desde el escenario	297
Figura 189. Planta. Disposición de la fuente sonora en rojo, y de los receptores en verde (Planos fuente: Escala Arquitectos).	298
Figura 190. Sección (Planos fuente: Escala Arquitectos)......	298
Figura 191. Modelo virtual de la sala	303
Figura 192. Captura del test 3DBillard realizado en Odeon	303
Figura 193. Representación gráfica del TR ₃₀ medido “in situ” con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables y la modelización inicial.....	304
Figura 194. Comparativa TR ₃₀ . Medición "in situ", modelización y resultados tras aplicación del RSM..	309
Figura 195. Superficie de respuesta a 125 Hz.....	310

Figura 196. Superficie de respuesta a 250 Hz	311
Figura 197 . Superficie de respuesta a 500 Hz	312
Figura 198. Superficie de respuesta a 1000 Hz	313
Figura 199. Superficie de respuesta a 2000 Hz	314
Figura 200. Superficie de respuesta a 4000 Hz	315
Figura 201. Representación gráfica del TR ₃₀ medido “in situ” con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables, la modelización inicial, y la modelización de la combinación 1.....	317
Figura 202. Espectro de absorción del panel fenólico (bibliografía - azul- y tras aplicación RSM - verde-)	318
Figura 203. Espectro de absorción del techo de la sala (bibliografía-rojo- y aplicación RSM- morado-). 318	
Figura 204. Comparativa TR ₃₀ , medición "in situ" con telón subido y modelización inicial con boca de escena abierta	322
Figura 205. Comparativa TR ₃₀ . Medición "in situ", modelización y resultados tras aplicación del RSM ..	326
Figura 206. Superficie de respuesta a 125 Hz.	327
Figura 207. Superficie de respuesta a 250 Hz.....	328
Figura 208. Superficie de respuesta a 500 Hz.....	329
Figura 209. Superficie de respuesta a 1000 Hz.....	330
Figura 210. Superficie de respuesta a 2000 Hz.....	331
Figura 211. Superficie de respuesta a 4000 Hz.....	332
Figura 212. Representación gráfica del TR ₃₀ medido “in situ” con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables, la modelización inicial, y la modelización de la combinación 1.....	334
Figura 213. Espectro de absorción de los paneles fenólicos ajustados con telón bajado (bibliografía - azul- y tras aplicación RSM - verde-).....	335
Figura 214. Espectro de absorción los reflectores del techo (bibliografía-rojo- y aplicación RSM- morado-).....	335
Figura 215. Espectro de absorción de la boca de escena (bibliografía - rojo- y tras aplicación RSM - morado-).....	336
Figura 216. Comparativa TR ₃₀ telón bajado, medición real con límites superior e inferior aceptables, resultado obtenido en modelo con telón bajado tras análisis con telón subido	337
Figura 217. Comparativa TR ₃₀ telón subido. Medición real con límites superior e inferior, modelo ajustado, y modelos empleando los coeficientes de absorción de boca de escena de distintos autores.	339

Figura 218. Comparativa TR ₃₀ con telón subido con distintos valores de absorción para la boca de escena	340
Figura 219. Espectros de absorción de la boca de escena.....	342
Figura 220. Teatro Principal. Comparativa TR ₃₀ telón subido. Medición real con límites superior e inferior, modelo ajustado, y modelos empleando los coeficientes de absorción de boca de escena de distintos autores.....	344
Figura 221 . Teatro Olympia. Comparativa TR ₃₀ telón subido. Medición real con límites superior e inferior, modelo ajustado, y modelos empleando los coeficientes de absorción de boca de escena de distintos autores.....	344
Figura 222. Teatro Talía. Comparativa TR ₃₀ telón subido. Medición real con límites superior e inferior, modelo ajustado, y modelos empleando los coeficientes de absorción de boca de escena de distintos autores.....	345
Figura 223. Teatro Banda Primitiva de Lliria. Comparativa TR ₃₀ telón subido. Medición real con límites superior e inferior, modelo ajustado, y modelos empleando los coeficientes de absorción de boca de escena de distintos autores.....	345
Figura 224. Teatro El Musical. Comparativa TR ₃₀ telón subido. Medición real con límites superior e inferior, modelo ajustado, y modelos empleando los coeficientes de absorción de boca de escena de distintos autores.....	346
Figura 225. Auditorio Alfons Roig. Comparativa TR ₃₀ telón subido. Medición real con límites superior e inferior, modelo ajustado, y modelos empleando los coeficientes de absorción de boca de escena de distintos autores.....	346
Figura 226. Teatro Principal. Comparativa TR ₃₀ con telón subido con distintos valores de absorción para la boca de escena	348
Figura 227. Teatro Olympia. Comparativa TR ₃₀ con telón subido con distintos valores de absorción para la boca de escena	348
Figura 228. Teatro Talía. Comparativa TR ₃₀ con telón subido con distintos valores de absorción para la boca de escena	349
Figura 229. Teatro de la Banda Primitiva de Lliria. Comparativa TR ₃₀ con telón subido con distintos valores de absorción para la boca de escena.....	349
Figura 230. Teatro El Musical. Comparativa TR ₃₀ con telón subido con distintos valores de absorción para la boca de escena	350
Figura 231. Auditorio Alfons Roig. Comparativa TR ₃₀ con telón subido con distintos valores de absorción para la boca de escena	350

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coeficientes de absorción de la boca de escena propuestos por Knudsen y Harris	52
Tabla 2. Valores estimativos de los coeficientes de absorción asociados a la boca de escena de un teatro con proscenio	53
Tabla 3. Coeficientes de absorción para la boca de escena (Arau)	53
Tabla 4. Coeficientes de absorción para butacas muy bien tapizadas	53
Tabla 5. Coeficientes de absorción de la boca de escena propuestos por distintos autores.	54
Tabla 6. Valoración de la inteligibilidad de una sala en función del STI/RASTI	59
Tabla 7. Coeficientes de absorción superficial empleados en una simulación y "target"	67
Tabla 8. Combinaciones de pares de espectros absorbentes a estudiar y tiempos de reverberación obtenido en cada cálculo del modelo.....	68
Tabla 9. TR ₃₀ obtenidos de las combinaciones definidas anteriormente.	69
Tabla 10. Ejemplo de ternas de datos para la frecuencia 125Hz.....	70
Tabla 11. Nuevas parejas de puntos que entran dentro del TR ₃₀ objetivo.....	71
Tabla 12. Pares de puntos obtenidos para varias nuevas combinaciones	71
Tabla 13. Tiempo de reverberación resultado de emplear los coeficientes de absorción de la Combinación 1.....	71
Tabla 14. Coeficiente de absorción asignados a las distintas soluciones constructivas de la sala	83
Tabla 15. Coordenadas de la fuente y de los receptores	84
Tabla 16. Inteligibilidad	85
Tabla 17. Parámetros temporales	85
Tabla 18. Claridad	85
Tabla 19. Definición	85
Tabla 20. Inteligibilidad	86
Tabla 21. Parámetros temporales	86
Tabla 22. Claridad	86
Tabla 23. Definición	86
Tabla 24. TR ₃₀ medio de la medición in situ y de la modelización con telón bajado.....	89
Tabla 25. Coeficientes de absorción de las superficies de la sala y asignación de número de superficie ..	90

Tabla 26. Coeficientes de absorción empleados en la simulación	91
Tabla 27. Región de estudio de la superficie X1.....	92
Tabla 28. Región de estudio de la superficie X2.....	92
Tabla 29. Combinaciones de pares de espectros de absorción de las regiones X1 y X2.	93
Tabla 30. TR ₃₀ obtenidos de las combinaciones definidas anteriormente.	94
Tabla 31. Ternas de datos a 125 Hz.....	95
Tabla 32. Pares de puntos a 125 Hz.....	95
Tabla 33. Ternas de datos a 250 Hz.....	96
Tabla 34. Pares de puntos a 250 HZ	96
Tabla 35. ternas de datos a 500 Hz.....	97
Tabla 36. Pares de puntos a 500 Hz.....	97
Tabla 37. Ternas de datos a 1000 Hz.....	98
Tabla 38. Pares de puntos a 1000 Hz.....	98
Tabla 39. Ternas de datos a 2000 Hz.....	99
Tabla 40. Pares de puntos a 2000 Hz.....	99
Tabla 41. Ternas de datos a 4000 Hz.....	100
Tabla 42. Pares de puntos a 4000 Hz.....	100
Tabla 43. Pares de puntos obtenidos para el cálculo	101
Tabla 44. Combinación de espectros de absorción de las superficies estudiadas	101
Tabla 45. TR ₃₀ obtenido	102
Tabla 46. Coeficientes de absorción de las superficies tras aplicación del RSM con telón bajado	104
Tabla 47. Superficies de la sala con distinta materialidad y comportamiento absorbente, asignación de número de superficie	105
Tabla 48. Comparativa TR ₃₀ medición real y modelo virtual	106
Tabla 49. Coeficientes de absorción empleados en la simulación	107
Tabla 50. Región de estudio de la superficie incógnita X1	108
Tabla 51. Región de estudio de la superficie incógnita X2	108
Tabla 52. Combinaciones de pares de espectros absorbentes a estudiar.....	109
Tabla 53. TR ₃₀ obtenidos de las combinaciones definidas anteriormente.	109

Tabla 54. Ternas de datos a 125 Hz	111
Tabla 55. Pares de puntos a 125 Hz.....	111
Tabla 56. Ternas de datos a 250 Hz	112
Tabla 57. Pares de puntos a 250 Hz	112
Tabla 58. ternas de datos a 500 Hz.....	113
Tabla 59. Pares de puntos a 500 Hz.....	113
Tabla 60. Ternas de datos a 1000 Hz	114
Tabla 61. Pares de puntos a 1000 Hz.....	114
Tabla 62. Ternas de datos a 2000 Hz	115
Tabla 63. Pares de puntos a 2000 Hz.....	115
Tabla 64. Ternas de datos a 4000 Hz	116
Tabla 65. Pares de puntos a 4000 Hz.....	116
Tabla 66. Pares de puntos obtenidos para el cálculo	117
<i>Tabla 67. Combinación de espectros de absorción de las superficies estudiadas</i>	<i>117</i>
<i>Tabla 68. TR₃₀ obtenido</i>	<i>117</i>
<i>Tabla 69. TR₃₀ del modelo con telón bajado tras ajuste con telón subido</i>	<i>120</i>
Tabla 70. Coeficientes de absorción de las soluciones constructivas empleadas en el modelo tras ajuste con telón subido.....	121
<i>Tabla 71. Coeficiente de absorción de la boca de escena.....</i>	<i>122</i>
<i>Tabla 72. TR₃₀ obtenido en el modelo ajustado con telón subido, y empleando los coeficientes de absorción de otros autores.....</i>	<i>122</i>
Tabla 73. Coeficientes de absorción asignados a las distintas soluciones constructivas de la sala	132
Tabla 74. Coordenadas de la fuente y de los receptores.....	133
Tabla 75. Inteligibilidad	134
Tabla 76. Parámetros temporales	134
Tabla 77. Claridad	134
Tabla 78. Definición	134
Tabla 79. Inteligibilidad	135
Tabla 80. Parámetros temporales	135

Tabla 81. Claridad	135
Tabla 82. Definición	135
Tabla 83. TR ₃₀ medio de la medición in situ y de la modelización con telón bajado.....	137
Tabla 84. Coeficientes de absorción de las superficies de la sala y asignación de número de superficie	139
Tabla 85. Coeficientes de absorción empleados en la simulación	140
Tabla 86. Región de estudio de la superficie X1.....	141
Tabla 87. Región de estudio de la superficie X2.....	141
Tabla 88. Combinaciones de pares de espectros de absorción de las regiones X1 y X2.	141
Tabla 89. TR ₃₀ obtenidos de las combinaciones definidas anteriormente	142
Tabla 90. Ternas de datos a 125 Hz	144
Tabla 91. Pares de puntos a 125 Hz.....	144
Tabla 92. Ternas de datos a 250 Hz	145
Tabla 93. Pares de puntos a 250 HZ	145
Tabla 94. ternas de datos a 500 Hz.....	146
Tabla 95. Pares de puntos a 500 Hz.....	146
Tabla 96. Ternas de datos a 1000 Hz	147
Tabla 97. Pares de puntos a 1000 Hz.....	147
Tabla 98. Ternas de datos a 2000 Hz	148
Tabla 99. Pares de puntos a 2000 Hz.....	148
Tabla 100. Ternas de datos a 4000 Hz	149
Tabla 101. Pares de puntos a 4000 Hz.....	149
Tabla 102. Pares de puntos obtenidos para el cálculo	150
Tabla 103. Combinación de espectros de absorción de las superficies estudiadas	150
Tabla 104. TR ₃₀ obtenido	151
Tabla 105. Combinación de espectros de absorción de las superficies estudiadas	151
Tabla 106. TR ₃₀ obtenido	152
Tabla 107. Coeficientes de absorción de las superficies tras aplicación del RSM con telón bajado	155
Tabla 108. Superficies de la sala con distinta materialidad y comportamiento absorbente, asignación de número de superficie	156

Tabla 109. Comparativa TR ₃₀ medición real y modelo virtual	157
<i>Tabla 110. Coeficiente de absorción de la boca de escena</i>	<i>158</i>
Tabla 111. TR ₃₀ obtenido en el modelo ajustado con telón subido, y empleando los coeficientes de absorción de otros autores.....	158
Tabla 112. Coeficientes de absorción asignados a las distintas soluciones constructivas de la sala.....	168
Tabla 113. Coordenadas de la fuente y de los receptores	169
Tabla 114. Inteligibilidad	170
Tabla 115. Parámetros temporales	170
Tabla 116. Claridad	170
Tabla 117. Definición	170
Tabla 118. Inteligibilidad	171
Tabla 119. Parámetros temporales	171
Tabla 120. Claridad	171
Tabla 121. Definición	171
Tabla 122. TR ₃₀ medio de la medición in situ y de la modelización con telón bajado.....	173
Tabla 123. Coeficientes de absorción de las superficies de la sala y asignación de número de superficie.	175
Tabla 124. Coeficientes de absorción empleados en la simulación	176
Tabla 125. Región de estudio de la superficie X1	177
Tabla 126. Región de estudio de la superficie X2	177
Tabla 127. Combinaciones de pares de espectros de absorción de las regiones X1 y X2.	178
Tabla 128. TR ₃₀ obtenidos de las combinaciones definidas anteriormente	179
Tabla 129. Ternas de datos a 125 Hz	180
Tabla 130. Pares de puntos a 125 Hz	180
Tabla 131. Ternas de datos a 250 Hz	181
Tabla 132. Pares de puntos a 250 HZ	181
Tabla 133. ternas de datos a 500 Hz.....	182
Tabla 134. Pares de puntos a 500 Hz	182
Tabla 135. Ternas de datos a 1000 Hz	183

Tabla 136. Pares de puntos a 1000 Hz	183
Tabla 137. Pares de puntos obtenidos para el cálculo	184
Tabla 138. Combinación de espectros de absorción de las superficies estudiadas	185
Tabla 139. TR ₃₀ obtenido	185
Tabla 140. Coeficientes de absorción de las superficies tras aplicación del RSM con telón bajado	187
Tabla 141. Superficies de la sala con distinta materialidad y comportamiento absorbente.....	188
Tabla 142. Comparativa TR ₃₀ medición real y modelo virtual	189
<i>Tabla 143. Coeficiente de absorción de la boca de escena</i>	<i>190</i>
Tabla 144. TR ₃₀ obtenido en el modelo ajustado con telón subido, y empleando los coeficientes de absorción de otros autores.....	190
Tabla 145. Coeficientes de absorción asignados a las distintas soluciones constructivas de la sala	200
Tabla 146. Coordenadas de la fuente y de los receptores	201
Tabla 147. Inteligibilidad	202
Tabla 148. Parámetros temporales	202
Tabla 149. Claridad	202
Tabla 150. Definición	202
Tabla 151. Inteligibilidad	203
Tabla 152. Parámetros temporales	203
Tabla 153. Claridad	203
Tabla 154. Definición	203
Tabla 155. TR ₃₀ medio de la medición in situ y de la modelización con telón bajado.....	206
Tabla 156. Coeficientes de absorción de las superficies de la sala y asignación de número de superficie	207
Tabla 157. Coeficientes de absorción empleados en la simulación	208
Tabla 158. Región de estudio de la superficie X1	209
Tabla 159. Región de estudio de la superficie X2	209
Tabla 160. Combinaciones de pares de espectros de absorción de las regiones X1 y X2.	209
Tabla 161. TR ₃₀ obtenidos de las combinaciones definidas anteriormente	210
Tabla 162. Coeficientes de absorción de las superficies de la sala y asignación de número de superficie	212

Tabla 163. TR ₃₀ medio de la medición in situ y de la modelización con telón bajado.....	213
Tabla 164. Región de estudio de la superficie X1.....	214
Tabla 165. Región de estudio de la superficie X2.....	214
Tabla 166. Combinaciones de pares de espectros de absorción de las regiones X1 y X2	214
Tabla 167. TR ₃₀ obtenidos de las combinaciones definidas anteriormente	215
Tabla 168. Coeficientes de absorción de las superficies de la sala y asignación de número de superficie	217
Tabla 169. TR ₃₀ medio de la medición in situ y de la modelización con telón bajado.....	217
Tabla 170. Región de estudio de la superficie X1.....	218
Tabla 171. Región de estudio de la superficie X2.....	218
Tabla 172. Combinaciones de pares de espectros de absorción de las regiones X1 y X2	219
Tabla 173. TR ₃₀ obtenidos de las combinaciones definidas anteriormente	219
Tabla 174. Ternas de datos a 125 Hz	221
Tabla 175. Pares de puntos a 125 Hz.....	221
Tabla 176. Ternas de datos a 250 Hz	222
Tabla 177. Pares de puntos a 250 Hz	222
Tabla 178. ternas de datos a 500 Hz.....	223
Tabla 179. Pares de puntos a 500 Hz.....	223
Tabla 180. Ternas de datos a 1000 Hz	224
Tabla 181. Pares de puntos a 1000 Hz.....	224
Tabla 182. Ternas de datos a 2000 Hz	225
Tabla 183. Pares de puntos a 2000 Hz.....	225
Tabla 184. Ternas de datos a 4000 Hz	226
Tabla 185. Pares de puntos a 4000 Hz.....	226
Tabla 186. Pares de puntos obtenidos para el cálculo	227
Tabla 187. Combinación de espectros de absorción de las superficies estudiadas	227
Tabla 188. TR ₃₀ obtenido	228
Tabla 189. Coeficientes de absorción de las superficies tras aplicación del RSM con telón bajado	230

Tabla 190. Superficies de la sala con distinta materialidad y comportamiento absorbente, asignación de número de superficie	231
Tabla 191. Comparativa TR ₃₀ medición real y modelo virtual	232
Tabla 192. Región de estudio de la superficie incógnita X1	233
Tabla 193. Región de estudio de la superficie incógnita X2	233
Tabla 194. Combinaciones de pares de espectros absorbentes a estudiar	233
Tabla 195.. TR ₃₀ obtenidos de las combinaciones definidas anteriormente	234
Tabla 196. Ternas de datos a 125 Hz	235
Tabla 197. Pares de puntos a 125 Hz	235
Tabla 198. Ternas de datos a 250 Hz	236
Tabla 199. Pares de puntos a 250 Hz	236
Tabla 200. ternas de datos a 500 Hz.....	237
Tabla 201. Pares de puntos a 500 Hz.....	237
Tabla 202. Ternas de datos a 1000 Hz	238
Tabla 203. Pares de puntos a 1000 Hz.....	238
Tabla 204. Ternas de datos a 2000 Hz	239
Tabla 205. Pares de puntos a 2000 Hz.....	239
Tabla 206. Ternas de datos a 4000 Hz	240
Tabla 207. Pares de puntos a 4000 Hz.....	240
Tabla 208. Pares de puntos obtenidos para el cálculo	241
Tabla 209. Combinación de espectros de absorción de las superficies estudiadas	241
Tabla 210. TR ₃₀ obtenido	241
Tabla 211. Combinación de espectros de absorción de las superficies estudiadas	242
Tabla 212. TR ₃₀ obtenido	243
Tabla 213. Coeficientes de absorción de las soluciones constructivas empleadas en el modelo tras ajuste con telón subido.....	246
<i>Tabla 214. Coeficiente de absorción de la boca de escena</i>	<i>246</i>
Tabla 215.. TR ₃₀ obtenido en el modelo ajustado con telón subido, y empleando los coeficientes de absorción de otros autores.....	247
Tabla 216. Coeficientes e absorción asignados a las distintas soluciones constructivas de la sala.....	256

Tabla 217. Coordenadas de la fuente y de los receptores	257
Tabla 218. Inteligibilidad	258
Tabla 219. Parámetros temporales	258
Tabla 220. Claridad	258
Tabla 221. Definición	258
Tabla 222. Inteligibilidad	259
Tabla 223. Parámetros temporales	259
Tabla 224. Parámetros energéticos.....	259
Tabla 225. Definición	259
Tabla 226. TR ₃₀ medio de la medición in situ y de la modelización con telón bajado.....	262
Tabla 227. Coeficientes de absorción de las superficies de la sala y asignación de número de superficie	263
Tabla 228.. Coeficientes de absorción empleados en la simulación	264
Tabla 229. Región de estudio de la superficie X1.....	264
Tabla 230. Región de estudio de la superficie X2.....	264
Tabla 231. Combinaciones de pares de espectros de absorción de las regiones X1 y X2.	265
Tabla 232. TR ₃₀ obtenidos de las combinaciones definidas anteriormente.	266
Tabla 233. Ternas de datos a 125 Hz	267
Tabla 234. Pares de puntos a 125 Hz.....	267
Tabla 235. Ternas de datos a 250 Hz	268
Tabla 236. Pares de puntos a 250 HZ	268
Tabla 237. ternas de datos a 500 Hz.....	269
Tabla 238. Pares de puntos a 500 Hz.....	269
Tabla 239. Ternas de datos a 1000 Hz	270
Tabla 240. Pares de puntos a 1000 Hz.....	270
Tabla 241. Ternas de datos a 2000 Hz	271
Tabla 242. Pares de puntos a 2000 Hz.....	271
Tabla 243. Ternas de datos a 4000 Hz	272
Tabla 244. Pares de puntos a 4000 Hz.....	272

Tabla 245. Pares de puntos obtenidos para el cálculo	273
Tabla 246. Combinación de espectros de absorción de las superficies estudiadas	274
Tabla 247. TR_{30} obtenido	274
Tabla 248. Coeficientes de absorción de las superficies tras aplicación del RSM con telón bajado	276
Tabla 249. Superficies de la sala con distinta materialidad y comportamiento absorbente.....	277
Tabla 250. Comparativa TR_{30} medición real y modelo virtual	277
Tabla 251. Coeficientes de absorción empleados en la simulación	279
Tabla 252. Región de estudio de la superficie incógnita X1	279
Tabla 253. Región de estudio de la superficie incógnita X2	280
Tabla 254. Combinaciones de pares de espectros absorbentes a estudiar	280
<i>Tabla 255. TR_{30} obtenidos de las combinaciones definidas anteriormente.</i>	<i>281</i>
Tabla 256. Ternas de datos a 125 Hz	282
Tabla 257. Pares de puntos a 125 Hz.....	283
Tabla 258. Ternas de datos a 250 Hz	283
Tabla 259. Pares de puntos a 250 HZ	283
Tabla 260. Ternas de datos a 1000 Hz	284
Tabla 261. Pares de puntos a 1000 Hz.....	284
Tabla 262. Ternas de datos a 2000 Hz	285
Tabla 263. Pares de puntos a 2000 Hz.....	285
Tabla 264. Pares de puntos obtenidos para el cálculo	286
<i>Tabla 265. Combinación de espectros de absorción de las superficies estudiadas</i>	<i>287</i>
<i>Tabla 266. TR_{30} obtenido</i>	<i>287</i>
Tabla 267. Coeficientes de absorción de las soluciones constructivas empleadas en el modelo tras ajuste con telón subido.....	289
<i>Tabla 268. Coeficiente de absorción de la boca de escena</i>	<i>290</i>
Tabla 269. TR_{30} obtenido en el modelo ajustado con telón subido, y empleando los coeficientes de absorción de otros autores.....	290
Tabla 270. Coeficientes e absorción asignados a las distintas soluciones constructivas de la sala.....	299
Tabla 271. Coordenadas de la fuente y de los receptores.	300

Tabla 272. Inteligibilidad	301
Tabla 273. Parámetros temporales	301
Tabla 274. Claridad	301
Tabla 275. Definición	301
Tabla 276. Inteligibilidad	302
Tabla 277. Parámetros temporales	302
Tabla 278. Parámetros energéticos.....	302
Tabla 279. Definición	302
Tabla 280. TR ₃₀ medio de la medición in situ y de la modelización con telón bajado.....	304
Tabla 281. Coeficientes de absorción de las superficies de la sala y asignación de número de superficie.	305
Tabla 282. Coeficientes de absorción empleados en la simulación	306
Tabla 283. Región de estudio de la superficie X1.....	307
Tabla 284. Región de estudio de la superficie X2.....	307
Tabla 285. Combinaciones de pares de espectros de absorción de las regiones X1 y X2.	307
Tabla 286. TR ₃₀ obtenidos de las combinaciones definidas anteriormente.	308
Tabla 287. Ternas de datos a 125 Hz	310
Tabla 288. Pares de puntos a 125 Hz.....	310
Tabla 289. Ternas de datos a 250 Hz	311
Tabla 290. Pares de puntos a 250 HZ	311
Tabla 291. ternas de datos a 500 Hz.....	312
Tabla 292. Pares de puntos a 500 Hz.....	312
Tabla 293. Ternas de datos a 1000 Hz	313
Tabla 294. Pares de puntos a 1000 Hz.....	313
Tabla 295. Ternas de datos a 2000 Hz	314
Tabla 296. Pares de puntos a 2000 Hz.....	314
Tabla 297. Ternas de datos a 4000 Hz	315
Tabla 298. Pares de puntos a 4000 Hz.....	315
Tabla 299. Pares de puntos obtenidos para el cálculo	316

Tabla 300. Combinación de espectros de absorción de las superficies estudiadas	316
Tabla 301. TR ₃₀ obtenido	317
Tabla 302. Coeficientes de absorción de las superficies tras aplicación del RSM con telón bajado	319
Tabla 303. Denominación de los receptores en la medición real, en el modelo virtual y sus coordenadas	320
Tabla 304. Coeficiente de absorción de la boca de escena.	321
Tabla 305. Coeficientes de absorción de las soluciones constructivas empleadas en la simulación	321
Tabla 306. Comparativa TR ₃₀ medición real y modelo virtual	322
Tabla 307. Coeficientes de absorción empleados en la simulación	323
Tabla 308. Región de estudio de la superficie X1	324
Tabla 309. Región de estudio de la superficie X2	324
Tabla 310. Combinaciones de pares de espectros de absorción de las regiones X1 y X2.	325
Tabla 311. TR ₃₀ obtenidos de las combinaciones definidas anteriormente.	325
Tabla 312. Ternas de datos a 125 Hz	327
Tabla 313. Pares de puntos a 125Hz.....	327
Tabla 314. Ternas de datos a 250 Hz	328
Tabla 315. Pares de puntos a 250 HZ	328
Tabla 316. ternas de datos a 500 Hz.....	329
Tabla 317. Pares de puntos a 500 Hz	329
Tabla 318. Ternas de datos a 1000 Hz	330
Tabla 319. Pares de puntos a 1000 Hz.....	330
Tabla 320. Ternas de datos a 2000 Hz	331
Tabla 321. Pares de puntos a 2000 Hz.....	331
Tabla 322. Ternas de datos a 4000 Hz	332
Tabla 323. Pares de puntos a 4000 Hz	332
Tabla 324. Pares de puntos obtenidos para el cálculo	333
Tabla 325. Combinación de espectros de absorción de las superficies estudiadas	333
Tabla 326. TR ₃₀ obtenido	334
Tabla 327. TR ₃₀ del modelo con telón bajado tras ajuste con telón subido	336

Tabla 328. Coeficientes de absorción de las soluciones constructivas empleadas en el modelo tras ajuste con telón subido.....	337
Tabla 329. Coeficiente de absorción de la boca de escena del Auditorio Alfons Roig	338
Tabla 330. TR_{30} obtenido en el modelo ajustado con telón subido, y empleando los coeficientes de absorción de otros autores.....	338
Tabla 331. Coeficientes de absorción de la boca de escena de cada teatro	341
Tabla 332. Coeficientes de absorción de la boca de escena propuestos por distintos autores.....	341

1 INTRODUCCIÓN. OBJETIVOS Y ESTRUCTURA

En el diseño de espacios de representación escénica como teatros, salas de conciertos y óperas, la acústica como ciencia desempeña un papel fundamental, pero no siempre fue así. Hasta el siglo XX para el diseño de dichos espacios se confiaba en la experiencia previa, en emplear los elementos que habían funcionado en obras de referencia anteriores. Sin embargo, hay que considerar que es posible que existiesen salas que no funcionaran bien para su uso previsto y que, sencillamente no hayan llegado a nuestros días [1].

El comportamiento acústico de una sala depende de diversas variables como el tiempo de reverberación, el volumen de la sala, el coeficiente de absorción de las soluciones constructivas empleadas en las superficies interiores, y de la temperatura y humedad de la sala. El tiempo de reverberación y el volumen de la sala son dos de los principales parámetros de calidad acústica, y en función del uso previsto de una sala se emplean distintos valores de referencia. Estos valores son aproximados, dado que existe cierta componente subjetiva. En los teatros es fundamental la inteligibilidad de la palabra, que el mensaje de los actores llegue con suficiente claridad a los espectadores. Esto se traduce en tiempos bajos de reverberación y un volumen de sala máximo controlado. Para distintos tipos de música se necesita un tiempo de reverberación medio distinto entre sí, pero siempre mayor que para la palabra [2]. Otros parámetros a tener en cuenta en la calidad acústica de salas son: el Early Decay Time, el Speech Transmission Index, la claridad y la definición.

Para asegurar el buen comportamiento acústico en teatros es necesario limitar la distancia entre el escenario y la última fila, con el objeto de potenciar el sonido directo frente al reverberado; y controlar que la sala sea más bien estrecha con los palcos profundos y el techo no demasiado alto. De esta manera se puede conseguir un tiempo de reverberación bajo y unas buenas condiciones visuales [3], [4].

En teatros, la caja de escena y la sala principal se comunican entre sí a través de la boca de escena. En muchas ocasiones el volumen de la caja de escena es igual o superior al de la sala propiamente dicha. Para asegurar un buen comportamiento acústico del recinto, es necesario que la caja de escena sea bastante absorbente. De esta manera se

puede considerar que todo el sonido que entra en la caja de escena es absorbido en ella, evitando efectos nocivos de realimentación del sonido en la sala [3].

En el comportamiento acústico de salas es importante también la absorción de las soluciones constructivas de las superficies que forman el interior de la sala. Conociendo éstas se pueden realizar modelos virtuales ajustados a la realidad. Los coeficientes de absorción de los materiales o de las distintas composiciones de los mismos se obtienen mediante ensayo en laboratorio empleando métodos científicos establecidos por distintas normas [5], [6]. La extrapolación de dichas soluciones a la obra puede ser imprecisa, por lo que los valores de absorción de las tablas disponibles en la literatura se han de tomar con precaución, dado que la absorción de un determinado material depende de las condiciones específicas en las que se realice su montaje [2], [7], [8].

Habitualmente, los modelos virtuales de teatros se realizan sin la caja de escena. De esta forma, a la hora de reunir información sobre los coeficientes de absorción de los distintos elementos interiores, se sustituye el volumen de la caja de escenario por la superficie de la boca de escena, a la que se le asigna un coeficiente de absorción que representa a la caja de escena en su totalidad. Diversos autores han propuesto valores del coeficiente de absorción para la boca de escena sin especificar con mucho detalle los procedimientos para su obtención [3], [9]–[12].

Como se ha dicho previamente el coeficiente de absorción de las soluciones constructivas se obtiene de ensayos de laboratorio, pero la boca de escena es un espacio vacío y no es posible obtener sus coeficientes de este modo.

El uso del Método de las Superficies de Respuesta (RSM) permite ajustar modelos virtuales de salas en las que inicialmente se desconozca el coeficiente de absorción de hasta dos de las soluciones constructivas empleadas. El empleo del RSM permite estudiar problemas cuya solución se ve afectada por varios factores cuantitativos. La solución o respuesta es función de una serie de variables independientes y de un error experimental. En este caso, la respuesta o “target”, es el tiempo de reverberación de la sala y las variables independientes son los coeficientes de absorción de hasta dos soluciones constructivas con comportamientos acústicos desconocidos [13].

En este sentido el empleo del RSM se antoja una herramienta de importancia capital para hallar el coeficiente de absorción de la boca de escena, que es el objetivo principal de este trabajo.

1.1 Objetivos

El objetivo general de la presente tesis es:

- Contrastar los valores del coeficiente de absorción de la boca de escena en teatros que asignan distintos autores, con los valores hallados a partir de modelos virtuales basados en salas reales.

La hipótesis de partida en este trabajo consiste en considerar que los datos del espectro de absorción de la boca de escena existentes en la bibliografía actual son correctos. Estos coeficientes están basados en la experiencia de los distintos autores. En esta investigación, a través del estudio de los casos por medio de modelizaciones informáticas, se pretende corroborar la información que aporta la literatura científica, y hallar mediante el método científico el coeficiente de absorción de la boca de escena en teatros y compararlos con los propuestos en las obras de referencia.

Así pues, se propone el empleo del Método de las Superficies de Respuesta para la obtención del coeficiente de absorción de la boca de escena de teatros con el fin de corroborar los valores propuestos por varios autores.

Los objetivos específicos son:

- Reunir información sobre los valores del coeficiente de absorción que han determinado distintos investigadores.
- Hallar el coeficiente de absorción de la boca de escena empleando modelos virtuales de salas reales, calibrados.
- Estudiar la sensibilidad de los modelos virtuales calibrados a la variación de la absorción de la boca de escena.

1.2 Estructura de la Tesis

Con el fin de exponer el trabajo de investigación desarrollado a continuación se presenta la siguiente estructura de capítulos.

En el segundo capítulo, “MARCO TEÓRICO”, se realiza una introducción a la evolución de los teatros a lo largo de la historia, desde los teatros griegos y romanos al aire libre pasando por los teatros del renacimiento y barroco, a los más actuales, como los teatros circulares. Se describen las distintas tipologías en función de las necesidades y realidades de cada época. También se habla de la acústica como ciencia, así como específicamente de la acústica de los teatros, sus características, sus necesidades y sus problemas. En un apartado específico se expone lo que los distintos autores comentan sobre la absorción de la boca de escena. Así mismo se incluye la terminología y concepto de algunos de los parámetros acústicos empleados en el acondicionamiento acústico de salas. Termina el capítulo haciendo un breve repaso de los fundamentos del método de las superficies de respuesta (RSM).

A lo largo del tercer capítulo, “METODOLOGÍA” se describe el procedimiento para la realización de las mediciones en los teatros, los requisitos previos y las mediciones “in situ”. Así como la aplicación de la metodología empleada para realizar el ajuste de los modelos con boca de escena abierta y cerrada, y la obtención de los coeficientes de absorción de las bocas de escena. También se detalla el proceso de selección de salas empleado. La obtención de la muestra final ha sido ardua ya que se han requerido multitud de permisos de distintas organizaciones, Lo que ha supuesto una merma de la muestra diseñada inicialmente.

A continuación, en el capítulo cuarto, “RESULTADOS”, se presentan los resultados obtenidos de la muestra de teatros seleccionados. Se realiza una descripción de cada sala, aportando información gráfica y detalles de sus características espaciales, constructivas y acústicas, así como los cálculos realizados para ajustar cada uno de los modelos. También se presentan el coeficiente de absorción de las bocas de escena de los modelos virtuales ajustados con telón abierto y el tiempo de reverberación de cada modelo virtual con telón de escena abierto, resultado de emplear los coeficientes de absorción para la boca de escena propuestos por los distintos autores. Además, se estudia la sensibilidad de los distintos modelos virtuales al empleo de coeficientes de

absorción para la boca de escena: bajos, medios y altos. En el apartado de “Discusión”, se muestran de manera resumida los resultados, para una mejor lectura, y se expone la discusión.

El capítulo quinto, “CONCLUSIONS AND FUTURE PERSPECTIVES”, contiene las conclusiones obtenidas de esta tesis, así como las perspectivas de investigación futuras.

El capítulo sexto, “REFERENCIAS”, reúne las referencias empleadas en el presente trabajo.

En el capítulo séptimo aparece el preceptivo apartado bibliográfico, “BIBLIOGRAFIA”.

Finalmente, en el capítulo octavo “ANEXO” se incluye una ficha de cada sala con información resumida de las mismas.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Historia y Evolución de los Teatros

El origen de los teatros lo encontramos, como sucede con muchas otras disciplinas, en la antigua Grecia. Los teatros griegos se localizaban en laderas de colinas, con bajo ruido de fondo, y aprovechaban la pendiente natural para construir el graderío de forma semicircular. La inclinación de entre 20 y 34 grados, permitía disminuir la distancia fuente-receptor, favoreciendo la visibilidad y evitando el efecto de sombra acústica. La construcción de un muro en la parte posterior del escenario no solo disminuía los ruidos exteriores, sino que ayudaba a reflejar la voz de los actores. También, la localización en la zona del coro de una superficie semicircular reflectante ayudaba a reforzar las primeras reflexiones. Mediante la decoración, esculturas, decorados etc, se favorece la difusión de la onda sonora. En muchas ocasiones los actores llevaban máscaras que además de amplificar su expresión facial, amplificaban sus voces. En el teatro griego la inteligibilidad de la palabra era fundamental [9]. En la Figura 1 podemos ver el Teatro de Epidauro en Grecia.



Figura 1. Teatro griego de Epidauro en Grecia

Los teatros romanos eran de una suntuosidad superior a los de Grecia. Presentaban algunas diferencias con sus predecesores a causa del cambio de gustos de la época. En los teatros griegos la orquesta, de forma circular o en herradura, es más grande para poder albergar los coros, mientras que en los romanos ésta tiene forma semicircular (Figura 2). Por otra parte, la escena en los teatros romanos era más profunda que en los griegos. Algunas de las diferencias repercutían en el comportamiento acústico de los mismos. Las gradas de los teatros romanos tenían una pendiente mayor que las de los griegos. Esto, junto con un muro levantado tras la escena que llegaba a la altura del peristilo que coronaba las gradas, conseguía un efecto envolvente en los teatros romanos.



Figura 2. Teatro romano en Bosra (Siria)

En *Los diez libros de arquitectura de Marco Lucio Vitruvio*, se especifican las normas de construcción de los teatros romanos de forma clara. Se precisa la geometría así como aspectos relacionados con la acústica [8], [14]. Clasifica los lugares para el emplazamiento de los teatros en cuatro tipos en función de sus propiedades acústicas, a saber: *disonantes*, *circunsonantes*, *resonantes* y *consonantes*, siendo estos últimos los mejores desde el punto de vista sonoro. Hace varias recomendaciones para conseguir la mejor acústica en los recintos, como la colocación de grandes vasos de bronce, de tamaño proporcional al de los teatros en los que habían de colocarse, que hacían las veces de resonadores. Éstos, se utilizaban en teatros contruidos de piedra o mármol, que tenían carencia de resonancia. En función del tamaño del teatro, especificaba qué tipo de vaso era adecuado, así como su localización [8].

Entre finales del siglo V hasta mediados del siglo XV se produce una gran transformación del mundo teatral. Cambian sus fundamentos y se centra en temas religiosos. Las representaciones se realizan en plazas públicas y se carece de espacios específicos para

la representación teatral por lo que las inquietudes acústicas desaparecen en esta época.

Durante el renacimiento italiano, las representaciones urbanas se trasladan a espacios cubiertos. Se retomaron conceptos extraídos de los antiguos teatros romanos a partir del Libro V de Vitruvio (20 a.C.) [14], y de otros tratados más recientes como los de Alberti [15], Serlio [16] o Filarete [17]. El traslado de las representaciones teatrales de espacios abiertos a cerrados conllevó la aparición de fenómenos acústicos como la reverberación y el color, causada por las reflexiones de las ondas acústicas en las superficies interiores.

La forma de los teatros fue cambiando hacia proporciones más oblongas y alcanza su auge en el Barroco, cuando la música comienza a ser una pieza fundamental en las representaciones. Con el objeto de conseguir una mayor flexibilidad coreográfica aparece la caja de escena en teatros [11], así como el proscenio, parte del escenario que sobresalía de la boca de escena, mientras que el resto del escenario quedaba por detrás, en un espacio de mayor altura que el resto de la sala y llena de elementos absorbentes como decorados, cortinas y telones. Los volúmenes acoplados del escenario y de la sala se comunicaban a través del arco del proscenio. Además, se inicia la separación entre la zona de acompañamiento musical y la zona de representación por parte de los actores, culminando este proceso con la aparición de los teatros de ópera, en los que se sitúa a los músicos en un foso frente al escenario separado de los actores. El Teatro de San Carlo en Nápoles es un ejemplo de este periodo. En esta época surgen los palcos o anfiteatros, que ayudaban a reducir la reverberación excesiva y los ecos gracias a sus paredes de gran absorción. El empleo de la madera como material, en panelados y recubrimientos, en la mayoría de los teatros de ópera, implicaba una alta absorción en bajas frecuencias y por tanto curvas del tiempo de reverberación excesivamente planas. La primera ópera notable fue el teatro SS. Giovanni e Paolo en Venecia, remodelado por Carlo Fontana en 1645 para su uso como ópera. Fue la primera ópera italiana con forma de herradura [4]. Otra forma común en planta en esta época fue la oval o elíptica truncada. Las óperas de estilo italiano destacaban por su claridad acústica [4].

Para conseguir un buen acondicionamiento acústico, los autores de la época recomendaban la utilización de madera con cámara de aire para el revestimiento de

paredes y techos, así como forrar el interior con paneles de lana ligeros. Para conseguir unos niveles adecuados de brillo y claridad, se recomendaba situar la orquesta visible para la audiencia de manera que el sonido directo superaba al reflejado [18].

El Teatro alla Scala de Milán (1778) constituye uno de los teatros más importantes de finales del s. XVIII. Presentaba ciertas carencias acústicas sobre todo en los palcos, cuya escasa abertura los hacía funcionar como volúmenes acoplados al principal, aunque precisamente esto favorecía las reflexiones laterales y por tanto a los espectadores sentados en el patio de butacas [18].

El desarrollo más importante de proyectos de óperas sucede en la Francia de mitad del s. XVIII. En el tratado de Pierre Patte “*Essai sur l’Architecture*” (1774) se recomienda el uso de la planta oval para un mejor acondicionamiento acústico. Benito Bails (ilustración española) en su obra “*Elementos de Matemáticas*” (tomo IX Arquitectura Civil) toma muchos aspectos del tratado de Patte. También destaca el trabajo de George Saunders: “*Treatise on Theateres*” (1790), en el que se recomienda el uso de planta circular truncada por razones acústicas y de visión, aunque óperas construidas siguiendo estas indicaciones sufrieron precisamente de problemas de visión y de focalizaciones acústicas. En esta época el pensamiento ilustrado se imbricó en el diseño de las óperas, favoreciendo la sustitución de los palcos y galerías separadas, por los anfiteatros. De esta época son los proyectos de ópera no construidos basados en formas geométricas puras: el proyecto de auditorio semicircular de Etienne-Louis-Boullée, y el auditorio semicircular de Gabriel Pierre Martin Dumont [18].

En el siglo XIX las dimensiones de las salas aumentaron y por tanto también su reverberación. Para tener un buen comportamiento acústico debían emplear materiales muy absorbentes, tapicerías, cortinajes, telones, alfombras; así como favorecer las reflexiones laterales y la definición siendo suficientemente estrechas [18].

A mediados del siglo XIX surgen las salas de conferencias o “*Lecture Theaters*”. Empleados para que profesores pudieran instruir a una audiencia, tenían gradas de gran pendiente para favorecer que tanto el rayo visual como auditivo llegara directo. Las primeras salas circulares evolucionaron hacia formas rectangulares. En el tratado de Lachez “*Acoustique et optique de salles de reunion*” se describen las características de diseño que debían tener dichas salas. A finales del siglo XIX Lord Rayleigh introdujo el

método ondulatorio en el estudio acústico de salas. Pero no es hasta principio del siglo XX cuando se inicia la Acústica Arquitectónica como ciencia aplicada de la mano de W. C. Sabine [19]. Otros tipos de teatros de esta época son los teatros circo. En España se encuentran algunos ejemplos de esta tipología. Entre ellos destaca el Teatro Circo de Albacete, bellamente rehabilitado, en el que se ha situado una concha de sección convexa en el techo de la sala para favorecer la difusión del sonido (Figura 3).

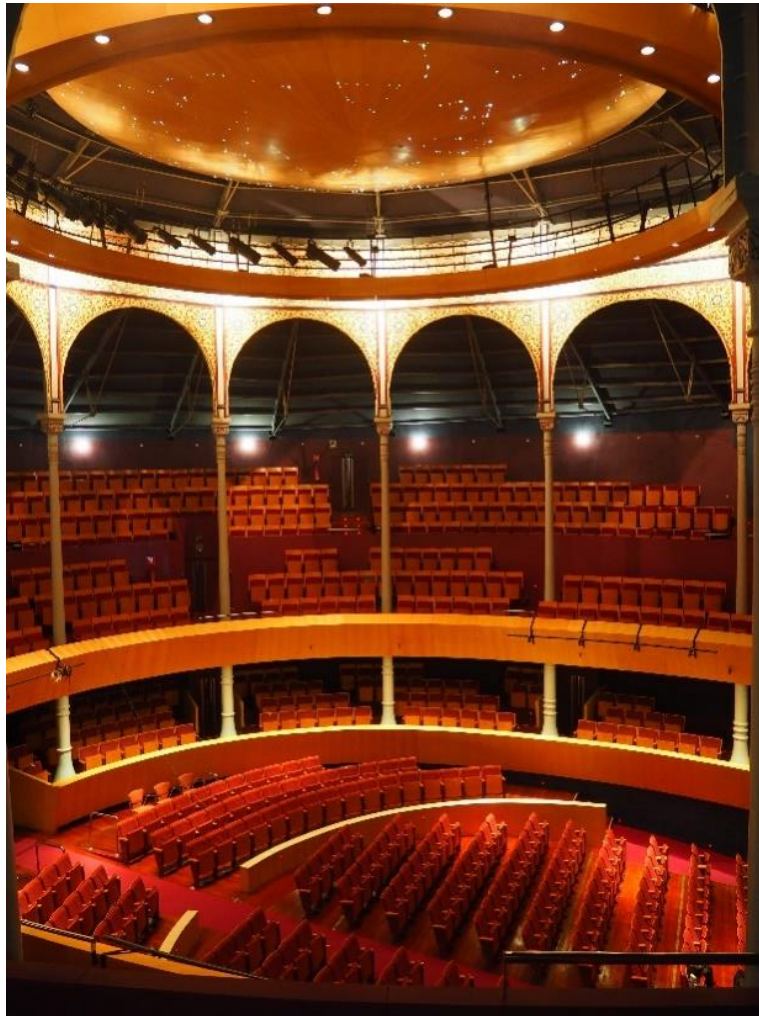


Figura 3. Teatro Circo de Albacete. Vista de patio de butacas y concha del techo

Hacia la segunda mitad del siglo XX surgieron otras tipologías como la del teatro con escenario integrado (“thrust-stage theatre”) que permitía al actor situarse en el centro de la audiencia, como se muestra en la Figura 4. El teatro circular (“theatre in the round”) eleva a la máxima expresión el objetivo de conseguir la mayor intimidad posible entre el actor y el público. El público rodea completamente a los actores, por lo que algunos están dándoles la espalda. La inteligibilidad puede verse afectada por esto. Además, las

primeras reflexiones provienen fundamentalmente de las paredes perimetrales, ya que el techo habitualmente se emplea para colocar los focos [11].



Figura 4. Ejemplo de teatro con "thrust-stage"

2.2 La acústica como ciencia

La acústica hace doscientos años era un arte. Para realizar las mediciones se utilizaban principalmente los oídos. La acústica como tal, permaneció en este punto hasta principios del siglo XX cuando William Clement Sabine introdujo la acústica arquitectónica en una serie de trabajos de investigación [2].

En 1885 se inauguró el Fogg Art Museum en el Campus de la Universidad de Harvard. La acústica de su sala de conferencias resultó ser muy deficiente, por lo que el presidente de Harvard acudió al departamento de física para resolver el problema. El titular del departamento le encargó la tarea al nuevo profesor asociado de 27 años W.C Sabine. Sabine invirtió tres años en descubrir por qué algunas salas tenían muy buena acústica y otras no. Junto con sus ayudantes realizó múltiples ensayos en distintos tipos de salas con un tubo de órgano, un cronómetro y su oído. El tiempo que tardaba en desaparecer el sonido de las salas fue uno de los parámetros que midieron.

De sus investigaciones y mediciones derivó la famosa fórmula del tiempo de reverberación de Sabine [20], que establecía que el tiempo de reverberación de una sala es directamente proporcional al volumen de la sala e inversamente proporcional a la capacidad de absorción de los elementos de cierre de la sala así como del amueblamiento [10].

$$T_R = \frac{0.162 \times V}{A} \quad (1)$$

Siendo V el volumen de la sala y A el área de absorción equivalente de la misma

$$A = \alpha \cdot S \quad (2)$$

La absorción acústica de una sala es

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i + \sum_{i=1}^m N_i \cdot A_i \quad (3)$$

Siendo, S_1, S_2, \dots, S_n las áreas de las distintas superficies de un local

$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ sus correspondientes coeficientes de absorción

N_1, N_2, \dots, N_n el número de objetos con una absorción A_1, A_2, \dots, A_n

En el transcurso de sus investigaciones, examinó las características absorbentes de un amplio rango de materiales de construcción y descubrió que incluso leves variaciones en la forma de montarlos en obra podían significar cambios en las propiedades absorbentes de los materiales [2], [8]–[10].

Los valores de absorción de las distintas soluciones constructivas propuestas en la literatura, han de tomarse con precaución, dado que el comportamiento absorbente de las mismas en los ensayos puede diferir del que presentan en obra [8]. La literatura publicada relacionada con los coeficientes de absorción de distintas soluciones constructivas presenta ciertas inconsistencias, lo que dificulta tener valores extremadamente precisos [2].

La teoría de Sabine, centrada en el cálculo y medición del tiempo de reverberación, no tenía en cuenta la forma de la sala.

Más adelante se produjeron otros grandes avances como la invención de los trídodos (1907) y la llegada de la radiodifusión (1920), que supusieron un gran salto en el campo

de la acústica. Con los tríodos, se podían producir sonidos en cualquier frecuencia deseada, y era posible medir la intensidad de sonidos muy leves. Además, fue factible construir instrumentos de medida que fueran compactos, resistentes e insensibles a las corrientes de aire.

Alrededor de los años 40, la acústica arquitectónica recibió impulso principalmente de las teorías y experimentos que se estaban llevando a cabo en el Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.), la Universidad de California (Los Ángeles), y de varias investigaciones llevadas a cabo en Europa (principalmente en Alemania e Inglaterra). En este periodo se explicó detalladamente el tiempo de reverberación en salas rectangulares, se demostró la utilidad del método de impedancia para especificar materiales acústicos, y se pusieron las bases para el cálculo de la atenuación del sonido en conductos. Se demostraron las ventajas de las paredes inclinadas y del uso de materiales acústicos por áreas en lugar de en muros enteros. Se introdujeron los absorbentes funcionales y el mercado se llenó de una amplia gama de materiales.

También se desarrolló la ciencia de la psicoacústica, se cuantificaron conceptos como volumen y enmascaramiento, y se determinaron muchos de los factores que permiten una comunicación oral adecuada. Con la aparición de nuevos diseños de salas distintos a la forma rectangular se concluye que el tiempo de reverberación no es el único parámetro que rige el comportamiento acústico de una sala, y surgen otros factores. A partir de mediados del siglo XX se proponen nuevos parámetros [19].

Durante la segunda guerra mundial, al igual que en otros campos, la velocidad en el progreso de la acústica alcanzó cotas que no han sido superadas hoy día.

En la actualidad, la acústica ha pasado a ser un tema de interés en el día a día de cualquier persona. Se ha legislado para proveer a las personas de entornos tranquilos y acústicamente saludables en vivienda y trabajo, son cada vez más los arquitectos que se asesoran con expertos en acústica, se buscan soluciones al ruido de los aeropuertos y carreteras, o se introducen equipos de sonido de alto rendimiento en las viviendas [1].

2.3 Acústica en Teatros.

Beranek reflexionaba acerca de la creencia popular de que los auditorios antiguos sonaban mejor que los modernos, y concluía que probablemente esto se debía a que los auditorios antiguos con acústica deficiente no habían llegado a nuestros días.

Hasta 1900 (teoría de Sabine) se confiaba en los buenos precedentes acústicos a la hora de diseñar nuevos teatros [21]. El propio Sabine empleó los precedentes para determinar la forma y proporciones óptimas en el caso del Boston Symphony Hall, pero utilizó cálculos para determinar la altura idónea del techo. Otros arquitectos de la época hicieron caso omiso de la forma y proporciones correctas, importándoles sólo el tiempo de reverberación, demostrándose que éste es insuficiente para una correcta acústica. Entre 1900-1950 se diluyó la importancia de una forma adecuada para salas de concierto y teatros. Esta confusión se puede entender debido a que para pequeños aforos la forma no suele ser importante. Sin embargo, la forma es crítica cuando el aforo es superior a 800 asientos en teatros y 1500 en salas de conciertos [3].

Uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta en el diseño de un teatro es la inteligibilidad de la palabra [11], es decir, que el grado de comprensión del mensaje oral sea óptimo en todos los puntos de una sala [2].

La inteligibilidad depende de la relación entre la señal útil recibida (sonido directo y primeras reflexiones) y el ruido de fondo. El ruido de fondo asociado a un espacio cerrado tiene dos componentes: la primera es debida al ruido producido por el sistema de climatización y demás instalaciones, así como del exterior, mientras que la segunda va asociada al nivel de campo reverberante existente en la sala. Éste depende del volumen del recinto y de los materiales utilizados como revestimientos de las superficies internas. Cuanto mayor es el volumen y menor la absorción de las superficies, menor es la inteligibilidad [11].

En salas pequeñas o cerca de los actores suele ocurrir que el sonido directo y las primeras reflexiones constituyen la mayor parte (en porcentaje) del sonido total en una sala, es por ello que la inteligibilidad en estos casos es buena. En grandes teatros el tiempo de reverberación suele ser algo más largo por lo que aumenta el sonido reverberado, en detrimento de la inteligibilidad. En teatros se suele recomendar

tiempos de reverberación de un segundo, pero para volúmenes reducidos es aconsejable bajarlo a 0'7 segundos. Se puede conseguir una buena energía directa proveyendo de fuertes primeras reflexiones que lleguen dentro del primer veinteavo de un segundo tras el sonido directo [3]. Las superficies que provocan reflexiones a partir de los 30 milisegundos se deben tratar con materiales absorbentes acústicos [10]. Los techos suspendidos pueden ser apropiados para este cometido, aunque frecuentemente los requerimientos acústicos entran en conflicto con la iluminación del escenario.

Hay algunos aspectos de diseño, especialmente en los teatros con proscenio, importantes en el comportamiento acústico. Son: un control de la anchura de la sala, un techo relativamente bajo y palcos profundos, que posibilitan que el volumen de la sala sea pequeño, proporcionando un tiempo de reverberación bajo y limitando la distancia de la última fila al escenario. Todo ello mejora las condiciones visuales y acústicas [3], [4]. Algunos autores señalan que los teatros con proscenio, gracias a sus proporciones, pueden alcanzar aforos de hasta 1000 espectadores sin necesidad de refuerzo electroacústico, mientras que en los teatros circo o con escenario rodeados por público, el límite se situaría alrededor de unas 600 personas [10]. Precisamente uno de los criterios que tradicionalmente se ha considerado que permiten conseguir una sala con buena acústica es que las proporciones de la misma mantengan una buena relación dimensional [22], [23].

La ciencia actual admite mayor variabilidad en las proporciones de las salas. El volumen óptimo de la sala depende de la función a la que esté destinada y del área ocupada por público, y se relaciona con el tiempo de reverberación. Para salas de teatro, conferencias y espacios similares, el TR medio óptimo se encuentra entre $0.264V^{0.1394}$ y $0.368V^{0.1505}$ [24].

Es necesario que el tiempo de reverberación de la sala sea independiente de la escenografía empleada en las distintas representaciones. Se dan casos en que la diferencia del tiempo de reverberación de la sala con escenografías muy absorbentes o poco absorbentes es muy notoria (por ejemplo en el Teatro Nacional de Múnich, en Alemania), lo que afecta gravemente al comportamiento acústico de la sala [11], [25].

En espacios dedicados al espectáculo (ópera, música clásica, ballet, teatro) se observa que son aquellos dedicados a la música, los que resultan más estimulantes para los ingenieros en acústica. Pero cada vez más las administraciones requieren de espacios en los que puedan realizarse distintos tipos de representaciones artísticas. Del análisis que realizan diversos autores sobre los requerimientos de los espacios multifuncionales, se pueden obtener algunas ideas relacionadas con las características de la caja de escena, y sus requerimientos para su uso en teatro [26]–[33].

Habitualmente, los espacios multifuncionales (al menos en Estados Unidos a principios y mediados del siglo XX) están diseñados principalmente para teatro, por lo que el tiempo de reverberación de la sala es bastante bajo con respecto a lo deseable para eventos sinfónicos. En los primeros espacios que se diseñaron para acoger espectáculos de distinto tipo, se intentó llegar a una solución intermedia en cuanto a tiempos de reverberación, resultando salas insatisfactorias tanto para música como para palabra hablada. Esto llevó a la creencia de que las salas multifuncionales no funcionaban en ningún caso [34].

Más adelante se propusieron hacer que el tiempo de reverberación de la sala pudiera cambiar para adaptarse a distintos usos. Para variar el tiempo de reverberación de las salas se emplearon medios mecánicos o electroacústicos. La variación de la absorción acústica, muy común en Norte América, consiste en modificar el tiempo de reverberación de la sala mediante el empleo de elementos absorbentes móviles. Se usan elementos retráctiles como cortinas y paneles absorbentes, así como superficies reflectantes móviles para cerrar la caja de escena en función del tiempo de reverberación requerido. La desventaja es que para cambiar el tiempo de reverberación usando esta opción, el área de la superficie absorbente ajustable ha de ser equivalente en tamaño a la de los espectadores. Por lo que su uso es adecuado en salas pequeñas y medianas. Algunas de las soluciones que se diseñaron para adaptar su uso para conciertos fueron: la “heavy contained shell”, la “stage craft Shell” (Jaffe), el “hall shaper” (una concha dentro de una concha),... entre otras [3], [4], [34].

Con la eclosión de construcción de estos espacios multifuncionales, algunos de ellos alquilaban su espacio con la torre de escenario vacía para economizar, pero dado que algunas compañías no tenían recursos para equipar la torre con bambalinas y cortinajes,

el espacio quedaba muy poco vestido. Como consecuencia el tiempo de reverberación resultante era demasiado alto para teatro [34]. Se han realizado muchas investigaciones sobre la acústica de la caja de escena [27]–[30]. Son más escasas las que se han llevado a cabo para evaluar el efecto de la colocación de elementos absorbentes en la caja de escena. Algunos estudios concluyen que el campo sonoro del escenario se ve más afectado cuando los materiales absorbentes han sido colocados en la parte baja de los paramentos verticales de la caja de escena, que cuando se colocan en las paredes de la parte alta de la caja de escena. El empleo de elementos absorbentes colgados de las varas, así como los decorados pueden modificar el tiempo de reverberación y la sonoridad de la sala [26].

Recientemente se han adoptado otras soluciones como la variación del volumen de la sala, el uso de cámaras reverberantes o la variación de la absorción acústica, entre otras. El volumen de la sala se puede modificar empleando paneles móviles en el techo, o incluso mediante un único techo. En ambos casos, el techo puede cambiar de altura, permitiendo que el tiempo de reverberación de la sala cambie. De esta manera la sala puede ser adecuada para distintos tipos de espectáculos: teatro, musicales, ópera, ballet e incluso conciertos de orquesta. Ejemplos de este uso son: el teatro Milton Keynes, en Inglaterra, y el teatro Bruce Mason en Auckland, Nueva Zelanda. Esta solución no siempre ha dado resultados positivos ya que requiere de un minucioso estudio. Para habilitar el uso en conciertos de teatros con caja de escena, se puede sellar la caja de escena a la altura del techo con paneles reflectantes, y colocar a la orquesta en el escenario [3].

En el diseño de teatros, al realizar los cálculos del tiempo de reverberación, el espacio de la caja de escena no se considera y se sustituye por las dimensiones de la boca de escenario a la que se le asigna un espectro de absorción tomado de la bibliografía. La absorción recomendada para la boca de escena cambia según los autores. Para que esto pueda ser así, en espacios multifuncionales, para la configuración de teatro es aconsejable reducir la altura de la boca de escenario, por ejemplo, mediante la colocación del telón cortafuegos en una posición más baja. Ello permite dejar de considerar el volumen de la caja de escenario como parte integrante del volumen de la sala [11].

Tal y como indica Barron (2010), “en los teatros sin caja escénica, el volumen de la sala puede resultar demasiado grande. La presencia de torre de escenario añade absorción a la boca del escenario. Prácticamente todo el sonido que se introduce en la torre de escenario es absorbido por el decorado y los cortinajes. Para un mismo tiempo de reverberación en la sala, los teatros con torre de escenario pueden tener un mayor volumen de auditorio que aquellos que no tengan torre de escenario”. Se entiende que se habla de torres de escenario típicamente vestidas. En aquellas que como indica Jaffe (2010) no lo están, la absorción de la torre de escenario puede no colaborar de la manera esperada, provocando caídas con doble pendiente del nivel acústico [3].

El volumen de una sala controla el tiempo de reverberación de la misma. Es posible cambiar el tiempo de reverberación de una sala de volumen fijo con un margen amplio. Los materiales y los detalles constructivos determinan el valor del espectro del coeficiente de absorción de cada superficie o solución constructiva. Conforme aumenta la superficie de una solución aumenta su capacidad para absorber sonido [8]. Como se ha visto en la fórmula (1).

La comunicación de dos espacios a través de una abertura genera lo que se conoce como volúmenes acoplados. Es lo que ocurre en los teatros en los que el volumen de la caja de escena se comunica con el auditorio a través de la boca de escena.

Otros volúmenes acoplados en salas pueden ser palcos profundos y zonas de asientos situadas bajo anfiteatros profundos. En general, su volumen no debe de añadirse al de la sala, para ello han de mantener una apertura a la sala pequeña en relación con el frente de palco. Si su área absorbente es mucho mayor que el área de acoplamiento a la sala y su volumen inferior al del espacio principal, ésta se toma como totalmente absorbente y no se añade al volumen principal. En el caso contrario, cuando la absorción del volumen acoplado es inferior a la del área de acoplamiento de la sala, su absorción puede sumarse a la de la sala principal, y considerar los dos volúmenes como uno solo [8]. Con este segundo uso se han empleado como recurso en salas de orquesta [35]. Sobre todo en Norte América se ha empleado mucho la absorción variable, para adecuar los espacios a distintas situaciones [3]. Las cámaras reverberantes tienen un área de acoplamiento menor que en la solución anterior, por lo que la sala y las cámaras reverberantes funcionan como volúmenes acoplados. Aquí, se busca la doble pendiente

en la caída del nivel acústico de la sala. Para que funcione, la cámara ha de ser suficientemente reverberante y el área de acoplamiento adecuada. Es una solución cara y que requiere bastante espacio. Los espacios reverberantes acoplados funcionan como un reservorio de energía sonora. En estos casos no es posible usar las ecuaciones antes descritas [9].

Como se ha dicho previamente, los teatros en los que el volumen de la caja de escena se comunica con el auditorio a través de la boca de escena, también pueden considerarse volúmenes acoplados. En este caso preocupa que la caída del tiempo de reverberación de la sala, se vea influenciada por el tiempo de reverberación de la caja de escena, y que se produzca una doble pendiente en la caída. Esto puede ocurrir, como hemos visto antes, cuando el tiempo de reverberación es menor en la caja de escena que en el auditorio [3].

2.4 La absorción de la boca de escena en la literatura

El coeficiente de absorción de la caja de escena se toma como dato de la bibliografía existente. Éste representa la absorción de la caja de escenario en su totalidad. En muchos casos la absorción de la caja de escenario se indica como “stage opening”, o “proscenium opening”, abertura del escenario o boca del escenario, sin más especificaciones. Sin embargo, en la propia literatura se dan claves para considerar que las características formales y de acondicionamiento de estos espacios pueden influir en su comportamiento absorbente.

Varios autores han propuesto valores para la absorción de la boca de escena. La mayoría de ellos ofrecen valores bastante similares.

Cavanaugh y Wilkes, proponen que el valor del coeficiente de absorción para la boca de escena se encuentra entre 0,25 y 0,75, en función del nivel de amueblamiento de la caja de escena, y advierten de que estos valores son aproximados y no deben sustituir a los ensayos en laboratorio [10], [36].

Knudsen y Harris recomiendan los valores que aparecen en la Tabla 1 para el coeficiente de absorción de la boca de escena, aunque indican que son aproximados y pueden variar. Inciden en que estos valores se pueden emplear bajo determinadas

circunstancias. Éstas son: que la reverberación de la caja de escena y de la sala sean similares y que los palcos tengan las condiciones para considerarlos parte del volumen de la sala, es decir, que no funcionen como volúmenes acoplados. Añade que normalmente se considera el volumen de la sala y de los palcos como uno; y el del escenario como otro.

Tabla 1. Coeficientes de absorción de la boca de escena propuestos por Knudsen y Harris

	128Hz	512Hz	2048Hz
Knudsen y Harris	0,30	0,40	0,50

Mantener valores similares de reverberación de la caja de escena y de la sala es más sencillo si la caja de escena tiene un tamaño mediano y tiene sus paramentos verticales, incluido el techo, cubiertos con material absorbente como cortinajes de “velour” con pliegues de gran profundidad. Esto contribuye a mejorar la absorción a bajas frecuencias. Si además se requiere mayor absorción se pueden colocar materiales absorbentes adicionales en la parte superior de los paramentos. Algunos ensayos han comprobado que el nivel de inteligibilidad en los palcos bajaba drásticamente cuando los actores declamaban desde el fondo del escenario, en comparación a cuando lo hacían en la parte delantera del escenario, por lo que se recomienda que la representación ocurra principalmente en posiciones cercanas al frente del escenario. Aproximadamente el 70% de la energía sonora emitida por un actor situado en la boca de escena se proyecta hacia los espectadores (50 % si se coloca de lado), el resto se dirige hacia el interior de la caja de escena. Cuando ésta es suficientemente absorbente, dicha energía se disipa, y no contribuye al sonido reverberante de la sala. Se puede reforzar la palabra colocando elementos reflectantes en la zona cercana a boca de escena para ayudar a proyectar el sonido [9], [11].

En la Tabla 2. Valores estimativos de los coeficientes de absorción asociados a la boca de escena de un teatro con proscenio. Tabla 2 se observan los valores aproximados de absorción de la boca de escena en teatros con proscenio establecidos por Carrión. Estos valores se emplean cuando la caja de escenario no forma parte del volumen de la sala, es decir la caja de escenario y la sala no son volúmenes acoplados. Para que esto sea así,

la altura de la boca de escena ha de ser lo más baja posible. [11]. Carrión especifica que los valores que propone han sido extrapolados a partir de los propuestos por Knudsen y Harris.

Tabla 2. Valores estimativos de los coeficientes de absorción asociados a la boca de escena de un teatro con proscenio.

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Carrión	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55

Estos valores podrían variar si cambia la absorción de la caja de escena a causa de cambios en la escenografía. Y recomienda, al igual que Knudsen y Harris, revestir la parte superior de los paramentos de la caja de escena con materiales absorbentes, de manera que el tiempo de reverberación de la caja de escena sea lo más independiente posible de la escenografía [11].

Arau, da unos valores similares a los anteriores, ver Tabla 3.

Tabla 3. Coeficientes de absorción para la boca de escena (Arau)

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Arau	0,30	0,40	0,50	0,60	0,60	0,50

Barron, por su parte, considera que los coeficientes empleados para butacas tapizadas muy absorbentes son adecuados para la boca de escena de un teatro cuando la zona de escenario es suficientemente absorbente. Ver Tabla 4 [3]. Estos datos difieren bastante de los sugeridos por otros autores.

Tabla 4. Coeficientes de absorción para butacas muy bien tapizadas

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Barron	0,72	0,80	0,86	0,89	0,90	0,90

Normalmente se asume que la caja de escena es muy absorbente (acústicamente muerta), ya que contiene profusión de elementos absorbentes, por lo que para hacer el cálculo del tiempo de reverberación de la sala, la boca de escena se considera una superficie absorbente más [3].

Las cajas de escena en salas de ópera también deben ser acústicamente muy absorbentes para prevenir el efecto de caída con doble pendiente en aquellos casos en los que las representaciones tienen poca escenografía que pueda contribuir a absorber el sonido. [3].

El coeficiente de absorción de la boca de escena obtenido en las salas estudiadas en el presente trabajo se ha comparado con los coeficientes propuestos por los autores que aparecen en la Tabla 5.

Tabla 5. Coeficientes de absorción de la boca de escena propuestos por distintos autores.

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Carrión	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
Arau	0,30	0,40	0,50	0,60	0,60	0,50
Knudsen y Harris	0,30		0,40		0,50	
Cavanaugh y Wilkes	0,25-0,75					
Barron	0,72	0,80	0,86	0,89	0,90	0,90

2.5 Parámetros de calidad acústica

Existen muchos parámetros de calidad acústica de salas. Con el paso del tiempo y la evolución de la acústica como ciencia muchos autores han creado sus propios parámetros para evaluar la bondad de la acústica de una sala: Beranek [1], Barron [3], Arau [12].

Aquí definiremos los principales parámetros que se han utilizado en el transcurso de la presente investigación.

2.5.1 Tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación TR a una determinada frecuencia se define como el tiempo que transcurre desde que la fuente emisora se detiene hasta que el nivel de presión sonora cae 60dB. Tal y como se vio en la ecuación 1, el tiempo de reverberación depende del volumen de la sala, de la absorción de los materiales y del aire. El tiempo de reverberación se puede calcular por medio de otras fórmulas (Eyring y Norris [37], Arau [12], Kuttruff [38], etc)

Para estimar si una sala tiene un adecuado tiempo de reverberación para el uso previsto se emplea el tiempo de reverberación medio,

$$TR_{mid} = \frac{1}{2} \cdot (TR(500Hz) + TR(1000 Hz)) \quad (4)$$

En teatros, el TR_{mid} ha de estar entre 0,70 y 1,2 segundos. Cuando el valor del TR_{mid} es superior a 1,5 segundos la sala puede resultar demasiado viva, mientras que TR_{mid} inferiores a 0,5 segundos dan lugar a sala excesivamente secas.

Aumentos en el TR a bajas frecuencias empeoran la inteligibilidad, por lo que es aconsejable que el TR se mantenga lo más constante posible. A altas frecuencias y sobre todo en grandes salas es previsible una disminución del TR debido a la atenuación del aire [11].

Es uno de los factores más utilizados ya que puede calcularse por adelantado a partir de dibujos de la sala y de los coeficientes de absorción conocidos [25].

El tiempo de reverberación de una sala a bajas frecuencias es un indicador de cómo de pesadas o ligeras son las estructuras de las paredes y techos envolventes de dicha sala [8]. Las masas vibrantes, estructuras ligeras, son muy absorbentes a bajas frecuencias.

Las salas con forma oblonga, “shoe-box”, platea plana y a lo sumo dos líneas de palcos, pueden tener mayor proporción de volumen de sala por asiento, y por lo tanto tener un tiempo de reverberación más alto. Esto es más difícil en salas con pendiente acusada en platea, ya que esto hace que el público sea más absorbente al tener una mayor exposición al campo sonoro [25].

2.5.2 TR_{10} , TR_{20} , TR_{30} y EDT

Las mediciones del tiempo de reverberación requieren medir una caída de 60dB, lo que en ocasiones no es posible debido al ruido de fondo. Por este motivo se han definido los parámetros TR_{10} , TR_{20} y TR_{30} . Cada uno de ellos es el tiempo que tarda el nivel de presión acústica en caer 10dB, 20dB y 30dB respectivamente. El TR_{10} se obtiene midiendo el tiempo que transcurre desde que la curva cae 5 dB hasta 25 dB respecto al nivel inicial y multiplicando su valor por seis. El TR_{20} es el tiempo que transcurre desde la caída de 5 dB a 25 dB respecto al nivel inicial, multiplicado por 3. Y el TR_{30} es el tiempo que transcurre desde la caída de 5 dB a 35 dB respecto al nivel inicial, multiplicado por 2.

El “Early Decay Time” o EDT, es también un parámetro que evalúa la velocidad de la caída. En este caso, desde el momento inicial, esto es desde 0 dB, hasta que el nivel de presión sonora decae 10 dB. Es un indicador del grado de viveza de una sala. Cuando el EDT en un punto de la sala es significativamente menor al valor del TR medido en el mismo punto, la impresión subjetiva es que la sala es poco viva. Valores medios de los EDT (a 500Hz y 1000Hz) del entorno del TR_{mid} , aseguran una buena difusión del sonido [11].

2.5.3 Calidez

La calidez acústica mide la respuesta de una sala a frecuencias bajas. La calidez o BR (“Bass Ratio”) de una sala es la relación entre la suma de los tiempos de reverberación

a frecuencias bajas y el tiempo de reverberación medio, que es, a su vez, la suma de los tiempos de reverberación a frecuencias medias [39].

$$BR = \frac{TR(125\text{ Hz})+TR(250\text{ Hz})}{TR(500\text{ Hz})+TR(1000\text{ Hz})} \quad (5)$$

2.5.4 Brillo

El brillo mide la riqueza de armónicos de una sala. Cuanto mayor es el brillo, más claro y brillante es el sonido. Es la relación entre la suma de los tiempos de reverberación a frecuencias altas y el tiempo de reverberación medio.

$$Br = \frac{TR(2000\text{ Hz})+TR(4000\text{ Hz})}{TR(500\text{ Hz})+TR(1000\text{ Hz})} \quad (6)$$

2.5.5 Claridad

La claridad mide la proporción de energía que llega por las primeras reflexiones con respecto a reflexiones tardías. Se emplea C_{50} para medir la claridad de la palabra y C_{80} para la de la música.

C_{50} se calcula para cada frecuencia entre 125 Hz y 4000Hz. Se expresa en escala logarítmica:

$$C_{50} = \frac{\text{Energía hasta 50 ms}}{\text{Energía a partir de 50 ms}} \quad (\text{en dB}) \quad (7)$$

Se denomina “speech average” la ponderación mediante factores de los factores correspondientes a las bandas de 500Hz, 1000Hz, 2000Hz y 4000Hz, de acuerdo con el peso específico que tiene cada banda en la inteligibilidad de la palabra [35].

$$C_{50}(\text{speech average}) = 0,15 C_{50}(500\text{ Hz}) + 0,25 C_{50}(1000\text{ Hz}) + 0,35 C_{50}(2000\text{ Hz}) + 0,25 C_{50}(4000\text{ Hz}) \quad (8)$$

Para una inteligibilidad correcta la claridad debe ser mayor o igual a 2dB.

De manera análoga, C_{80} es el cociente entre la energía recibida durante los 80 primeros milisegundos desde la llegada del sonido directo y la energía posterior.

$$C_{80} = \frac{\text{Energía hasta 80 ms}}{\text{Energía a partir de 80 ms}} \text{ (en dB)} \quad (9)$$

Se denomina “music average” al resultado de la ecuación 10, se recomienda que su valor se sitúe entre -4 y 0 dB, en salas vacías; y entre -2 y +2 dB para salas ocupadas.

$$C_{80} = \frac{C_{80}(500\text{Hz}) + C_{80}(1000\text{Hz}) + C_{80}(2000\text{Hz})}{3} \text{ (en dB)} \quad (10)$$

La claridad disminuye conforme aumenta el tiempo de reverberación.

2.5.6 Definición

La definición, D , es la relación entre la energía que llega al oyente en los primeros 50ms y la energía total [40].

$$D = \frac{\text{Energía recibida en los primeros 50 ms}}{\text{Energía total}} \quad (11)$$

Cuanto mayor sea el valor de D en un punto determinado de la sala, mejores serán la inteligibilidad y la sonoridad en dicho punto. El valor de D ha de estar en el entorno de 0,50 para salas de conciertos, ha de ser mayor a 0,70 en salas dedicadas a teatro, mientras que en salas de ópera es adecuado que se entretente entre 0,5 y 0,6 [41].

Se relaciona con el valor de C_{50} mediante la siguiente fórmula:

$$D = \frac{1}{1 + 10^{-C_{50}/10}} \quad (12)$$

2.5.7 STI/RASTI

Los valores del índice de inteligibilidad de la palabra o STI (“Speech Inteligibility Index”), se encuentran entre 0 (incomprensible) y 1 (perfectamente comprensible); cuanto más cercano a uno mayor es la inteligibilidad. Existen otros parámetros para medir la inteligibilidad. Es el caso del RASTI (“Rapid Speech Transmission Index”), un sistema también desarrollado por Steenek y Houtgast [42], pero más sencillo de calcular. La

calidad de la inteligibilidad de la palabra de un recinto se puede evaluar en función del valor que toman STI y RASTI, Tabla 6 .

Tabla 6. Valoración de la inteligibilidad de una sala en función del STI/RASTI

STI/RASTI	Calificación
0,00 - 0,30	Mala
0,30 – 0,45	Pobre
0,45 – 0,60	Regular
0,60 – 0,75	Buena
0,75 – 1,00	Excelente

2.6 Método de las Superficies de Respuesta

El método de las superficies de respuesta o RSM por sus siglas en inglés, se ha usado de manera extensa en diversos campos para desarrollar, mejorar y optimizar procesos. Uno de sus usos frecuentes es el de analizar problemas en los que una o varias respuestas están influenciadas por varios factores cuantitativos. El objetivo es optimizar la respuesta encontrando los valores óptimos de dichos factores [43].

La respuesta se representa por la ecuación:

$$Y = f(X_1, X_2 \dots X_n) \pm E$$

Donde, Y es la respuesta, f es la función respuesta, $X_1 \dots X_n$ son las variables independientes, y E es el error experimental causado por la falta de linealidad de las respuestas. La función respuesta (f) depende del tipo de relación existente entre la respuesta y las variables independientes. Se realiza una aproximación de la función respuesta, ya que la verdadera función respuesta (f) es desconocida. El modelo puede responder de forma lineal o cuadrática a la variación de variables. Un modelo de primer orden se representa mediante la ecuación:

$$Y = \beta + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + E$$

La obtención de los estimadores de los coeficientes de regresión y la variación del error experimental se obtiene mediante mínimos cuadrados. Con la función o superficie ajustada obtenida se realiza el análisis de superficie de respuesta. En la Figura 5 se observa una superficie de respuesta obtenida de una función polinómica de primer grado. En el plano horizontal se representan los factores independientes X_1 y X_2 , y en el eje vertical se representa la respuesta Y .

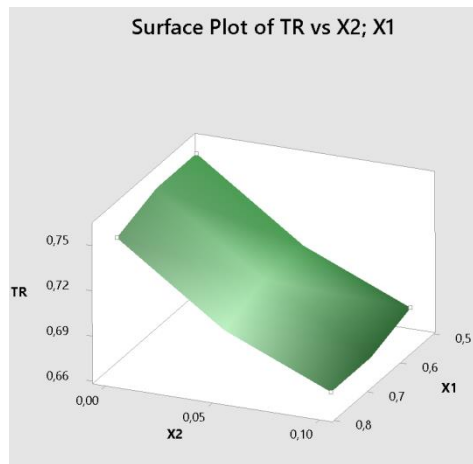


Figura 5. Superficie de respuesta

También se puede representar lo mismo mediante regiones de respuesta (Figura 6). Estos gráficos representan mediante curvas de nivel, las combinaciones de factores que provocan una determinada respuesta.

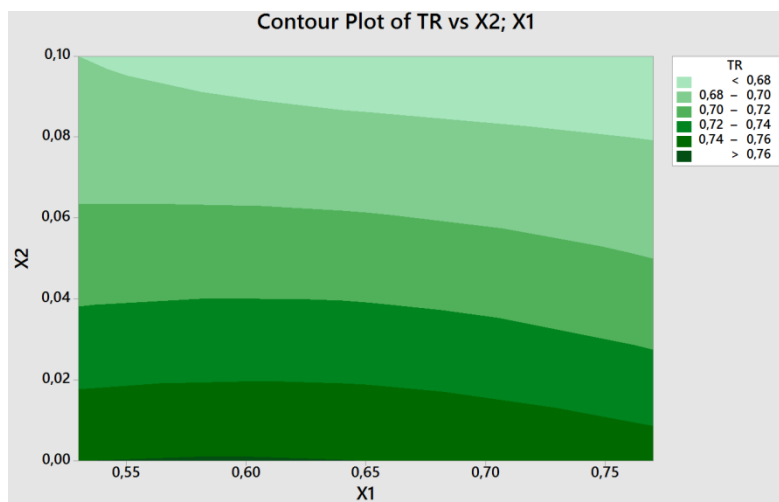


Figura 6. Representación de región de superficie de respuesta.

En simulación acústica, tradicionalmente el ajuste de modelos virtuales a salas existentes se ha realizado mediante procesos iterativos. Estos son útiles para salas

pequeñas o cuando el investigador es experimentado. En 2012, Llinares [13] introdujo el empleo del RSM para el ajuste de salas en su tesis " *Contribución a la simulación virtual de parámetros de calidad acústica en espacios arquitectónicos. Aplicación del método de superficies de respuesta*", demostrando que su uso sistematiza el proceso de simulación acústica de salas, sobre todo de gran volumen. Además, el empleo del RSM permite obtener datos de elementos no superficiales, tales como la boca de escena [44].

En acondicionamiento de salas, tal y como describe Llinares [13], la respuesta es el tiempo de reverberación de la sala, T . Los factores que determinan la respuesta son los espectros de absorción de hasta dos soluciones constructivas de las distintas superficies que forman el interior de la sala, (X_1, X_2) . Cuando se trabaja en simulación de espacios arquitectónicos, se han de conocer los coeficientes de absorción de las soluciones constructivas de las distintas superficies que forman el interior del espacio. El empleo del RSM posibilita que dos de las soluciones constructivas permanezcan como incógnita.

Se toman como soluciones constructivas incógnita aquellas que presentan mayor incertidumbre en cuanto a su comportamiento. Esto puede deberse a distintas causas: que no se haya ensayado en laboratorio porque sus características físicas lo impiden; porque su colocación en obra sea distinta a la prevista en los ensayos o porque haya podido sufrir alteraciones tras su puesta en obra que afecten a su comportamiento acústico, entre otras.

3 METODOLOGÍA

En este capítulo se detallan las herramientas metodológicas empleadas para la obtención del coeficiente de absorción de la boca de escena en teatros.

El diseño de la investigación para la consecución del objetivo general de la investigación ha sido el siguiente:

- Consulta de la literatura científica centrada en las características acústicas de la caja de escena.
- Recopilación de información constructiva y gráfica extensa sobre varios teatros seleccionados a partir de diversas fuentes.
- Ejecución de mediciones “in situ” de los parámetros acústicos que definen el comportamiento de los teatros seleccionados con la boca de escena abierta y cerrada.
- Representación en tres dimensiones de los teatros seleccionados mediante el software AutoCAD.
- Realización modelos virtuales en ODEON y ajuste a la medición real con la boca de escena cerrada. Empleo del RSM para ajustar el modelo con boca de escena cerrada.
- Estudio del modelo con la boca de escena abierta. Empleo del modelo del RSM para ajustar el modelo con boca de escena abierta.
- Obtención del coeficiente de absorción de la boca de escena de cada modelo.

En la Figura 7 se observa un diagrama de flujo que muestra el diseño de la investigación:

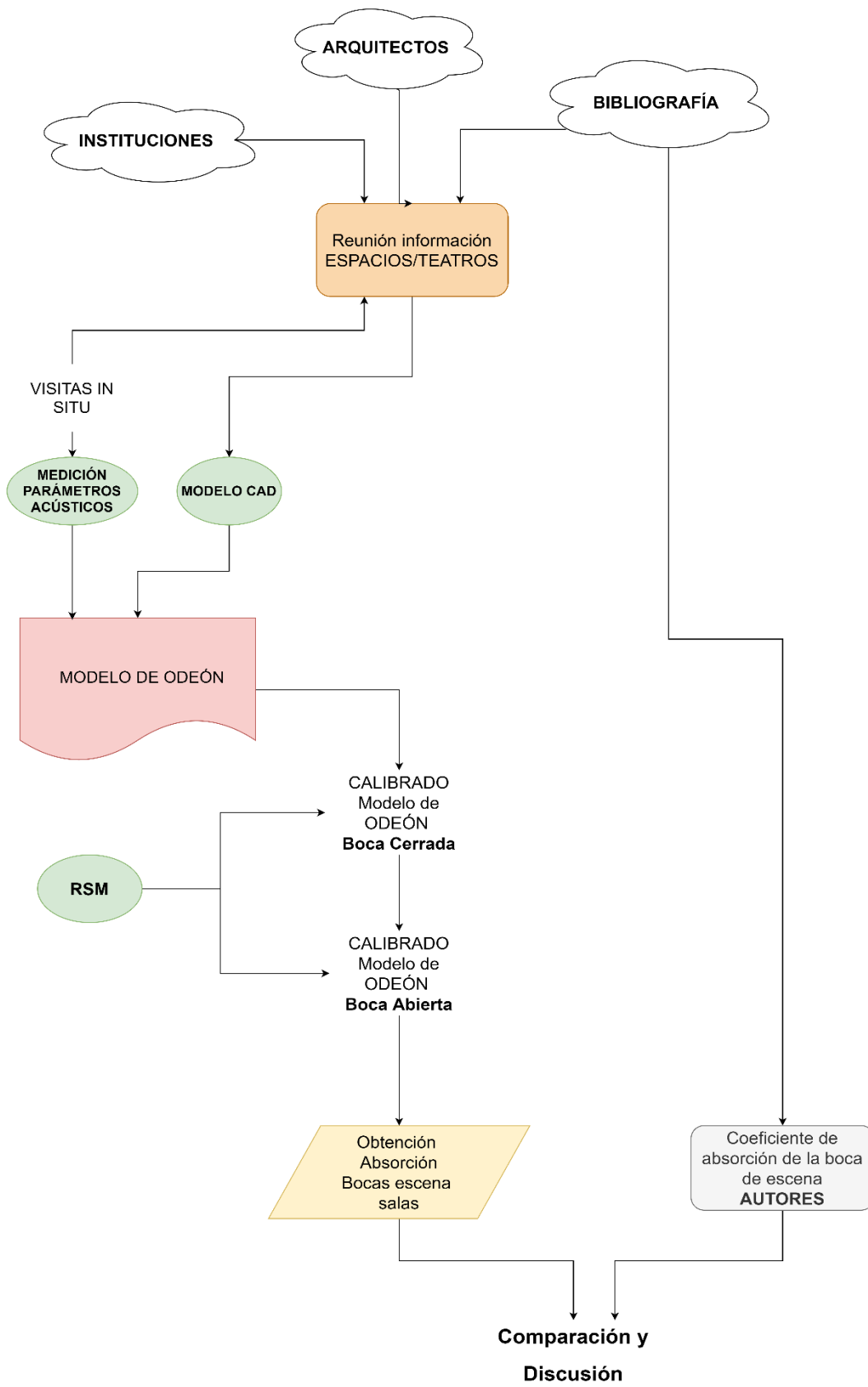


Figura 7. Diagrama del diseño de la investigación

3.1 Mediciones de parámetros acústicos in situ.

Para la obtención de los parámetros acústicos de las salas se realizaron mediciones “in situ” de la respuesta a impulso, de acuerdo con la norma ISO 3382/2009. [48]. Para ello se ha empleado el programa DIRAC 7841 de Brüel & Kjaer, así como el instrumental de mediciones acústicas del Centro de Tecnologías Físicas de la UPV, que consta de: ordenador portátil con tarjeta de sonido y software DIRAC V 3.1, amplificador LAB 300 de LAB GRUPPEN, y fuente sonora omnidireccional Omnipower 4296, todo lo anterior de Brüel & Kjaer. Se ha empleado el método “Sweep” o barrido sinusoidal para medir la respuesta a impulso de la sala tras la emisión de la señal de excitación. La recepción de la señal se ha realizado con el mismo equipo informático y un micrófono omnidireccional y bidireccional modelo Shure KSM44.

Los puntos en los que se quería realizar la medición se señalaron previamente en los planos de la sala. Se seleccionaron varios puntos en platea, anfiteatros o palcos, en función del recinto. Algunos en la línea central de la sala y otros situados no simétricos con respecto al eje. El número de puestos marcados en cada sala varió en función del tamaño y configuración de la sala, pero en todo caso excedió el número mínimo de puntos marcado por la normativa.

Las mediciones se realizaron dos veces en todos los puntos, una con la boca de escena abierta y otra con la boca de escena cerrada. Las salas se encontraban sin público. Y se emplearon aproximadamente tres horas en realizarlas.

La fuente omnidireccional se colocaba en el centro de la corbata del escenario con una altura aproximada de 150 centímetros; de manera que se podía mantener la posición de la fuente en las dos configuraciones del teatro: con la boca de escena abierta y con la boca de escena cerrada. Al bajar el telón la fuente quedaba alejada del mismo, lo más posible. La profundidad de la corbata de las distintas salas es variable, mientras que algunas tienen una gran profundidad otras no llegan al metro.

En la mayor parte de los casos, se iniciaban las mediciones con telón abierto. El micrófono se iba moviendo a las distintas posiciones seleccionadas en el plano. La altura del micrófono se fijaba aproximadamente a 140 centímetros. Se marcaba la posición de cada medición con cinta para poder replicar la medición con telón cerrado.

En cada punto se registraban las respuestas impulsivas mediante el empleo del software DIRAC[49], instalado en un ordenador portátil exclusivo para este uso.

Del procesado de la señal se obtuvieron los siguientes parámetros acústicos: C_{80} , D_{50} , STI. Los tiempos de reverberación, EDT, TR_{10} , TR_{20} , TR_{30} , se hallan mediante integración retrógrada de la respuesta a impulso [50].

3.2 Simulación. Modelo virtual de las salas.

Una vez realizadas las mediciones in situ se procedió a hacer un modelo en 3D de cada sala con el software Autocad 2015.

Los modelos en 3D se han realizado empleando planos vectoriales suministrados por los arquitectos autores de la obra o rehabilitación o las administraciones responsables del recinto. El modelo virtual se corresponde con la volumetría del interior de la sala, siguiendo los criterios de definición de detalle descritos en el manual del programa de simulación acústica. La ejecución de las distintas superficies del modelo de CAD se ha realizado con “3D-face”, ya que es la forma en la que el programa acústico puede interpretar las superficies del modelo. Los modelos se exportaron al software ODEON [51]. Se realizaron una serie de comprobaciones iniciales para asegurar la estanqueidad del modelo, tales como pérdida de rayos, y continuidad de las aristas.

En los modelos acústicos se posicionó el centro de coordenadas en el eje de la sala, en el punto de encuentro más bajo entre la corbata del escenario y la platea. Se introdujeron los parámetros de cálculo del modelo, la posición de la fuente sonora y de los micrófonos como en la toma de datos real. Mientras que los coeficientes de absorción de las distintas superficies de la sala fueron extraídos de la bibliografía, de ensayos de laboratorio o del banco de materiales del programa.

Con estos parámetros introducidos se realizó un cálculo inicial del modelo. Habitualmente, el resultado difiere de la medición real, lo que requirió una serie de ajustes en los coeficientes de absorción de los materiales principalmente. Este ajuste puede realizarse por el método iterativo o empleando el método de las superficies de respuesta que se explica a continuación.

3.3 Calibrado de los modelos mediante el empleo del RSM.

Desde el punto de vista metodológico se ha empleado el RSM para calibrar los modelos virtuales de las salas con la boca de escena cerrada y después para hallar el coeficiente de absorción de la boca de escena en cada una de ellas.

Este método permite realizar ajustes simultáneamente con dos superficies cuyo comportamiento es desconocido. La realización de las combinaciones de pares de espectros de absorción posibilita observar si la variación de dichos espectros afecta al resultado del tiempo de reverberación del modelo y en qué medida lo hace. De esta manera, al ajustar un modelo es más sencillo identificar la absorción de qué superficies está afectando al comportamiento acústico de la sala, y descartar variaciones de la absorción de superficies que no tienen un peso específico importante en la reverberación de la sala.

En el caso de combinaciones de espectros de absorción que sí contienen el “target”, la visualización de las superficies nos permite localizar de manera más eficiente pares de absorciones posibles, tal y como se observa en la Figura 8.

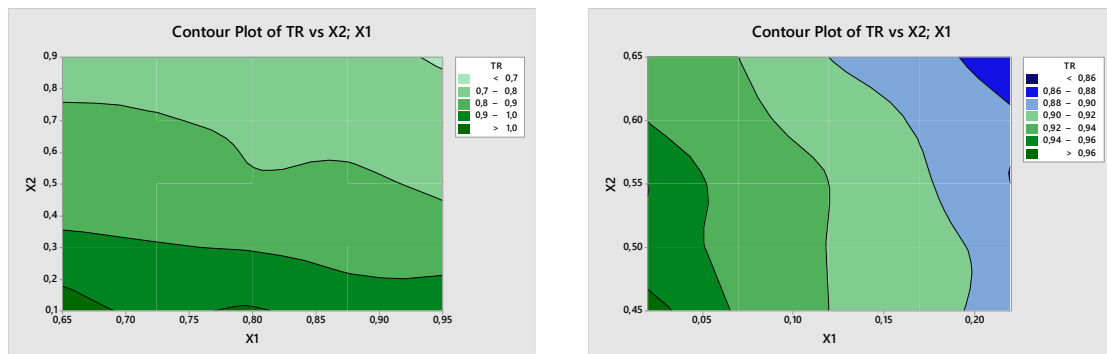


Figura 8. Teatro Principal. Ejemplos de superficie de respuesta, a la izquierda telón bajado a 2000Hz a la derecha telón subido a 4000 Hz

El RSM se emplea en primera instancia para ajustar el modelo virtual de la sala con la boca de escena cerrada. Es decir, en el modelo inicial la boca de escena está cubierta con una superficie que representa el telón. Se calcula el modelo de ODEON con los parámetros iniciales considerados en base a la inspección visual, a los detalles constructivos y a la memoria de proyecto. Si el cálculo arroja un resultado del espectro del tiempo de reverberación TR_{30} que encaja dentro del margen del 5% considerado

válido por las JND, entonces termina el proceso de calibración del modelo. En caso contrario se procede a aplicar el RSM.

Se toman de la bibliografía los datos de los espectros de absorción de cada solución constructiva, cada uno de ellos se compone de seis coeficientes (125Hz, 250Hz, 500Hz, 1000Hz, 2000Hz y 4000Hz), que son los que suelen especificar los fabricantes [2]. Se descartan los valores a 63 Hz ya que, según Cremer (2017), los datos de los coeficientes de absorción de los materiales a esa frecuencia no son fiables porque la mayoría de salas son demasiado pequeñas para medirlos adecuadamente [25].

Se seleccionan dos de las soluciones constructivas en base a los criterios descritos anteriormente, a las que denominamos superficies incógnita.

Se puede ver un ejemplo de tabla de coeficientes de absorción de las soluciones constructivas empleadas en una sala en la Tabla 7:

Tabla 7. Coeficientes de absorción superficial empleados en una simulación y "target"

Nº SUPERFICIE	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
1	$\alpha_{1_{125}}$	$\alpha_{1_{250}}$	$\alpha_{1_{500}}$	$\alpha_{1_{1000}}$	$\alpha_{1_{2000}}$	$\alpha_{1_{4000}}$
2	$\alpha_{2_{125}}$	$\alpha_{2_{250}}$	$\alpha_{2_{500}}$	$\alpha_{2_{1000}}$	$\alpha_{2_{2000}}$	$\alpha_{2_{4000}}$
...
(n-2)	$\alpha_{(n-2)_{125}}$	$\alpha_{(n-2)_{250}}$	$\alpha_{(n-2)_{500}}$	$\alpha_{(n-2)_{1000}}$	$\alpha_{(n-2)_{2000}}$	$\alpha_{(n-2)_{4000}}$
SUP. INCÓGNITA (n-1)	$X_{1_{125}}$	$X_{1_{250}}$	$X_{1_{500}}$	$X_{1_{1000}}$	$X_{1_{2000}}$	$X_{1_{4000}}$
SUP. INCÓGNITA n	$X_{2_{125}}$	$X_{2_{250}}$	$X_{2_{500}}$	$X_{2_{1000}}$	$X_{2_{2000}}$	$X_{2_{4000}}$
TARGET	TR_{125}	TR_{250}	TR_{500}	TR_{1000}	TR_{2000}	TR_{4000}

Partiendo de valores iniciales de absorción tomados de la bibliografía para cada superficie incógnita, X_{1i} y X_{2i} , el RSM se aplica para obtener una región de estudio por octava y por respuesta, $B_{1i} \pm R_{1i}$ y $B_{2i} \pm R_{2i}$. Después, éstas se combinan entre sí, dando como resultado nueve combinaciones de espectros de absorción, ver Tabla 8:

Definición de la región de estudio en la aplicación del RSM:

$$X_{1i} = B_{1i} \pm R_{1i}$$

Siendo:

B_{1i} , valores tomados de la bibliografía,

R_{1i} , incrementos que varían de 0 a 0,5

Análogamente X_{2i}

Se combina la región de estudio X_1 con la región de estudio X_2 .

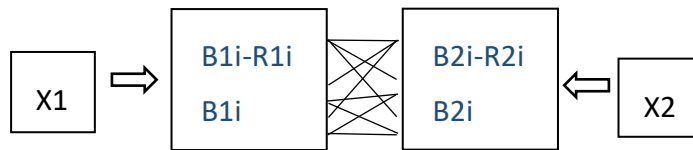


Tabla 8. Combinaciones de pares de espectros absorbentes a estudiar y tiempos de reverberación obtenido en cada cálculo del modelo

combinación	puntos	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	
1	B1i-R1i	X11 ₁₂₅	X11 ₂₅₀	X11 ₅₀₀	X11 ₁₀₀₀	X11 ₂₀₀₀	X11 ₄₀₀₀	X11
	B2i-R2i	X21 ₁₂₅	X21 ₂₅₀	X21 ₅₀₀	X21 ₁₀₀₀	X21 ₂₀₀₀	X21 ₄₀₀₀	X21
		tr1 ₁₂₅	tr1 ₂₅₀	tr1 ₅₀₀	tr1 ₁₀₀₀	tr1 ₂₀₀₀	tr1 ₄₀₀₀	tr1
2	B1i-R1i	X11 ₁₂₅	X11 ₂₅₀	X11 ₅₀₀	X11 ₁₀₀₀	X11 ₂₀₀₀	X11 ₄₀₀₀	X11
	B2i	X22 ₁₂₅	X22 ₂₅₀	X22 ₅₀₀	X22 ₁₀₀₀	X22 ₂₀₀₀	X22 ₄₀₀₀	X22
		tr2 ₁₂₅	tr2 ₂₅₀	tr2 ₅₀₀	tr2 ₁₀₀₀	tr2 ₂₀₀₀	tr2 ₄₀₀₀	tr2
3	B1i-R1i	X11 ₁₂₅	X11 ₂₅₀	X11 ₅₀₀	X11 ₁₀₀₀	X11 ₂₀₀₀	X11 ₄₀₀₀	X11
	B2i+R2i	X23 ₁₂₅	X23 ₂₅₀	X23 ₅₀₀	X23 ₁₀₀₀	X23 ₂₀₀₀	X23 ₄₀₀₀	X23
		tr3 ₁₂₅	tr3 ₂₅₀	tr3 ₅₀₀	tr3 ₁₀₀₀	tr3 ₂₀₀₀	tr3 ₄₀₀₀	tr3
4	B1i	X12 ₁₂₅	X12 ₂₅₀	X12 ₅₀₀	X12 ₁₀₀₀	X12 ₂₀₀₀	X12 ₄₀₀₀	X12
	B2i-R2i	X21 ₁₂₅	X21 ₂₅₀	X21 ₅₀₀	X21 ₁₀₀₀	X21 ₂₀₀₀	X21 ₄₀₀₀	X21
		tr4 ₁₂₅	tr4 ₂₅₀	tr4 ₅₀₀	tr4 ₁₀₀₀	tr4 ₂₀₀₀	tr4 ₄₀₀₀	tr4
5	B1i	X12 ₁₂₅	X12 ₂₅₀	X12 ₅₀₀	X12 ₁₀₀₀	X12 ₂₀₀₀	X12 ₄₀₀₀	X12
	B2i	X22 ₁₂₅	X22 ₂₅₀	X22 ₅₀₀	X22 ₁₀₀₀	X22 ₂₀₀₀	X22 ₄₀₀₀	X22
		tr5 ₁₂₅	tr5 ₂₅₀	tr5 ₅₀₀	tr5 ₁₀₀₀	tr5 ₂₀₀₀	tr5 ₄₀₀₀	tr5
6	B1i	X12 ₁₂₅	X12 ₂₅₀	X12 ₅₀₀	X12 ₁₀₀₀	X12 ₂₀₀₀	X12 ₄₀₀₀	X12
	B2i+R2i	X23 ₁₂₅	X23 ₂₅₀	X23 ₅₀₀	X23 ₁₀₀₀	X23 ₂₀₀₀	X23 ₄₀₀₀	X23
		tr6 ₁₂₅	tr6 ₂₅₀	tr6 ₅₀₀	tr6 ₁₀₀₀	tr6 ₂₀₀₀	tr6 ₄₀₀₀	tr6
7	B1i+R1i	X13 ₁₂₅	X13 ₂₅₀	X13 ₅₀₀	X13 ₁₀₀₀	X13 ₂₀₀₀	X13 ₄₀₀₀	X13
	B2i-R2i	X21 ₁₂₅	X21 ₂₅₀	X21 ₅₀₀	X21 ₁₀₀₀	X21 ₂₀₀₀	X21 ₄₀₀₀	X21
		tr7 ₁₂₅	tr7 ₂₅₀	tr7 ₅₀₀	tr7 ₁₀₀₀	tr7 ₂₀₀₀	tr7 ₄₀₀₀	tr7
8	B1i+R1i	X13 ₁₂₅	X13 ₂₅₀	X13 ₅₀₀	X13 ₁₀₀₀	X13 ₂₀₀₀	X13 ₄₀₀₀	X13
	B2i	X22 ₁₂₅	X22 ₂₅₀	X22 ₅₀₀	X22 ₁₀₀₀	X22 ₂₀₀₀	X22 ₄₀₀₀	X22
		tr8 ₁₂₅	tr8 ₂₅₀	tr8 ₅₀₀	tr8 ₁₀₀₀	tr8 ₂₀₀₀	tr8 ₄₀₀₀	tr8
9	B1i+R1i	X13 ₁₂₅	X13 ₂₅₀	X13 ₅₀₀	X13 ₁₀₀₀	X13 ₂₀₀₀	X13 ₄₀₀₀	X13
	B2i+R2i	X23 ₁₂₅	X23 ₂₅₀	X23 ₅₀₀	X23 ₁₀₀₀	X23 ₂₀₀₀	X23 ₄₀₀₀	X23
		tr9 ₁₂₅	tr9 ₂₅₀	tr9 ₅₀₀	tr9 ₁₀₀₀	tr9 ₂₀₀₀	tr9 ₄₀₀₀	tr9

Las nuevas parejas de espectros de absorción se introducen en ODEON para calcular el tiempo de reverberación de cada combinación, obteniendo nueve tiempos de reverberación como se observa en la Tabla 9.

Tabla 9. TR_{30} obtenidos de las combinaciones definidas anteriormente.

TR₃₀	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
tr1	tr1₁₂₅	tr1₂₅₀	tr1₅₀₀	tr1₁₀₀₀	tr1₂₀₀₀	tr1₄₀₀₀
tr2	tr2₁₂₅	tr2₂₅₀	tr2₅₀₀	tr2₁₀₀₀	tr2₂₀₀₀	tr2₄₀₀₀
tr3	tr3₁₂₅	tr3₂₅₀	tr3₅₀₀	tr3₁₀₀₀	tr3₂₀₀₀	tr3₄₀₀₀
tr4	tr4₁₂₅	tr4₂₅₀	tr4₅₀₀	tr4₁₀₀₀	tr4₂₀₀₀	tr4₄₀₀₀
tr5	tr5₁₂₅	tr5₂₅₀	tr5₅₀₀	tr5₁₀₀₀	tr5₂₀₀₀	tr5₄₀₀₀
tr6	tr6₁₂₅	tr6₂₅₀	tr6₅₀₀	tr6₁₀₀₀	tr6₂₀₀₀	tr6₄₀₀₀
tr7	tr7₁₂₅	tr7₂₅₀	tr7₅₀₀	tr7₁₀₀₀	tr7₂₀₀₀	tr7₄₀₀₀
tr8	tr8₁₂₅	tr8₂₅₀	tr8₅₀₀	tr8₁₀₀₀	tr8₂₀₀₀	tr8₄₀₀₀
tr9	tr9₁₂₅	tr9₂₅₀	tr9₅₀₀	tr9₁₀₀₀	tr9₂₀₀₀	tr9₄₀₀₀

Los datos se agrupan por frecuencias, obteniendo nueve combinaciones de tres puntos por cada frecuencia. Las superficies de respuesta son las representaciones gráficas de cada una de estas combinaciones (Figura 5Figura 9). A partir de las superficies de respuesta, utilizando el software MINITAB, o cualquier otro software matemático, se obtienen nuevas parejas de puntos que satisfacen el “target” (Tabla 10) empleando herramientas gráficas o matemáticas. Hay que evitar tomar pares de puntos que estén cercanos a los límites de la superficie de respuesta, ya que son imprecisos.

En la Tabla 10 se muestra un ejemplo de ternas de datos para la frecuencia 125Hz y en la Figura 9 uno de representación mediante superficie de respuesta.

Tabla 10. Ejemplo de ternas de datos para la frecuencia 125Hz

125HZ		
X1	X2	TR
X11 ₁₂₅	X21 ₁₂₅	tr1 ₁₂₅
X11 ₁₂₅	X22 ₁₂₅	tr2 ₁₂₅
X11 ₁₂₅	X23 ₁₂₅	tr3 ₁₂₅
X12 ₁₂₅	X21 ₁₂₅	tr3 ₁₂₅
X12 ₁₂₅	X22 ₁₂₅	tr5 ₁₂₅
X12 ₁₂₅	X23 ₁₂₅	tr6 ₁₂₅
X13 ₁₂₅	X21 ₁₂₅	tr7 ₁₂₅
X13 ₁₂₅	X22 ₁₂₅	tr8 ₁₂₅
X13 ₁₂₅	X23 ₁₂₅	tr9 ₁₂₅

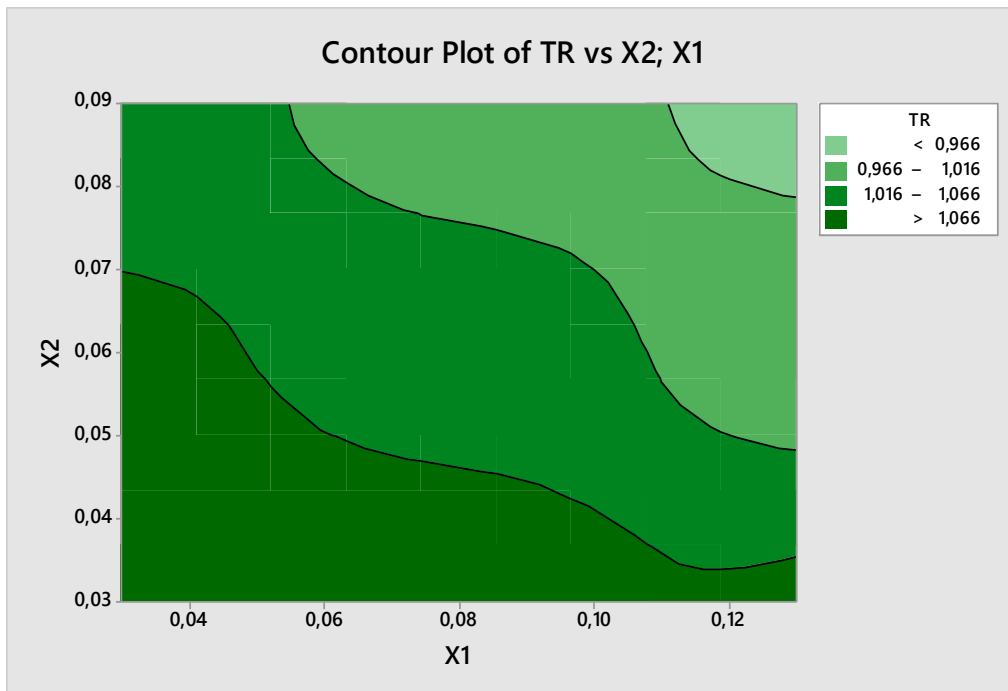


Figura 9. Ejemplo de representación mediante región de superficie de respuesta

Se hace una tabla de parejas de puntos por frecuencia (Tabla 11) y a continuación se crean nuevos espectros de absorción para las superficies con comportamiento desconocido (Tabla 12). Se calcula el tiempo de reverberación de cada combinación (Tabla 13) y se compara con los resultados del tiempo de reverberación de la medición "in situ".

Tabla 11. Nuevas parejas de puntos que entran dentro del TR₃₀ objetivo.

X1	0,06	0,08	0,11
X2	0,08	0,075	0,06

Tabla 12. Pares de puntos obtenidos para varias nuevas combinaciones

		125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Combinación 1	X1	X1 ₁₂₅	X1 ₂₅₀	X1 ₅₀₀	X1 ₁₀₀₀	X1 ₂₀₀₀	X1 ₄₀₀₀
	X2	X2 ₁₂₅	X2 ₂₅₀	X2 ₅₀₀	X2 ₁₀₀₀	X2 ₂₀₀₀	X2 ₄₀₀₀
Combinación 2	X1	X1 ₁₂₅	X1 ₂₅₀	X1 ₅₀₀	X1 ₁₀₀₀	X1 ₂₀₀₀	X1 ₄₀₀₀
	X2	X2 ₁₂₅	X2 ₂₅₀	X2 ₅₀₀	X2 ₁₀₀₀	X2 ₂₀₀₀	X2 ₄₀₀₀
Combinación 3	X1	X1 ₁₂₅	X1 ₂₅₀	X1 ₅₀₀	X1 ₁₀₀₀	X1 ₂₀₀₀	X1 ₄₀₀₀
	X2	X2 ₁₂₅	X2 ₂₅₀	X2 ₅₀₀	X2 ₁₀₀₀	X2 ₂₀₀₀	X2 ₄₀₀₀

Tabla 13. Tiempo de reverberación resultado de emplear los coeficientes de absorción de la Combinación 1

TR₃₀	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
TR₃₀ de la Combinación 1	tr1₁₂₅	tr1₂₅₀	tr1₅₀₀	tr1₁₀₀₀	tr1₂₀₀₀	tr1₄₀₀₀

Una combinación se considera válida cuando su espectro encaja dentro de los márgenes considerados aceptables (variación superior e inferior del 5% JND) del tiempo de reverberación (TR₃₀) de la medición realizada “in situ”.

Si alguno de los espectros del TR₃₀ se encuentra dentro de los márgenes superior e inferior considerados válidos, se aceptan los espectros de absorción que dan lugar a dicho TR₃₀.

En caso contrario, se observan las superficies de respuesta obtenidas para valorar si es necesario ampliar el incremento asignado a la región de estudio, o si es mejor cambiar una o las dos superficies consideradas como incógnita.

Una vez ajustado el modelo virtual con la boca de escena cerrada (material telón), se procede a realizar el mismo proceso con la boca de escena abierta. Inicialmente, se ha asignado a la boca de escena los valores del espectro de absorción propuestos por Arau [12]. Se realiza el cálculo del modelo con la boca de escena abierta. Si del cálculo del modelo se obtiene un espectro del tiempo de reverberación que encaja dentro de los márgenes superior e inferior del TR_{30} medido in situ para boca de escena abierta, entonces se valida el modelo. En caso contrario, se repite el proceso de ajuste con el RSM, manteniendo la boca de escena como una de las superficies incógnita.

3.3.1 Casos particulares

En algunos casos, aparentemente las superficies incógnita parecen tener un comportamiento muy reflectante o muy absorbente. En estos casos, el coeficiente de absorción de las superficies seleccionadas consultado en la bibliografía tiene valores cercanos a cero o a uno. A causa de la forma en la que se aplica el RSM, los incrementos que se emplean pueden ser bastante bajos, esto da lugar a parejas de puntos muy cercanos a los valores de absorción iniciales considerados. En la práctica se observa que los valores del tiempo de reverberación obtenidos pueden ser también cercanos entre sí.

Si se parte de una situación en la que el TR_{30} medido “in situ” se encuentra alejado del obtenido por el modelo inicial, entonces los valores obtenidos del TR_{30} del modelo aplicando incrementos muy bajos pueden no dar lugar a tiempos de reverberación que se acerquen al “target”. Si se sospecha que el comportamiento de las soluciones constructivas estudiadas difiere de su apariencia exterior, se puede abordar el problema de otra manera. Se puede emplear el RSM empezando por asignar a las superficies incógnita valores de absorción medios y aplicar incrementos relativamente altos para visualizar qué combinaciones contienen ampliamente al “target”. Después, se puede volver a aplicar el RSM con valores iniciales de los coeficientes de absorción cercanos a las combinaciones más ajustadas vistas en el paso anterior.

Esta forma permite visualizar cuál es la influencia que tiene la variación de la absorción de cada una de las superficies incógnita (o soluciones constructivas incógnita) en el TR_{30}

obtenido, y qué combinaciones se acercan más al “target”. Si tras este proceso, las combinaciones obtenidas no contienen al “target”, esto significa que las soluciones constructivas consideradas como incógnita no son adecuadas para ajustar la sala. Por lo que es necesario elegir otra pareja inicial de superficies, cambiando una o las dos superficies incógnita.

3.3.2 Obtención de los coeficientes de absorción de la boca de escena

Una vez obtenidos los coeficientes de absorción de la boca de escenario de cada una de las salas estudiadas, se han comparado con los espectros de absorción extraídos de la bibliografía estudiada.

En este trabajo se ha considerado como hipótesis inicial que los datos del espectro de absorción de la boca de escena hallados en la bibliografía actual son correctos. Por lo que a través del estudio de los casos y por medio de modelizaciones informáticas se ha intentado corroborar la información que aporta la literatura científica.

Además, se ha probado en los modelos de cada teatro el funcionamiento de los coeficientes de absorción de la boca de escena propuestos por los distintos autores con el objeto de observar el nivel de independencia del TR_{30} de la sala respecto de la absorción de la boca de escena.

Finalmente, se ha ampliado la extensión del punto anterior, y se ha calculado cada uno de los modelos empleando valores del coeficiente de absorción constante: bajos, medios y altos (0,10; 0,50 y 0,90). Esto ha permitido observar la influencia de la absorción de la boca de escena en los modelos.

3.4 Selección de salas

La muestra de salas para realizar la investigación se ha circunscrito a la provincia de Valencia, ya que en ella existen una gran cantidad y variedad de espacios de representación artística. Casi cada pueblo o ciudad tiene una sociedad musical, y frecuentemente cuentan con espacios de ensayo y representación. En muchos casos son auditorios, pero en otros son espacios multifuncionales que permiten realizar también

otras actividades como teatro [45]. La ciudad de Valencia cuenta con más de una docena de teatros, de distinta importancia.

Para la selección inicial de teatros sobre los que se ha llevado a cabo el estudio se ha empleado la información elaborada en el trabajo final de máster (TFM) “Catalogación de teatros y auditorios con caja escénica de la Comunidad Valenciana. Soluciones constructivas de algunos casos” [46].

Los teatros escogidos presentan diversidad de épocas, dimensiones y soluciones constructivas empleadas en sus acabados interiores. Tras la selección inicial, se contactó con las entidades públicas y privadas responsables de la gestión de las distintas salas. En la mayoría de los casos los procesos burocráticos para obtener autorización de las visitas se extendieron bastante en el tiempo. Muchas de las salas que autorizaron las visitas para hacer el TFM denegaron la autorización para realizar las mediciones. Si bien es verdad que las visitas que se realizaron para el TFM eran de inspección visual y toma de fotografías, no requerían personal especializado y eran relativamente breves; mientras que las mediciones para este trabajo requerían un técnico especial, lo que tenía costes asociados. Además, la medición acústica de las salas y toma de fotografías y datos, conllevaba una inversión en tiempo elevada, que dependía en gran medida del tamaño de la sala.

De las salas elegidas inicialmente se obtuvo respuesta afirmativa de aquellas que figuran en la presente tesis. Entre ellas se encuentran algunas de las salas más representativas de Valencia y de España y son ejemplos vivos de la historia de los edificios teatrales en nuestro país.

Las salas que se han estudiado son:

- El Teatro Principal. Valencia
- El Teatro Olympia. Valencia
- El Teatro Talía. Valencia
- El Teatro de la Banda Primitiva de Llíria. Llíria.
- Teatro El Musical. Valencia
- El Auditorio Alfons Roig, situado en la Facultad de Bellas Artes de San Carlos (Universitat Politècnica de València).

Para el análisis de los espacios se ha empleado la siguiente metodología. Una vez obtenida la autorización para visitar los espacios:

- Se recogió información gráfica y constructiva de los recintos, contactando con las administraciones que los gestionan, los arquitectos encargados del proyecto o rehabilitación, a través de repositorios como el MIRE (Mapa Informatizado de Recintos Escénicos) [47] o la bibliografía disponible sobre los mismos.
- Se visitaron los espacios con objeto de recoger datos, fotografías, medidas, sistema constructivo y materiales de los acabados.
- Se realizaron mediciones “in situ” dobles, con configuración de boca de escena abierta y con boca de escena cerrada, para la obtención y análisis de los parámetros acústicos que definen el comportamiento acústico de la sala en cada estado.
- Se procesaron la información tomada y las mediciones, para plasmarla en fichas de cada recinto, que incluyen:
 - Descripción de la sala
 - Datos generales: Año de construcción o rehabilitación, arquitecto responsable, características del recinto, dimensiones principales y aforo.
 - Materialidad: Descripción de los materiales y acabados vistos en la visita a la sala, con anotación si se aprecian soluciones constructivas especiales como acolchados de grandes dimensiones o paramentos atamborados. Anotación de soluciones constructivas encontradas en la bibliografía y en los proyectos de obra.
 - Fotografías: generales de la sala y de detalle.
 - Planos
 - Comportamiento acústico de las soluciones constructivas empleadas en los acabados interiores: Tablas con los coeficientes de absorción empleados en el modelo virtual de la sala.

- Medición de parámetros
 - Toma de datos “in situ”
 - Parámetros acústicos: con telón bajado y subido
- Aplicación del RSM
 - Modelo virtual de la sala
 - Aplicación RSM con telón bajado
 - Aplicación RSM con telón subido
- Resultado de la simulación

En el apartado Resultados se encuentra una descripción más detallada de cada espacio.

4 RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos tras aplicar el procedimiento descrito en la metodología a cada una de las salas, un resumen de los resultados y el análisis de los mismos en la discusión.

En cada sala se presentan los resultados en tres secciones.

En la primera sección se incluyen los resultados derivados de la de la obtención de información sobre la sala, descripción, materialidad e imágenes. En la segunda sección se muestran los resultados de la medición acústica realizada “in situ” con boca de escena abierta y cerrada. Por último, en la tercera sección se presentan los resultados emanados de la aplicación del RSM para ajustar la sala, para obtener el coeficiente de absorción de la boca de escena de cada una y determinar la influencia de la absorción de la boca de escena en el modelo.

Las salas aparecen en orden cronológico de construcción:

- El Teatro Principal. Valencia
- El Teatro Olympia. Valencia
- El Teatro Talía. Valencia
- El Teatro de la Banda Primitiva de Llíria. Llíria.
- Teatro El Musical. Valencia
- El Auditorio Alfons Roig, situado en la Facultad de Bellas Artes de San Carlos (UPV).

4.1 Sala 1. Teatro Principal de Valencia

4.1.1 Descripción de la sala

4.1.1.1 *Datos generales*

Dirección

C/ Barcas 15, Valencia

Fecha de construcción

1832

Arquitecto

Felipe Fontana Y Juan Marzo.

Reformas posteriores. Última reforma realizada en 1991 por el arquitecto Guillermo Stuyck

4.1.1.2 *Características morfológicas y constructivas*

El Teatro Principal de Valencia es uno de los teatros con proscenio españoles más paradigmáticos, junto con el Teatre Gran Liceu de Barcelona (1847) y el Teatro Real de Madrid (1850). Y uno de los más antiguos que ha conservado su configuración original [52].

Fue diseñado en 1770 por el arquitecto italiano Felipe Fontana. Su construcción sufrió diversas vicisitudes y en 1832 se inauguró el teatro sin las fachadas. En 1859 fue inaugurado definitivamente. Durante mucho tiempo fue el teatro más importante de la ciudad de Valencia.

El edificio del teatro Principal ha ido evolucionando a lo largo de su historia y ha sufrido varias reformas, pero ha mantenido su esencia. Es un ejemplo perfecto de teatro a la italiana y tiene todas sus características: planta en forma de herradura, techo plano, foso de orquesta, una gran caja de escena, palcos laterales en platea y cuatro niveles de palcos más, teniendo los dos últimos, anfiteatros. En la actualidad la planta cuarta se emplea para apoyo técnico y no suele habilitarse para público. A la sala se accede a

través de puertas numeradas situadas en corredores curvos que dan acceso independiente a platea, a cada uno de los palcos individuales y a los palcos corridos y anfiteatros. En las dos últimas plantas los palcos independientes se sustituyen por filas corridas de asientos. Centrada al fondo se encuentra la zona de anfiteatro.

A principios del siglo XX, el Teatro Principal fue utilizado de manera intermitente como sala de ensayos y de representación por parte de la Banda Sinfónica Municipal de Música de Valencia y por la Orquesta de Valencia; hasta 1987, año en que se inauguró el Palau de la Música.

El Teatro Principal cuenta actualmente con un aforo de entre 836 y 1126 espectadores, dependiendo del tipo de espectáculo [52]. Las dimensiones aproximadas de la sala son: 20 metros de anchura, 22 metros de profundidad y 16 metros de altura. El escenario tiene una anchura aproximada de 25 metros, una profundidad de 16, y una altura de la caja de escena de 19 metros. La boca de escena tiene unas dimensiones de 12 metros de anchura por 10,8 metros de altura. El volumen aproximado de la caja de escena es de 7.800 m³ y el de la sala, 6.700 m³ [47].

Los muros curvos de la envolvente de la sala son muros de ladrillo guarnecido, también las divisiones entre palcos, aunque de menor espesor. Los paramentos verticales están cubiertos con cortinas en planta baja, en planta primera y en el frente de escenario. Bajo los palcos de planta baja algunas paredes son atamboradas. Los antepechos de los palcos, de forma curva, y la boca de escena están decorados con molduras, así como el encuentro entre el paramento vertical y el techo de la sala. El techo de la sala es de cañizo con escayola parcialmente decorado, la cámara de aire posterior varía en profundidad en las zonas de platea y anfiteatro. El techo bajo palcos está enlucido sobre estructura rígida. El pavimento general de la sala es parqué de madera sobre rastreles, cubierto con moqueta en las zonas de circulación. El pavimento del escenario, y el de las gradas de planta segunda a cuarta tienen un entarimado de madera sobre estructura con gran profundidad. Los palcos tienen pavimento cerámico. Las butacas de platea se observan muy absorbentes, mientras que las de palcos y anfiteatros parecen medianamente tapizadas. El telón de la boca de escena es de gran gramaje.

4.1.1.3 Fotografías



Figura 10. Vista de la sala



Figura 11. Vista del escenario



Figura 12. Butacas platea



Figura 13. Vista lateral



Figura 14. Lámpara



Figura 15. Vista palcos

4.1.1.4 Planos

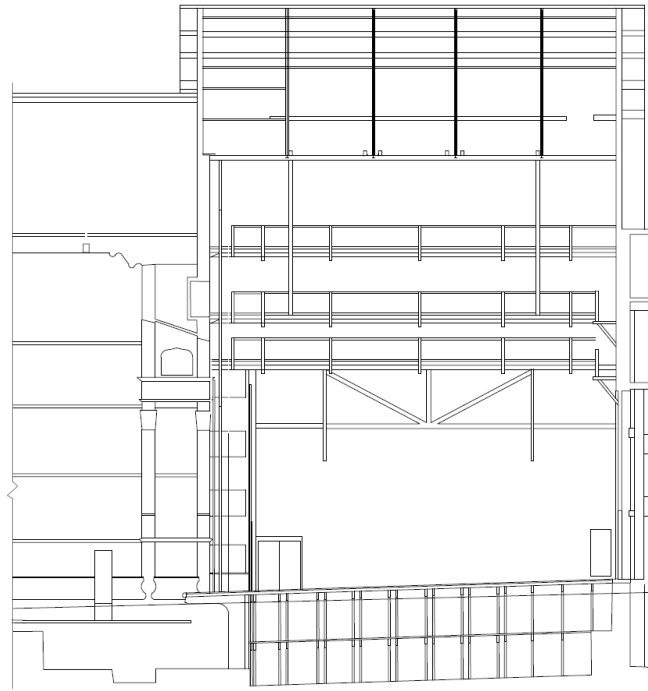


Figura 16. Sección (Fuente: MIRE)

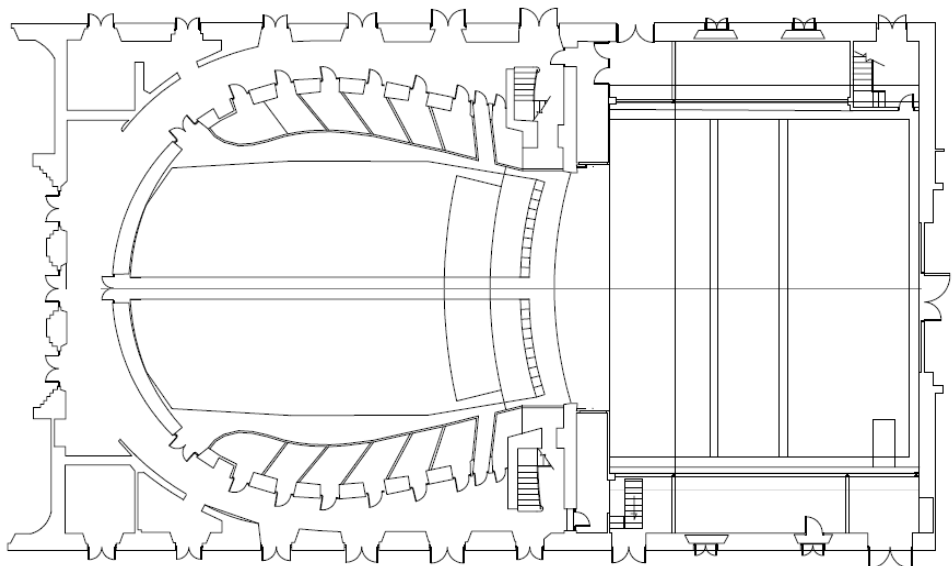


Figura 17. Planta (Fuente: MIRE)

4.1.1.5 Comportamiento absorbente de los materiales

En la Tabla 14 se detallan los coeficientes de absorción de las distintas soluciones constructivas que se encuentran en la sala.

Tabla 14. Coeficiente de absorción asignados a las distintas soluciones constructivas de la sala

Zona	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
Pavimento escenario, gradas P2, P3, P4	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Pavimento PB	0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,20
Pavimento pasillos (platea)	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25
Pavimento palcos	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Paredes atamboradas bajo palcos PB	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Paredes P2, P3 y P4; divisiones de palcos	0,025	0,026	0,060	0,085	0,043	0,050
Molduras antepecho palcos, boca escena	0,13	0,13	0,25	0,28	0,30	0,30
Molduras falso techo y boca de escena	0,20	0,20	0,25	0,28	0,30	0,30
Puertas acceso a sala y de palcos PB	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
Cortina boca de escena	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
Falso techo zona general	0,30	0,20	0,10	0,07	0,05	0,05
Techo bajo palcos	0,14	0,10	0,06	0,04	0,04	0,03
Butaca palcos y anfiteatros	0,56	0,64	0,70	0,72	0,68	0,62
Falso techo perímetro P4	0,29	0,20	0,15	0,10	0,05	0,05
Falso techo anfiteatro P4	0,08	0,11	0,05	0,03	0,02	0,03
Butacas platea	0,72	0,79	0,83	0,84	0,83	0,79
Paredes PB y P1, frente de escenario (cubierta con cortinas)	0,80	0,29	0,44	0,52	0,40	0,35

4.1.2 Medición de parámetros

4.1.2.1 Toma de datos "in situ"

Para definir los puntos (x,y,z) tanto de la fuente como de los distintos receptores, tomamos como centro de origen la parte más baja de la corbata en su encuentro con el plano de platea. Así medimos cada punto con respecto al origen que hemos determinado y lo trasladamos a ODEON.

Se toman los datos de la colocación de la fuente dodecaédrica: A 1,32 metros de altura sobre el escenario (que está a 1,15 metros de altura sobre el origen de coordenadas determinado) y a 0,91 metros de la boca del mismo. Altura del micrófono: 1,51 metros. (Mediciones de 1 a 23 con telón subido, mediciones de 24 a 46 con telón bajado)

Tabla 15. Coordenadas de la fuente y de los receptores

		X	Y	Z
Fuente		0,90	0,28	2,47
Abierto	Cerrado			
PTO_1	PTO_46	-7,25	0,00	1,50
PTO_2	PTO_45	-13,86	0,00	1,81
PTO_3	PTO_44	-20,55	0,00	2,42
PTO_4	PTO_43	-20,44	-4,00	2,41
PTO_5	PTO_42	-12,66	-5,56	1,73
PTO_6	PTO_41	-4,39	-4,38	1,50
PTO_7	PTO_40	-7,76	4,84	1,50
PTO_8	PTO_39	-16,69	3,58	2,05
PTO_9	PTO_38	-11,20	-8,40	2,17
PTO_10	PTO_37	-6,48	-7,25	2,17
PTO_11	PTO_36	-5,27	-7,09	5,17
PTO_12	PTO_35	-8,71	-7,83	5,17
PTO_13	PTO_34	-20,97	0,00	5,17
PTO_14	PTO_33	-16,89	6,54	5,17
PTO_15	PTO_32	-16,49	6,85	8,04
PTO_16	PTO_31	-20,47	0,00	8,04
PTO_17	PTO_30	-10,32	-8,22	8,04
PTO_18	PTO_29	-6,60	-7,18	8,04
PTO_19	PTO_28	-5,15	-7,35	11,02
PTO_20	PTO_27	-11,56	-8,34	11,02
PTO_21	PTO_26	-19,92	0	11,02
PTO_22	PTO_25	-17,20	6,31	11,02
PTO_23	PTO_24	-21,96	0	11,70

En la Tabla 15 se indican las coordenadas de la fuente sonora y de los distintos receptores.

4.1.2.2 Parámetros acústicos

Mediante la utilización del software DIRAC se han realizado las mediciones in situ de la sala, con telón bajado y con telón subido. De esta manera se han obtenido los parámetros acústicos en cada situación.

4.1.2.2.1 Parámetros acústicos con telón bajado

Tabla 16. Inteligibilidad

STI male	0,65
STI female	0,66

Tabla 17. Parámetros temporales

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
EDT	1,092	0,891	0,872	0,854	0,812	0,668
TR₃₀	1,286	1,052	0,984	0,993	0,99	0,863
TR₂₀	1,274	1,044	0,98	0,988	0,987	0,861
TR₁₀	1,247	1,087	1,004	1,001	1,003	0,844

Tabla 18. Claridad

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
C₅₀	-4,10	-3,08	-3,27	-2,50	-2,69	-1,94
C₈₀	-1,03	0,89	1,02	1,77	1,57	3,54

Tabla 19. Definición

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
D₅₀	0,28	0,33	0,32	0,36	0,35	0,39

4.1.2.2.2 Parámetros acústicos con telón subido

Tabla 20. Inteligibilidad

STI male	0,64
STI female	0,64

Tabla 21. Parámetros temporales

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
EDT	1,117	0,987	0,914	0,904	0,857	0,703
TR₃₀	1,286	1,075	1,037	1,035	1,005	0,886
TR₂₀	1,277	1,072	1,029	1,035	1,01	0,876
TR₁₀	1,319	1,111	1,093	1,073	1,056	0,856

Tabla 22. Claridad

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
C₅₀	-2,13	-0,87	-0,52	-0,17	-0,17	0,52
C₈₀	0,84	2,97	3,36	3,51	3,68	4,79

Tabla 23. Definición

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
D₅₀	0,38	0,45	0,47	0,49	0,49	0,53

4.1.3 Aplicación del método de superficies de respuesta

4.1.3.1 Modelo virtual de la sala

Se realiza el modelo virtual de la sala en Autocad y se importa el modelo a ODEON, Figura 18.

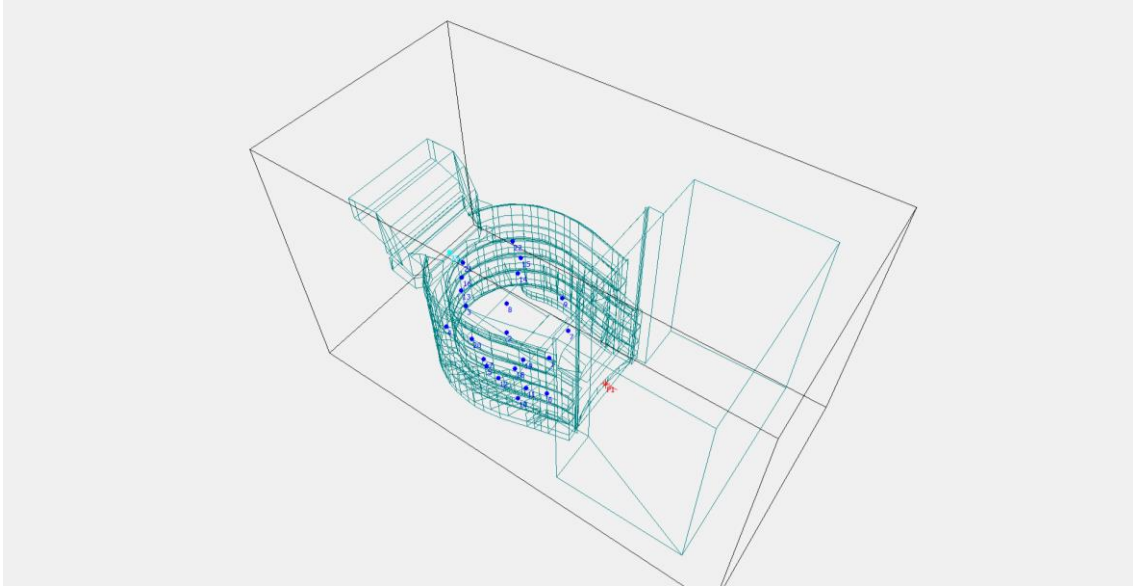


Figura 18. Modelo virtual de la sala

Se comprueba que el modelo es correcto: que no tiene fugas (“deadballs”), Figura 19; que no hay rayos perdidos, Figura 20, y que las aristas del modelo están en contacto entre sí, Figura 21.

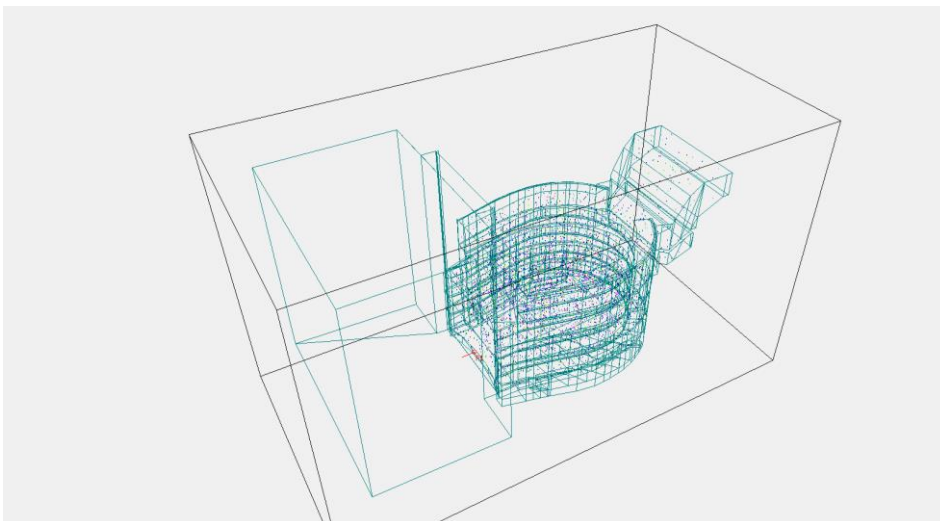


Figura 19. Captura del test 3D Billard realizado en ODEON

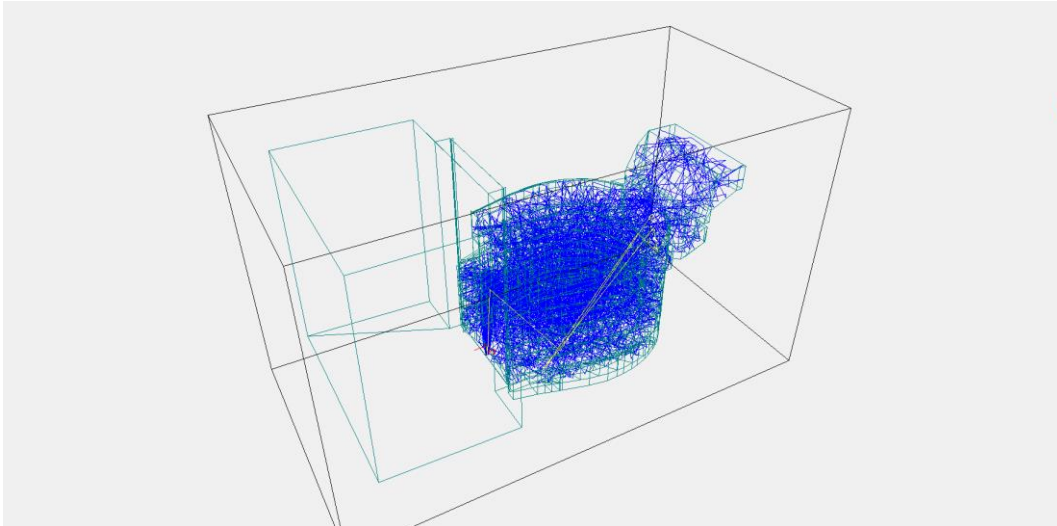


Figura 20. Captura del test rayos perdidos

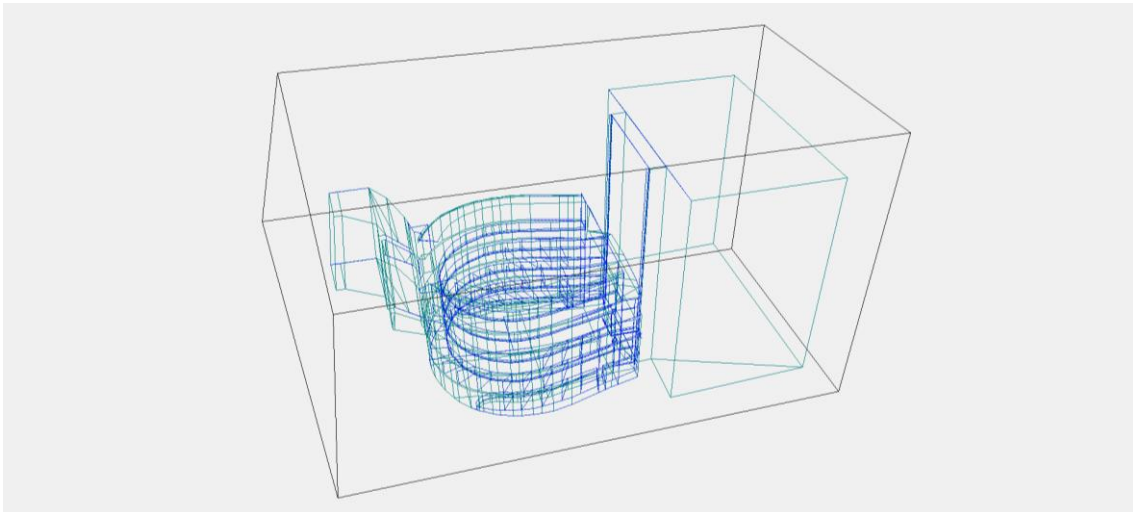


Figura 21. Captura del test aristas únicas

Se introducen las coordenadas de la fuente y de los receptores, y se asignan los materiales de las distintas superficies, empleando los coeficientes de la Tabla 14.

4.1.3.2 Aplicación del RSM con telón bajado

En el modelo virtual de la sala con telón bajado, a la superficie de la boca de escena se le asigna el material de telón. Se calcula el modelo y se obtiene el tiempo de

reverberación TR_{30} medio. El TR_{30} obtenido tras el cálculo se compara con el de la medición realizada “in situ”, tal y como se ve en la Tabla 24.

Tabla 24. TR_{30} medio de la medición in situ y de la modelización con telón bajado

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
<i>Medición in situ</i>	1,286	1,052	0,984	0,993	0,99	0,863
<i>Modelización Principal</i>	1,46	1,25	0,96	0,86	0,85	0,78

En la Figura 22 se representa el tiempo de reverberación medio, TR_{30} , medido in situ, los márgenes superior e inferior en los que el resultado del modelo es aceptable y el resultado del TR_{30} de la modelización inicial. Se observa que el valor a 500 Hz está ajustado. A bajas frecuencias se necesita mayor absorción mientras que a altas, es conveniente bajar la absorción.

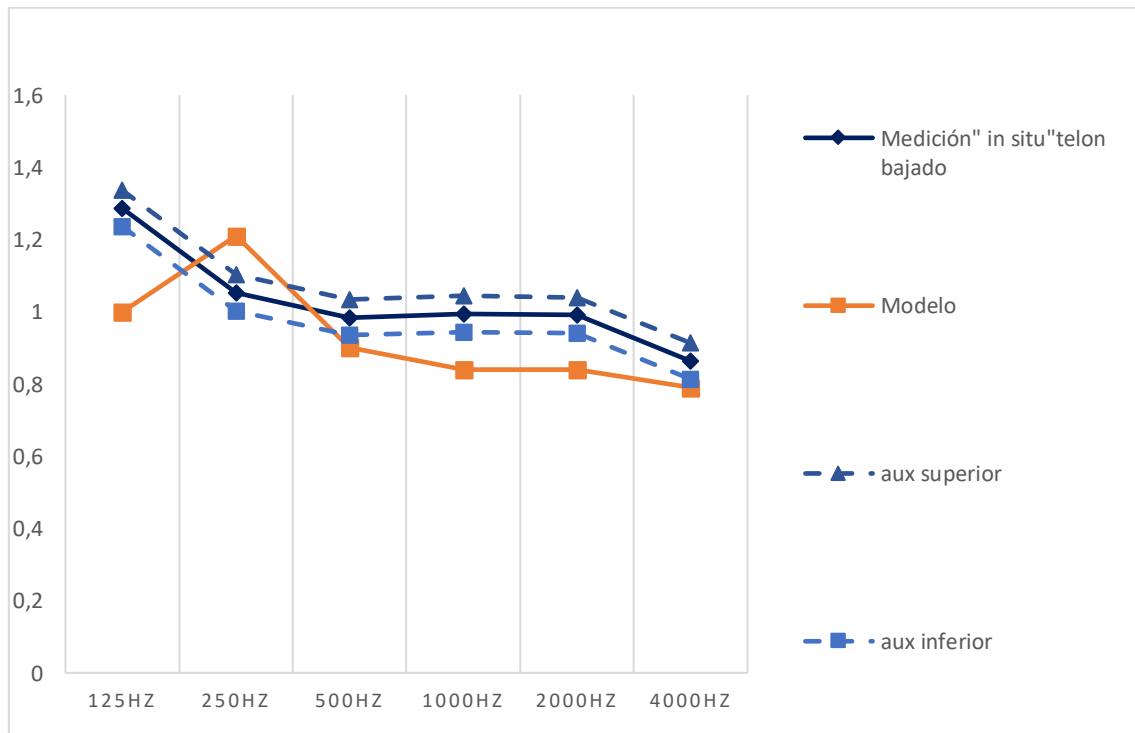


Figura 22. Representación gráfica del TR_{30} medido “in situ” con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables y la modelización inicial

4.1.3.2.1 Ajuste mediante método de superficies de respuesta

A continuación, se va a emplear el RSM para ajustar el modelo virtual a la medición real.

En primer lugar, se reordena la tabla de coeficientes de absorción de los materiales de la sala y se les asigna un número, tal y como se observa en la Tabla 25.

Tabla 25. Coeficientes de absorción de las superficies de la sala y asignación de número de superficie

Zona	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	Nº SUP
Pavimento escenario, gradas P2, P3, P4	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10	1
Pavimento PB	0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,20	2
Pavimento pasillos (platea)	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25	3
Pavimento palcos	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	4
Paredes atamboradas bajo palcos PB (sonido hueco)	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09	5
Paredes P2, P3 y P4; divisiones de palcos	0,025	0,026	0,060	0,085	0,043	0,050	6
Molduras antepecho palcos, boca escena	0,13	0,13	0,25	0,28	0,30	0,30	7
Molduras falso techo y boca de escena	0,20	0,20	0,25	0,28	0,30	0,30	8
Puertas acceso a sala y de palcos PB	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	9
Cortina boca de escena	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65	10
Falso techo zona general	0,30	0,20	0,10	0,07	0,05	0,05	11
Techo bajo palcos	0,14	0,10	0,06	0,04	0,04	0,03	12
Butaca palcos y anfiteatros	0,56	0,64	0,70	0,72	0,68	0,62	13
Falso techo perímetro P4	0,29	0,20	0,15	0,10	0,05	0,05	14
Falso techo anfiteatro P4	0,08	0,11	0,05	0,03	0,02	0,03	15
Butacas platea	0,72	0,79	0,83	0,84	0,83	0,79	16
Paredes PB y P1, frente de escenario (cubierta con cortinas)	0,80	0,29	0,44	0,52	0,40	0,35	17

Se eligen como superficies incógnita el acabado superficial fenólico y los reflectores o lamas del techo.

Se define la región de estudio en la aplicación del RSM.

$$X_{1i} = B_{1i} \pm R_{1i}$$

Siendo:

B_{1i} los valores tomados de la bibliografía y

R_{1i} , incrementos que oscilan entre 0 y 0,5

De forma análoga se realiza para X_{2i}

En la Tabla 26 se muestran los coeficientes de absorción de las superficies empleados en la simulación y las regiones de estudio.

Tabla 26. Coeficientes de absorción empleados en la simulación

Nº SUP	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
1	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
2	0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,20
3	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25
4	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
5	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
6	0,025	0,026	0,060	0,085	0,043	0,050
7	0,13	0,13	0,25	0,28	0,30	0,30
8	0,20	0,20	0,25	0,28	0,30	0,30
9	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
10	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
11	0,30	0,20	0,10	0,07	0,05	0,05
12	0,14	0,10	0,06	0,04	0,04	0,03
13	0,56	0,64	0,70	0,72	0,68	0,62
14	0,29	0,20	0,15	0,10	0,05	0,05
15	0,08	0,11	0,05	0,03	0,02	0,03
Butacas platea	X1₁₂₅	X1₂₅₀	X1₅₀₀	X1₁₀₀₀	X1₂₀₀₀	X1₄₀₀₀
Paredes cubiertas con cortinas	X2₁₂₅	X2₂₅₀	X2₅₀₀	X2₁₀₀₀	X2₂₀₀₀	X2₄₀₀₀

4.1.3.2.2 Ajuste 1

Se especifican los valores de las dos regiones de estudio, se toman los valores de la bibliografía y se asignan unos incrementos a cada una de ellas.

En la Tabla 27 y en la

Tabla 28, se observan los valores asignados a las regiones de estudio X1 y X2, respectivamente.

Tabla 27. Región de estudio de la superficie X1

X1	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
B1i-R1i	0,57	0,64	0,65	0,65	0,65	0,60
B1i	0,72	0,79	0,80	0,80	0,80	0,75
B1i+R1i	0,87	0,94	0,95	0,95	0,95	0,90
INCREMENTOS R1	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15

Tabla 28. Región de estudio de la superficie X2

X2	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
B2i-R2i	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
B2i	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
B2i+R2i	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
INCREMENTOS R2	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40

En la Tabla 29 se muestran los pares de espectros de absorción obtenidos.

Tabla 29. Combinaciones de pares de espectros de absorción de las regiones X1 y X2.

combinación	puntos	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	
1	B1i-R1i	0,57	0,64	0,65	0,65	0,65	0,60	X11
	B2i-R2i	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	X21
2	B1i-R1i	0,57	0,64	0,65	0,65	0,65	0,60	X11
	B2i	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	X22
3	B1i-R1i	0,57	0,64	0,65	0,65	0,65	0,60	X11
	B2i+R2i	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	X23
4	B1i	0,72	0,79	0,80	0,80	0,80	0,75	X12
	B2i-R2i	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	X21
5	B1i	0,72	0,79	0,80	0,80	0,80	0,75	X12
	B2i	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	X22
6	B1i	0,72	0,79	0,80	0,80	0,80	0,75	X12
	B2i+R2i	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	X23
7	B1i+R1i	0,87	0,94	0,95	0,95	0,95	0,90	X13
	B2i-R2i	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	X21
8	B1i+R1i	0,87	0,94	0,95	0,95	0,95	0,90	X13
	B2i	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	X22
9	B1i+R1i	0,87	0,94	0,95	0,95	0,95	0,90	X13
	B2i+R2i	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	X23

Estas combinaciones se prueban en Odeon para obtener los tiempos de reverberación nuevos.

Se introducen las nueve combinaciones en Odeon y se calcula el tiempo de reverberación para cada una de ellas. El resultado se puede ver en la Tabla 30. El tiempo de reverberación de las combinaciones se designa de aquí en adelante en minúsculas acompañado de un número que hace referencia a la combinación de origen de la que es su resultado.

Tabla 30. TR₃₀ obtenidos de las combinaciones definidas anteriormente.

TR ₃₀	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
tr1	1,51	1,44	1,18	1,10	1,06	0,96
tr2	1,17	1,13	0,94	0,89	0,85	0,79
tr3	1,03	1,00	0,82	0,79	0,76	0,71
tr4	1,40	1,35	1,11	1,05	1,01	0,91
tr5	1,10	1,06	0,89	0,84	0,81	0,75
tr6	0,98	0,94	0,79	0,76	0,72	0,67
tr7	1,31	1,26	1,05	0,99	0,95	0,87
tr8	1,04	0,99	0,85	0,81	0,78	0,73
tr9	0,92	0,88	0,75	0,72	0,68	0,64

En la Figura 23 se observa que todos los puntos objetivo se encuentran dentro de los espectros del TR₃₀ de las distintas combinaciones.

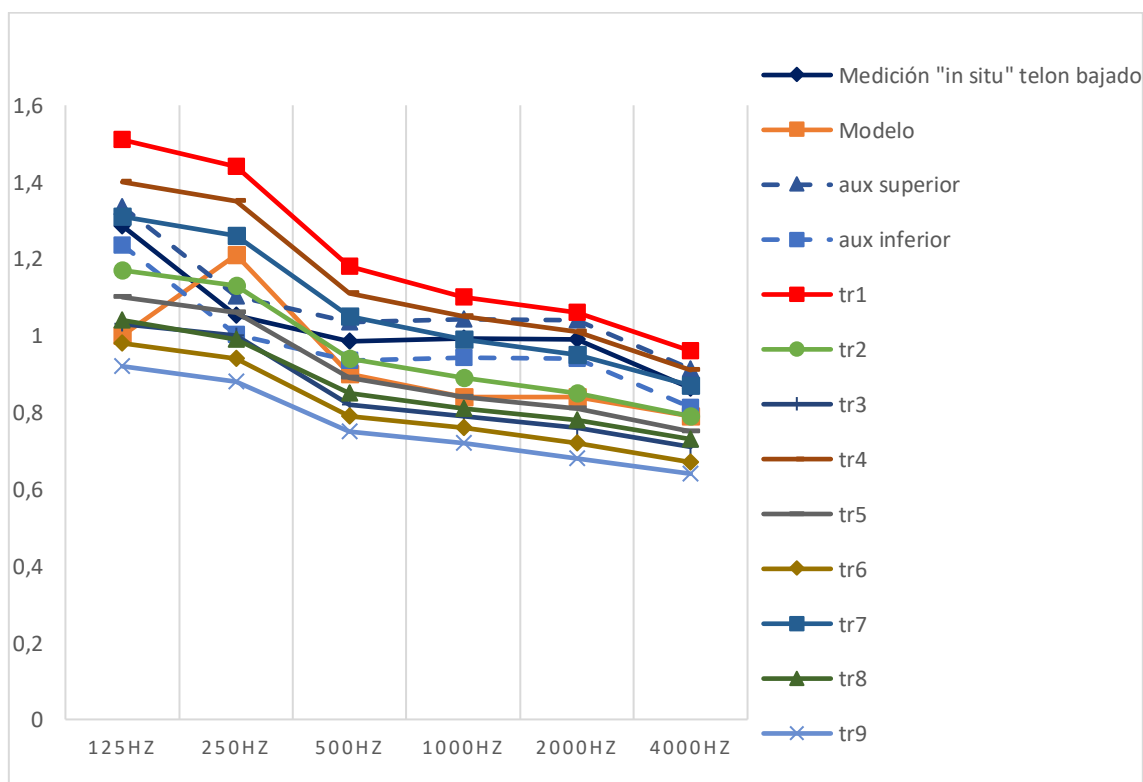


Figura 23.. Comparativa TR₃₀. Medición "in situ", modelización y resultados tras aplicación del RSM

Para obtener las superficies de respuesta, se agrupan los datos por frecuencia, formando nueve combinaciones de ternas de puntos por frecuencia. A partir de dichas superficies se obtienen nuevos pares de puntos que satisfacen el “target”.

Ternas de datos por frecuencia y representación mediante superficie de respuesta:

Tabla 31. Ternas de datos a 125 Hz

125HZ			
	X1	X2	TR
	0,57	0,10	1,51
	0,57	0,50	1,17
	0,57	0,90	1,03
	0,72	0,10	1,40
	0,72	0,50	1,10
	0,72	0,90	0,98
	0,87	0,10	1,31
	0,87	0,50	1,04
	0,87	0,90	0,92

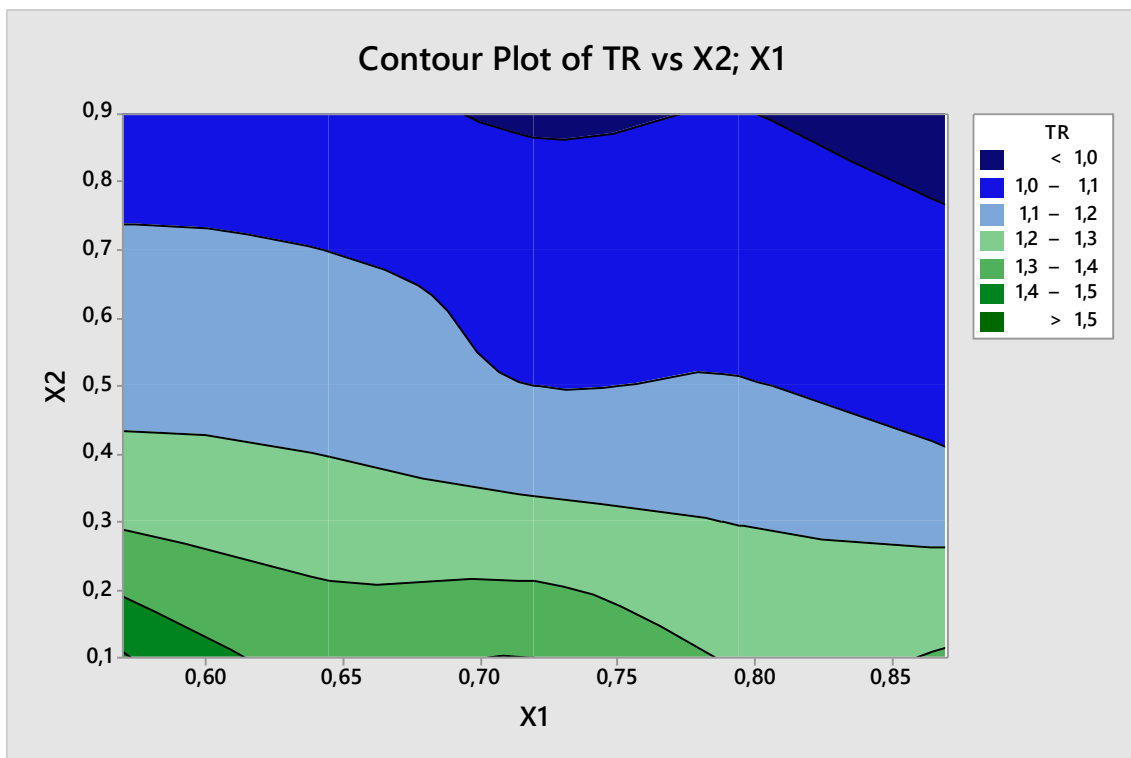


Figura 24. Superficie de respuesta a 125 Hz.

Tabla 32. Pares de puntos a 125 Hz

X1	0.72	0.65	0.75
X2	0.23	0.21	0.27

Tabla 33. Ternas de datos a 250 Hz

250HZ			
	X1	X2	TR
	0,64	0,10	1,44
	0,64	0,50	1,13
	0,64	0,90	1,00
	0,79	0,10	1,35
	0,79	0,50	1,06
	0,79	0,90	0,94
	0,94	0,10	1,26
	0,94	0,50	0,99
	0,94	0,90	0,88

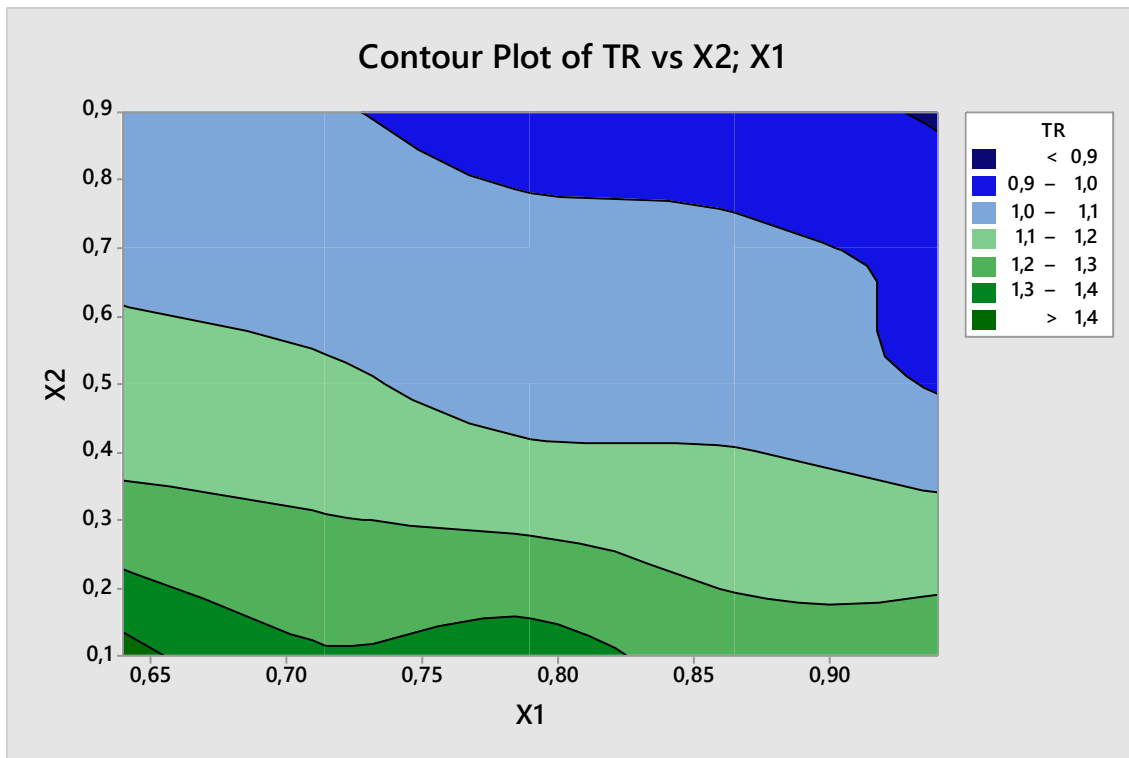


Figura 25. Superficie de respuesta a 250 Hz

Tabla 34. Pares de puntos a 250 HZ

X1	0.79	0.75	0.85
X2	0.51	0.46	0.57

Tabla 35. ternas de datos a 500 Hz

500HZ			
	X1	X2	TR
	0,65	0,10	1,18
	0,65	0,50	0,94
	0,65	0,90	0,82
	0,80	0,10	1,11
	0,80	0,50	0,89
	0,80	0,90	0,79
	0,95	0,10	1,05
	0,95	0,50	0,85
	0,95	0,90	0,75

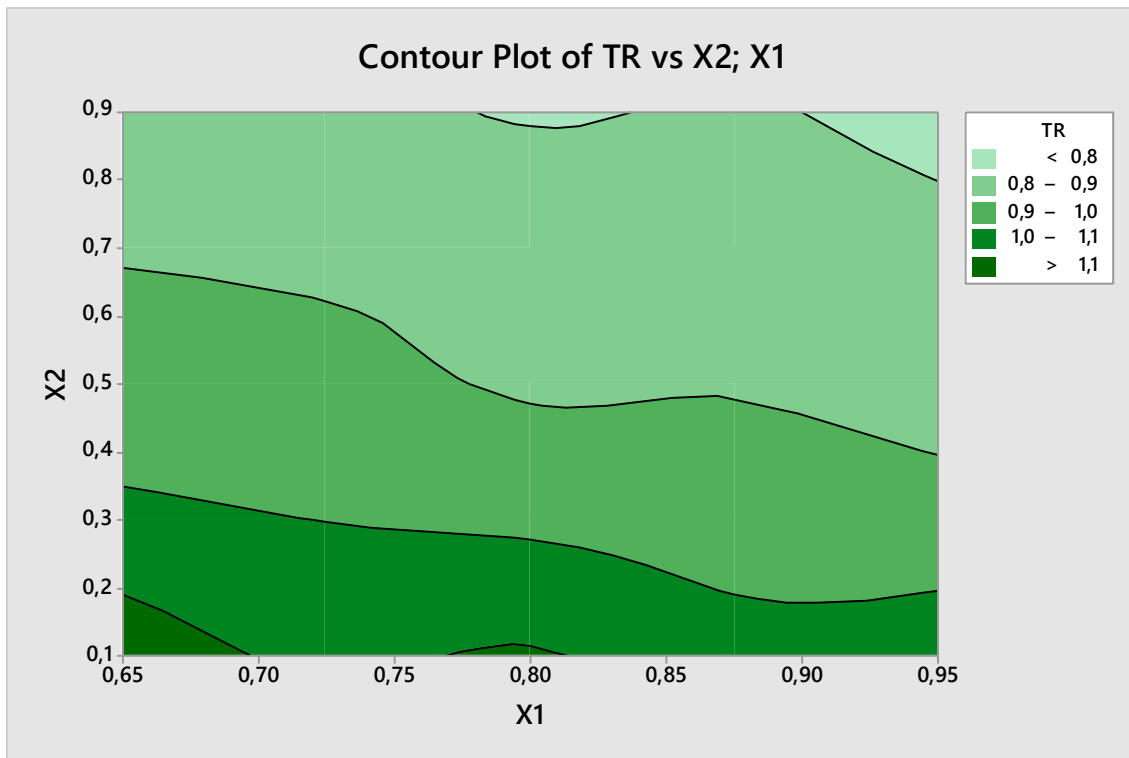


Figura 26.. Superficie de respuesta a 500 Hz

Tabla 36. Pares de puntos a 500 Hz

X1	0.81	0.75	0.85
X2	0.30	0.25	0.37

Tabla 37. Ternas de datos a 1000 Hz

1000HZ			
	X1	X2	TR
	0,65	0,10	1,10
	0,65	0,50	0,89
	0,65	0,90	0,79
	0,80	0,10	1,05
	0,80	0,50	0,84
	0,80	0,90	0,76
	0,95	0,10	0,99
	0,95	0,50	0,81
	0,95	0,90	0,72

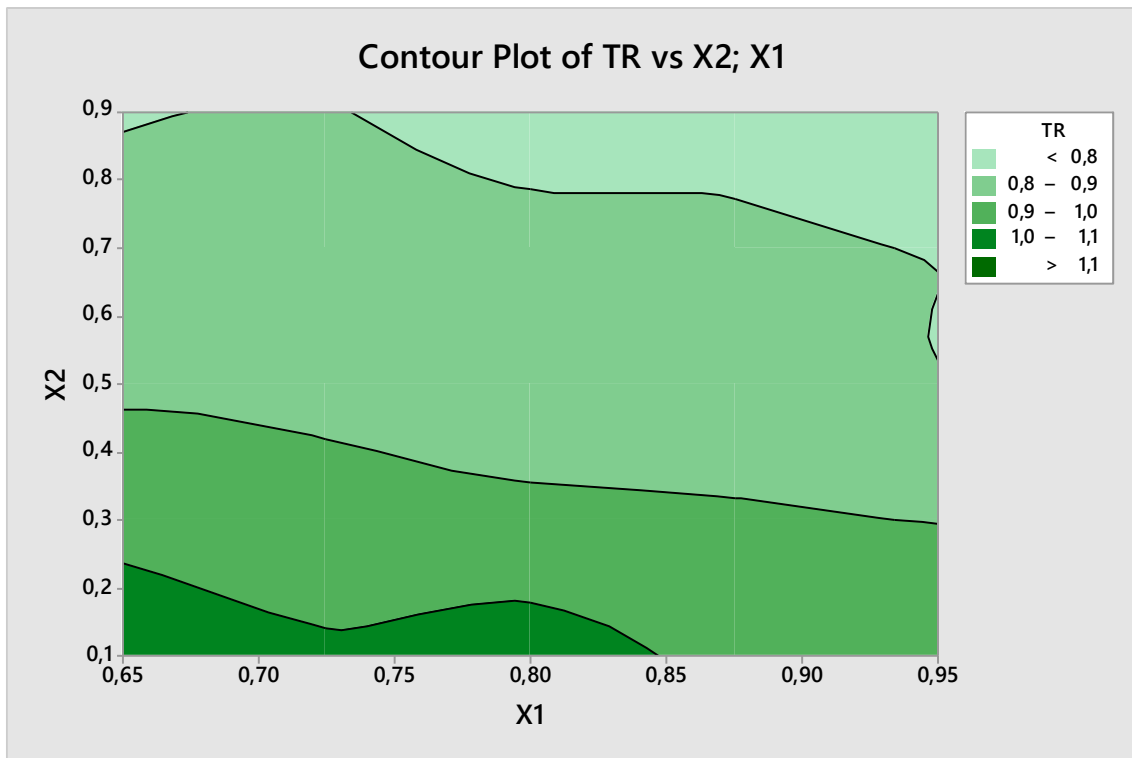


Figura 27. Superficie de respuesta a 1000 Hz

Tabla 38. Pares de puntos a 1000 Hz

X1	0.82	0.75	0.90
X2	0.17	0.13	0.22

Tabla 39. Ternas de datos a 2000 Hz

2000HZ			
	X1	X2	TR
	0,65	0,10	1,06
	0,65	0,50	0,85
	0,65	0,90	0,76
	0,80	0,10	1,01
	0,80	0,50	0,81
	0,80	0,90	0,72
	0,95	0,10	0,95
	0,95	0,50	0,78
	0,95	0,90	0,68

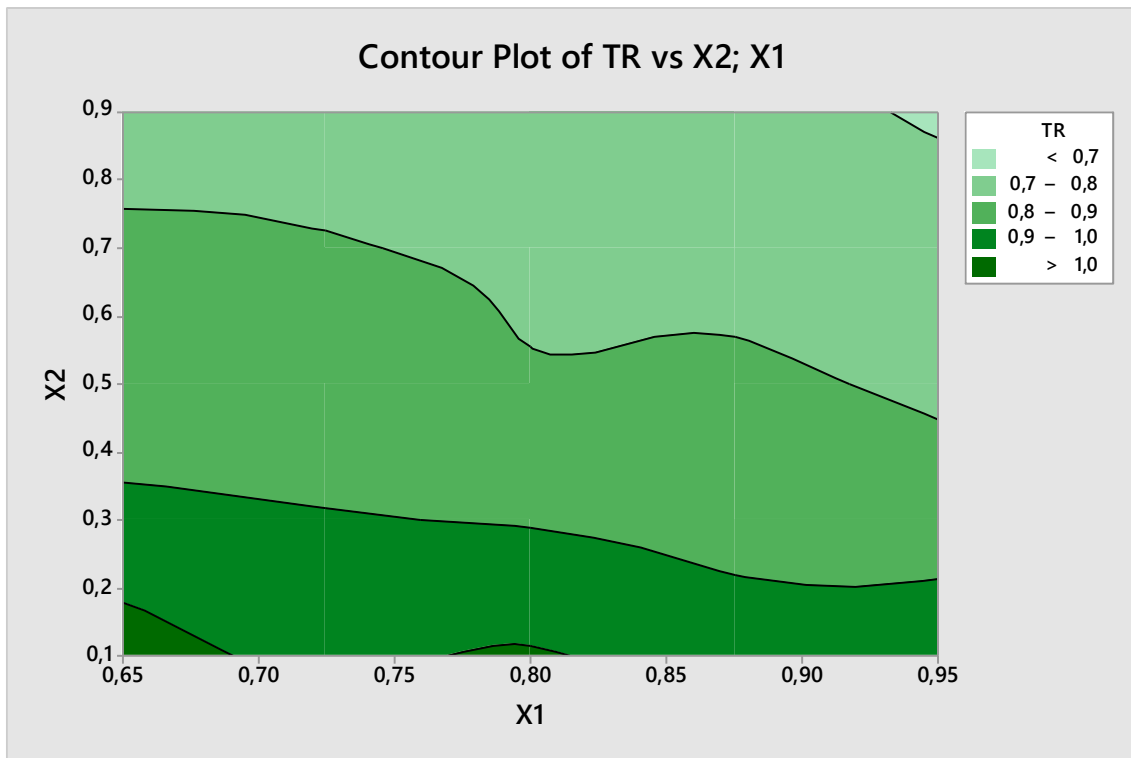


Figura 28. Superficie de respuesta a 2000 Hz

Tabla 40. Pares de puntos a 2000 Hz

X1	0.80	0.71	0.85
X2	0.13	0.10	0.19

Tabla 41. Ternas de datos a 4000 Hz

4000HZ			
	X1	X2	TR
	0,60	0,10	0,96
	0,60	0,50	0,79
	0,60	0,90	0,71
	0,75	0,10	0,91
	0,75	0,50	0,75
	0,75	0,90	0,67
	0,90	0,10	0,87
	0,90	0,50	0,73
	0,90	0,90	0,64

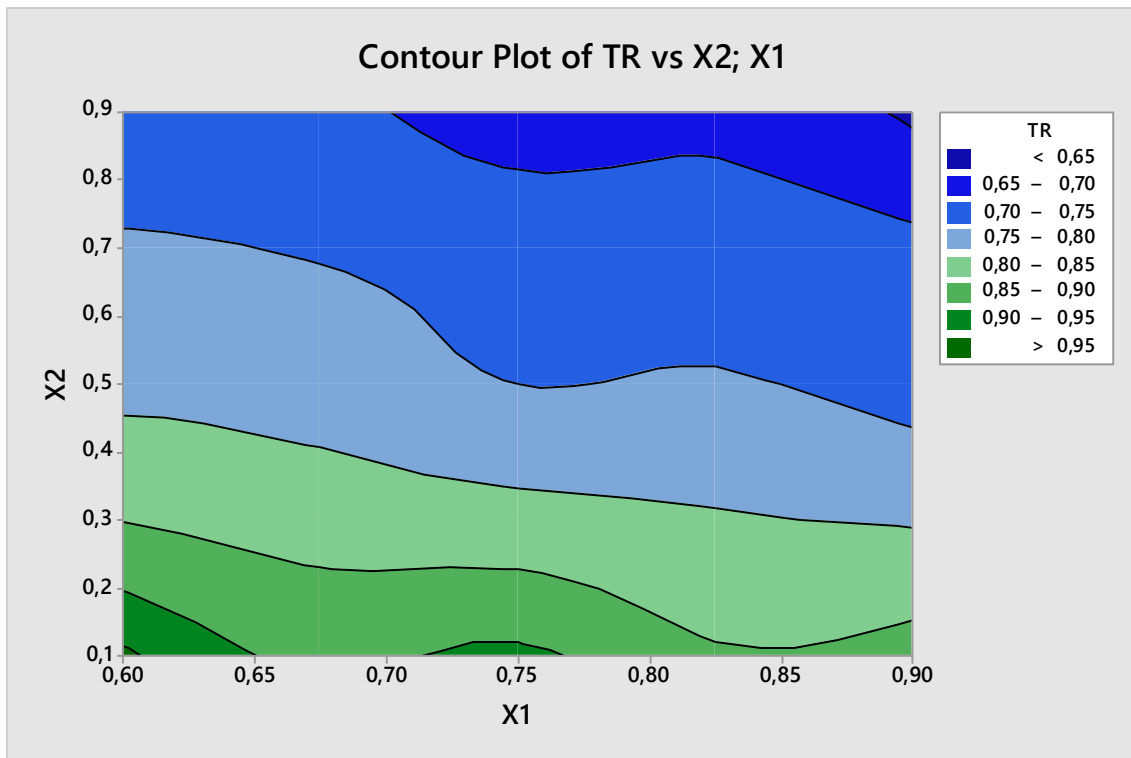


Figura 29. Superficie de respuesta a 4000 Hz

Tabla 42. Pares de puntos a 4000 Hz

X1	0.76	0.65-0.85
X2	0.19	0.14-0.25

4.1.3.2.2.1 Combinaciones

En la Tabla 43 se muestran los conjuntos de pares obtenidos.

En principio habría que descartar aquellos pares que se encuentren en los límites de la región estudiada. En este caso, dado que los pares se han obtenido de forma visual evitando los límites de la región, no es necesario descartar ningún par por esa razón.

Tabla 43. Pares de puntos obtenidos para el cálculo

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
X1	0.72	0.79	0.81	0.82	0.80	0.76
X2	0.23	0.51	0.30	0.17	0.13	0.19
X1	0.65	0.75	0.75	0.75	0.71	0.65
X2	0.21	0.46	0.25	0.13	0.10	0.14

Se seleccionan los pares que más se ajustan a los valores esperados de cada uno de ellos.

Probamos los nuevos pares en el modelo virtual.

Combinación 1.

En la Tabla 44 se muestran los espectros de absorción de las superficies X1 y X2 empleadas en la simulación.

Tabla 44. Combinación de espectros de absorción de las superficies estudiadas

puntos	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
X1	0,72	0,79	0,81	0,82	0,80	0,76
X2	0,23	0,51	0,30	0,17	0,13	0,12

La combinación anterior da como resultado el tiempo de reverberación que se muestra en la Tabla 45 y en la Figura 30.

Tabla 45. TR₃₀ obtenido

TR ₃₀	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
tr1	1,30	1,05	0,96	1,00	0,99	0,90

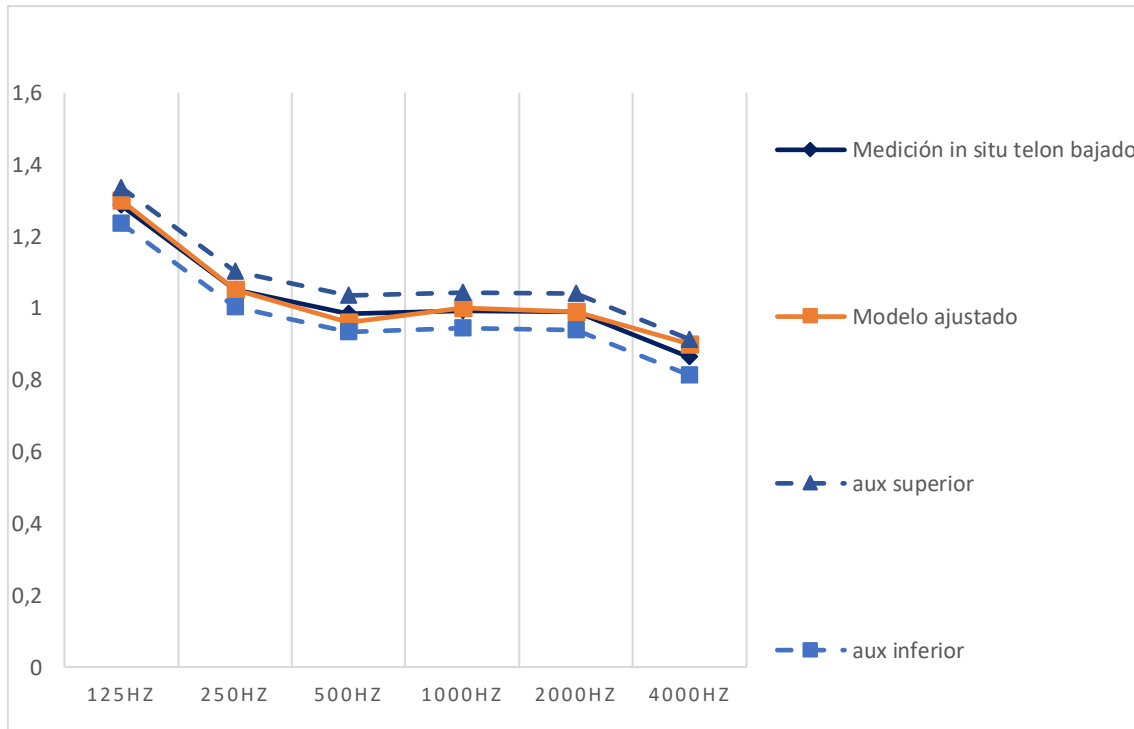


Figura 30. Representación gráfica del TR₃₀ medido “in situ” con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables, la modelización inicial, y la modelización de la combinación 1

En la Figura 30 se observan los valores del TR₃₀ de la medición real, los límites superior e inferior de 0,05 segundos dentro de los que los valores se consideran ajustados, el tiempo de reverberación del modelo inicial y del modelo tras la aplicación del RSM. Los valores de la modelización que se encuentren dentro de estos límites se consideran aceptables.

El espectro de absorción tr1 se encuentra dentro de los márgenes establecidos como aceptables, por lo que se admite la combinación 1. Los cambios del espectro de absorción del material X1, butacas, y X2, cortinas sobre paredes, se muestran en la Figura 31 y en la Figura 32 respectivamente.

Los espectros de absorción 10 y 11 se corresponden con los datos de la bibliografía de las butacas y de las paredes cubiertas con cortinas, respectivamente. X1 y X2, representan los ajustes realizados a cada uno de ellos tras la aplicación del RSM.

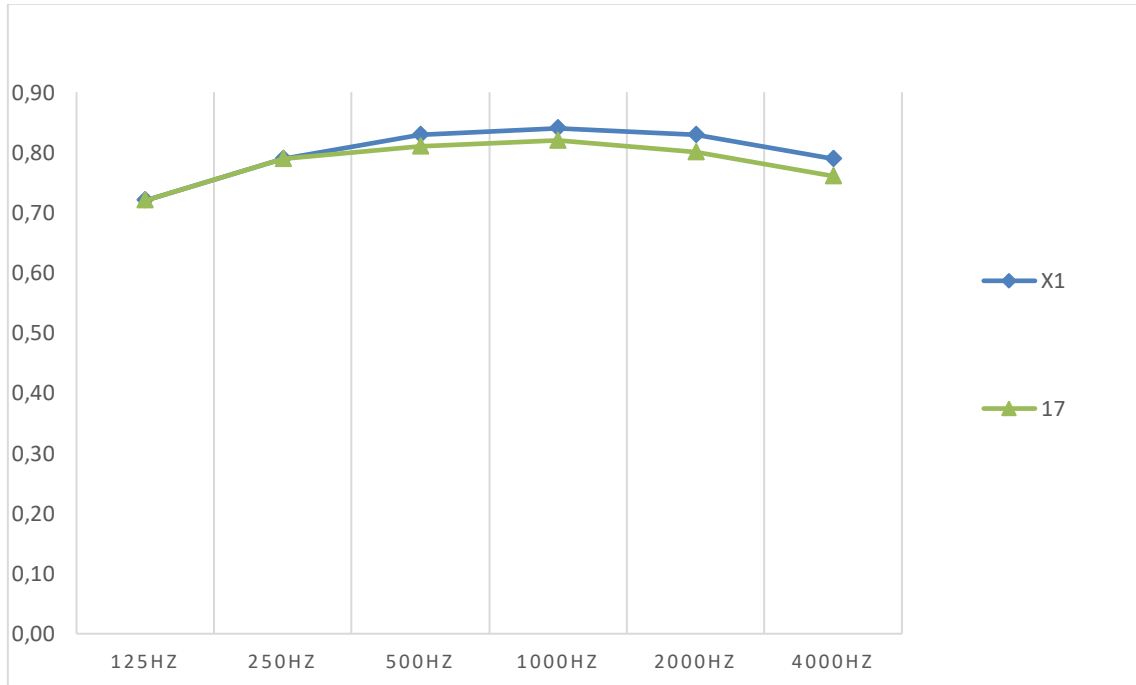


Figura 31. Espectro de absorción de las butacas de platea (bibliografía- azul- y aplicación RSM-verde-)

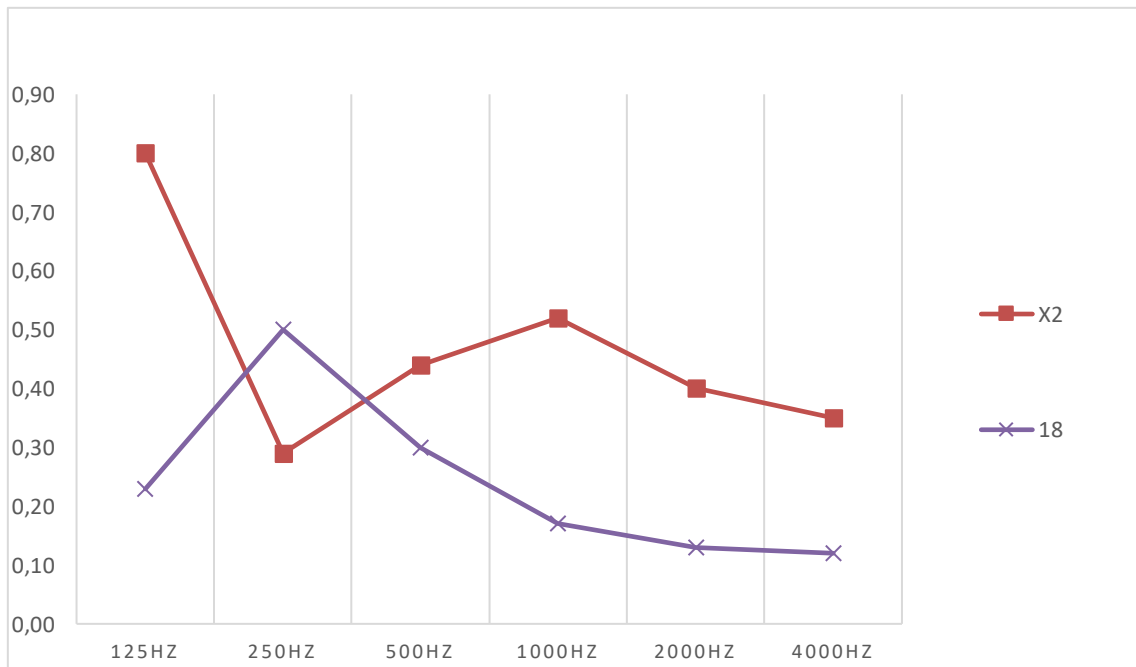


Figura 32. Espectro de absorción paredes cubiertas con cortinas separadas de la misma (bibliografía-rojo- y aplicación RSM- morado-)

Se aceptan los nuevos valores de los materiales de la sala, en la Tabla 46 se muestran el coeficiente de absorción de las superficies tras el ajuste realizado con el telón bajado.

Tabla 46. Coeficientes de absorción de las superficies tras aplicación del RSM con telón bajado

Zona	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
Pavimento escenario, gradas P2, P3, P4	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Pavimento PB	0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,20
Pavimento pasillos (platea)	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25
Pavimento palcos	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Paredes atamboradas bajo palcos PB (sonido hueco)	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Paredes P2, P3 y P4; divisiones de palcos	0,025	0,026	0,060	0,085	0,043	0,050
Molduras antepecho palcos, boca escena	0,13	0,13	0,25	0,28	0,30	0,30
Molduras falso techo y boca de escena	0,20	0,20	0,25	0,28	0,30	0,30
Puertas acceso a sala y de palcos PB	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
Cortina boca de escena	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
Falso techo zona general	0,30	0,20	0,10	0,07	0,05	0,05
Techo bajo palcos	0,14	0,10	0,06	0,04	0,04	0,03
Butaca palcos y anfiteatros	0,56	0,64	0,70	0,72	0,68	0,62
Falso techo perímetro P4	0,29	0,20	0,15	0,10	0,05	0,05
Falso techo anfiteatro P4	0,08	0,11	0,05	0,03	0,02	0,03
Butacas platea	0,72	0,79	0,81	0,82	0,80	0,76
Paredes PB y P1, frente de escenario (cubierta con cortinas)	0,23	0,50	0,30	0,17	0,13	0,12

4.1.3.3 Aplicación del RSM con telón subido

Acabada la sala con la boca de escena cerrada (telón bajado) se procede a estudiar la sala con la boca de escena abierta (telón subido).

En el modelo virtual de la sala, se sustituye la cortina de la boca de escena por una superficie nueva, la abertura de escenario, que será nuestra incógnita. Se asignan los coeficientes hallados en el proceso anterior.

Las coordenadas de la fuente y de los receptores, son las mismas que en el caso anterior.

Se cambia el material de la boca de escena en el modelo ajustado anterior y se calcula el modelo para boca de escena abierta. En la Tabla 47 se muestran los coeficientes de absorción empleados en la modelización inicial con boca de escena abierta, reordenados.

Tabla 47. Superficies de la sala con distinta materialidad y comportamiento absorbente, asignación de número de superficie

Zona	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	Nº SUP
Pavimento escenario, gradas P2, P3, P4	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10	1
Pavimento PB	0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,20	2
Pavimento pasillos (platea)	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25	3
Pavimento palcos	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	4
Paredes atamboradas bajo palcos PB (sonido hueco)	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09	5
Paredes P2, P3 y P4; divisiones de palcos	0,025	0,026	0,060	0,085	0,043	0,050	6
Molduras antepecho palcos, boca escena	0,13	0,13	0,25	0,28	0,30	0,30	7
Molduras falso techo y boca de escena	0,20	0,20	0,25	0,28	0,30	0,30	8
Puertas acceso a sala y de palcos PB	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	9
Falso techo zona general	0,30	0,20	0,10	0,07	0,05	0,05	10
Techo bajo palcos	0,14	0,10	0,06	0,04	0,04	0,03	11
Butaca palcos y anfiteatros	0,56	0,64	0,70	0,72	0,68	0,62	12
Falso techo perímetro P4	0,29	0,20	0,15	0,10	0,05	0,05	13
Falso techo anfiteatro P4	0,08	0,11	0,05	0,03	0,02	0,03	14
Butacas platea	0,72	0,79	0,81	0,82	0,80	0,76	15
Paredes PB y P1, frente de escenario (cubierta con cortinas)	0,23	0,50	0,30	0,17	0,13	0,12	16
Boca de escena	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	17
Cortina boca de escena	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65	18

Se obtiene el tiempo de reverberación TR_{30} medio. El TR_{30} obtenido tras el cálculo se compara con el de la medición realizada "in situ", tal y como se ve en la Tabla 48 y en la Figura 33.

Tabla 48. Comparativa TR_{30} medición real y modelo virtual

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Medición in situ	1,286	1,075	1,037	1,035	1,005	0,886
Modelización Principal	1,29	1,05	0,97	1,01	1,00	0,92

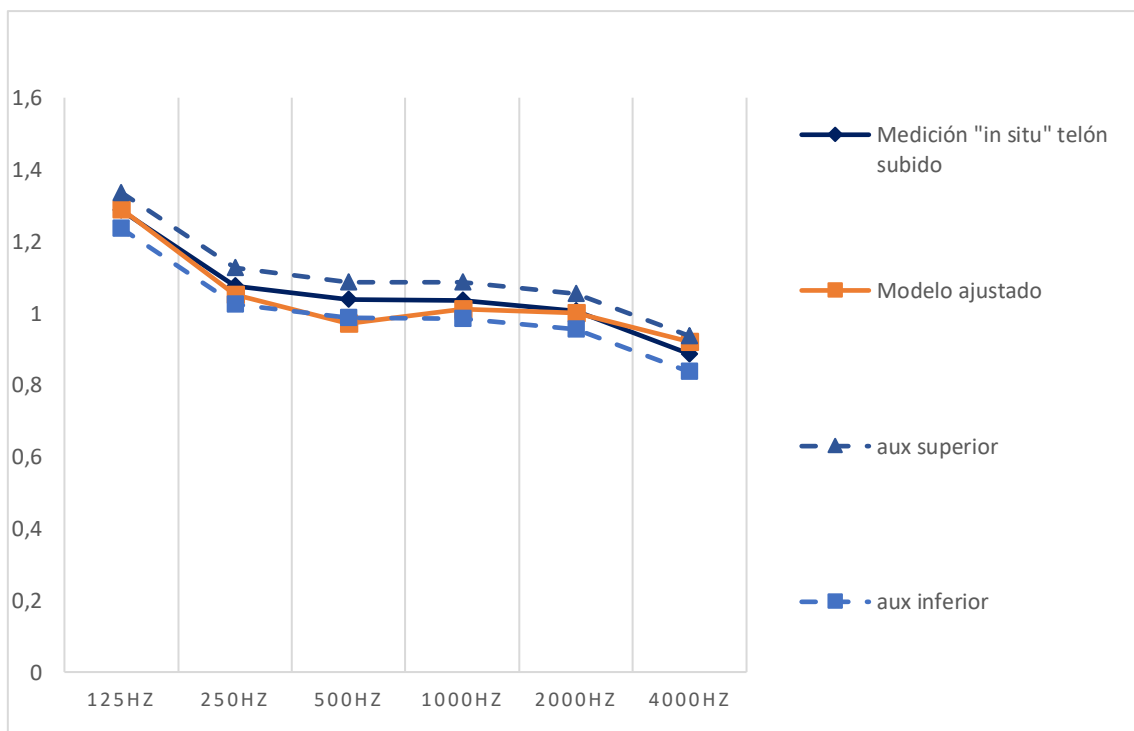


Figura 33. Comparativa TR_{30} , medición "in situ" con telón subido y modelización inicial con boca de escena abierta

En Figura 33 se representa el tiempo de reverberación medio, TR_{30} , medido "in situ", de la sala con telón subido, los márgenes superior e inferior y el resultado del TR_{30} de la modelización con los ajustes realizados con telón bajado. En todas las frecuencias excepto a 500 Hz los valores del tiempo de reverberación del modelo se encuentran dentro de los límites aceptables. A 500Hz le sobra un poco de absorción.

Es necesario ajustar el modelo virtual a la medición real con telón subido.

Se procede a aplicar el método de las superficies de repuesta.

4.1.3.3.1 Ajuste mediante método de superficies de respuesta

Una vez analizada la sala con la boca de escena cerrada (telón bajado) se procede a estudiar la sala con la boca de escena abierta (telón subido).

Se elige como incógnita la boca de escena y las paredes cubiertas con cortinas.

Se define la región de estudio en la aplicación del RSM.

$$X_{1i} = B_{1i} \pm R_{1i}$$

Siendo:

B_{1i} los valores tomados de la bibliografía y

R_{1i} incrementos que oscilan entre 0 y 0,5

De forma análoga se realiza para X_{2i}

En la Tabla 49 se reflejan los coeficientes de absorción de las superficies empleados en la simulación y las regiones de estudio.

Tabla 49. Coeficientes de absorción empleados en la simulación

Nº SUP	Materiales	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
1		0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
2		0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,20
3		0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25
4		0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
5		0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
6		0,025	0,026	0,060	0,085	0,043	0,050
7		0,13	0,13	0,25	0,28	0,30	0,30
8		0,20	0,20	0,25	0,28	0,30	0,30
9		0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
10		0,30	0,20	0,10	0,07	0,05	0,05
11		0,14	0,10	0,06	0,04	0,04	0,03
12		0,56	0,64	0,70	0,72	0,68	0,62
13		0,29	0,20	0,15	0,10	0,05	0,05
14		0,08	0,11	0,05	0,03	0,02	0,03
15		0,72	0,79	0,81	0,82	0,80	0,76
X1	Paredes cubiertas con cortinas	0,23	0,50	0,30	0,17	0,13	0,12
X2	Boca de escena	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55

4.1.3.3.2 Ajuste 1

Se especifican los valores de las dos regiones de estudio, se toman los valores de la bibliografía y se asignan unos incrementos a cada una de ellas.

En la Tabla 50 y en la

Tabla 51 se presentan los valores asignados a las regiones de estudio X1 y X2, respectivamente.

Tabla 50. Región de estudio de la superficie incógnita X1

X1	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
B1i-R1i	0,13	0,40	0,20	0,07	0,03	0,02
B1i	0,23	0,50	0,30	0,17	0,13	0,12
B1i+R1i	0,33	0,60	0,40	0,27	0,23	0,22
INCREMENTOS R1	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10

Tabla 51. Región de estudio de la superficie incógnita X2

X2	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
B2i-R2i	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
B2i	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
B2i+R2i	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
INCREMENTOS R2	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10

Se obtienen los siguientes pares de espectros de absorción:

Tabla 52. Combinaciones de pares de espectros absorbentes a estudiar

combinación	puntos	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	
1	B1i-R1i	0,130	0,400	0,200	0,070	0,030	0,020	X11
	B2i-R2i	0,200	0,250	0,300	0,350	0,400	0,450	X21
2	B1i-R1i	0,130	0,400	0,200	0,070	0,030	0,020	X11
	B2i	0,300	0,350	0,400	0,450	0,500	0,550	X22
3	B1i-R1i	0,130	0,400	0,200	0,070	0,030	0,020	X11
	B2i+R2i	0,400	0,450	0,500	0,550	0,600	0,650	X23
4	B1i	0,230	0,500	0,300	0,170	0,130	0,120	X12
	B2i-R2i	0,200	0,250	0,300	0,350	0,400	0,450	X21
5	B1i	0,230	0,500	0,300	0,170	0,130	0,120	X12
	B2i	0,300	0,350	0,400	0,450	0,500	0,550	X22
6	B1i	0,230	0,500	0,300	0,170	0,130	0,120	X12
	B2i+R2i	0,400	0,450	0,500	0,550	0,600	0,650	X23
7	B1i+R1i	0,330	0,600	0,400	0,270	0,230	0,220	X13
	B2i-R2i	0,200	0,250	0,300	0,350	0,400	0,450	X21
8	B1i+R1i	0,330	0,600	0,400	0,270	0,230	0,220	X13
	B2i	0,300	0,350	0,400	0,450	0,500	0,550	X22
9	B1i+R1i	0,330	0,600	0,400	0,270	0,230	0,220	X13
	B2i+R2i	0,400	0,450	0,500	0,550	0,600	0,650	X23

Estas combinaciones se introducen en Odeon para obtener los tiempos de reverberación para cada una de ellas. El resultado se puede ver en la Tabla 53.

Tabla 53. TR₃₀ obtenidos de las combinaciones definidas anteriormente.

TR ₃₀	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
tr1	1,37	1,12	1,09	1,11	1,08	0,97
tr2	1,37	1,11	1,05	1,07	1,06	0,96
tr3	1,35	1,10	1,05	1,08	1,06	0,94
tr4	1,30	1,06	0,99	1,05	1,03	0,92
tr5	1,29	1,05	0,97	1,01	1,00	0,92
tr6	1,28	1,04	0,97	1,02	1,00	0,90
tr7	1,19	1,03	0,96	0,99	0,97	0,89
tr8	1,19	1,01	0,93	0,97	0,95	0,88
tr9	1,18	1,01	0,93	0,97	0,95	0,86

En la Figura 34 se observa que tras la aplicación del RSM, el “target” se encuentra dentro de los espectros del TR₃₀ de las distintas combinaciones.

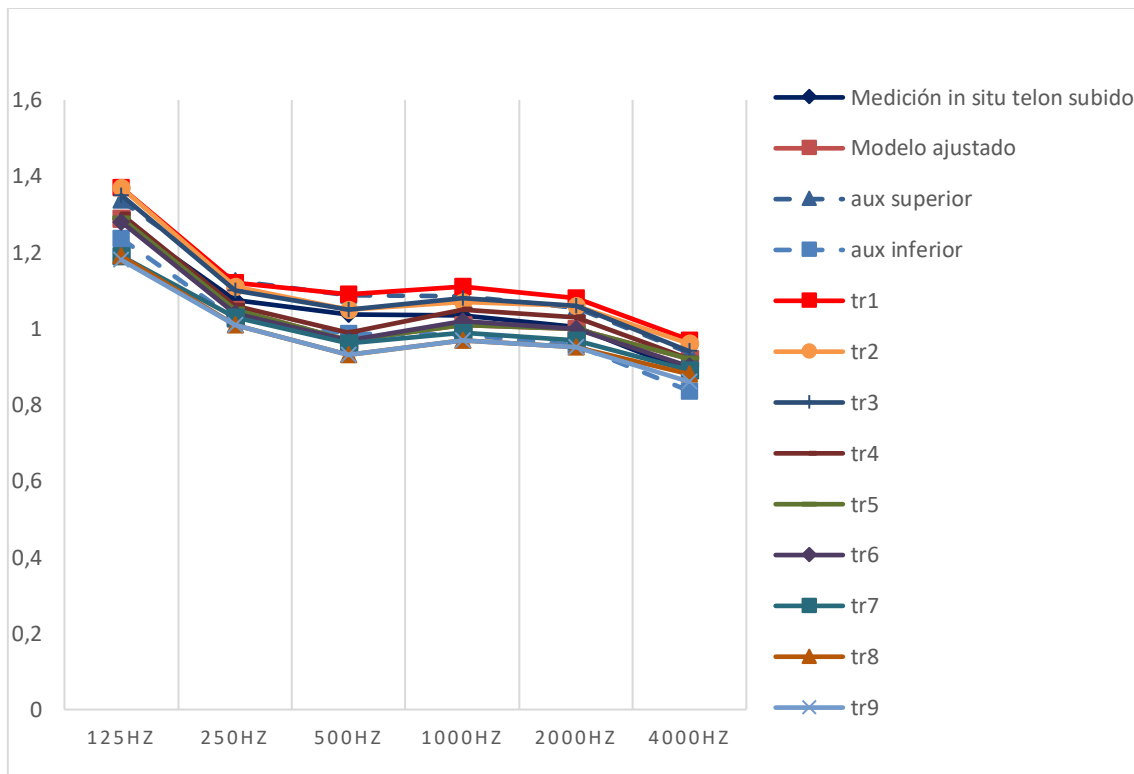


Figura 34. Comparativa TR₃₀. Medición in situ, modelización, y resultados TR₃₀ tras aplicación RSM

Para obtener las superficies de respuesta, se agrupan los datos por frecuencia, formando nueve combinaciones de ternas de puntos por frecuencia. A partir de dichas superficies se obtienen nuevos pares de puntos que satisfacen el “target”.

Ternas de datos por frecuencia y representación mediante superficie de respuesta:

Tabla 54. Ternas de datos a 125 Hz

125HZ			
	X1	X2	TR
	0,13	0,20	1,37
	0,13	0,30	1,37
	0,13	0,40	1,35
	0,23	0,20	1,30
	0,23	0,30	1,29
	0,23	0,40	1,28
	0,33	0,20	1,19
	0,33	0,30	1,19
	0,33	0,40	1,18

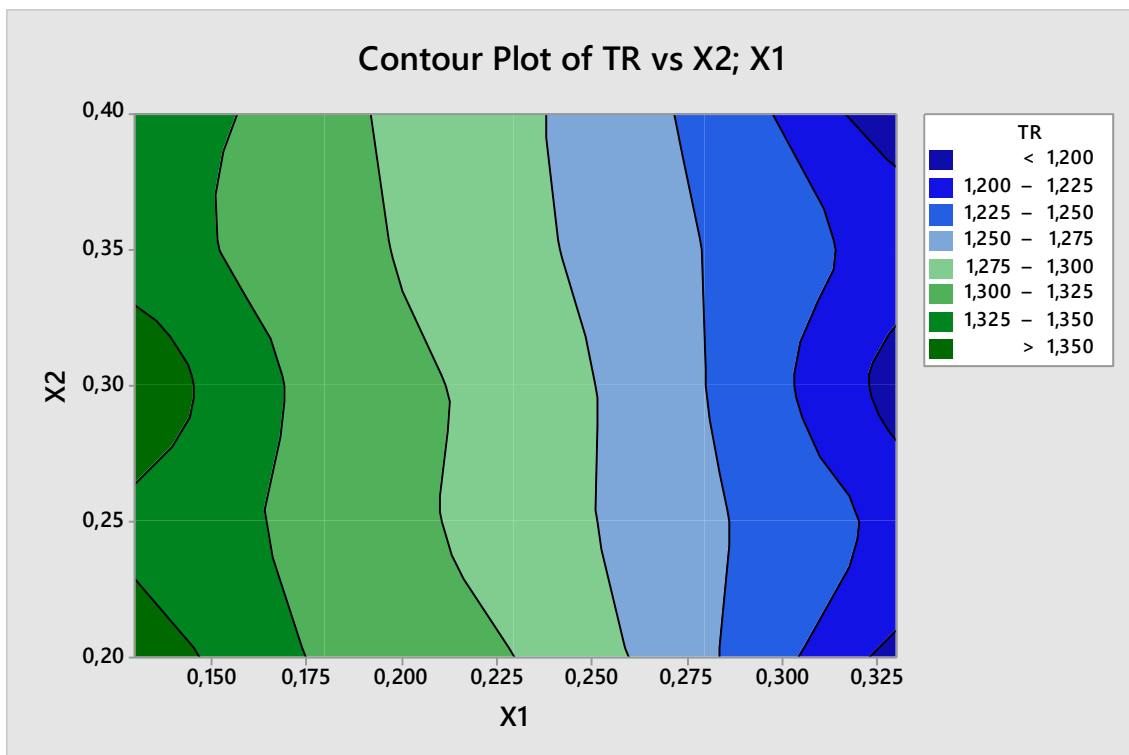


Figura 35. Superficie de respuesta a 125 Hz.

Tabla 55. Pares de puntos a 125 Hz

X1	0.23	0.17	0.28
X2	0.30	0.20	0.30

Tabla 56. Ternas de datos a 250 Hz

250HZ			
	X1	X2	TR
	0,40	0,25	1,12
	0,40	0,35	1,11
	0,40	0,45	1,10
	0,50	0,25	1,06
	0,50	0,35	1,05
	0,50	0,45	1,04
	0,60	0,25	1,03
	0,60	0,35	1,01
	0,60	0,45	1,01

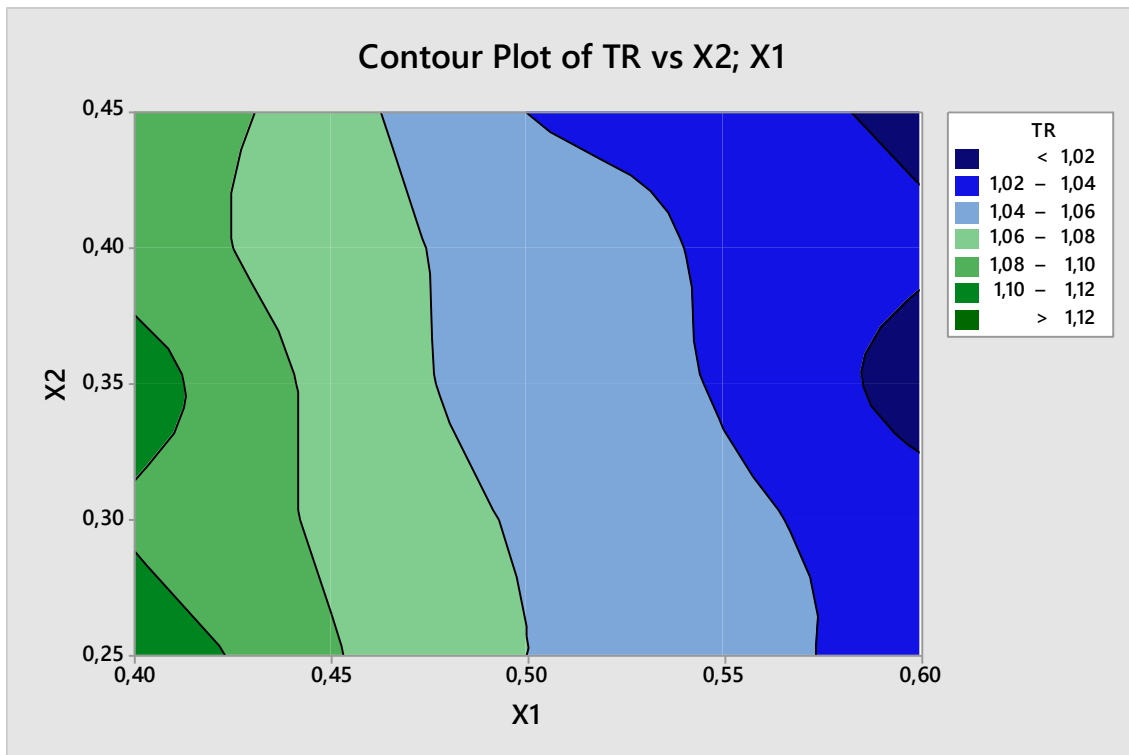


Figura 36. Superficie de respuesta a 250 Hz

Tabla 57. Pares de puntos a 250 HZ

X1	0.51	0.40	0.56
X2	0.35	0.25	0.40

Tabla 58. ternas de datos a 500 Hz

500HZ			
	X1	X2	TR
	0,20	0,30	1,09
	0,20	0,40	1,05
	0,20	0,50	1,05
	0,30	0,30	0,99
	0,30	0,40	0,97
	0,30	0,50	0,97
	0,40	0,30	0,96
	0,40	0,40	0,93
	0,40	0,50	0,93

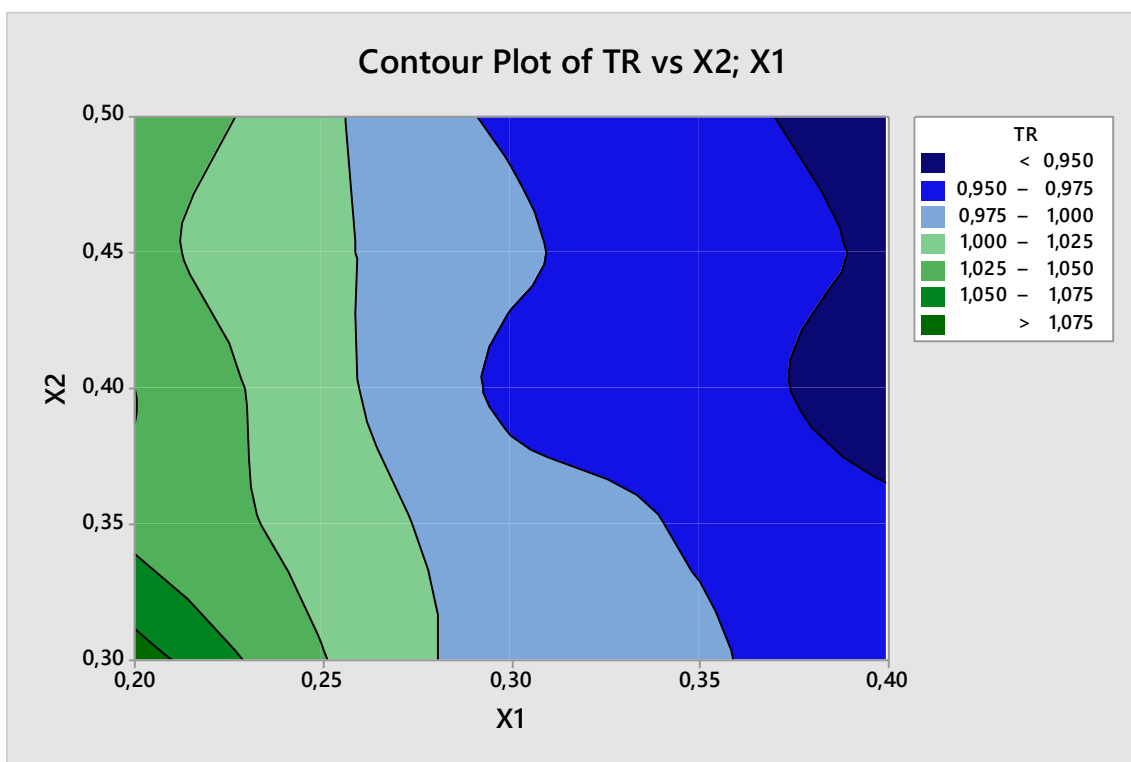


Figura 37. Superficie de respuesta a 500 Hz

Tabla 59. Pares de puntos a 500 Hz

X1	0.30	0.20	0.26
X2	0.30	0.30	0.45

Tabla 60. Ternas de datos a 1000 Hz

1000HZ			
	X1	X2	TR
	0,07	0,35	1,11
	0,07	0,45	1,07
	0,07	0,55	1,08
	0,17	0,35	1,05
	0,17	0,45	1,01
	0,17	0,55	1,02
	0,27	0,35	0,99
	0,27	0,45	0,97
	0,27	0,55	0,97

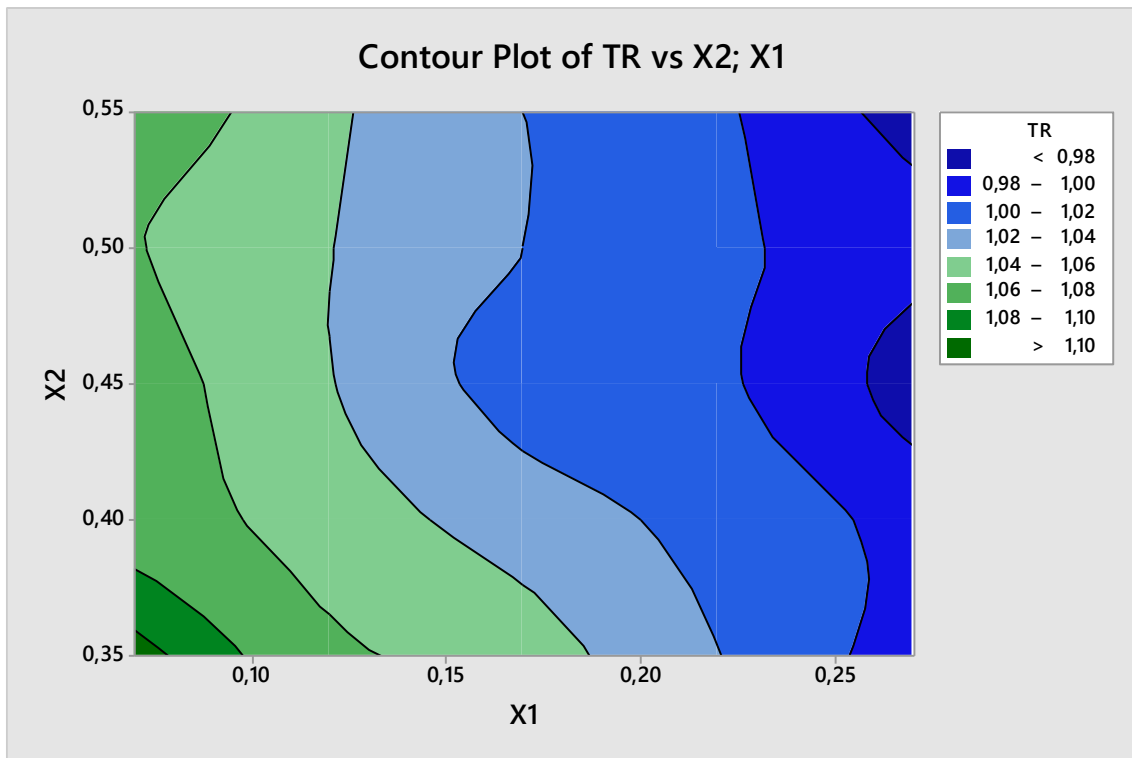


Figura 38. Superficie de respuesta a 1000 Hz

Tabla 61. Pares de puntos a 1000 Hz

X1	0.17	0.10	0.25
X2	0.40	0.35	0.50

Tabla 62. Ternas de datos a 2000 Hz

2000HZ			
	X1	X2	TR
	0,03	0,40	1,08
	0,03	0,50	1,06
	0,03	0,60	1,06
	0,13	0,40	1,03
	0,13	0,50	1,00
	0,13	0,60	1,00
	0,23	0,40	0,97
	0,23	0,50	0,95
	0,23	0,60	0,95

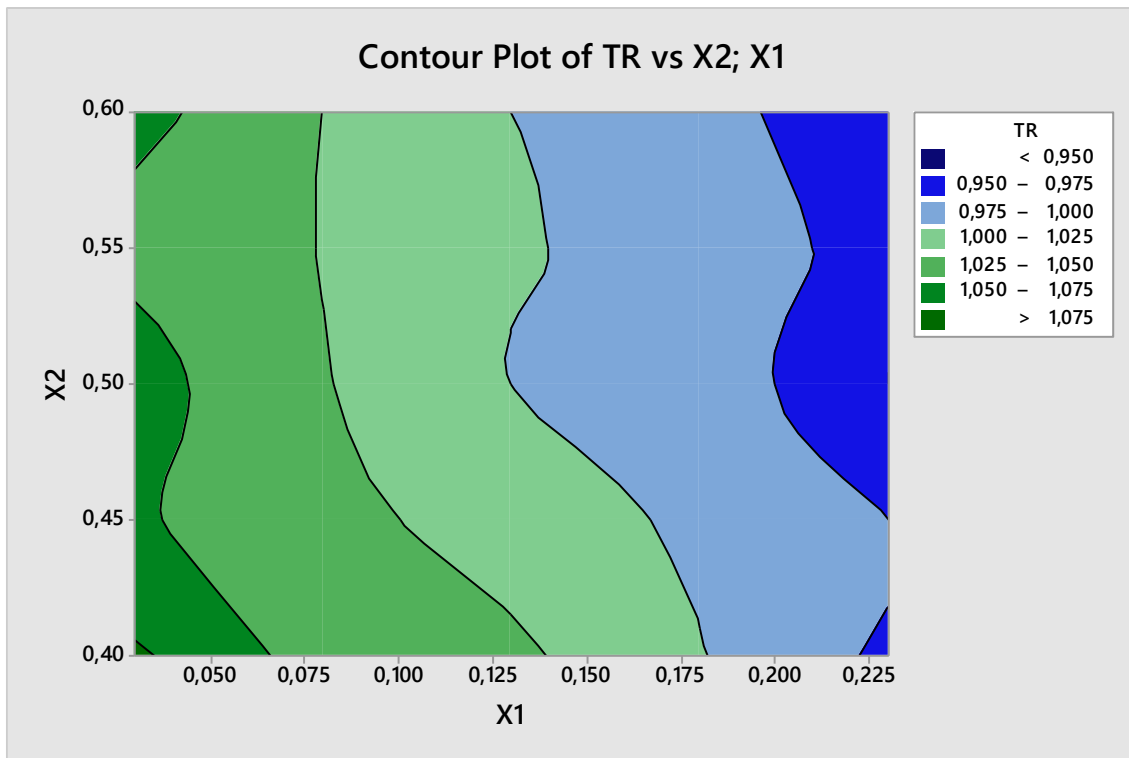


Figura 39. Superficie de respuesta a 2000 Hz

Tabla 63. Pares de puntos a 2000 Hz

X1	0.13	0.07	0.21
X2	0.50	0.40	0.50

Tabla 64. Ternas de datos a 4000 Hz

4000HZ			
	X1	X2	TR
	0,02	0,45	0,97
	0,02	0,55	0,96
	0,02	0,65	0,94
	0,12	0,45	0,92
	0,12	0,55	0,92
	0,12	0,65	0,90
	0,22	0,45	0,89
	0,22	0,55	0,88
	0,22	0,65	0,86

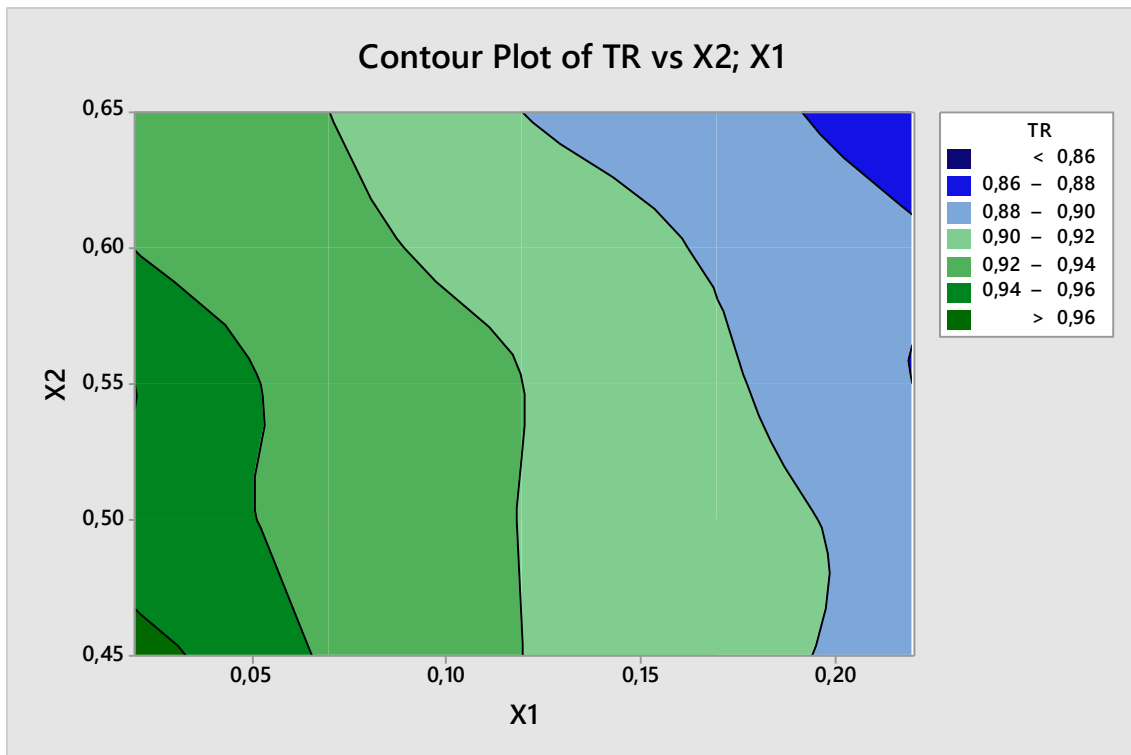


Figura 40. Superficie de respuesta a 4000 Hz

Tabla 65. Pares de puntos a 4000 Hz

X1	0.12	0.18	0.07	0.21
X2	0.55	0.64	0.45	0.55

4.1.3.3.2.1 Combinaciones

En la Tabla 66 se muestran los conjuntos de pares obtenidos:

Como se ha explicado previamente habría que descartar aquellos pares que se encuentren en los límites de la región estudiada, pero como en este caso los pares se han obtenido de forma visual evitando los límites de la región, no es necesario descartar ningún par por esa razón.

Tabla 66. Pares de puntos obtenidos para el cálculo

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
X1	0.23	0.51	0.30	0.17	0.13	0.12
X2	0.30	0.35	0.30	0.40	0.50	0.55
X1	0.17	0.40	0.20	0.10	0.07	0.18
X2	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.64

Se seleccionan los pares que mejor se ajustan a los valores esperados de cada uno de ellos, y se prueban en el modelo virtual.

Combinación 1.

En la Tabla 67 se muestran los espectros de absorción de las superficies X1 y X2 empleadas en la simulación.

Tabla 67. Combinación de espectros de absorción de las superficies estudiadas

puntos	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
X1	0.23	0.51	0.30	0.17	0.13	0.12
X2	0.30	0.35	0.30	0.40	0.50	0.55

La combinación anterior da como resultado el tiempo de reverberación que se muestra en la Tabla 68.

Tabla 68. TR₃₀ obtenido

TR₃₀	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
tr1	1,29	1,05	0,99	1,05	1,01	0,91

En la Figura 41 se observan los valores del TR_{30} de la medición real con un margen superior e inferior de 0,05 segundos y del modelo tras la aplicación del RSM. El espectro de absorción tr_1 se encuentra dentro de los márgenes establecidos como aceptables, por lo que se admite la combinación 1.

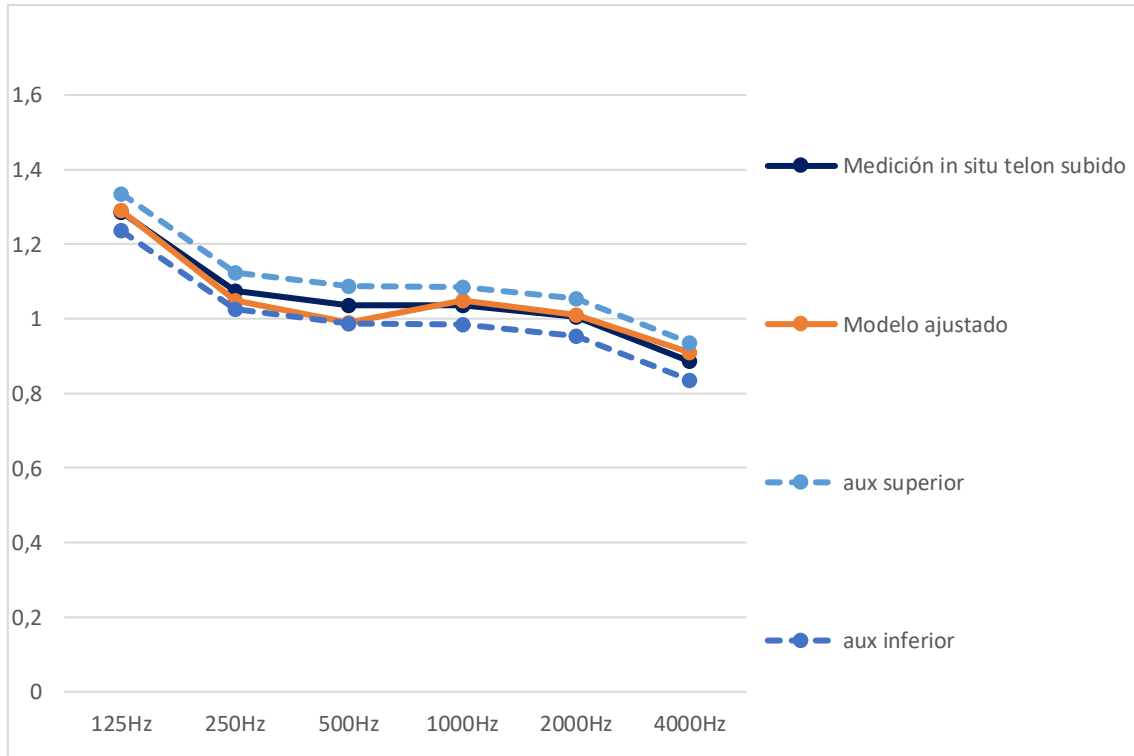


Figura 41. Representación gráfica del TR_{30} medido "in situ" con telón subido, los límites superior e inferior aceptables, la modelización inicial, y la modelización de la combinación 1

A continuación, se representa la variación del espectro de absorción de los materiales estudiados como incógnita respecto al valor del coeficiente de absorción inicial considerado, tomado de la bibliografía; junto con el valor finalmente empleado en la combinación ajustada.

Las variaciones correspondientes al material X1, paredes cubiertas con cortinas, y de X2, boca de escena, se muestran en la Figura 42 y en la Figura 43, respectivamente.

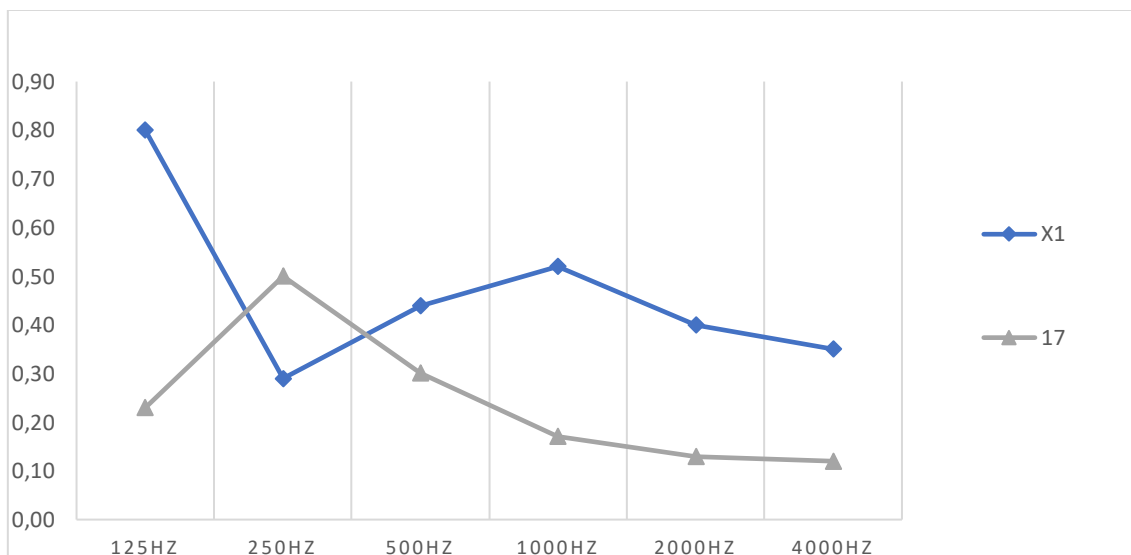


Figura 42. Espectro de las paredes cubiertas con cortinas (bibliografía-azul- y aplicación RSM- gris-).

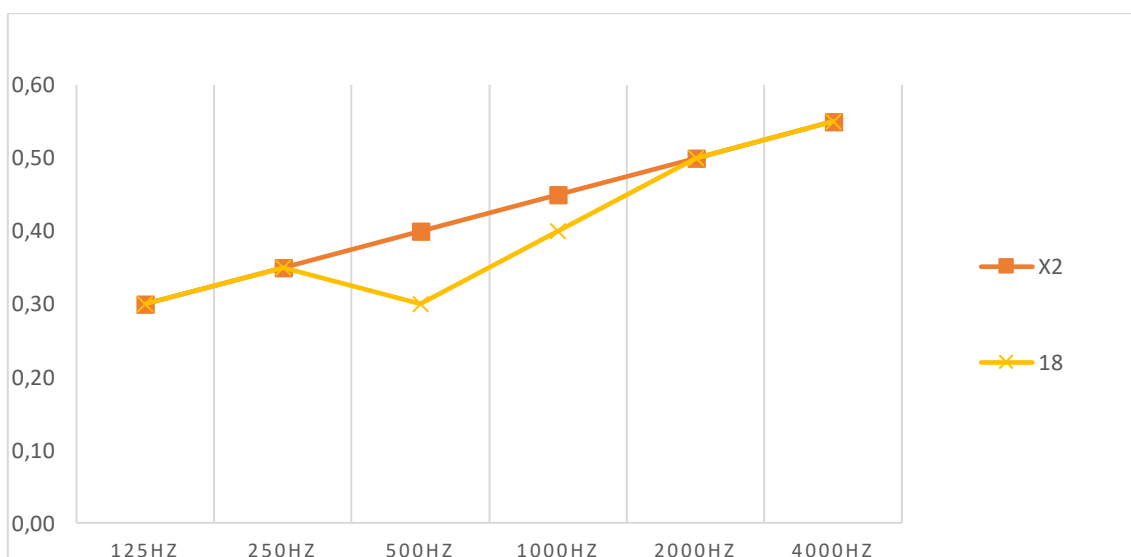


Figura 43. Espectro de la boca de escena (bibliografía-rojo- y aplicación RSM- amarillo-).

Los espectros de absorción 17 y 18 de la combinación 1, obtenidos del ajuste con boca de escena abierta, se corresponden con los datos de la bibliografía de las paredes cubiertas con cortinas y de la boca de escena, respectivamente. X1 y X2, representan los ajustes realizados a cada uno de ellos tras la aplicación del RSM.

A continuación, se va a comprobar si el cambio de absorción que se ha realizado en las lamas del techo funciona adecuadamente en la configuración con el telón bajado. El resultado se muestra en la Tabla 69 y en la Figura 44.

Tabla 69. TR_{30} del modelo con telón bajado tras ajuste con telón subido

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
TR_{30}	1,30	1,05	0,96	1,00	0,99	0,90

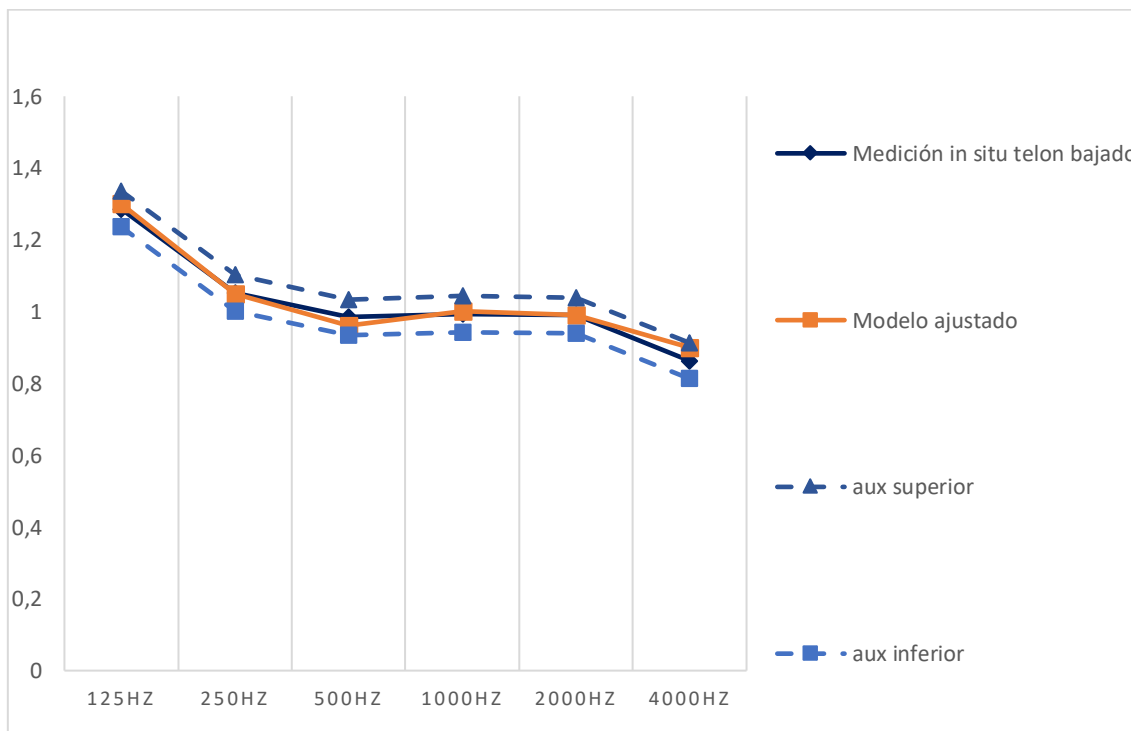


Figura 44. Comparativa TR_{30} telón bajado, medición real con límites superior e inferior aceptables, resultado obtenido en modelo con telón bajado tras análisis con telón subido

Dado que el tiempo de reverberación obtenido del modelo se encuentra dentro de los límites aceptables, se aceptan los cambios de absorción de los materiales.

En la Tabla 70 se muestran los coeficientes de absorción de las superficies tras aceptar los nuevos valores de los materiales de la sala.

Tabla 70. Coeficientes de absorción de las soluciones constructivas empleadas en el modelo tras ajuste con telón subido

Zona	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
Pavimento escenario, gradas P2, P3, P4	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Pavimento PB	0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,20
Pavimento pasillos (platea)	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25
Pavimento palcos	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Paredes atamboradas bajo palcos PB (sonido hueco)	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Paredes P2, P3 y P4; divisiones de palcos	0,025	0,026	0,060	0,085	0,043	0,050
Molduras antepecho palcos, boca escena	0,13	0,13	0,25	0,28	0,30	0,30
Molduras falso techo y boca de escena	0,20	0,20	0,25	0,28	0,30	0,30
Puertas acceso a sala y de palcos PB	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
Falso techo zona general	0,30	0,20	0,10	0,07	0,05	0,05
Techo bajo palcos	0,14	0,10	0,06	0,04	0,04	0,03
Butaca palcos y anfiteatros	0,56	0,64	0,70	0,72	0,68	0,62
Falso techo perímetro P4	0,29	0,20	0,15	0,10	0,05	0,05
Falso techo anfiteatro P4	0,08	0,11	0,05	0,03	0,02	0,03
Butacas platea	0,72	0,79	0,81	0,82	0,80	0,76
Paredes PB y P1, frente de escenario (cubierta con cortinas)	0,23	0,50	0,30	0,17	0,13	0,12
Boca de escena	0,30	0,35	0,30	0,40	0,50	0,55
Cortina boca de escena	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65

4.1.4 Resultados

El espectro de absorción de la boca de escena de la sala obtenido tras aplicación del RSM, se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 71. Coeficiente de absorción de la boca de escena

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Tras análisis RSM	0,30	0,35	0,30	0,40	0,50	0,55

A continuación, se compara el tiempo de reverberación del modelo ajustado con telón subido con los obtenidos empleando los espectros de absorción para la boca de escena de diversas fuentes. El resultado se muestra en la Tabla 72 y en la Figura 45.

Tabla 72. TR₃₀ obtenido en el modelo ajustado con telón subido, y empleando los coeficientes de absorción de otros autores

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Medición “in situ” telón subido	1,286	1,075	1,037	1,035	1,005	0,886
Modelo ajustado	1,29	1,05	0,99	1,05	1,01	0,91
Carrión	1,336	1,125	1,087	1,085	1,055	0,936
Arau	1,236	1,025	0,987	0,985	0,955	0,836
Knudsen y Harris	1,29	1,05	0,99	1,04	1,01	0,91
Cavanaugh y Wilkes	1,29	1,05	0,97	1,01	1,00	0,92
Barron	1,24	1,00	0,93	0,97	0,96	0,87

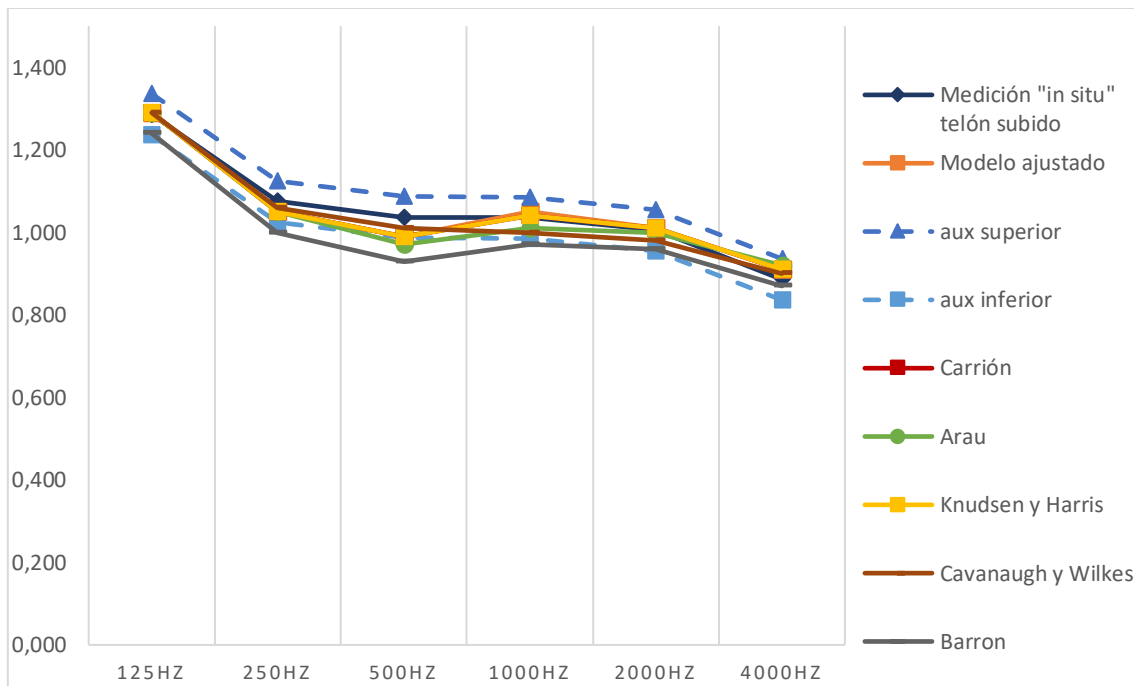


Figura 45. Comparativa TR_{30} telón subido. Medición real con límites superior e inferior, modelo ajustado, y modelos empleando los coeficientes de absorción de boca de escena de distintos autores

Los espectros de absorción propuestos por los distintos autores encajan dentro de los márgenes aceptables para el “target”, a excepción del de Arau a 500Hz.

Para observar la influencia de la boca de escena en el comportamiento absorbente del modelo, se calcula éste con valores distintos de absorción para la boca de escena (0,10, 0,50 y 0,90) y se obtienen los espectros del TR_{30} en cada caso.

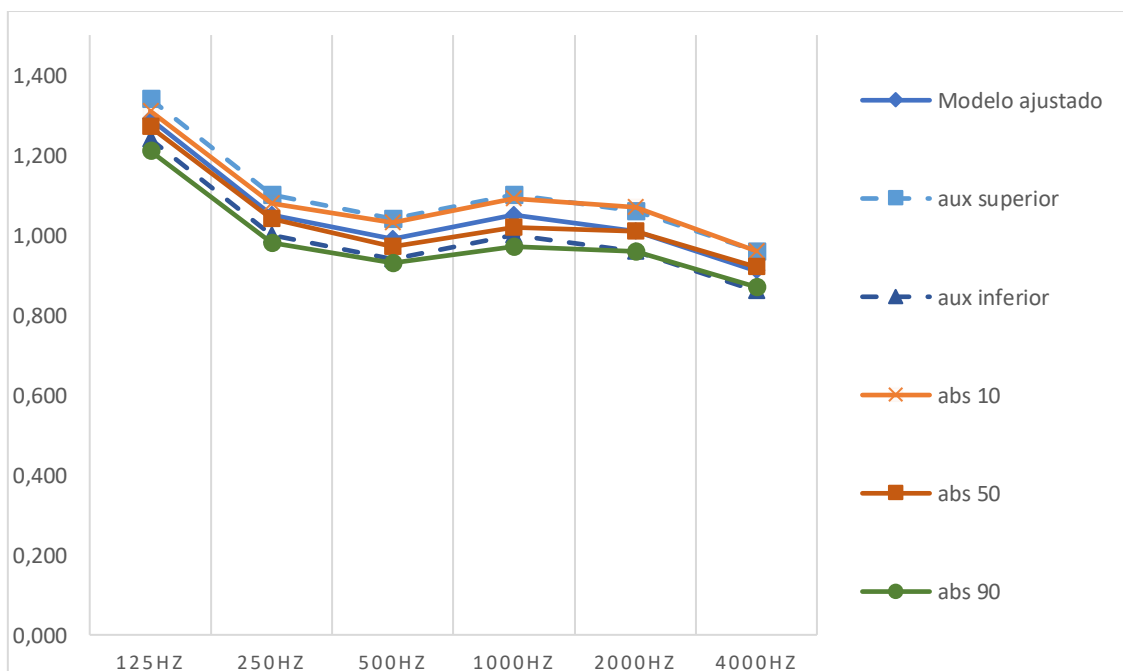


Figura 46. Comparativa TR_{30} con telón subido con distintos valores de absorción para la boca de escena

4.2 Sala 2. Teatro Olympia. Valencia

4.2.1 Descripción de la sala

4.2.1.1 *Datos generales*

Dirección

Calle San Vicente nº 44, Valencia

Fecha de construcción

1915

Arquitecto

Vicente Rodríguez Martín

La última reforma fue realizada en el año 2000 por los arquitectos Carlos V. Montesinos Cornejo y Horacio Castelo Taliani.

4.2.1.2 *Características morfológicas y constructivas*

El teatro Olympia fue diseñado en el año 1915 por el arquitecto Vicente Rodríguez Martín. Forma parte de un proyecto íntegro que cuenta con viviendas, espacios comerciales en planta baja y teatro en la zona central. El edificio destaca por su unidad compositiva [53], y fue uno de los primeros edificios de Valencia en emplear estructura metálica roblonada y columnas de fundición para su estructura.

En planta baja se sitúa el acceso al teatro por medio de un gran vestíbulo abierto al exterior donde se encuentran las taquillas, el vestíbulo, y los accesos a la sala, al sótano y a las plantas superiores.

El patio de butacas es de forma alargada y con una pequeña pendiente con dimensiones aproximadas de 38 metros de largo por 20 metros de ancho. Por los laterales del patio de butacas se accede a los palcos de planta baja. En la planta primera se encuentra el anfiteatro y el acceso a los palcos de la planta primera. En la parte superior del anfiteatro se encuentran unos cuartos técnicos y la sala de proyección. La sala tiene un aforo de 912 espectadores [54], [55]. Las medidas del escenario son 13,50 metros de anchura por 7,60 metros de profundidad, y tiene una altura de un metro con respecto al patio de

butacas. La boca de escena mide 7,80 metros de ancho por 5,90 metros de alto. La altura aproximada de la caja de escena es de 13 metros, y su volumen aproximado es de 1.400 m³. El volumen total aproximado de la sala es de 5.000 m³. Tiene una corbata con una profundidad de más de tres metros [47].

La estructura del edificio es en la mayor parte del edificio metálica, con pilares de acero, de perfil normalizado o circulares de fundición, vigas celosía de acero de fundición con uniones roblonadas y vigas de acero normalizadas. El muro de fachada es de carga, así como los muros y pilares que envuelven el teatro, resueltos con ladrillo cerámico macizo. Los forjados son unidireccionales de viguetas de acero con revoltones de ladrillo. La luz de 18 metros de la sala se salva mediante vigas celosía de acero de gran canto, con uniones roblonadas, sobre las que apoyan los pilares de las plantas superiores.

El patio de butacas está resuelto con entarimado de madera machihembrado, sobre el que se ha colocado moqueta en los espacios de circulación. El escenario también es de entarimado de madera machihembrado, pero dispuesto sobre estructura de madera. En la planta primera el forjado está revestido con entarimado de madera machihembrado. La escalera de acceso es de mármol blanco macael.

En el patio de butacas el revestimiento de las paredes es de enlucido de yeso, a excepción de la zona de acceso en que se disponen varios cuadros de revestimientos de tela enmarcados con ornamentación de escayola situados a una altura de 80 cm aproximadamente del suelo.

En la planta primera se distinguen dos zonas. La más cercana al escenario cuenta con un revestimiento de enlucido de yeso como en planta baja. La zona posterior mantiene la apariencia del acabado con una solución atamborada.

El techo de la sala es un falso techo de cañizo con escayola, que en la zona central cuenta con una falsa claraboya de vidrio y estructura metálica, retroiluminada. El perímetro de la sala está decorado con una moldura. En la zona del anfiteatro el falso techo es absorbente acústico de dos capas.

Los antepechos curvos de los palcos son de hormigón decorado con molduras de escayola y el encuentro de los paramentos verticales con el techo de la sala está

decorado con molduras. Los palcos están resueltos con losa de hormigón, revestido igual que la sala.

4.2.1.3 Fotografías



Figura 47. Vista de la sala



Figura 48. Vista del escenario



Figura 49. Vista de palcos



Figura 50. Vista planta primera. Butacas y pavimento

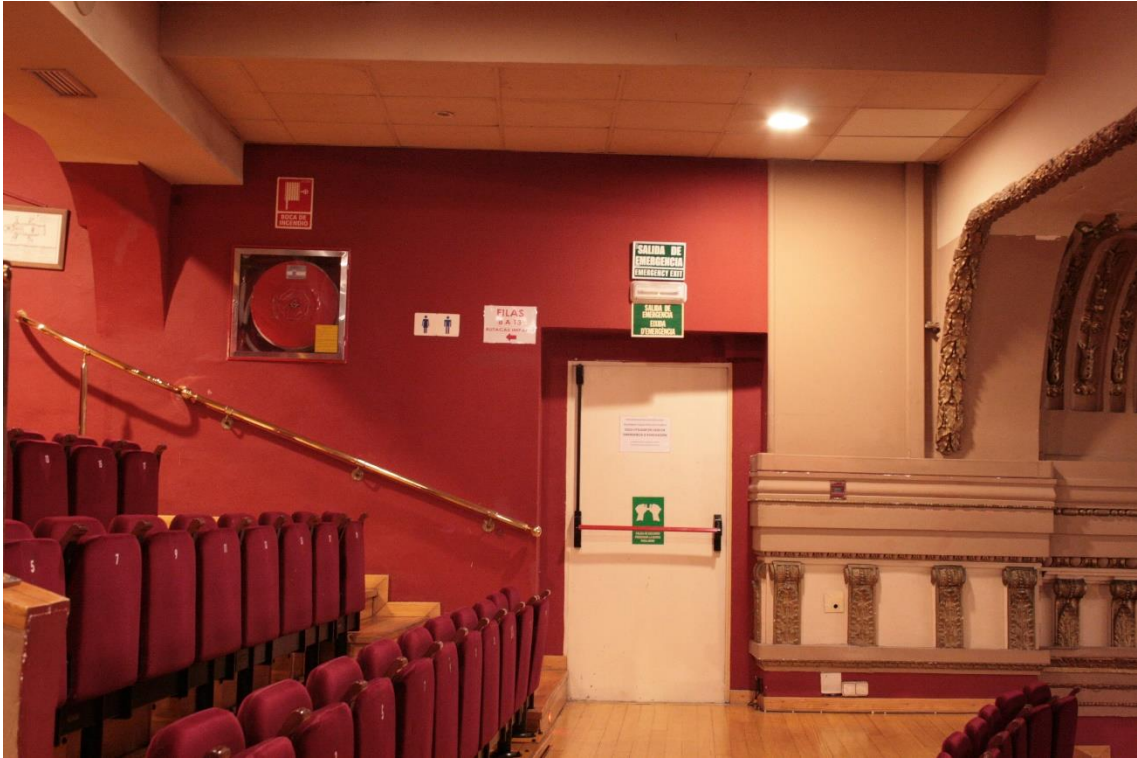


Figura 51. Vista planta primera. Techo

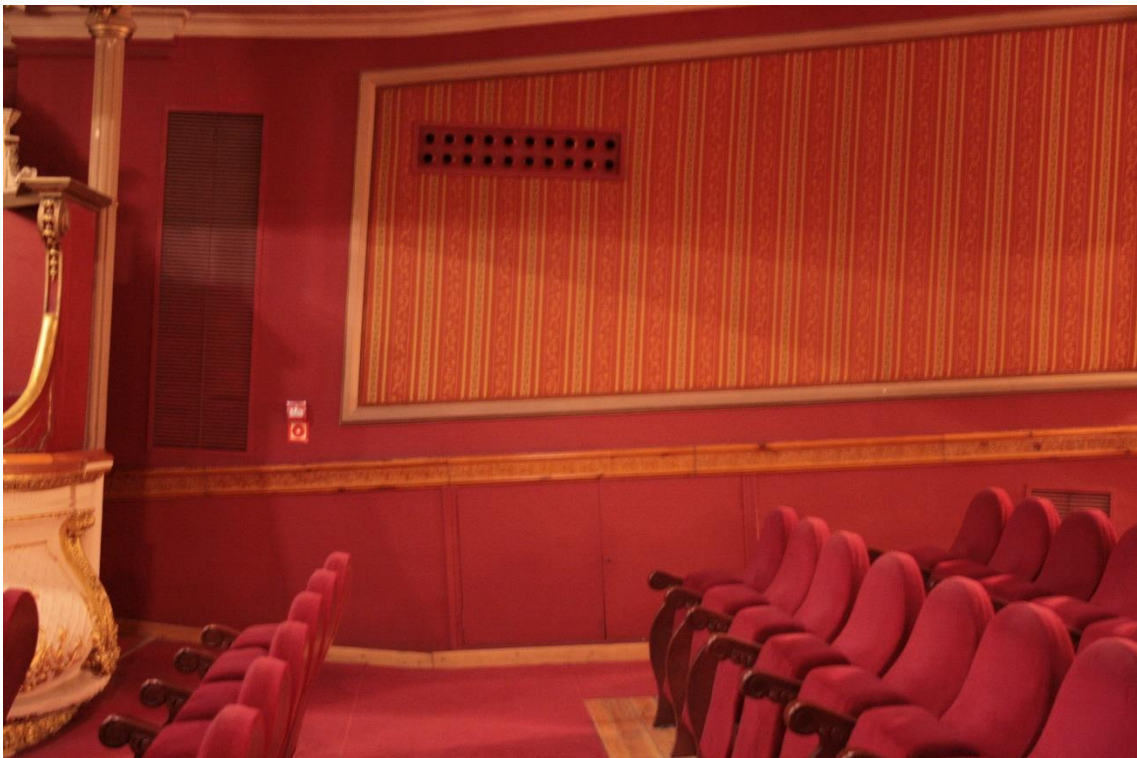


Figura 52. Cuadros acolchados

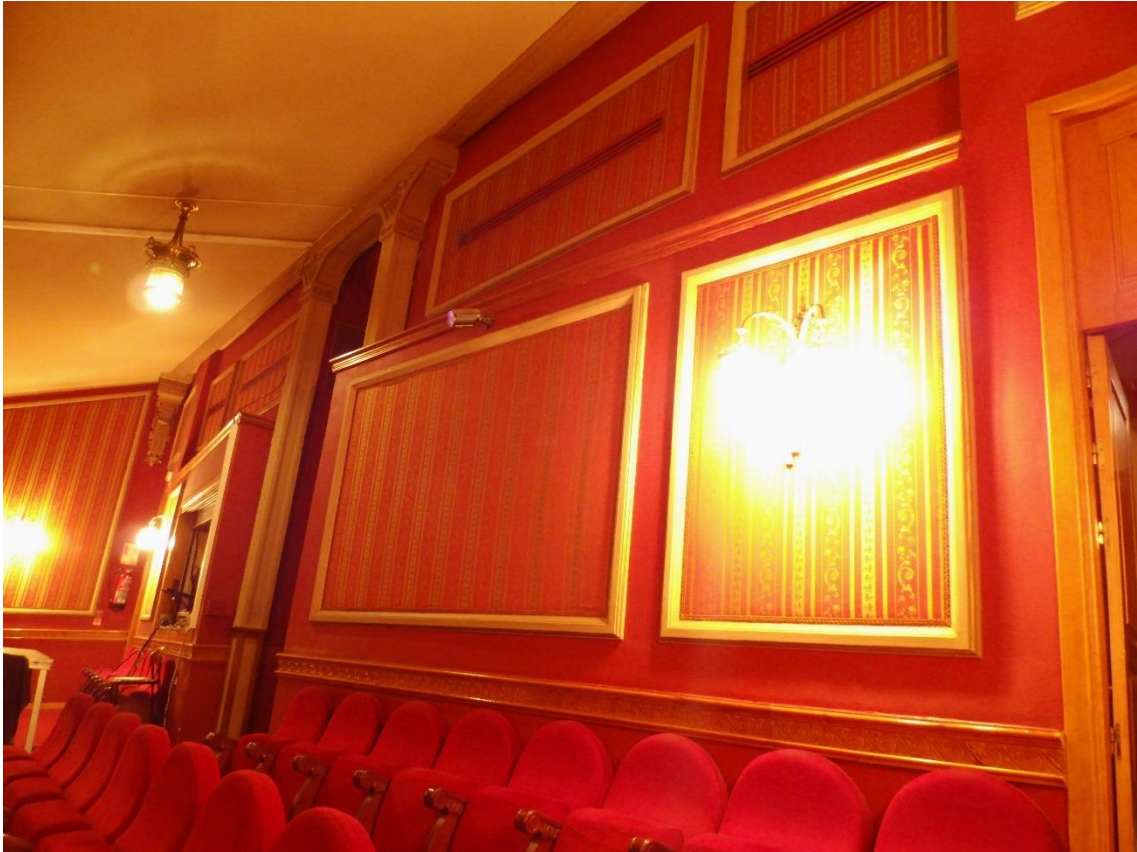


Figura 53. Cuadros acolchados



Figura 54. Cuadros acolchados



Figura 55. Decorado del techo y falso lucernario

4.2.1.4 Planos

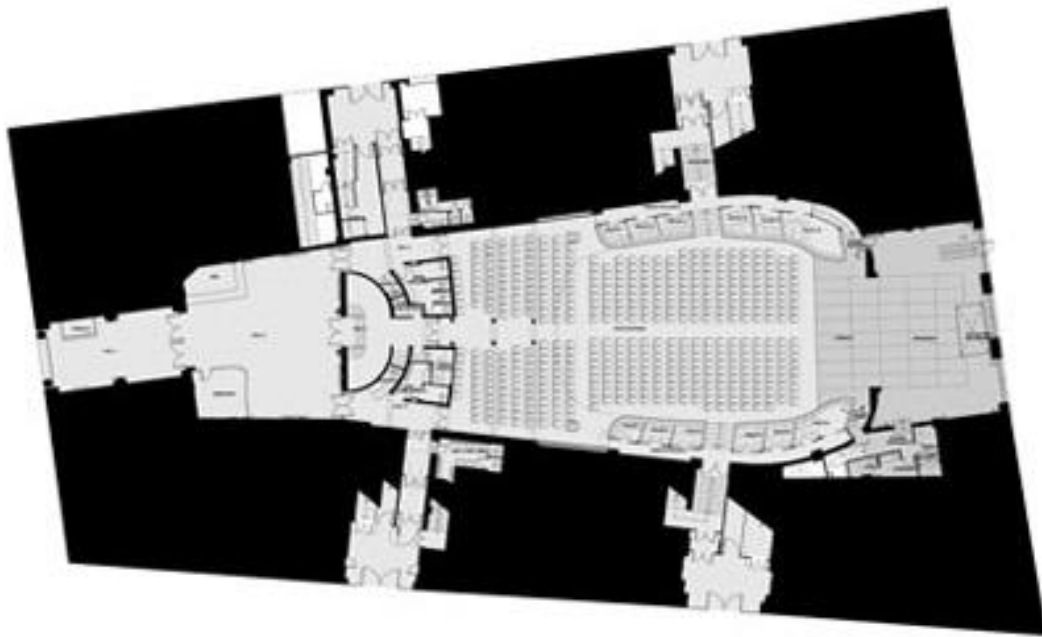


Figura 56. Planta (Fuente: Carlos Montesinos)

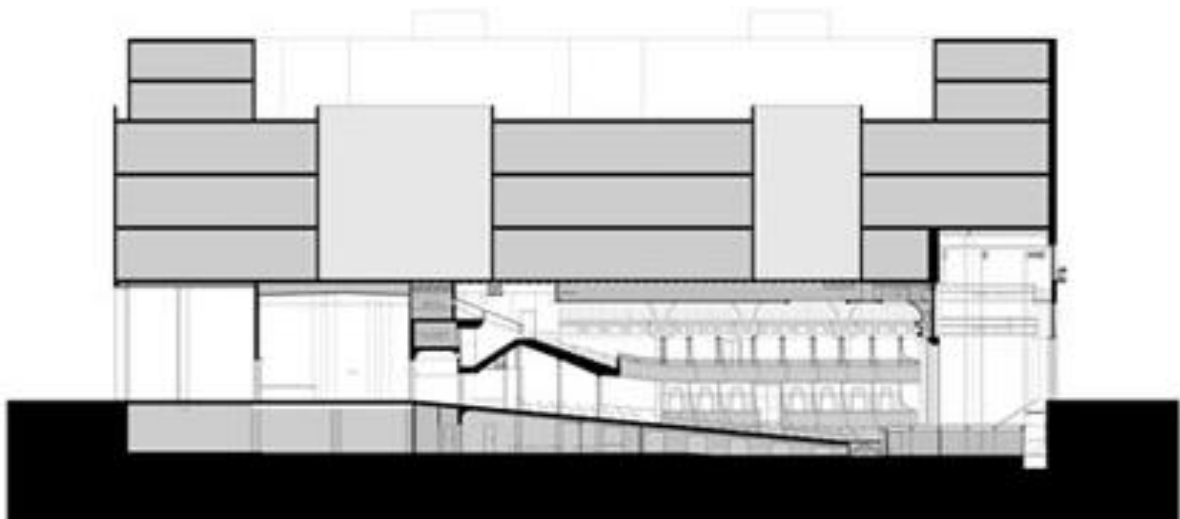


Figura 57. Sección (Fuente: Carlos Montesinos)

4.2.1.5 Comportamiento absorbente de los materiales

A continuación, se detallan los coeficientes de absorción de las distintas soluciones constructivas que se encuentran en la sala.

Tabla 73. Coeficientes de absorción asignados a las distintas soluciones constructivas de la sala

Zona	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
Falso techo zona general	0,08	0,06	0,05	0,04	0,04	0,04
Falso techo teatro zona fondo anfiteatro	0,17	0,32	0,12	0,06	0,03	0,02
Techo bajo palcos	0,14	0,10	0,06	0,04	0,04	0,03
Lámpara decorativa	0,640	0,400	0,200	0,130	0,170	0,050
Pavimento escenario	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,1
Pavimento P1	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Pavimento pasillos (platea y palcos PB)	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25
Pavimento escalera acceso palcos PB y anfiteatro	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Paredes atamboradas zona fondo en PB y P1 y dos bandas laterales junto boca (sonido hueco)	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09
Paredes PB y P1 (sonido solido)	0,013	0,015	0,02	0,028	0,04	0,05
Paredes zona boca de escena	0,1	0,04	0,05	0,05	0,08	0,18
Paredes patio butacas acolchados y divisiones de palcos	0,02	0,03	0,09	0,14	0,29	0,57
Molduras antepecho palcos, boca escena	0,13	0,13	0,25	0,28	0,3	0,3
Molduras coronación paredes laterales y perímetro falso techo	0,2	0,2	0,25	0,28	0,3	0,3
Puertas acceso a sala y de palcos PB	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
Cortina boca de escena	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
Butacas anfiteatro y palcos	0,56	0,64	0,7	0,72	0,68	0,62

4.2.2 Medición de parámetros

4.2.2.1 Toma de datos "in situ"

Para definir los puntos (x,y,z) tanto de la fuente como de los distintos receptores, tomamos como centro de origen la parte más baja de la corbata en su encuentro con el plano de platea. Así medimos cada punto con respecto al origen que hemos determinado y lo trasladamos a odeón.

Se toman los datos de la colocación de la fuente dodecaédrica: A 1,50 metros de altura sobre el escenario (que está a 1,07 metros de altura sobre el origen de coordenadas determinado) y a 2,00 metros de la boca del mismo. El micrófono se dispone a una altura de 1,20 metros.

En la Tabla 74 se indican las coordenadas de la fuente sonora y de los distintos receptores.

Tabla 74. Coordenadas de la fuente y de los receptores

Abierto	Cerrado	X	Y	Z
Fuente		-1,67	-0,25	2,31
PTO_30	PTO_1	11,21	-5,15	1,18
PTO_29	PTO_2	10,23	1,04	1,12
PTO_28	PTO_3	11,53	6,92	1,2
PTO_27	PTO_4	14,10	-5,15	1,36
PTO_26	PTO_5	14,42	0,89	1,38
PTO_25	PTO_6	13,10	6,92	1,30
PTO_24	PTO_7	15,94	-5,15	1,48
PTO_23	PTO_8	16,43	1,01	1,51
PTO_22	PTO_9	16,84	6,92	1,53
PTO_21	PTO_10	17,90	-5,15	1,80
PTO_20	PTO_11	18,85	1,19	2,02
PTO_19	PTO_12	18,83	6,92	2,02
PTO_18	PTO_13	22,75	-5,15	2,96
PTO_17	PTO_14	21,82	1,01	2,72
PTO_16	PTO_15	21,72	6,92	2,72

4.2.2.2 Parámetros acústicos

Mediante la utilización del software DIRAC se han realizado las mediciones in situ de la sala, con telón bajado y con telón subido. De esta manera se han obtenido los parámetros acústicos en cada situación.

4.2.2.2.1 Parámetros acústicos con telón bajado

Tabla 75. Inteligibilidad

STI male	0,62
STI female	0,62

Tabla 76. Parámetros temporales

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
EDT	0,895	0,814	0,937	0,936	0,937	0,844
TR₃₀	1,031	0,977	1,056	1,069	1,017	0,928
TR₂₀	1,057	0,964	1,060	1,073	1,017	0,926
TR₁₀	0,970	0,918	1,053	1,058	1,031	0,911

Tabla 77. Claridad

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
C₅₀	-1,94	0,87	1,05	1,05	1,58	1,94
C₈₀	2,13	4,93	4,35	4,24	4,71	5,35

Tabla 78. Definición

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
D₅₀	0,39	0,55	0,56	0,56	0,59	0,61

4.2.2.2.2 Parámetros acústicos con telón subido

Tabla 79. Inteligibilidad

STI male	0,63
STI female	0,64

Tabla 80. Parámetros temporales

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
EDT	0,914	0,768	0,908	0,933	0,882	0,789
TR₃₀	1,014	0,957	1,017	1,057	1,006	0,911
TR₂₀	1,029	0,943	1,011	1,063	1,002	0,908
TR₁₀	0,928	0,932	1,050	1,067	1,015	0,895

Tabla 81. Claridad

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
C₅₀	-1,58	0,70	1,05	1,40	2,31	2,88
C₈₀	2,93	5,32	4,48	4,69	5,25	6,04

Tabla 82. Definición

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
D₅₀	0,41	0,54	0,56	0,58	0,63	0,66

4.2.3 Aplicación del método de superficies de respuesta

Se realiza el modelo virtual de la sala en Autocad y se importa el modelo a Odeon. Se comprueba que el modelo es correcto: que no tiene fugas (“deadballs”), que no hay rayos perdidos, y que las aristas del modelo están en contacto entre sí.

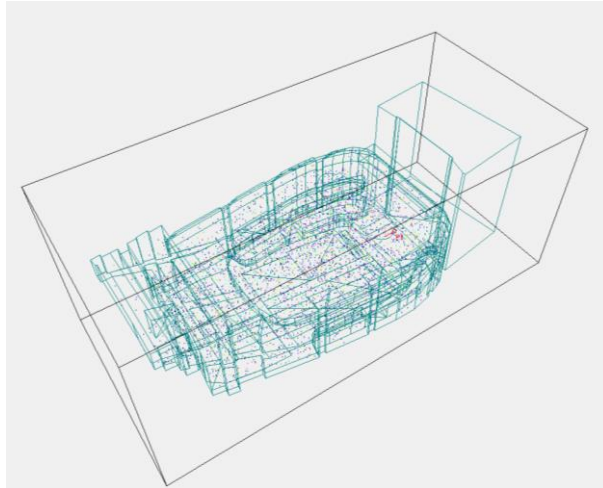


Figura 58. Captura del test 3D Billard realizado en Odeon

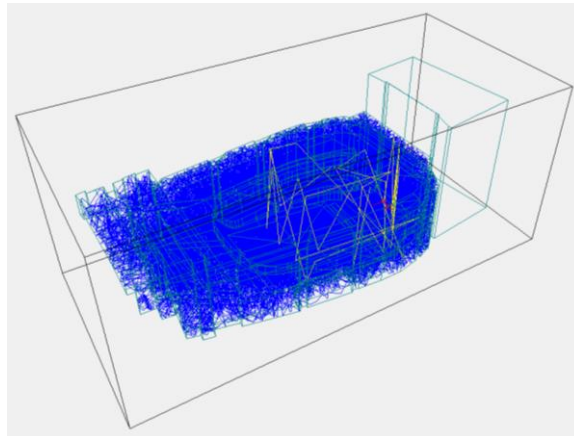


Figura 59. Captura del test rayos perdidos

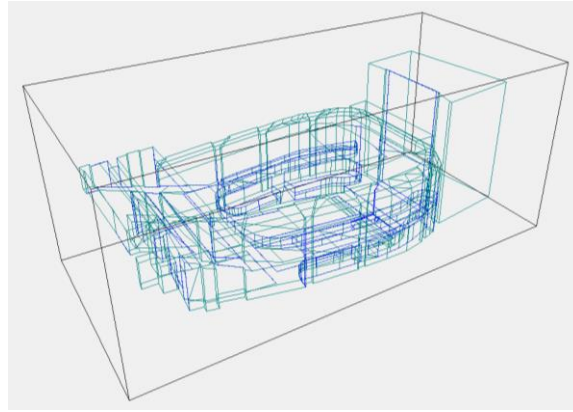


Figura 60. Captura del test aristas únicas

Se introducen las coordenadas de la fuente y de los receptores, y se asignan los materiales de las distintas superficies, empleando los coeficientes de la Tabla 73.

4.2.3.1 Aplicación del RSM con telón bajado

4.2.3.1.1 Modelo virtual de la sala con telón bajado

En el modelo virtual de la sala con telón bajado, a la superficie de la boca de escena se le asigna el material de telón. Se calcula el modelo y se obtiene el tiempo de reverberación TR_{30} medio. El TR_{30} obtenido tras el cálculo se compara con el de la medición realizada “in situ”, tal y como se ve en la Tabla 83.

Tabla 83. TR_{30} medio de la medición in situ y de la modelización con telón bajado

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
<i>Medición in situ</i>	1,031	0,977	1,056	1,069	1,017	0,928
<i>Modelización Olympia</i>	1,36	1,29	1,15	1,12	1,02	0,88

En la Figura 61 se representa el tiempo de reverberación medio, TR_{30} , medido in situ, los márgenes superior e inferior en los que el resultado del modelo es aceptable y el resultado del TR_{30} de la modelización inicial. Se observa que el valor a 500 Hz está ajustado. A bajas frecuencias se necesita mayor absorción mientras que a altas, es conveniente bajar la absorción.

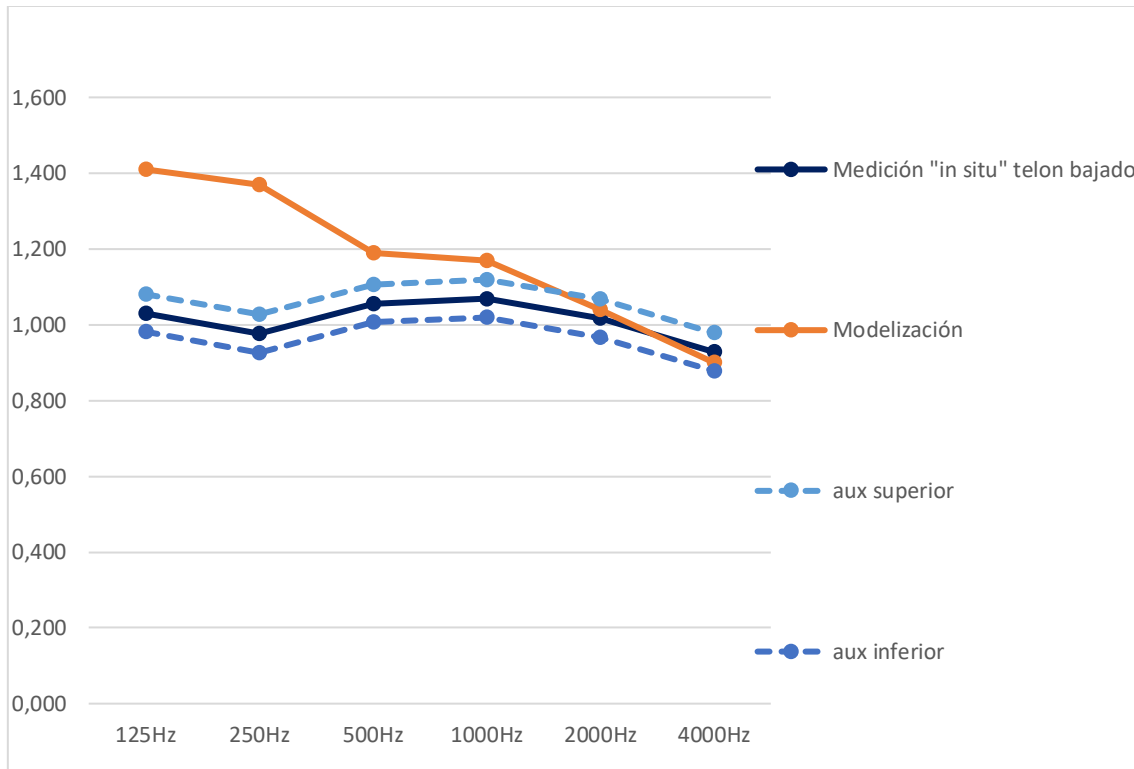


Figura 61. Representación gráfica del TR_{30} medido "in situ" con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables y la modelización inicial

4.2.3.1.2 Ajuste mediante método de superficies de respuesta

A continuación, se va a emplear el RSM para ajustar el modelo virtual a la medición real.

En primer lugar, se reordena la tabla de coeficientes de absorción de los materiales de la sala y se les asigna un número (Tabla 84).

Tabla 84. Coeficientes de absorción de las superficies de la sala y asignación de número de superficie

Zona	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	Nº SUP
Pavimento escenario	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10	1
Pavimento P1	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07	2
Pavimento pasillos (platea y palcos PB)	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25	3
Pavimento escalera acceso palcos PB y anfiteatro	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	4
Paredes atamboradas zona fondo en PB y P1 y dos bandas laterales junto boca	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09	5
Paredes PB y P1	0,013	0,015	0,02	0,028	0,04	0,05	6
Paredes zona boca de escena	0,10	0,04	0,05	0,05	0,08	0,18	7
Molduras antepecho palcos, boca escena	0,13	0,13	0,25	0,28	0,3	0,3	8
Molduras coronación paredes laterales y perímetro falso techo	0,20	0,20	0,25	0,28	0,3	0,3	9
Puertas acceso a sala y de palcos PB	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	10
Cortina boca de escena	0,140	0,350	0,550	0,720	0,700	0,650	11
Techo bajo palcos	0,14	0,10	0,06	0,04	0,04	0,03	12
Lámpara decorativa	0,640	0,400	0,200	0,130	0,170	0,050	13
Butacas anfiteatro y palcos	0,56	0,64	0,70	0,72	0,68	0,62	14
Falso techo teatro zona fondo anfiteatro	0,17	0,32	0,12	0,06	0,03	0,02	15
Paredes patio butacas acolchados	0,02	0,03	0,09	0,14	0,29	0,57	16
Falso techo zona general	0,08	0,06	0,05	0,04	0,04	0,04	X1
Palcos divisiones	0,02	0,03	0,09	0,14	0,29	0,57	X2

Se eligen como superficies incógnita el falso techo general de la sala y las divisiones entre palcos.

Se define la región de estudio en la aplicación del RSM.

$$X_{1i} = B_{1i} \pm R_{1i}$$

Siendo:

B_{1i} los valores tomados de la bibliografía y

R_{1i} , incrementos que oscilan entre 0 y 0,5

De forma análoga se realiza para X_{2i}

En la Tabla 85 se muestran los coeficientes de absorción de las superficies empleados en la simulación y las regiones de estudio.

Tabla 85. Coeficientes de absorción empleados en la simulación

	Nº SUP	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
	1	0,4	0,3	0,2	0,17	0,15	0,1
	2	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
	3	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25
	4	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
	5	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09
	6	0,013	0,015	0,02	0,028	0,04	0,05
	7	0,1	0,04	0,05	0,05	0,08	0,18
	8	0,13	0,13	0,25	0,28	0,3	0,3
	9	0,2	0,2	0,25	0,28	0,3	0,3
	10	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
	11	0,140	0,350	0,550	0,720	0,700	0,650
	12	0,14	0,1	0,06	0,04	0,04	0,03
	13	0,640	0,400	0,200	0,130	0,170	0,050
	14	0,56	0,64	0,7	0,72	0,68	0,62
	15	0,17	0,32	0,12	0,06	0,03	0,02
	16	0,02	0,03	0,09	0,14	0,29	0,57
Falso techo zona general	X1	X1₁₂₅	X1₂₅₀	X1₅₀₀	X1₁₀₀₀	X1₂₀₀₀	X1₄₀₀₀
Palcos divisiones	X2	X2₁₂₅	X2₂₅₀	X2₅₀₀	X2₁₀₀₀	X2₂₀₀₀	X2₄₀₀₀

4.2.3.1.3 Ajuste 1

Se especifican los valores de las dos regiones de estudio, se toman los valores de la bibliografía y se asignan unos incrementos a cada una de ellas.

En la Tabla 86 y en la Tabla 87, se observan los valores asignados a las regiones de estudio X1 y X2, respectivamente.

Tabla 86. Región de estudio de la superficie X1

X1	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
B1i-R1i	0,57	0,64	0,65	0,65	0,65	0,60
B1i	0,72	0,79	0,80	0,80	0,80	0,75
B1i+R1i	0,87	0,94	0,95	0,95	0,95	0,90
INCREMENTOS R1	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15

Tabla 87. Región de estudio de la superficie X2

X2	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
B2i-R2i	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
B2i	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
B2i+R2i	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
INCREMENTOS R2	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40

Se obtienen los siguientes pares de espectros de absorción, Tabla 88.

Tabla 88. Combinaciones de pares de espectros de absorción de las regiones X1 y X2.

combinación	puntos	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	
1	B1i-R1i	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	X11
	B2i-R2i	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	X21
2	B1i-R1i	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	X11
	B2i	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	X22
3	B1i-R1i	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	X11
	B2i+R2i	0,900	0,900	0,900	0,900	0,900	0,900	X23
4	B1i	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	X12
	B2i-R2i	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	X21
5	B1i	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	X12
	B2i	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	X22
6	B1i	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	X12
	B2i+R2i	0,900	0,900	0,900	0,900	0,900	0,900	X23
7	B1i+R1i	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	X13
	B2i-R2i	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	X21
8	B1i+R1i	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	X13
	B2i	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	X22
9	B1i+R1i	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	X13
	B2i+R2i	0,900	0,900	0,900	0,900	0,900	0,900	X23

Estas combinaciones se prueban en Odeon para obtener los tiempos de reverberación nuevos.

Se introducen las nueve combinaciones en Odeon y se calcula el tiempo de reverberación para cada una de ellas. El resultado se puede ver en la Tabla 89. El tiempo de reverberación de las combinaciones se designa de aquí en adelante en minúsculas acompañado de un número que hace referencia a la combinación de origen de la que es su resultado.

Tabla 89. TR₃₀ obtenidos de las combinaciones definidas anteriormente

TR₃₀	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
tr1	1,40	1,30	1,19	1,16	1,10	0,99
tr2	1,22	1,15	1,08	1,05	1,01	0,92
tr3	1,14	1,08	1,02	1,00	0,96	0,88
tr4	1,26	1,18	1,11	1,10	1,01	0,91
tr5	1,11	1,05	1,01	1,00	0,94	0,86
tr6	1,05	0,99	0,95	0,95	0,91	0,83
tr7	1,14	1,10	1,05	1,04	0,97	0,84
tr8	1,01	0,97	0,95	0,96	0,91	0,80
tr9	0,95	0,91	0,9	0,91	0,86	0,76

En la Figura 62 se observa que todos los puntos objetivo se encuentran dentro de los espectros del TR₃₀ de las distintas combinaciones.

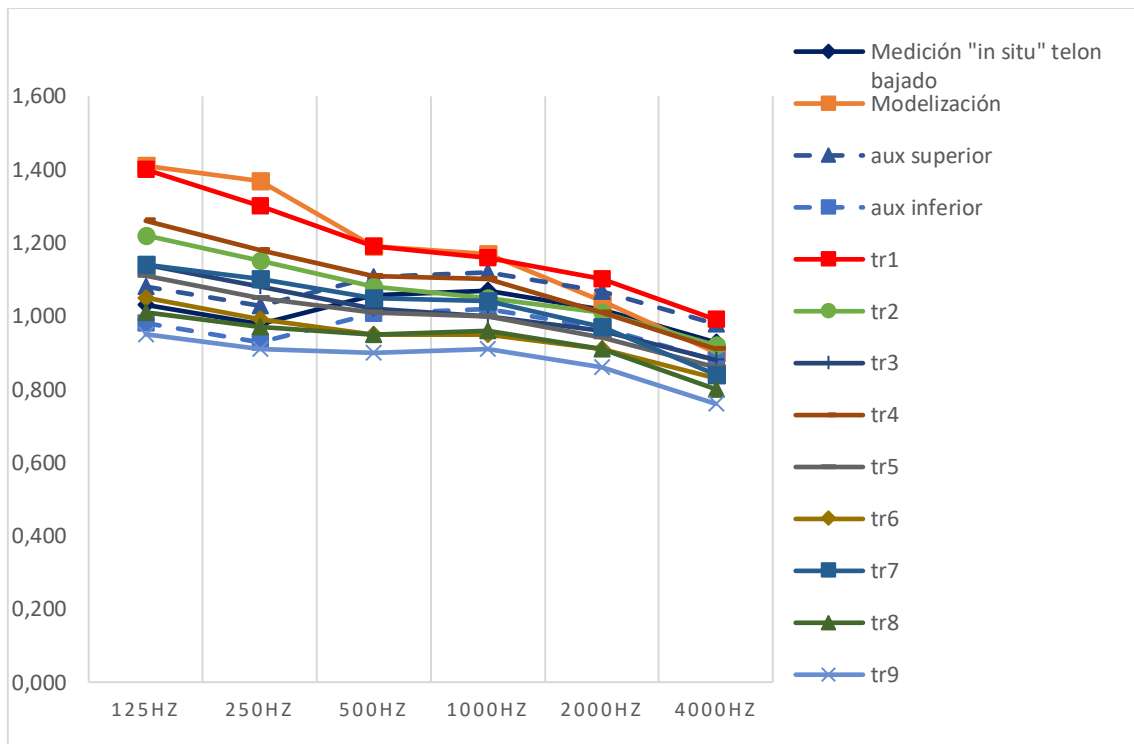


Figura 62. Comparativa TR₃₀. Medición "in situ", modelización y resultados tras aplicación del RSM

Para obtener las superficies de respuesta, se agrupan los datos por frecuencia, formando nueve combinaciones de ternas de puntos por frecuencia. A partir de dichas superficies se obtienen nuevos pares de puntos que satisfacen el "target".

Ternas de datos por frecuencia y representación mediante superficie de respuesta:

Tabla 90. Ternas de datos a 125 Hz

125HZ			
	X1	X2	TR
	0,52	0,05	1,40
	0,52	0,35	1,22
	0,52	0,65	1,14
	0,72	0,05	1,26
	0,72	0,35	1,11
	0,72	0,65	1,05
	0,92	0,05	1,14
	0,92	0,35	1,01
	0,92	0,65	0,95

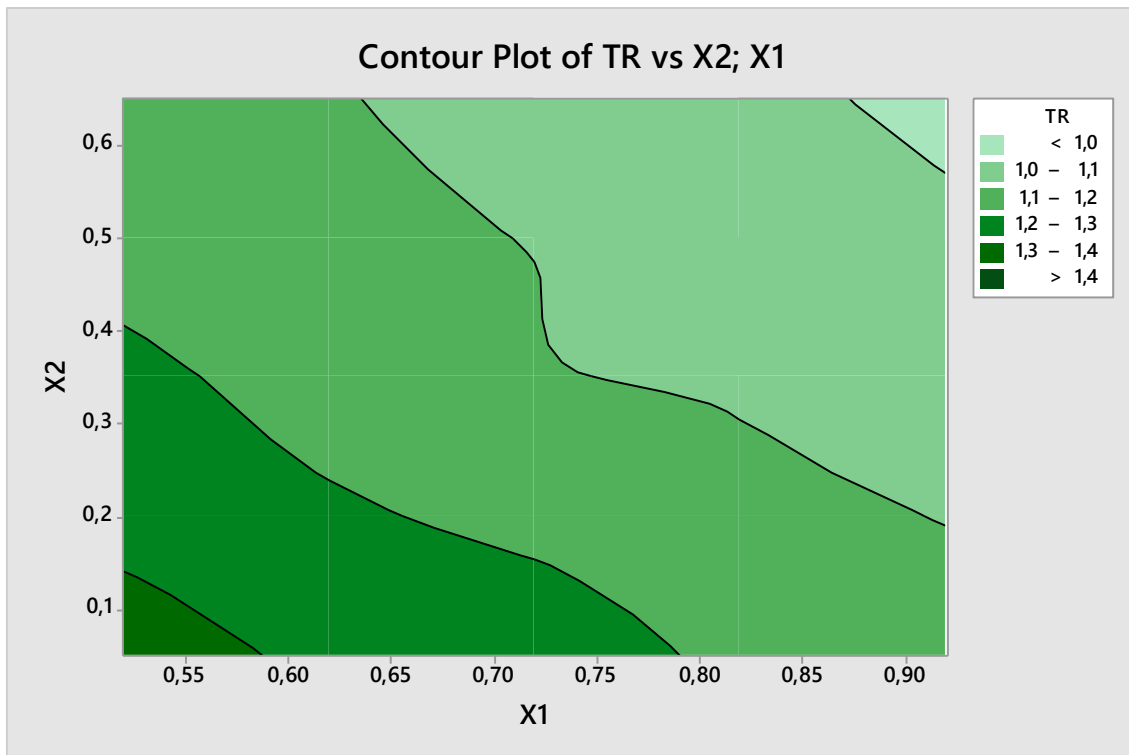


Figura 63. Superficie de respuesta a 125 Hz.

Tabla 91. Pares de puntos a 125 Hz

X1	0,30	0,40	0,47	0,50
X2	0,47	0,41	0,80	0,28

Tabla 92. Ternas de datos a 250 Hz

250HZ			
	X1	X2	TR
	0,65	0,05	1,30
	0,65	0,3	1,15
	0,65	0,55	1,08
	0,8	0,05	1,18
	0,8	0,3	1,05
	0,8	0,55	0,99
	0,95	0,05	1,10
	0,95	0,3	0,97
	0,95	0,55	0,91

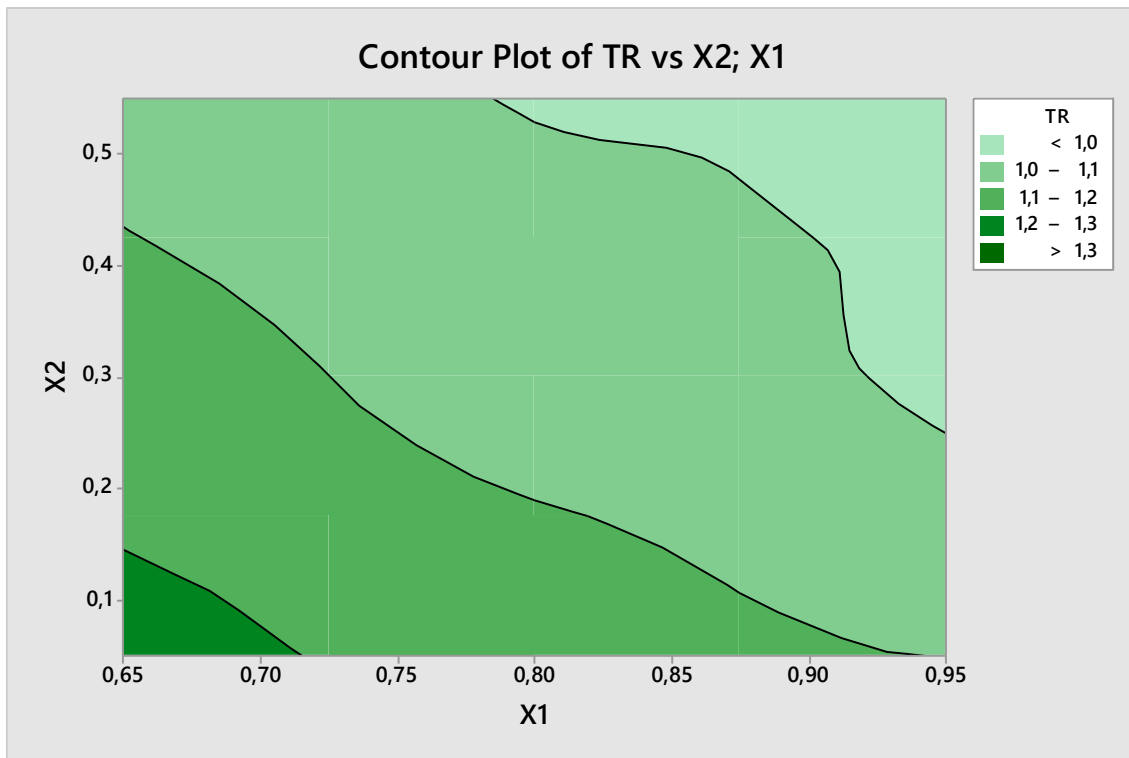


Figura 64. Superficie de respuesta a 250 Hz

Tabla 93. Pares de puntos a 250 HZ

X1	0,2	0,23	0,25	0,30	0,50
X2	0,73	0,68	0,50	0,44	0,78

Tabla 94. ternas de datos a 500 Hz

500HZ			
	X1	X2	TR
	0,76	0,05	1,19
	0,05	0,2	1,08
	0,76	0,35	1,02
	0,2	0,05	1,11
	0,76	0,2	1,01
	0,35	0,35	0,95
	0,86	0,05	1,05
	0,05	0,2	0,95
	0,86	0,35	0,90

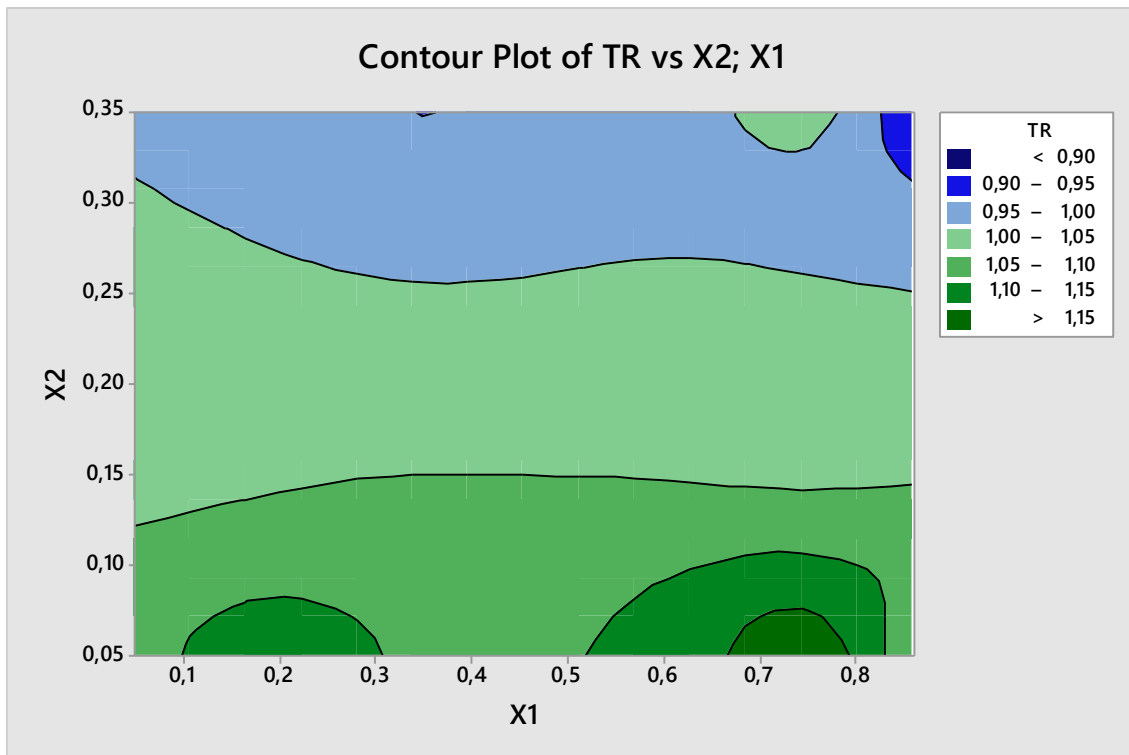


Figura 65 . Superficie de respuesta a 500 Hz

Tabla 95. Pares de puntos a 500 Hz

X1	0,10	0,15	0,44	0,20
X2	0,26	0,20	0,26	0,67

Tabla 96. Ternas de datos a 1000 Hz

1000HZ			
	X1	X2	TR
	0,65	0,05	1,16
	0,65	0,45	1,05
	0,65	0,85	1,00
	0,8	0,05	1,10
	0,8	0,45	1,00
	0,8	0,85	0,95
	0,95	0,05	1,04
	0,95	0,45	0,96
	0,95	0,85	0,91

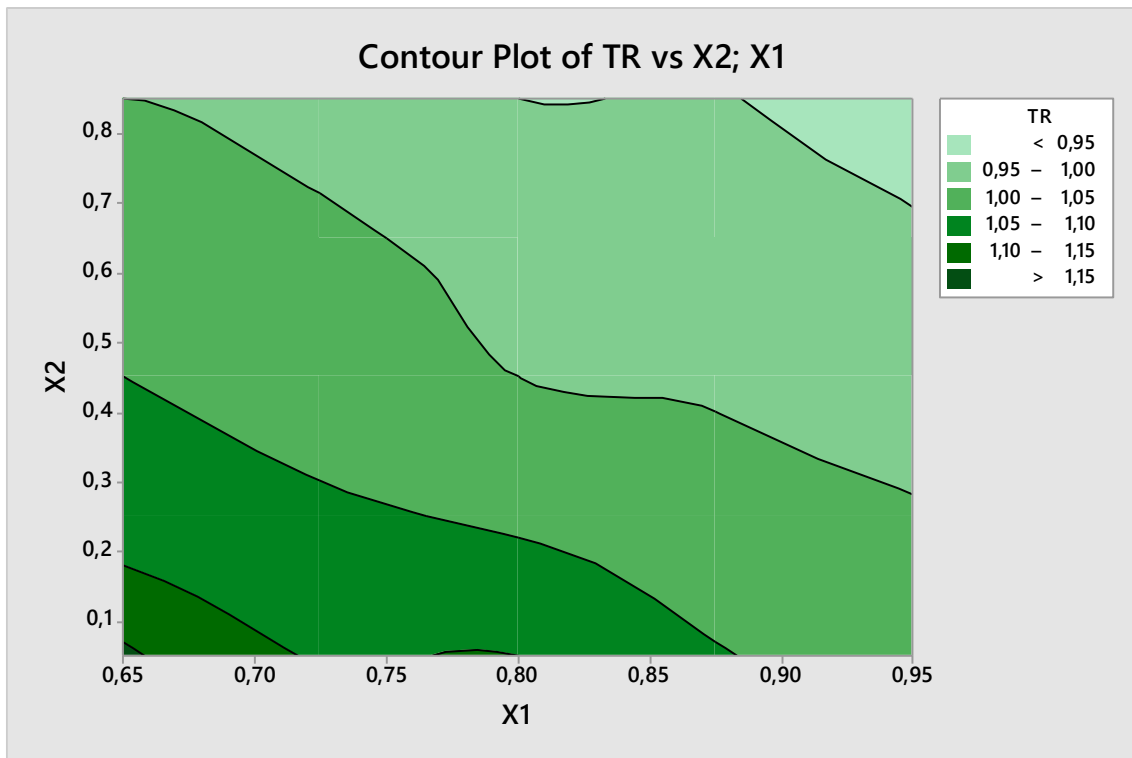


Figura 66. Superficie de respuesta a 1000 Hz

Tabla 97. Pares de puntos a 1000 Hz

X1	0,07	0,05	0,05	0,38
X2	0,20	0,15	0,37	0,20

Tabla 98. Ternas de datos a 2000 Hz

2000HZ			
	X1	X2	TR
	0,55	0,05	1,10
	0,55	0,10	1,01
	0,55	0,15	0,96
	0,75	0,05	1,01
	0,75	0,10	0,94
	0,75	0,15	0,91
	0,95	0,05	0,97
	0,95	0,10	0,91
	0,95	0,15	0,86

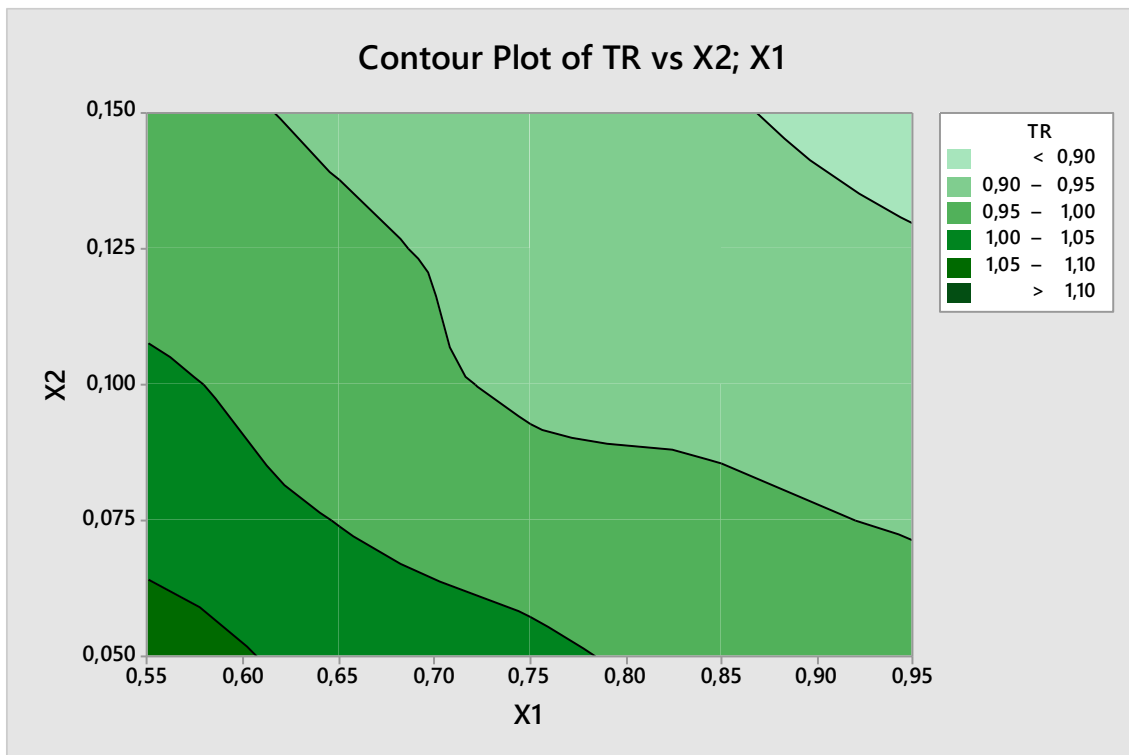


Figura 67. Superficie de respuesta a 2000 Hz

Tabla 99. Pares de puntos a 2000 Hz

X1	0,05	0,05	0,30
X2	0,60	0,20	0,20

Tabla 100. Ternas de datos a 4000 Hz

4000HZ			
	X1	X2	TR
	0,45	0,05	0,99
	0,45	0,10	0,92
	0,45	0,15	0,88
	0,70	0,05	0,91
	0,70	0,10	0,86
	0,70	0,15	0,83
	0,95	0,05	0,84
	0,95	0,10	0,80
	0,95	0,15	0,76

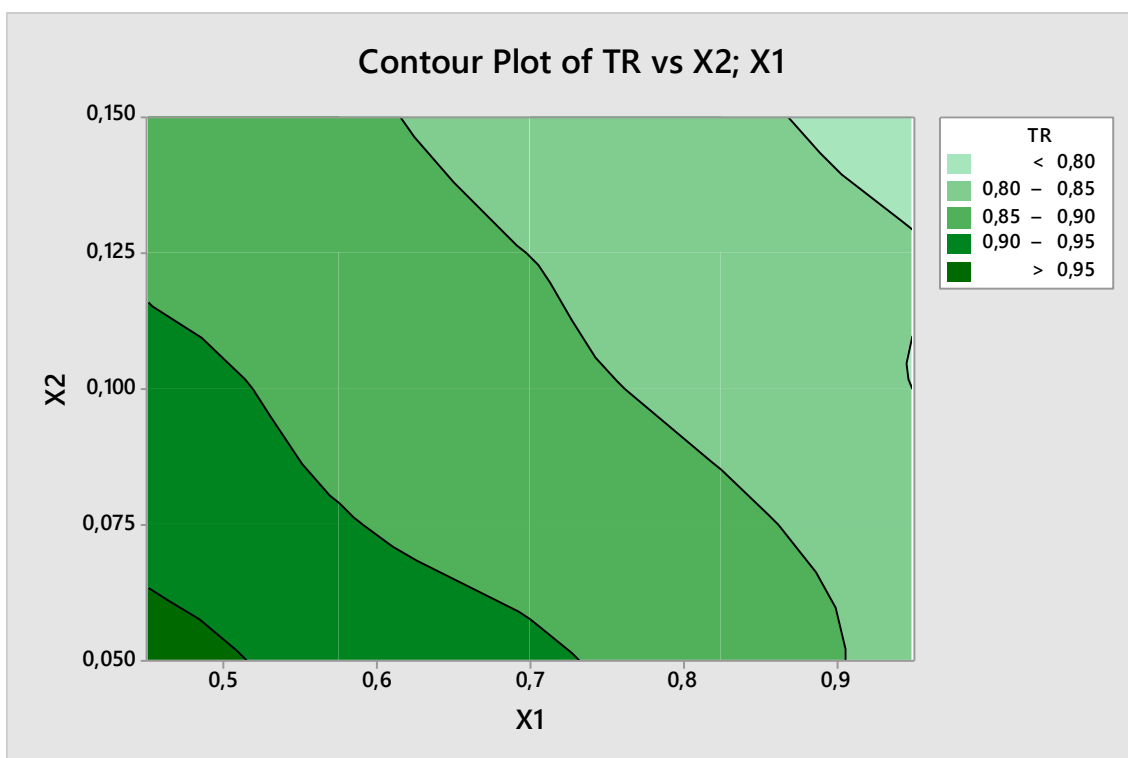


Figura 68. Superficie de respuesta a 4000 Hz

Tabla 101. Pares de puntos a 4000 Hz

X1	0,05	0,5
X2	0,20	0,1

4.2.3.1.3.1 Combinaciones

En la Tabla 102 se muestran los conjuntos de pares obtenidos:

En principio habría que descartar aquellos pares que se encuentren en los límites de la región estudiada. En este caso, dado que los pares se han obtenido de forma visual evitando los límites de la región, no es necesario descartar ningún par por esa razón.

Tabla 102. Pares de puntos obtenidos para el cálculo

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
X1	0,30	0,20	0,10	0,07	0,05	0,05
X2	0,47	0,73	0,26	0,20	0,20	0,20
X1	0,30	0,30	0,10	0,05	0,05	0,05
X2	0,60	0,44	0,40	0,15	0,60	0,10

Se seleccionan los pares que más se ajustan a los valores esperados de cada uno de ellos.

Probamos los nuevos pares en el modelo virtual.

Combinación 1.

En la Tabla 103 aparecen los espectros de absorción de las superficies X1 y X2 empleadas en la simulación.

Tabla 103. Combinación de espectros de absorción de las superficies estudiadas

puntos	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
X1	0,30	0,20	0,20	0,10	0,05	0,05
X2	0,47	0,73	0,26	0,20	0,20	0,20

La combinación anterior da como resultado el tiempo de reverberación que se muestra en la Tabla 104 y en la Figura 69.

Tabla 104. TR₃₀ obtenido

TR ₃₀	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
tr1	1,11	1,00	1,03	1,03	1,06	0,98

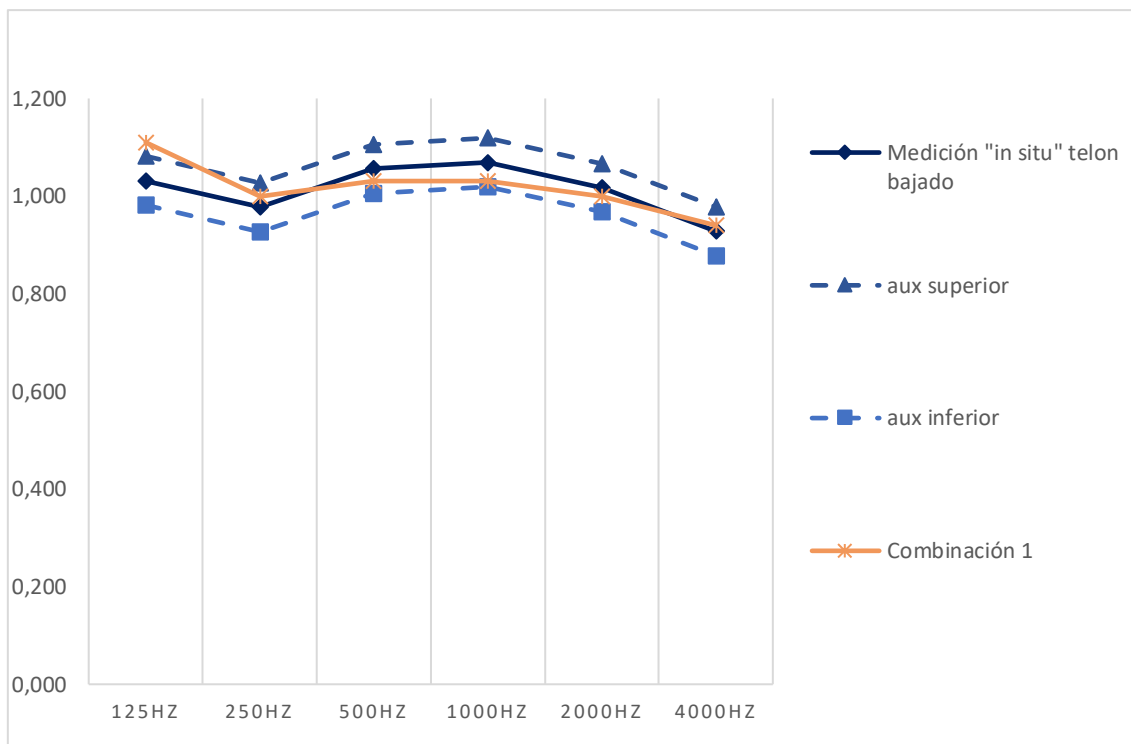


Figura 69. Representación gráfica del TR₃₀ medido "in situ" con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables, la modelización inicial, y la modelización de la combinación 1

El tiempo de reverberación del modelo empleando la combinación 1 de espectros de absorción, está casi ajustado, pero acepta un poco más de absorción general, se cambian las butacas medianamente tapizadas por butacas bien tapizadas y se recalcula.

Combinación 2.

Tabla 105. Combinación de espectros de absorción de las superficies estudiadas

		125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
X1	Falso techo zona general	0,30	0,20	0,20	0,10	0,05	0,05
X2	Palcos divisiones	0,47	0,73	0,26	0,20	0,20	0,20
	Butacas bien tapizadas	0,72	0,79	0,83	0,84	0,83	0,79

La combinación anterior da como resultado el tiempo de reverberación que se muestra en la Tabla 106 y en la Figura 70.

Tabla 106. TR₃₀ obtenido

TR ₃₀	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
tr2	1,01	0,98	1,04	1,07	1,00	0,90

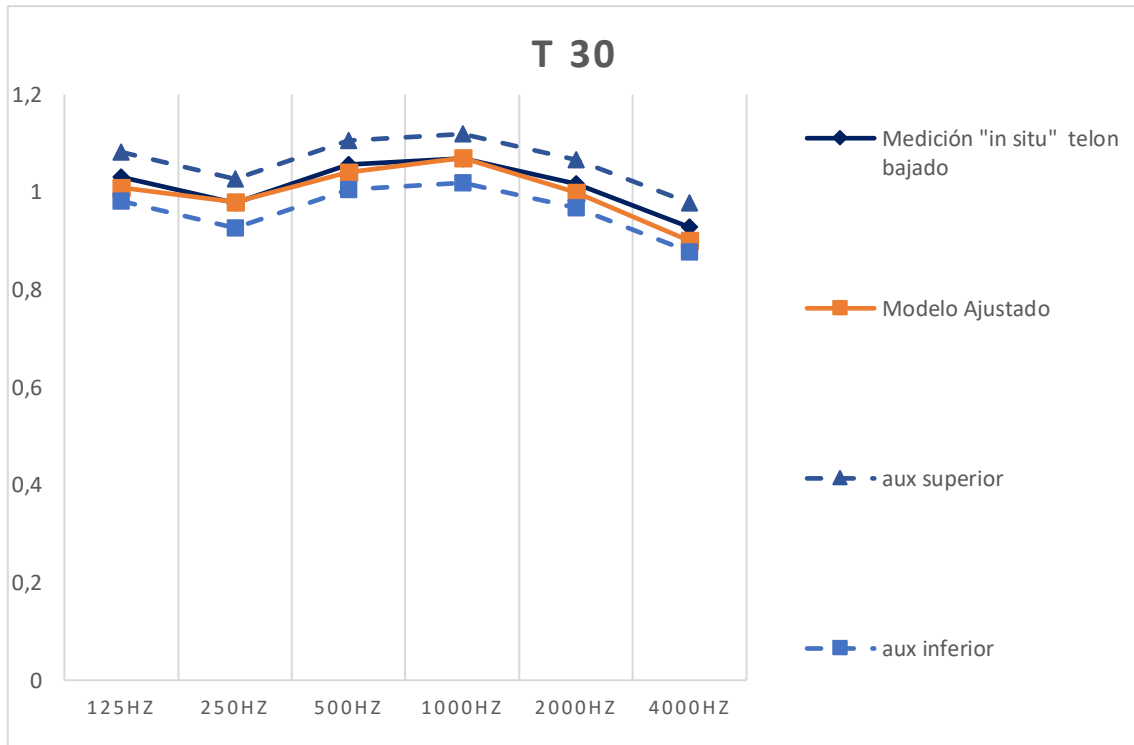


Figura 70. Representación gráfica del TR₃₀ medido "in situ" con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables, la modelización inicial, y la modelización de la combinación 2

En la Figura 70 se observan los valores del TR₃₀ de la medición real con un margen superior e inferior de 0,05 segundos, del modelo inicial y del modelo tras la aplicación del RSM. Los valores de la modelización que se encuentren dentro de estos márgenes se consideran aceptables.

El espectro de absorción tr2 se encuentra dentro de los márgenes establecidos como aceptables, por lo que se admite la combinación 2. Los cambios del espectro de absorción del material X1, X2 y de las butacas, se muestran en la Figura 71 y en la Figura 72 respectivamente.

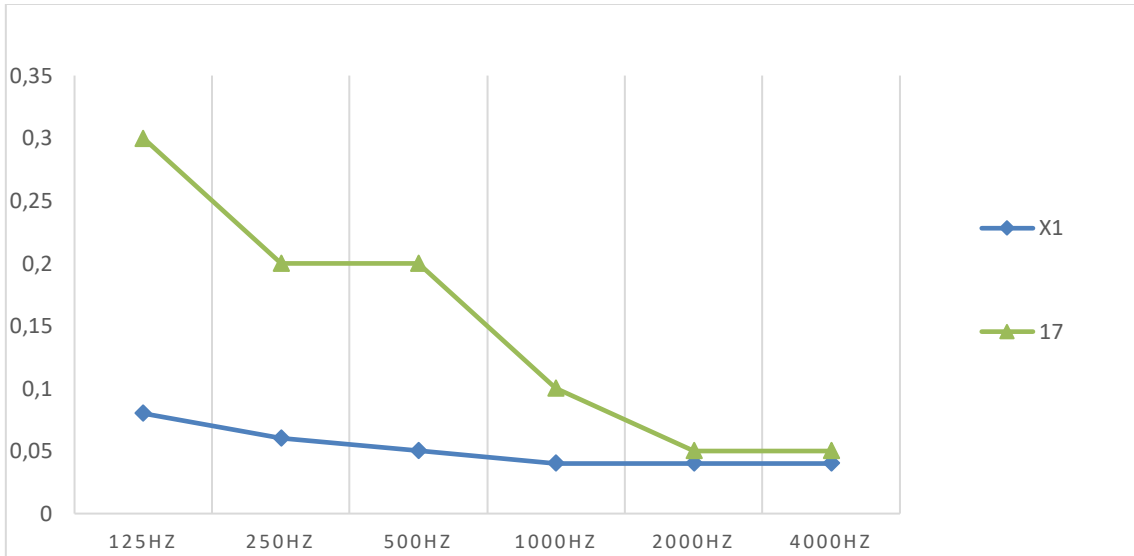


Figura 71 . Espectro de absorción del techo de la zona general (bibliografía- azul- y aplicación RSM-verde-)

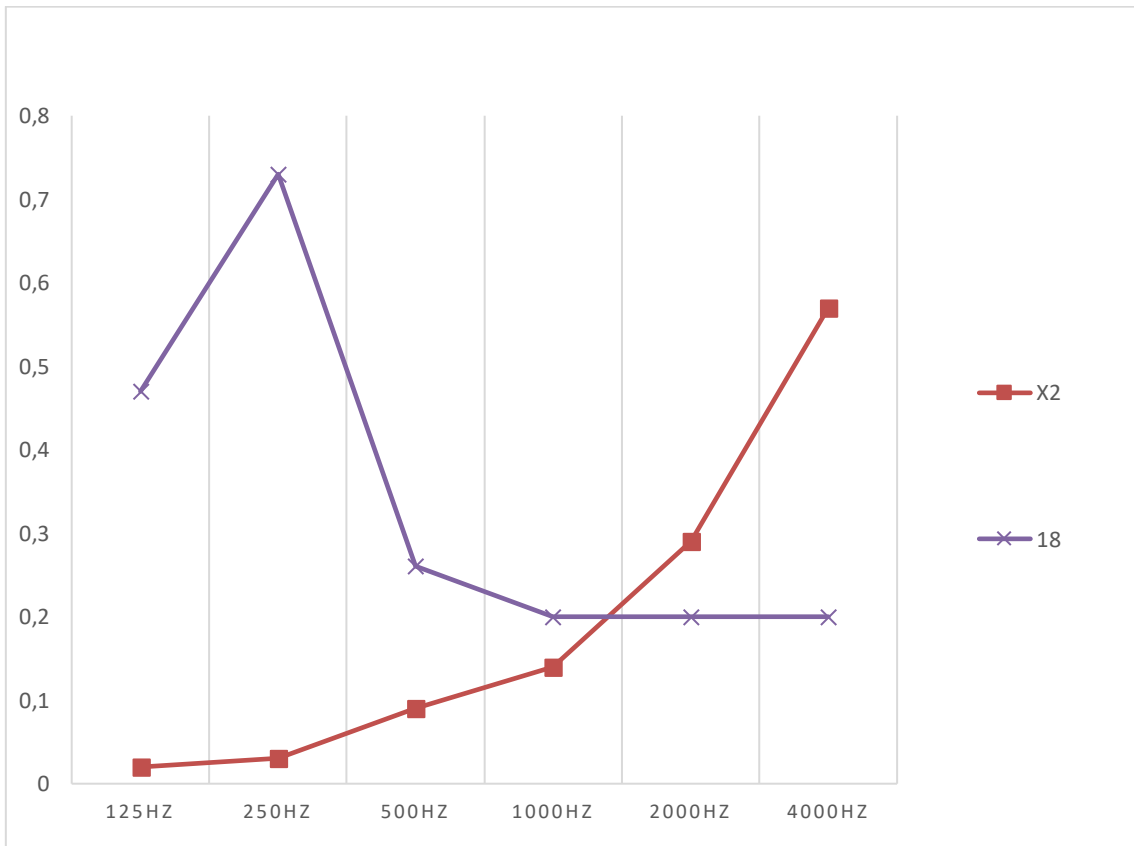


Figura 72. Espectro de absorción de las divisiones de los palcos con estructura de madera, forro de tela y, presumiblemente, aislamiento en su interior (bibliografía-rojo- y aplicación RSM- morado-)

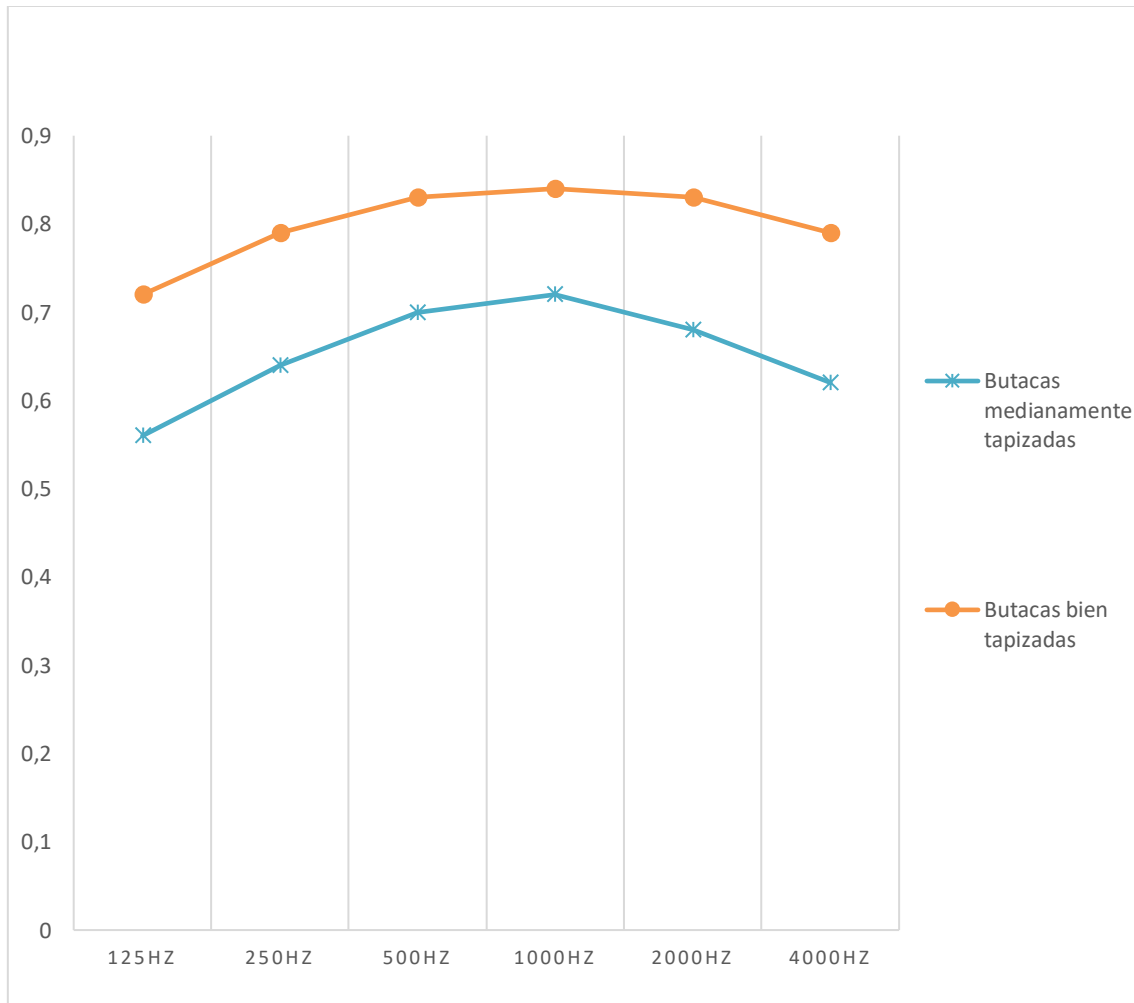


Figura 73. Espectro de absorción de las butacas (antes-cian- y después- naranja-)

Los espectros de absorción 17 y 18 se corresponden con los datos de la bibliografía de techo y de las divisiones entre palcos, respectivamente. X1 y X2, representan los ajustes realizados a cada uno de ellos tras la aplicación del RSM. En la Figura 73 se observa el cambio de absorción de las butacas medianamente tapizadas y bien tapizadas.

Se aceptan los nuevos valores de los materiales de la sala, en la Tabla 107 se muestran el coeficiente de absorción de las superficies tras el ajuste realizado con el telón bajado.

Tabla 107. Coeficientes de absorción de las superficies tras aplicación del RSM con telón bajado

Zona	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
Pavimento escenario	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Pavimento P1	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Pavimento pasillos (platea y palcos PB)	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25
Pavimento escalera acceso palcos PB y anfiteatro	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Paredes atamboradas zona fondo en PB y P1 y dos bandas laterales junto boca	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Paredes PB y P1	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05
Paredes zona boca de escena	0,10	0,04	0,05	0,05	0,08	0,18
Molduras antepecho palcos, boca escena	0,13	0,13	0,25	0,28	0,30	0,30
Molduras coronación paredes laterales y perímetro falso techo	0,20	0,20	0,25	0,28	0,30	0,30
Puertas acceso a sala y de palcos PB	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
Cortina boca de escena	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
Techo bajo palcos	0,14	0,10	0,06	0,04	0,04	0,03
Lámpara decorativa	0,64	0,40	0,20	0,13	0,17	0,05
Butacas anfiteatro y palcos	0,72	0,79	0,83	0,84	0,83	0,79
Falso techo teatro zona fondo anfiteatro	0,17	0,32	0,12	0,06	0,03	0,02
Paredes patio butacas acolchados	0,02	0,03	0,09	0,14	0,29	0,57
Falso techo zona general	0,30	0,20	0,20	0,10	0,05	0,05
Palcos divisiones	0,47	0,73	0,26	0,20	0,20	0,18

4.2.3.2 Aplicación del RSM con telón subido

Acabada la sala con la boca de escena cerrada (telón bajado), se procede a estudiar la sala con la boca de escena abierta (telón subido).

En el modelo virtual de la sala, se sustituye la cortina de la boca de escena por una superficie nueva, la abertura de escenario, que será nuestra incógnita. Se asignan los coeficientes hallados en el proceso anterior.

Las coordenadas de la fuente y de los receptores, son las mismas que en el caso anterior.

Se cambia el material de la boca de escena en el modelo ajustado anterior y se calcula el modelo para boca de escena abierta. En la Tabla 108 se muestran los coeficientes de absorción empleados en la modelización inicial con boca de escena abierta, reordenados.

Tabla 108. Superficies de la sala con distinta materialidad y comportamiento absorbente, asignación de número de superficie

Zona	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
Pavimento escenario	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Pavimento P1	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Pavimento pasillos (platea y palcos PB)	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25
Pavimento escalera acceso palcos PB y anfiteatro	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Paredes atamboradas zona fondo en PB y P1 y dos bandas laterales junto boca	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Paredes PB y P1	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05
Paredes zona boca de escena	0,10	0,04	0,05	0,05	0,08	0,18
Molduras antepecho palcos, boca escena	0,13	0,13	0,25	0,28	0,30	0,30
Molduras coronación paredes laterales y perímetro falso techo	0,20	0,20	0,25	0,28	0,30	0,30
Puertas acceso a sala y de palcos PB	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
Apertura boca de escena	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
Techo bajo palcos	0,14	0,10	0,06	0,04	0,04	0,03
Lámpara decorativa	0,64	0,40	0,20	0,13	0,17	0,05
Butacas anfiteatro y palcos	0,72	0,79	0,83	0,84	0,83	0,79
Falso techo teatro zona fondo anfiteatro	0,17	0,32	0,12	0,06	0,03	0,02
Paredes patio butacas acolchados	0,02	0,03	0,09	0,14	0,29	0,57
Falso techo zona general	0,30	0,20	0,20	0,10	0,05	0,05
Palcos divisiones	0,47	0,73	0,26	0,20	0,20	0,18

Se obtiene el tiempo de reverberación TR_{30} medio. El TR_{30} obtenido tras el cálculo se compara con el de la medición realizada "in situ", tal y como se ve en la Tabla 109 y en la Figura 74.

Tabla 109. Comparativa TR_{30} medición real y modelo virtual

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Medición "in situ" telón subido	1,014	0,957	1,017	1,057	1,006	0,910
Modelización Olympia	1,01	0,98	1,04	1,07	1,01	0,90

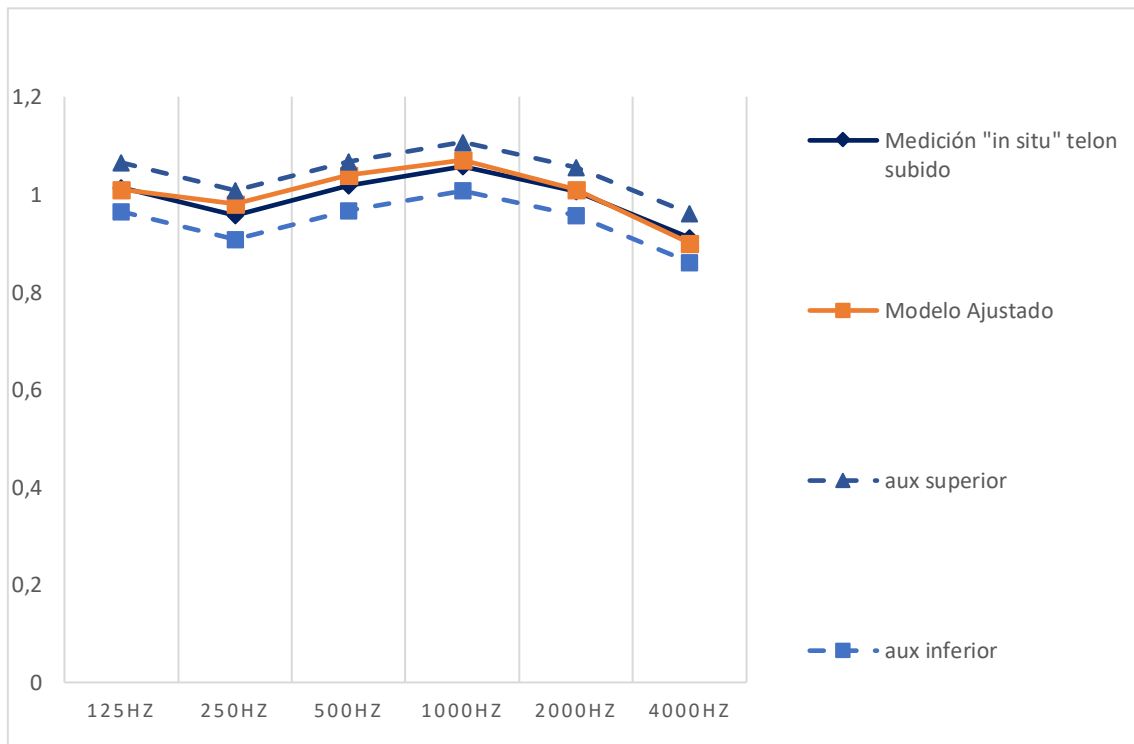


Figura 74. Comparativa TR_{30} , medición "in situ" con telón subido y modelización inicial con boca de escena abierta

En Figura 74 se representa el tiempo de reverberación medio, TR_{30} , medido "in situ" de la sala con telón subido, los márgenes superior e inferior y el resultado del TR_{30} de la modelización con los ajustes realizados con telón bajado. En todas las frecuencias los valores del tiempo de reverberación del modelo se encuentran dentro de los límites aceptables. La sala está ajustada. Se aceptan los coeficientes de absorción de los materiales empleados.

Se aceptan los valores del espectro de absorción de los materiales vistos en Tabla 108.

4.2.4 Resultados

El espectro de absorción de la boca de escena de la sala obtenido tras aplicación del RSM, se muestra a continuación:

Tabla 110. Coeficiente de absorción de la boca de escena

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Tras análisis RSM	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55

A continuación, se compara el tiempo de reverberación del modelo ajustado con telón subido con los obtenidos empleando los espectros de absorción para la boca de escena de diversas fuentes. El resultado se muestra en la Tabla 111 y en la Figura 75.

Tabla 111. TR₃₀ obtenido en el modelo ajustado con telón subido, y empleando los coeficientes de absorción de otros autores

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Medición “in situ” telón subido	1,014	0,957	1,017	1,057	1,006	0,910
Modelo ajustado	1,010	0,980	1,040	1,070	1,010	0,900
Carrión	1,01	0,98	1,04	1,07	0,99	0,90
Arau	1,01	0,98	1,04	1,07	1,01	0,90
Knudsen y Harris	1,01	0,98	1,04	1,07	0,99	0,90
Cavanaugh y Wilkes	1,01	0,98	1,05	1,07	1,00	0,89
Barron	0,99	0,99	1,05	1,08	1,00	0,89

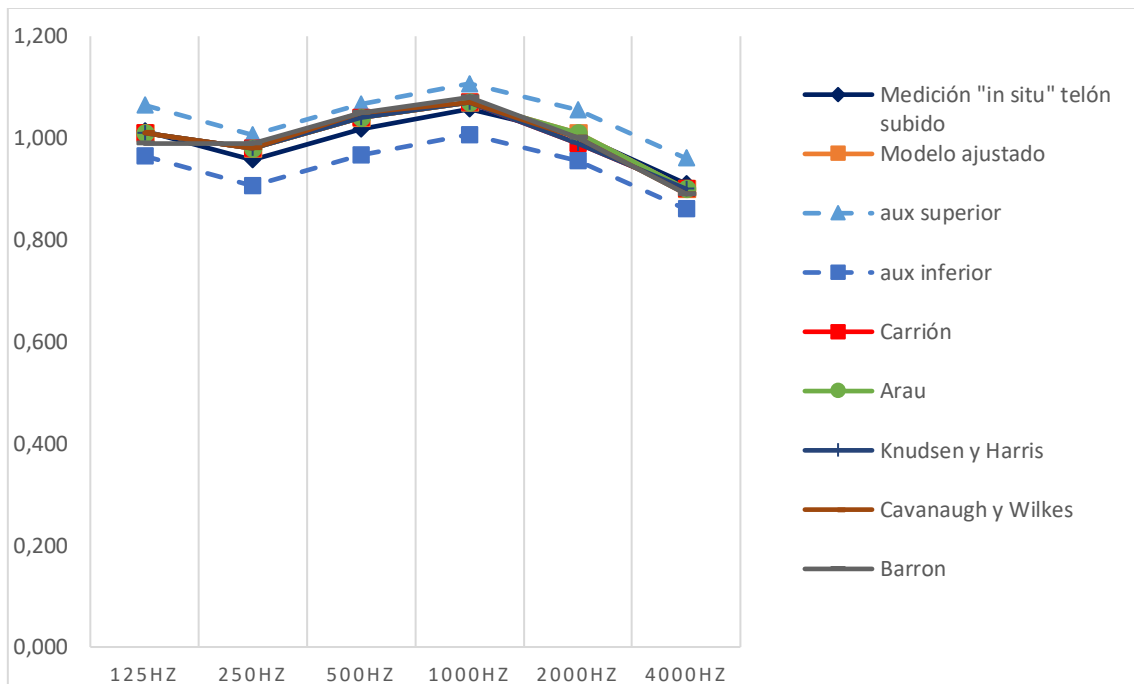


Figura 75 . Comparativa TR₃₀ telón subido. Medición real con límites superior e inferior, modelo ajustado, y modelos empleando los coeficientes de absorción de boca de escena de distintos autores

Todos los espectros de absorción propuestos por los distintos autores encajan dentro de los márgenes aceptables para el “target”.

Para observar la influencia de la boca de escena en el comportamiento absorbente del modelo, se calcula éste con valores distintos de absorción para la boca de escena (0,10; 0,50 y 0,90) y se obtienen los espectros del TR₃₀ en cada caso.

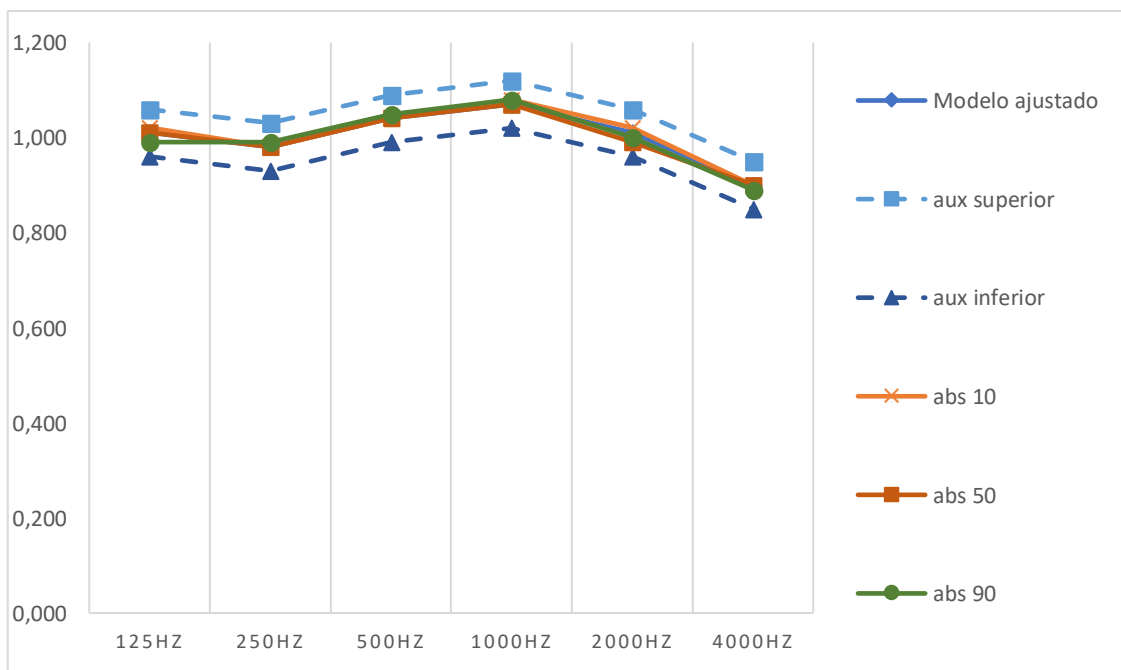


Figura 76. Comparativa TR₃₀ con telón subido con distintos valores de absorción para la boca de escena

4.3 Sala 3. Teatro Talía. Valencia

4.3.1 Descripción de la sala

4.3.1.1 *Datos generales*

Dirección

Calle Caballeros nº 31, Valencia

Fecha de construcción

1927

Arquitecto

Javier Goerlich Lleó

Última reforma por los arquitectos Carlos V. Montesinos Cornejo y Victoria Martí (proyecto de 1995, final de obra 1998)

4.3.1.2 *Características morfológicas y constructivas*

El Teatro Talía fue diseñado por el arquitecto valenciano Javier Goerlich Lleó in 1927. Pertenece a la institución benéfica de carácter católico Casa de los Obreros de San Vicente Ferrer, es propiedad de la Generalitat Valenciana, pero está gestionado por la empresa Olympia Metropolitana. Originalmente estaba conectado con el edificio adyacente que albergaba las oficinas de la institución [56].

El patio de butacas de forma ligeramente en abanico tiene una medidas aproximadas de 13 metros de anchura por casi 13 metros de largo. Se trata de un teatro pequeño con un aforo de 374 localidades, que le otorgan una sensación de gran intimidad y cercanía a los actores. Se distribuye en platea en planta baja, tres pisos de palcos y anfiteatro en planta primera [54], [57].

Las medidas del escenario son casi 13 metros de anchura por 8 metros de profundidad, y tiene una altura de algo más de un metro con respecto al patio de butacas. La boca de escena mide 6,50 metros de ancho por 5,70 metros de alto. La altura aproximada de la caja de escena es de 13 metros, y su volumen aproximado es de 1.400 m³. El volumen

total aproximado de la sala es de 2.300 m³. La corbata es muy estrecha, su profundidad no llega al metro [47].

El principal material empleado en la sala es acabado enlucido sobre muro de ladrillo, apareciendo este en la mayor parte de paramentos verticales a excepción de unas zonas falseadas junto a los accesos del fondo de la sala, y el frente de escenario.

Las puertas de acceso a la sala y a pisos superiores son de madera maciza, cubierta con cortinas.

Los antepechos tienen acabado curvo liso con una escueta decoración. Tanto la boca de escena está decorada con molduras de yeso, así como el perímetro del techo.

Las divisiones entre palcos están realizadas con paneles de cartón yeso o madera pintados.

El techo general de la sala es de yeso sobre perfilería con cámara de aire de distinta profundidad y aislamiento. Bajo los forjados de los palcos el acabado es de yeso liso. Existe una lámpara decorativa (tipo lucernario de vidrio) de grandes dimensiones en el centro del techo de la sala.

La cabina no está cerrada al espacio de la sala.

El pavimento de platea es parqué de madera sobre rastreles con una pendiente del 3%, el pasillo central está cubierto con alfombra. El pavimento de las plantas superiores es de baldosa hidráulica, excepto en la zona de anfiteatro que hay moqueta. Las escaleras de acceso a plantas superiores son de mármol blanco.

En cuanto al escenario, el pavimento es de tarima de madera, los paramentos verticales son de enlucido tosco sobre ladrillo. Las pasarelas de tramex están recubiertas con una lámina de caucho que se extiende sobre la estructura metálica. La cubierta de la caja de escena es de fibrocemento a dos aguas sobre estructuras metálicas.

4.3.1.3 Fotografías

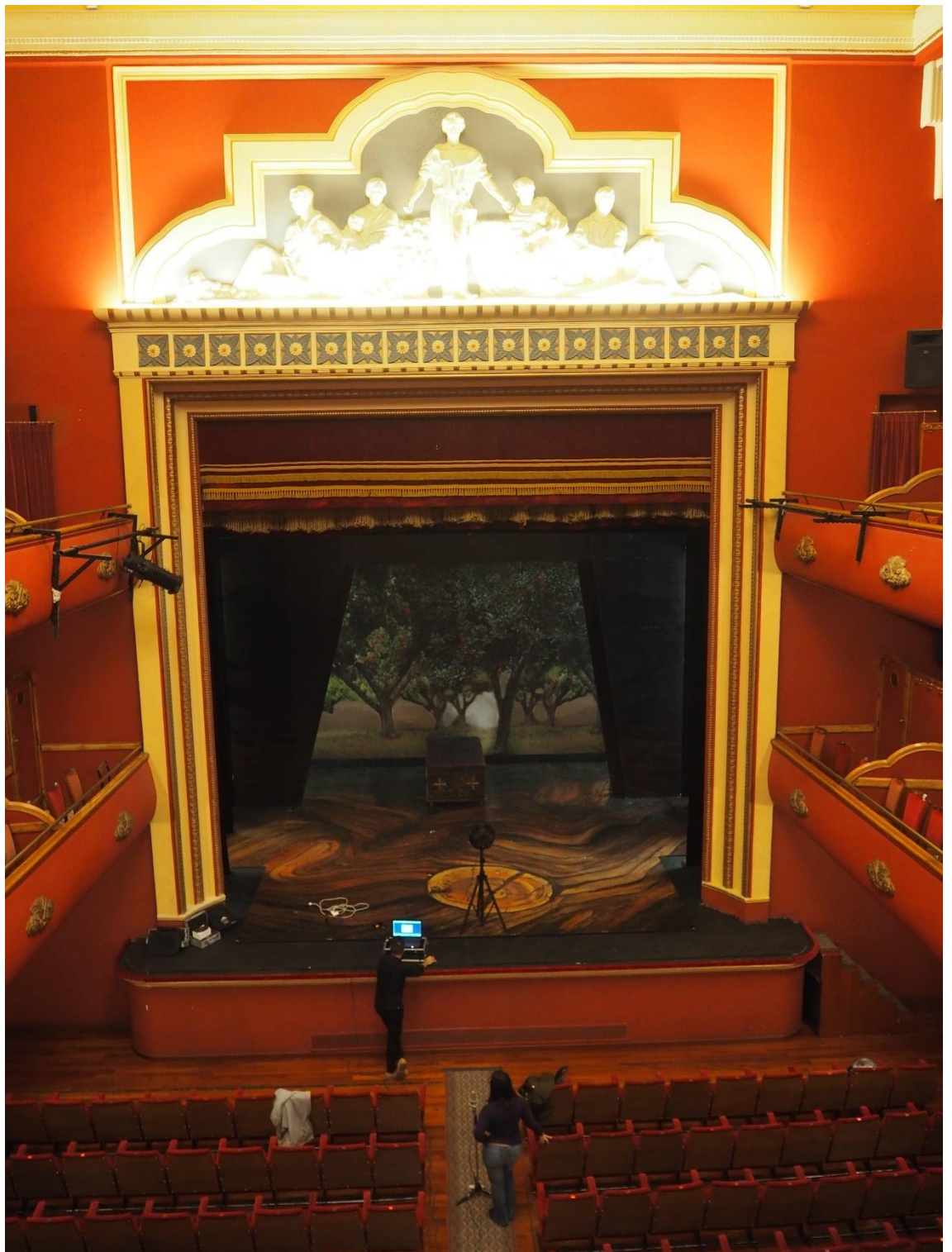


Figura 77. Vista del escenario.



Figura 78. Vista de la sala

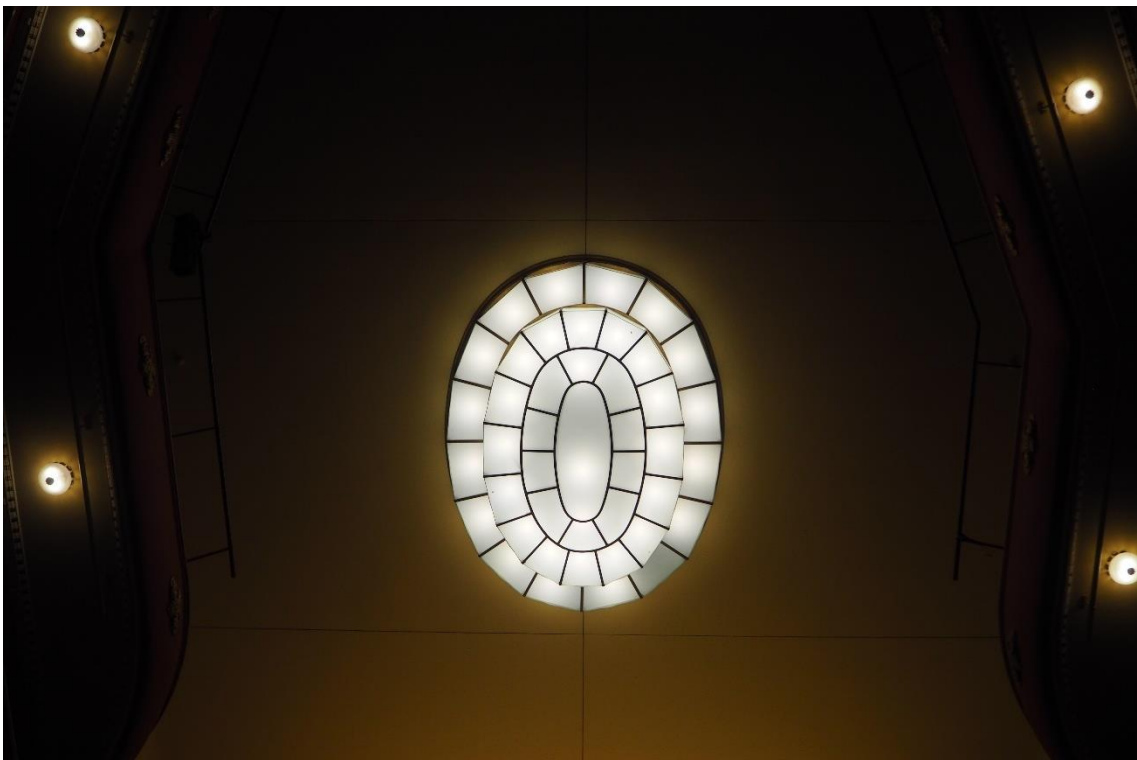


Figura 79. Lámpara decorativa



Figura 80. Decoración sobre boca de escena



Figura 81. Butacas anfiteatro

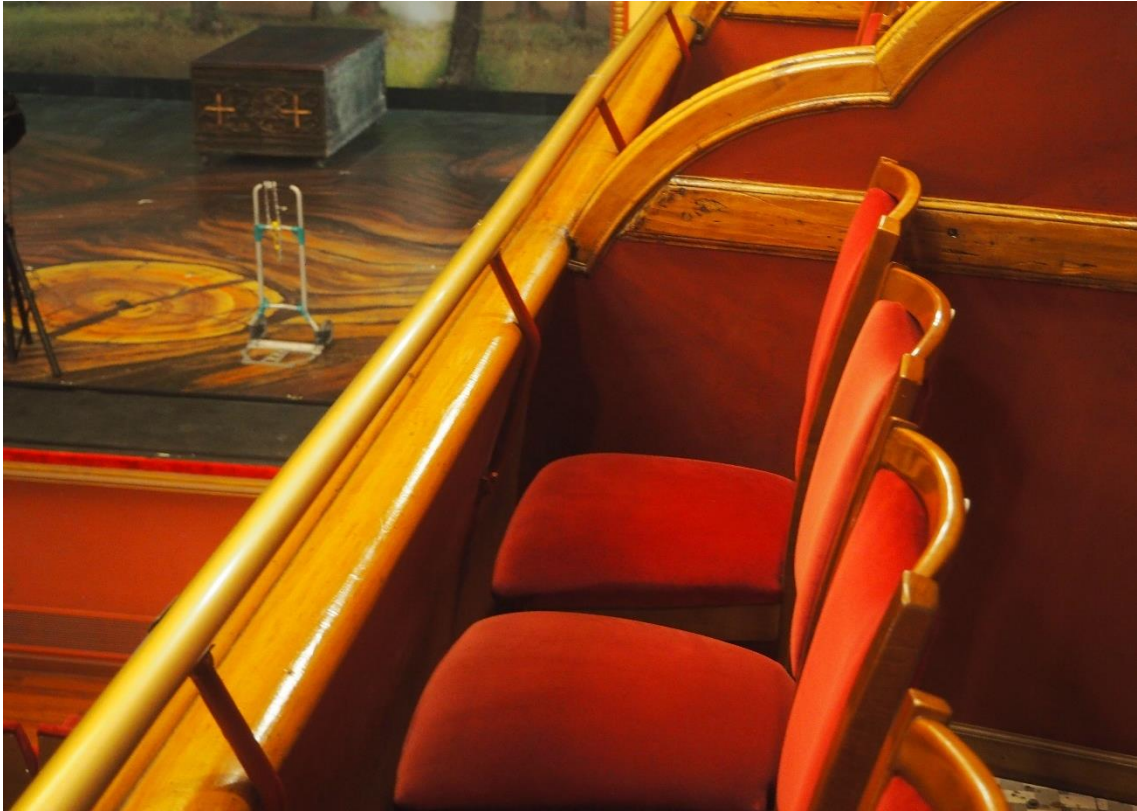


Figura 82. Butacas de palcos



Figura 83. Palcos



Figura 84. Instalaciones en el pavimento de platea

4.3.1.4 Planos

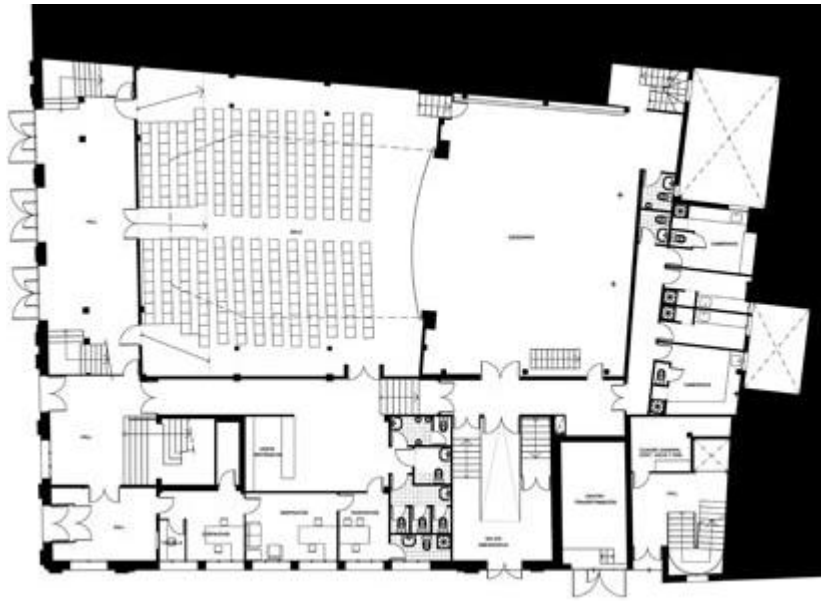


Figura 85. Planta (Fuente: Carlos Vicente Montesinos)

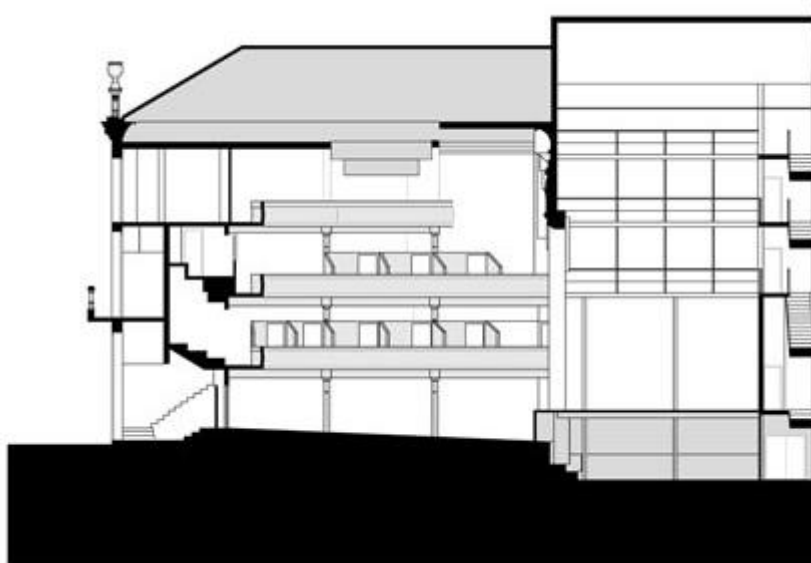


Figura 86. Sección (Fuente: Carlos Vicente Montesinos)

4.3.1.5 Comportamiento absorbente de los materiales

Se detallan a continuación los coeficientes de absorción de las distintas soluciones constructivas que se encuentran en la sala.

Tabla 112. Coeficientes de absorción asignados a las distintas soluciones constructivas de la sala

Zona	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
Techo escenario	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Pavimento catwalks	0,04	0,04	0,07	0,11	0,03	0,01
Pavimento escenario	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Pavimento PB	0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,20
Pavimento P1 y P2	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Pavimento anfiteatro P1	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25
Pavimento escaleras acceso	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Lámpara de techo	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Frente de escenario	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Puertas acceso a plantas	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
Boca de escena	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
Cortinas sobre puertas acceso a plantas y puertas palcos P2	0,07	0,31	0,49	0,75	0,70	0,60
Palcos antepecho, moldura alrededor boca escenario	0,13	0,13	0,25	0,28	0,30	0,30
Paredes patio butacas, paredes interiores escenario	0,013	0,015	0,02	0,028	0,04	0,05
Paredes patio butacas	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Butacas	0,49	0,66	0,80	0,88	0,82	0,70
Palcos divisiones	0,08	0,11	0,05	0,03	0,02	0,03
Techos	0,26	0,20	0,10	0,07	0,04	0,07

4.3.2 Medición de parámetros

4.3.2.1 Toma de datos "in situ"

Para definir los puntos (x,y,z) tanto de la fuente como de los distintos receptores, tomamos como centro de origen la parte más baja de la corbata en su encuentro con el plano de platea, así medimos cada punto con respecto al origen que hemos determinado y lo trasladamos a ODEON.

Se toman los datos de la colocación de la fuente dodecaédrica: A 1,30 metros de altura sobre el escenario (que está a 1,21 metros de altura sobre el origen de coordenadas determinado) y a 1,05 metros de la boca del mismo. Altura del micrófono 1,10 metros. (Mediciones de los puntos 1 a 18, con telón subido, mediciones de los puntos 19 a 36, con telón bajado)

En la Tabla 113 se indican las coordenadas de la fuente sonora y de los distintos receptores.

Tabla 113. Coordenadas de la fuente y de los receptores

Abierto	Cerrado	X	Y	Z
Fuente		1,00	-0,32	2,51
PTO_1	PTO_36	-2,63	0,12	1,21
PTO_2	PTO_35	-9,88	0,72	1,52
PTO_3	PTO_34	-11,90	3,50	1,60
PTO_4	PTO_33	-6,51	4,97	1,37
PTO_5	PTO_32	-2,83	4,92	1,22
PTO_6	PTO_31	-4,74	-4,48	1,30
PTO_7	PTO_30	-9,10	-3,71	1,48
PTO_8	PTO_29	-14,34	0,52	5,13
PTO_9	PTO_28	-13,46	-1,71	4,83
PTO_10	PTO_27	-11,59	0,63	4,23
PTO_11	PTO_26	-9,35	5,04	4,23
PTO_12	PTO_25	-5,18	5,15	4,23
PTO_13	PTO_24	-8,90	-3,95	4,23
PTO_14	PTO_23	-4,29	-4,45	4,23
PTO_15	PTO_22	-7,00	5,37	7,38
PTO_16	PTO_21	-2,80	4,79	7,38
PTO_17	PTO_20	-10,30	-3,62	7,22
PTO_18	PTO_19	-7,06	-4,25	7,38

4.3.2.2 Parámetros acústicos

Mediante la utilización del software DIRAC se han realizado las mediciones in situ de la sala, con telón bajado y con telón subido. De esta manera se han obtenido los parámetros acústicos en cada situación.

4.3.2.2.1 Parámetros acústicos con telón bajado

Tabla 114. Inteligibilidad

STI male	0,59
STI female	0,60

Tabla 115. Parámetros temporales

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
EDT	1,453	1,409	1,279	1,173	1,079	0,911
TR₃₀	1,596	1,528	1,458	1,375	1,273	1,064
TR₂₀	1,602	1,518	1,439	1,358	1,247	1,049
TR₁₀	1,621	1,600	1,436	1,310	1,214	1,003

Tabla 116. Claridad

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
C₅₀	-1,94	-0,70	0,00	0,00	0,87	2,13
C₈₀	1,22	2,01	2,83	2,76	3,71	5,11

Tabla 117. Definición

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
D₅₀	0,39	0,46	0,50	0,50	0,55	0,62

4.3.2.2.2 Parámetros acústicos con telón subido

Tabla 118. Inteligibilidad

STI male	0,60	0,59
STI female	0,61	0,60

Tabla 119. Parámetros temporales

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
EDT	1,359	1,260	1,225	1,141	1,028	0,859
TR₃₀	1,579	1,49	1,437	1,345	1,258	1,055
TR₂₀	1,570	1,495	1,427	1,332	1,243	1,033
TR₁₀	1,581	1,552	1,411	1,264	1,172	0,956

Tabla 120. Claridad

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
C₅₀	-1,76	0,17	0,17	0,70	1,40	2,69
C₈₀	1,64	2,88	3,14	3,41	4,32	5,77

Tabla 121. Definición

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
D₅₀	0,40	0,51	0,51	0,54	0,58	0,65

4.3.3 Aplicación del método de superficies de respuesta

Se realiza el modelo virtual de la sala en Autocad y se importa el modelo a ODEON. Se comprueba que el modelo es correcto: que no tiene fugas ("deadballs"), que no hay rayos perdidos, y que las aristas del modelo están en contacto entre sí.

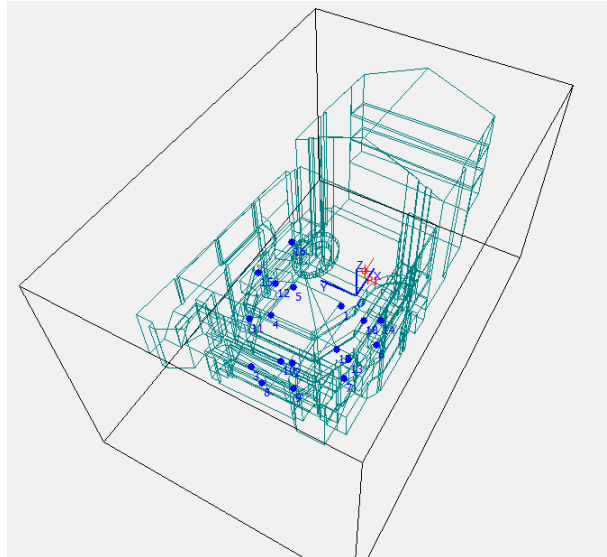


Figura 87. Posición de la fuente y los receptores en el modelo

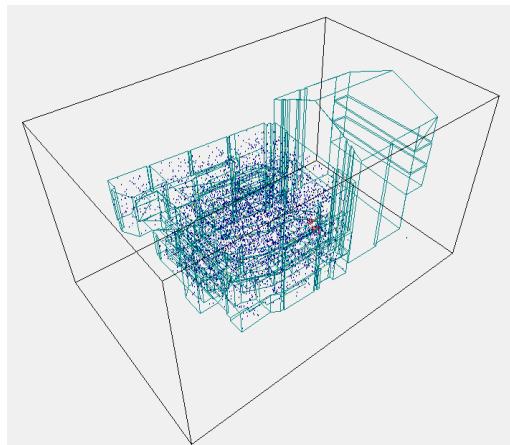


Figura 88. Captura del test 3D Billard

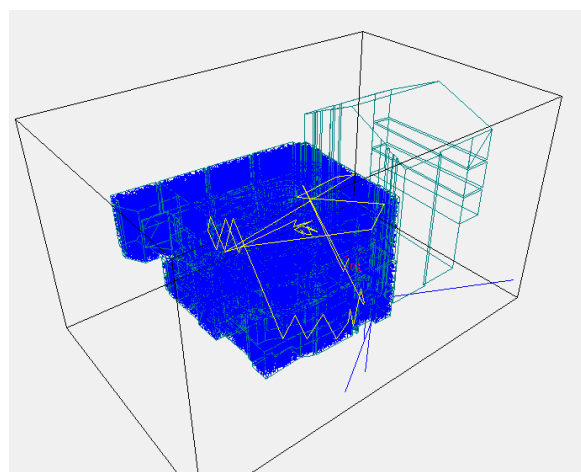


Figura 89. Captura del test rayos perdidos

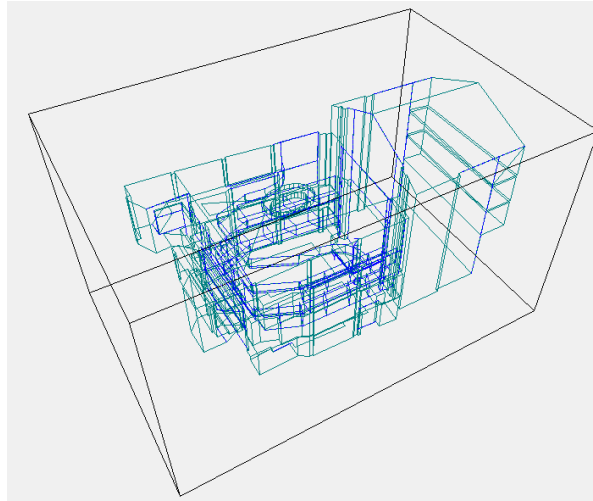


Figura 90. Captura del test de aristas únicas

Se introducen las coordenadas de la fuente y de los receptores, y se asignan los materiales de las distintas superficies, empleando los coeficientes de la Tabla 112.

4.3.3.1 Aplicación del RSM con telón bajado

En el modelo virtual de la sala con telón bajado, a la superficie de la boca de escena se le asigna el material de telón. Se calcula el modelo y se obtiene el tiempo de reverberación TR_{30} medio. El TR_{30} obtenido se compara con el de la medición realizada “in situ”, tal y como se ve en la Tabla 122.

Tabla 122. TR_{30} medio de la medición in situ y de la modelización con telón bajado

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
<i>Medición in situ</i>	1,596	1,528	1,458	1,375	1,273	1,064
<i>Modelización Talía</i>	1,75	1,65	1,58	1,43	1,33	1,10

En la Figura 91 se representan el tiempo de reverberación medio, TR_{30} , medido in situ, los límites superior e inferior en los que el resultado del modelo es aceptable y el resultado del TR_{30} de la modelización inicial. Se observa que el valor a altas frecuencias está ajustado. A bajas frecuencias se necesita mayor absorción.

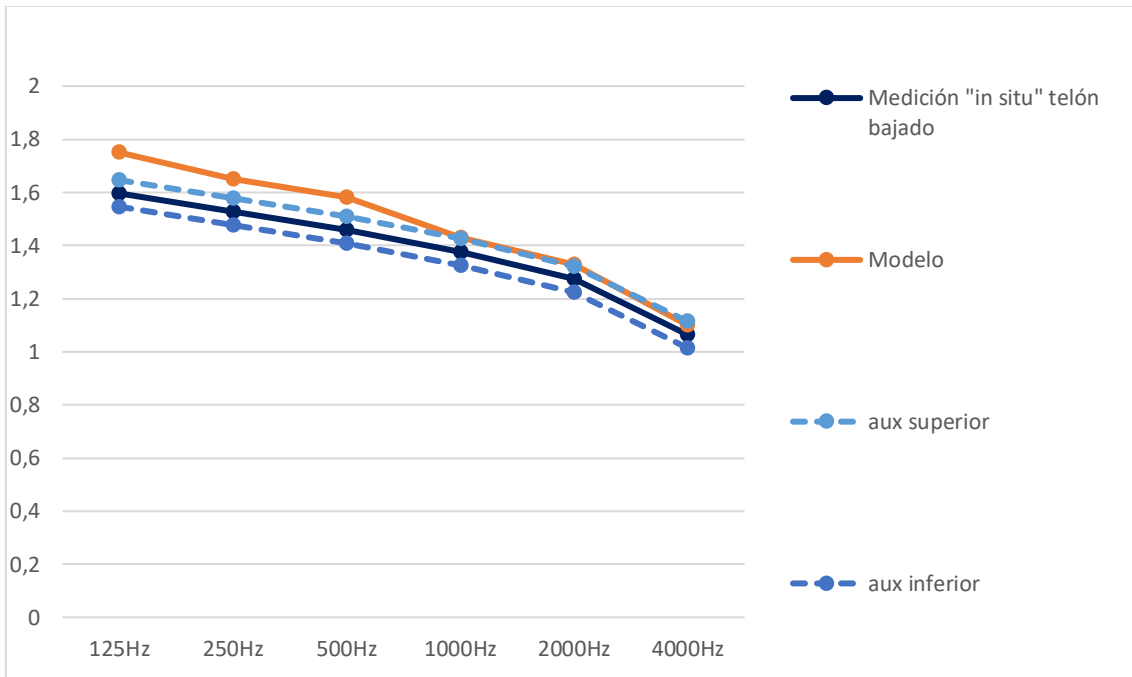


Figura 91. Representación gráfica del TR₃₀ medido "in situ" con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables y la modelización inicial

4.3.3.1.1 Ajuste mediante método de superficies de respuesta

A continuación, se va a emplear el RSM para ajustar el modelo virtual a la medición real.

En primer lugar, se reordena la tabla de coeficientes de absorción de los materiales de la sala y se les asigna un número, tal y como se refleja en la Tabla 123.

Tabla 123. Coeficientes de absorción de las superficies de la sala y asignación de número de superficie.

Zona	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	Nº SUP
Pavimento escenario	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10	1
Pavimento PB	0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,20	2
Pavimento P1 y P2	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	3
Pavimento anfiteatro P1	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25	4
Pavimento escaleras acceso	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	5
Lámpara de techo/lucernario	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	6
Frente de escenario	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09	7
Puertas acceso a plantas	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	8
Boca de escena	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65	9
Cortinas sobre puertas acceso a plantas y puertas palcos P2	0,07	0,31	0,49	0,75	0,70	0,60	10
Palcos antepecho, moldura alrededor boca escenario	0,13	0,13	0,25	0,28	0,30	0,30	11
Techo fondo y bajo palcos	0,14	0,1	0,06	0,04	0,04	0,03	12
Paredes patio butacas (sonido solido), paredes interiores escenario	0,013	0,015	0,02	0,028	0,04	0,05	13
Paredes patio butacas (sonido hueco)	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09	14
Palcos divisiones	0,08	0,11	0,05	0,03	0,02	0,03	15
Butacas	0,49	0,66	0,80	0,88	0,82	0,70	X1
Techo general	0,26	0,20	0,10	0,07	0,04	0,07	X2

Se eligen como superficies incógnita el falso techo general de la sala y las butacas.

Se define la región de estudio en la aplicación del RSM.

$$X_{1i} = B_{1i} \pm R_{1i}$$

Siendo:

B_{1i} los valores tomados de la bibliografía y

R_{1i} , incrementos que oscilan entre 0 y 0,5

De forma análoga se realiza para X_{2i}

En la Tabla 124 se muestran los coeficientes de absorción de las superficies empleados en la simulación y las regiones de estudio.

Tabla 124. Coeficientes de absorción empleados en la simulación

	Nº SUP	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
	1	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
	2	0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,20
	3	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
	4	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25
	5	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
	6	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
	7	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
	8	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
	9	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
	10	0,07	0,31	0,49	0,75	0,70	0,60
	11	0,13	0,13	0,25	0,28	0,30	0,30
	12	0,14	0,1	0,06	0,04	0,04	0,03
	13	0,013	0,015	0,02	0,028	0,04	0,05
	14	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
	15	0,08	0,11	0,05	0,03	0,02	0,03
Butacas	X1	$X_{1_{125}}$	$X_{1_{250}}$	$X_{1_{500}}$	$X_{1_{1000}}$	$X_{1_{2000}}$	$X_{1_{4000}}$
Techo general	X2	$X_{2_{125}}$	$X_{2_{250}}$	$X_{2_{500}}$	$X_{2_{1000}}$	$X_{2_{2000}}$	$X_{2_{4000}}$

4.3.3.1.2 Ajuste 1

Se especifican los valores de las dos regiones de estudio, se toman los valores de la bibliografía y se asignan unos incrementos a cada una de ellas.

En la Tabla 125 y en la

Tabla 126, se observan los valores asignados a las regiones de estudio X1 y X2, respectivamente.

Tabla 125. Región de estudio de la superficie X1

X1	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
B1i-R1i	0,340	0,510	0,650	0,780	0,720	0,550
B1i	0,49	0,66	0,80	0,88	0,82	0,70
B1i+R1i	0,640	0,810	0,950	0,980	0,920	0,850
INCREMENTOS R1	0,15	0,15	0,15	0,1	0,1	0,15

Tabla 126. Región de estudio de la superficie X2

X2	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
B2i-R2i	0,110	0,050	0,050	0,050	0,040	0,070
B2i	0,26	0,20	0,10	0,07	0,04	0,07
B2i+R2i	0,410	0,350	0,150	0,090	0,040	0,070
INCREMENTOS R2	0,15	0,15	0,05	0,02	0	0

Se obtienen los siguientes pares de espectros de absorción, Tabla 127.

Tabla 127. Combinaciones de pares de espectros de absorción de las regiones X1 y X2.

combinación	puntos	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	
1	B1i-R1i	0,340	0,510	0,650	0,780	0,720	0,550	X11
	B2i-R2i	0,110	0,050	0,050	0,050	0,040	0,070	X21
2	B1i-R1i	0,340	0,510	0,650	0,780	0,720	0,550	X11
	B2i	0,26	0,2	0,1	0,07	0,04	0,07	X22
3	B1i-R1i	0,340	0,510	0,650	0,780	0,720	0,550	X11
	B2i+R2i	0,410	0,350	0,150	0,090	0,040	0,070	X23
4	B1i	0,490	0,660	0,800	0,880	0,820	0,700	X12
	B2i-R2i	0,110	0,050	0,050	0,050	0,040	0,070	X21
5	B1i	0,490	0,660	0,800	0,880	0,820	0,700	X12
	B2i	0,260	0,200	0,100	0,070	0,040	0,070	X22
6	B1i	0,490	0,660	0,800	0,880	0,820	0,700	X12
	B2i+R2i	0,410	0,350	0,150	0,090	0,040	0,070	X23
7	B1i+R1i	0,640	0,810	0,950	0,980	0,920	0,850	X13
	B2i-R2i	0,110	0,050	0,050	0,050	0,040	0,070	X21
8	B1i+R1i	0,640	0,810	0,950	0,980	0,920	0,850	X13
	B2i	0,260	0,200	0,100	0,070	0,040	0,070	X22
9	B1i+R1i	0,640	0,810	0,950	0,980	0,920	0,850	X13
	B2i+R2i	0,410	0,350	0,150	0,090	0,040	0,070	X23

Estas combinaciones se prueban en ODEON para obtener los tiempos de reverberación nuevos.

Se introducen las nueve combinaciones en ODEON y se calcula el tiempo de reverberación para cada una de ellas. El resultado se puede ver en la Tabla 128. El tiempo de reverberación de las combinaciones se designa de aquí en adelante en minúsculas acompañado de un número que hace referencia a la combinación de origen de la que es su resultado.

Tabla 128. TR₃₀ obtenidos de las combinaciones definidas anteriormente

TR ₃₀	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
tr1	2,29	2,16	1,76	1,50	1,37	1,15
tr2	1,88	1,74	1,64	1,46	1,37	1,15
tr3	1,75	1,58	1,55	1,44	1,37	1,15
tr4	2,15	2,02	1,67	1,46	1,33	1,10
tr5	1,75	1,65	1,58	1,43	1,33	1,10
tr6	1,65	1,51	1,49	1,39	1,33	1,10
tr7	2,03	1,93	1,62	1,42	1,30	1,05
tr8	1,68	1,57	1,51	1,38	1,30	1,05
tr9	1,58	1,45	1,42	1,35	1,3	1,05

En la Figura 92 se observa que todos los puntos objetivo se encuentran dentro de los espectros del TR₃₀ de las distintas combinaciones.

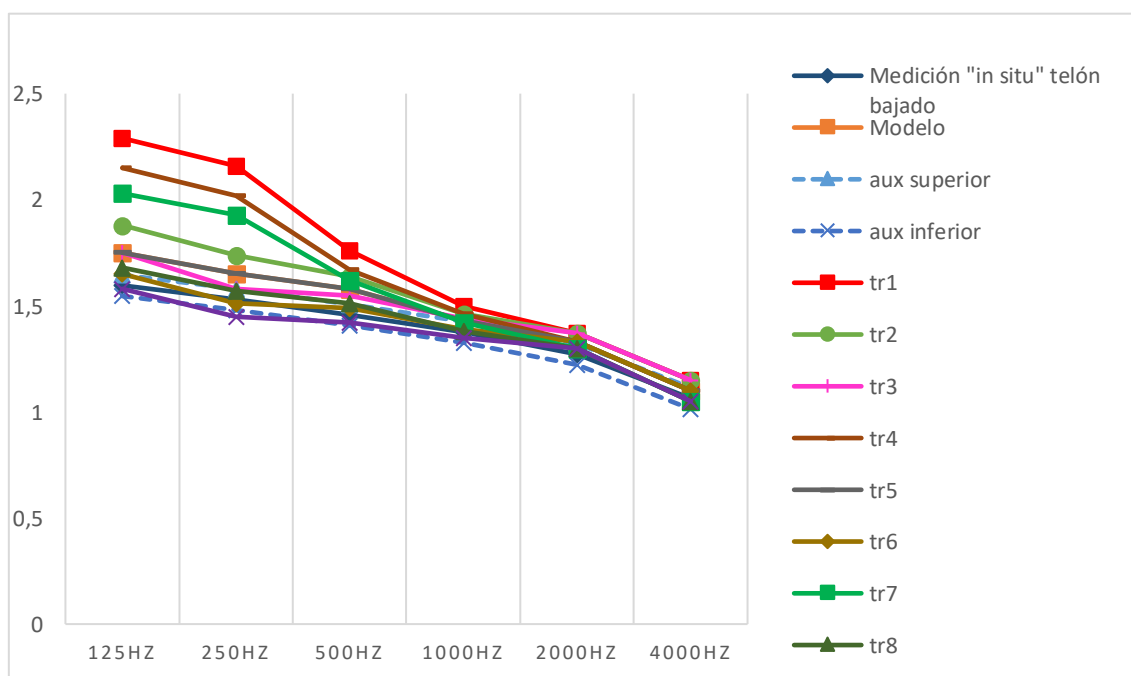


Figura 92. Comparativa TR₃₀. Medición "in situ", modelización y resultados tras aplicación del RSM

Para obtener las superficies de respuesta, se agrupan los datos por frecuencia, formando nueve combinaciones de ternas de puntos por frecuencia. A partir de dichas superficies se obtienen nuevos pares de puntos que satisfacen el “target”.

Ternas de datos por frecuencia y representación mediante superficie de respuesta:

Tabla 129. Ternas de datos a 125 Hz

125HZ			
	X1	X2	TR
	0,34	0,11	2,29
	0,34	0,26	1,88
	0,34	0,41	1,75
	0,49	0,11	2,15
	0,49	0,26	1,75
	0,49	0,41	1,65
	0,64	0,11	2,03
	0,64	0,26	1,68
	0,64	0,41	1,58

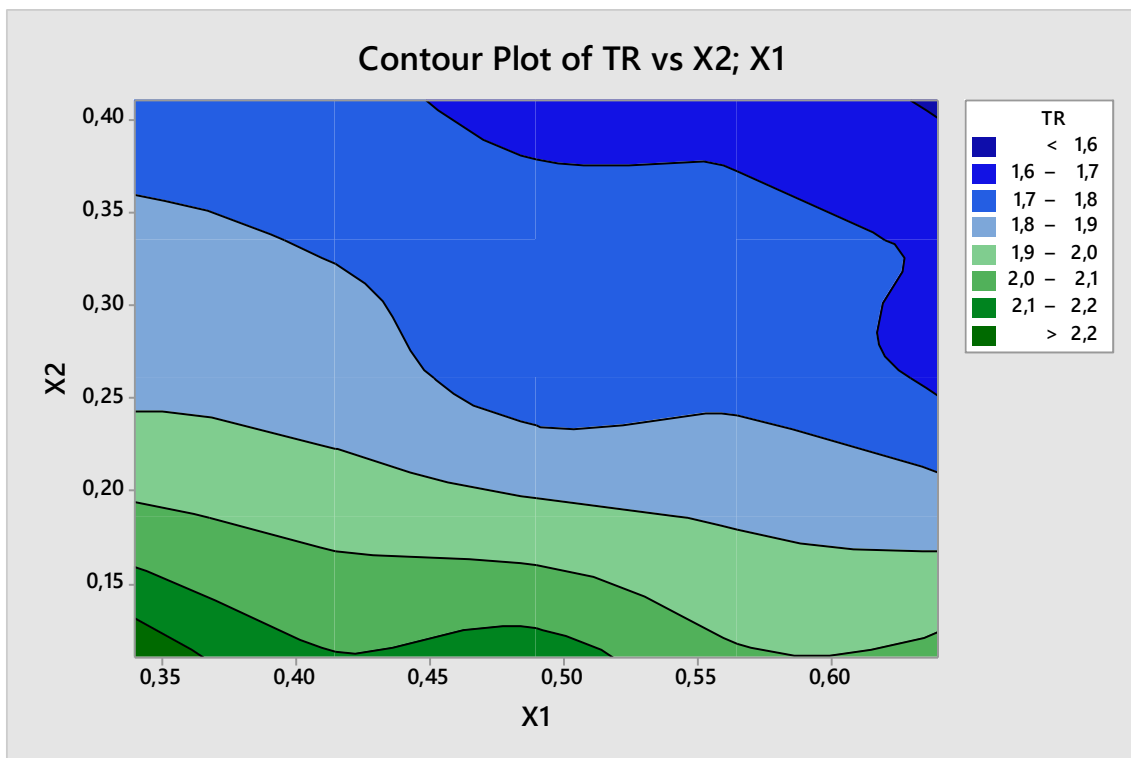


Figura 93. Superficie de respuesta a 125 Hz.

Tabla 130. Pares de puntos a 125 Hz

X1	0,49	0,50	0,55	0,52	0,62
X2	0,30	0,29	0,27	0,28	0,29

Tabla 131. Ternas de datos a 250 Hz

250HZ			
	X1	X2	TR
	0,51	0,05	2,16
	0,51	0,2	1,74
	0,51	0,35	1,58
	0,66	0,05	2,02
	0,66	0,2	1,65
	0,66	0,35	1,51
	0,81	0,05	1,93
	0,81	0,2	1,57
	0,81	0,35	1,45

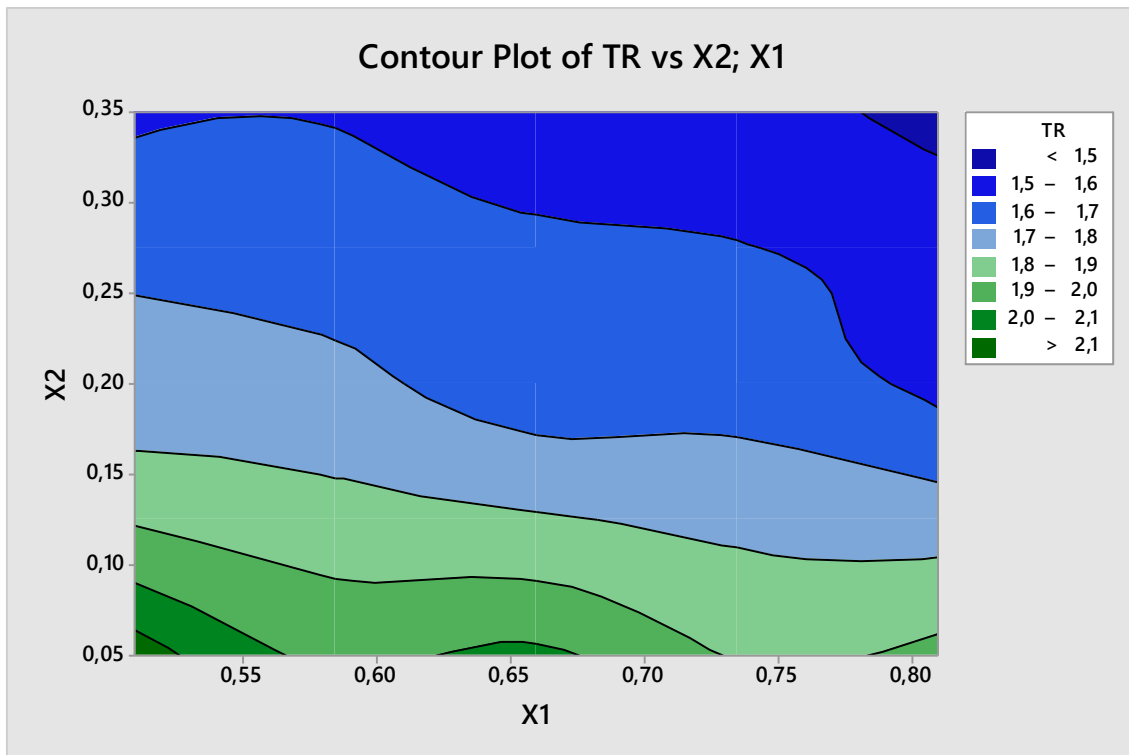


Figura 94. Superficie de respuesta a 250 Hz

Tabla 132. Pares de puntos a 250 HZ

X1	0,65	0,66	0,76	0,75
X2	0,27	0,27	0,20	0,23

Tabla 133. ternas de datos a 500 Hz

500HZ			
	X1	X2	TR
	0,65	0,05	1,76
	0,05	0,1	1,64
	0,65	0,15	1,55
	0,1	0,05	1,67
	0,65	0,1	1,58
	0,15	0,15	1,49
	0,8	0,05	1,62
	0,05	0,1	1,51
	0,8	0,15	1,42

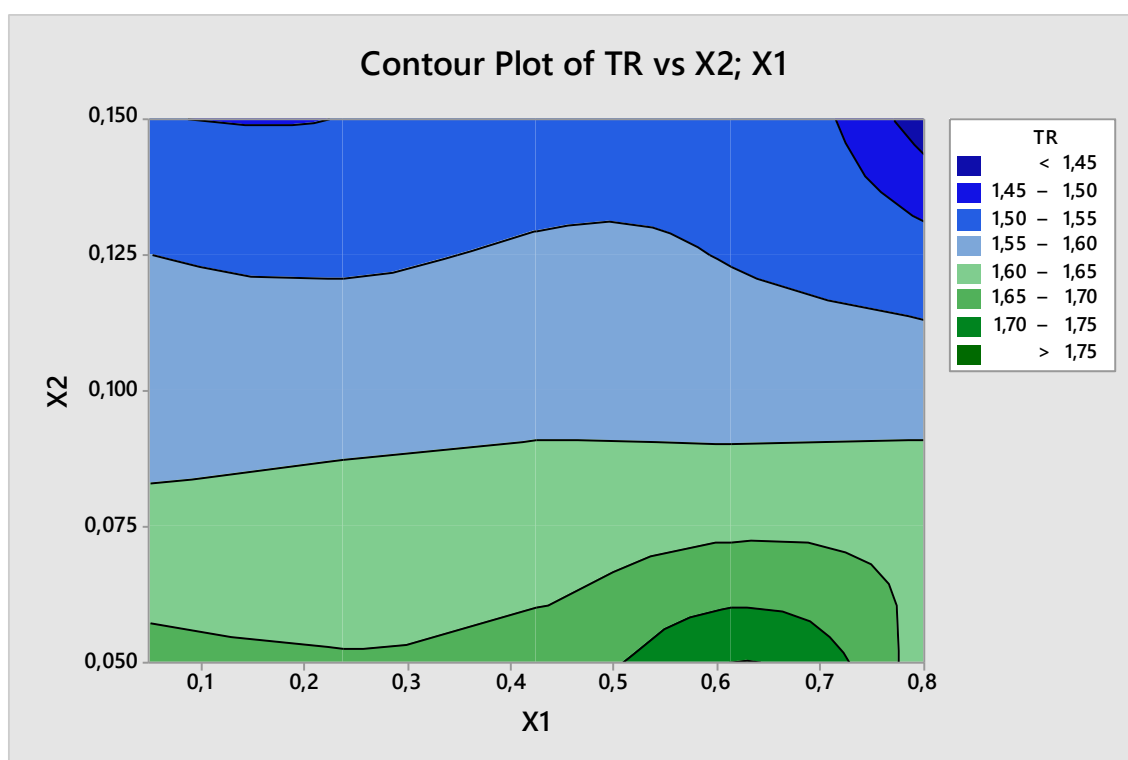


Figura 95 . Superficie de respuesta a 500 Hz

Tabla 134. Pares de puntos a 500 Hz

X1	0,78	0,79	0,75	0,80	0,80
X2	0,11	0,11	0,11	0,11	0,15

Tabla 135. Ternas de datos a 1000 Hz

1000HZ			
	X1	X2	TR
	0,78	0,05	1,5
	0,78	0,07	1,46
	0,78	0,09	1,44
	0,88	0,05	1,46
	0,88	0,07	1,43
	0,88	0,09	1,39
	0,98	0,05	1,42
	0,98	0,07	1,38
	0,98	0,09	1,35

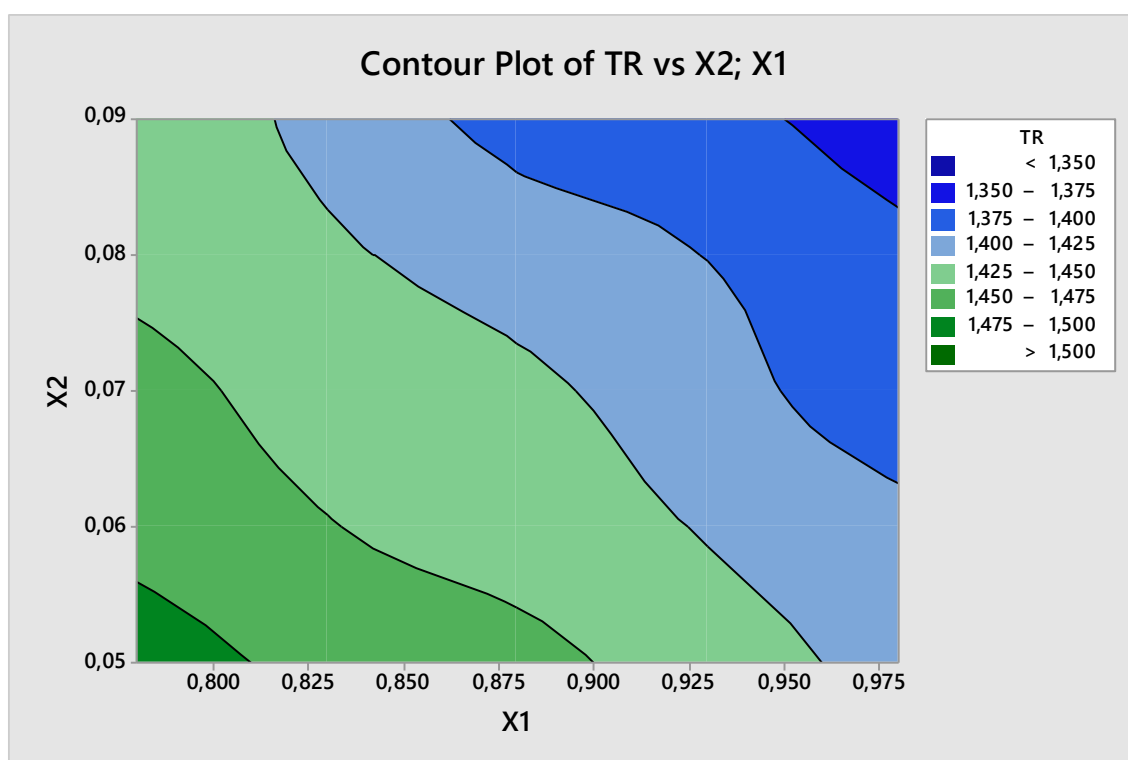


Figura 96. Superficie de respuesta a 1000 Hz

Tabla 136. Pares de puntos a 1000 Hz

X1	0,94	0,88	0,88	0,82	0,83
X2	0,09	0,05	0,10	0,06	0,10

4.3.3.1.2.1 Combinaciones

En la Tabla 137 se muestran los conjuntos de pares obtenidos:

En principio, habría que descartar aquellos pares que se encuentren en los límites de la región estudiada. En este caso, dado que los pares se han obtenido de forma visual evitando los límites de la región, no es necesario descartar ningún par por esa razón.

Tabla 137. Pares de puntos obtenidos para el cálculo

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz
X1	0,49	0,65	0,78	0,94
X2	0,30	0,27	0,11	0,09
X1	0,50	0,66	0,79	0,88
X2	0,29	0,27	0,11	0,05
X1	0,55	0,76	0,75	0,88
X2	0,27	0,20	0,11	0,10
X1	0,52	0,75	0,80	0,82
X2	0,28	0,23	0,11	0,06
X1	0,62		0,80	0,83
X2	0,29		0,15	0,10

Se seleccionan los pares que más se ajustan a los valores esperados de cada uno de ellos.

Probamos los nuevos pares en el modelo virtual.

Combinación 1.

En la Tabla 138 se muestran los espectros de absorción de las superficies X1 y X2 empleadas en la simulación.

Tabla 138. Combinación de espectros de absorción de las superficies estudiadas

puntos	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
X1	0,64	0,66	0,80	0,83	0,84	0,83
X2	0,40	0,33	0,18	0,13	0,10	0,05

La combinación anterior da como resultado el tiempo de reverberación que se muestra en la Tabla 139 y en la Figura 97.

Tabla 139. TR₃₀ obtenido

TR ₃₀	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
tr1	1,11	1,00	1,03	1,03	1,06	0,98

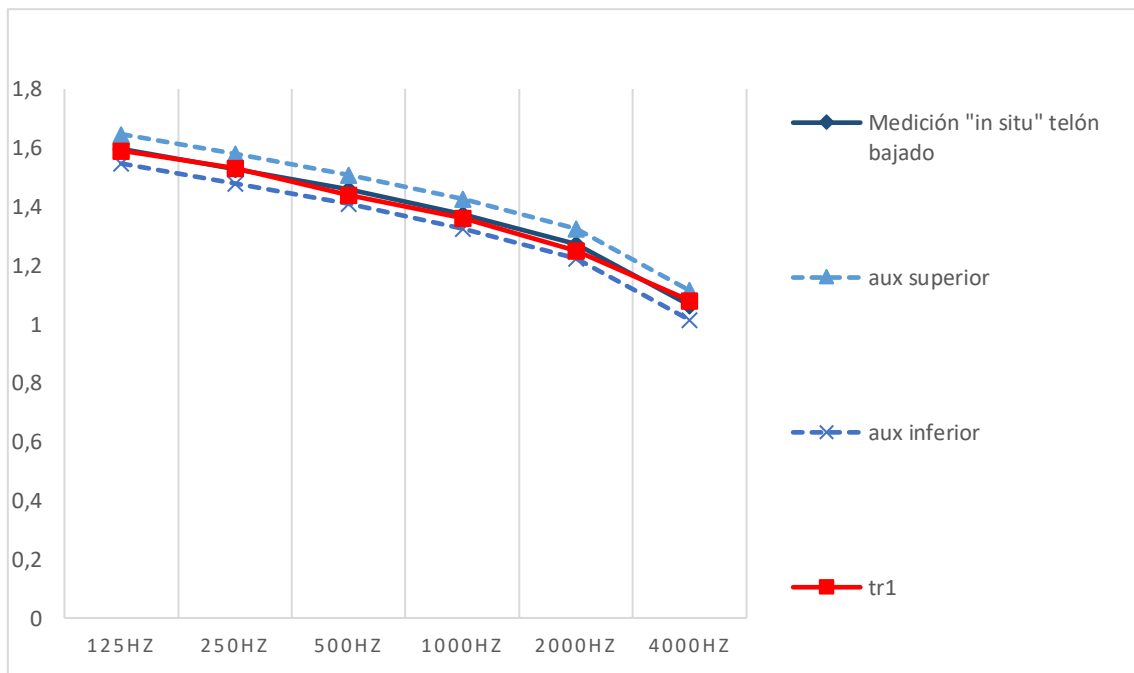


Figura 97. Representación gráfica del TR₃₀ medido "in situ" con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables, la modelización inicial, y la modelización de la combinación 1

En la Figura 97 se observan los valores del TR₃₀ de la medición real con un margen superior e inferior de 0,05 segundos, del modelo inicial y del modelo tras la aplicación del RSM. Los valores de la modelización que se encuentren dentro de estos márgenes se consideran aceptables.

El espectro de absorción tr1 se encuentra dentro de los márgenes establecidos como aceptables, por lo que se admite la combinación 1. Los cambios del espectro de absorción del material X1 (butacas), y X2 (cortinas sobre paredes), se muestran en la Figura 98 y en la Figura 99 respectivamente.

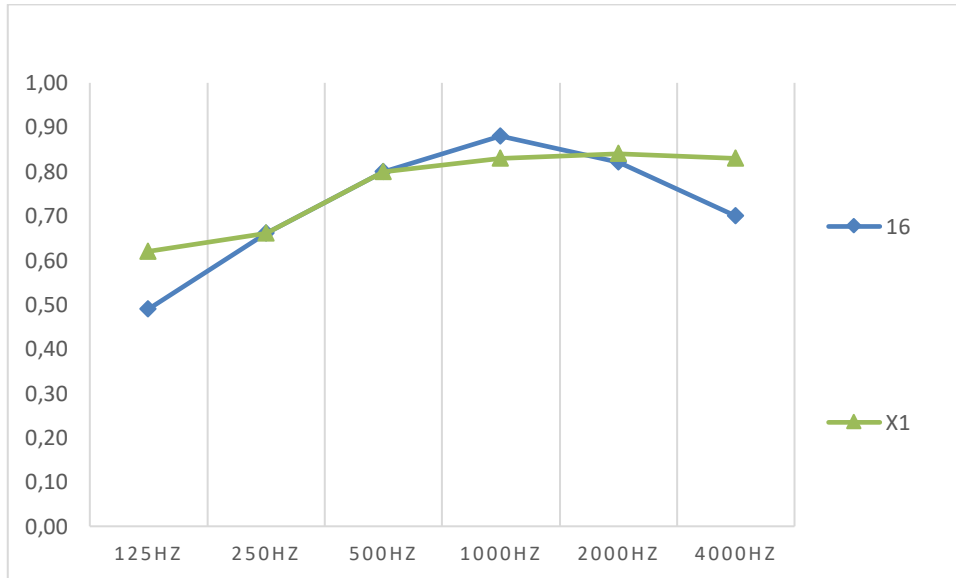


Figura 98. Espectro de absorción de las butacas (bibliografía- azul- y aplicación RSM-verde-)

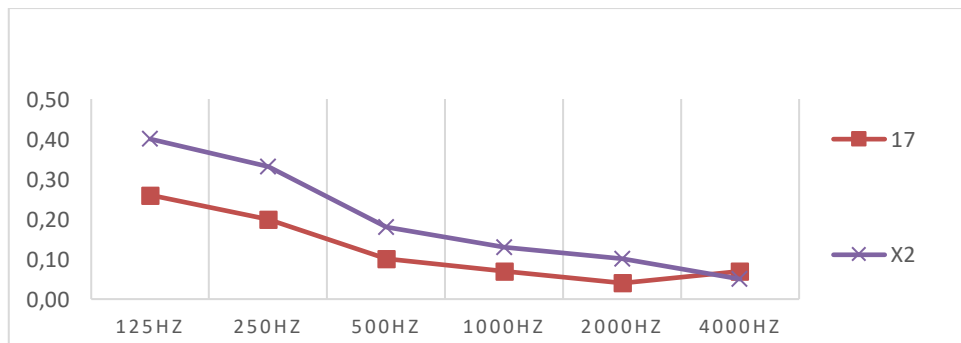


Figura 99.. Espectro de absorción del techo general de la sala (bibliografía-rojo- y aplicación RSM- morado-)

Los espectros de absorción 16 y 17 se corresponden con los datos de la bibliografía de las butacas y del techo, respectivamente. X1 y X2, representan los ajustes realizados a cada uno de ellos tras la aplicación del RSM.

Se aceptan los nuevos valores de los materiales de la sala, en la Tabla 140 se muestran los coeficientes de absorción de las superficies tras el ajuste realizado con el telón bajado.

Tabla 140. Coeficientes de absorción de las superficies tras aplicación del RSM con telón bajado

Zona	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
Techo escenario	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Pavimento pasarelas	0,04	0,04	0,07	0,11	0,03	0,01
Pavimento escenario	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Pavimento PB	0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,20
Pavimento P1 y P2	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Pavimento anfiteatro P1	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25
Pavimento escaleras acceso	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Lámpara de techo	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Frente de escenario	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Puertas acceso a plantas	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
Boca de escena	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
Cortinas sobre puertas acceso a plantas y puertas palcos P2	0,07	0,31	0,49	0,75	0,70	0,60
Palcos antepecho, moldura alrededor boca escenario	0,13	0,13	0,25	0,28	0,30	0,30
Techo fondo y bajo palcos	0,14	0,1	0,06	0,04	0,04	0,03
Paredes patio butacas paredes interiores escenario	0,013	0,015	0,02	0,028	0,04	0,05
Paredes patio butacas	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Palcos divisiones	0,08	0,11	0,05	0,03	0,02	0,03
Butacas	0,62	0,66	0,80	0,83	0,84	0,83
Techos	0,40	0,33	0,18	0,13	0,10	0,05

4.3.3.2 Aplicación del RSM con telón subido

Acabada la sala con la boca de escena cerrada, telón bajado, se procede a estudiar la sala con la boca de escena abierta (telón subido).

4.3.3.3 Modelo virtual de la sala con telón subido

En el modelo virtual de la sala, se sustituye la cortina de la boca de escena por una superficie nueva, la abertura de escenario, que será nuestra incógnita. Se asignan los coeficientes hallados en el proceso anterior.

Las coordenadas de la fuente y de los receptores, son las mismas que en el caso anterior.

Se cambia el material de la boca de escena en el modelo ajustado anterior y se calcula el modelo para boca de escena abierta. En la Tabla 141 se muestran los coeficientes de absorción empleados en la modelización inicial con boca de escena abierta, reordenados.

Tabla 141. Superficies de la sala con distinta materialidad y comportamiento absorbente

Zona	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
Techo escenario	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Pavimento pasarelas	0,04	0,04	0,07	0,11	0,03	0,01
Pavimento escenario	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Pavimento PB	0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,20
Pavimento P1 y P2	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Pavimento anfiteatro P1	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25
Pavimento escaleras acceso	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Lámpara de techo	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Frente de escenario	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Puertas acceso a plantas	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
Boca de escena	0,30	0,40	0,50	0,60	0,60	0,50
Cortinas sobre puertas acceso a plantas y puertas palcos P2	0,07	0,31	0,49	0,75	0,70	0,60
Palcos antepecho, moldura alrededor boca escenario	0,13	0,13	0,25	0,28	0,30	0,30
Techo fondo y bajo palcos	0,14	0,1	0,06	0,04	0,04	0,03
Paredes patio butacas, paredes interiores escenario	0,013	0,015	0,02	0,028	0,04	0,05
Paredes patio butacas	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Palcos divisiones	0,08	0,11	0,05	0,03	0,02	0,03
Butacas	0,62	0,76	0,80	0,83	0,84	0,83
Techos	0,40	0,33	0,18	0,13	0,10	0,05

Se obtiene el tiempo de reverberación TR_{30} medio. El TR_{30} obtenido se compara con el de la medición realizada "in situ", tal y como se ve en la Tabla 142 y en la Figura 100.

Tabla 142. Comparativa TR_{30} medición real y modelo virtual

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Medición "in situ" telón subido	1,579	1,49	1,437	1,345	1,258	1,055
Modelización Talía	1,56	1,52	1,45	1,36	1,27	1,09

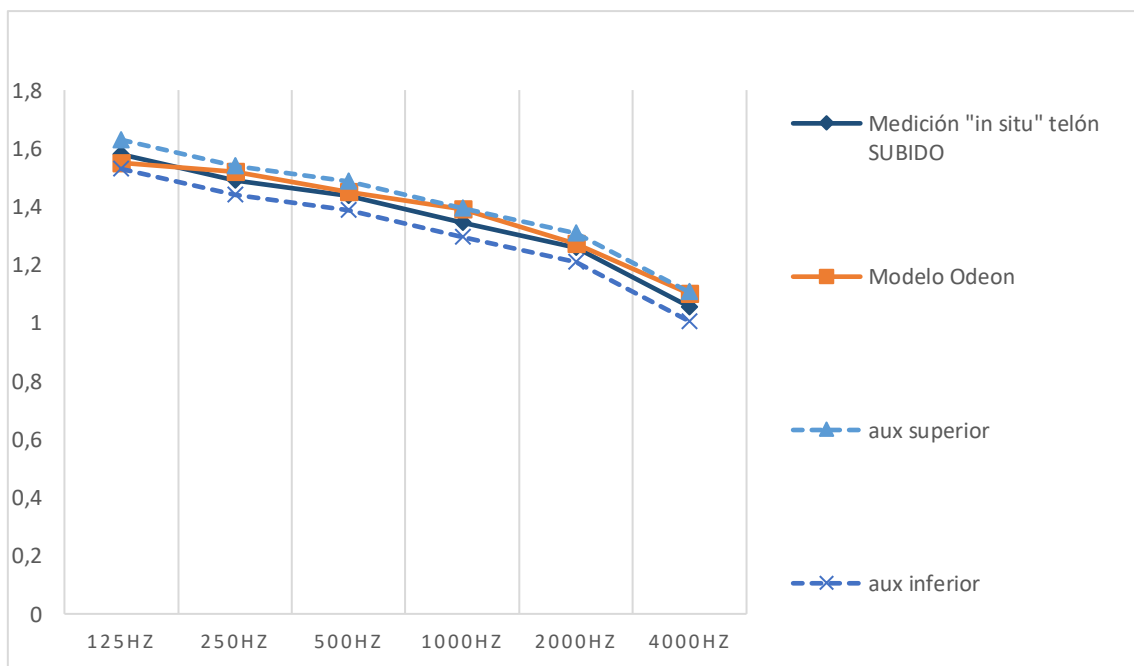


Figura 100. Comparativa TR_{30} , medición "in situ" con telón subido y modelización inicial con boca de escena abierta

En Figura 100 se representa el tiempo de reverberación medio, TR_{30} , medido "in situ" de la sala con telón subido, los límites superior e inferior y el resultado del TR_{30} de la modelización con los ajustes realizados con telón subido. En todas las frecuencias los valores del tiempo de reverberación del modelo se encuentran dentro de los límites aceptables. La sala está ajustada. Se aceptan los coeficientes de absorción de los materiales empleados.

Se aceptan los valores del espectro de absorción de los materiales vistos en la Tabla 141.

4.3.4 Resultados

El espectro de absorción de la boca de escena de la sala obtenido tras aplicación del RSM, se muestra en la Tabla 143.

Tabla 143. Coeficiente de absorción de la boca de escena

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Tras análisis RSM	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55

A continuación, se compara el tiempo de reverberación de la medición real, del modelo ajustado con telón subido, y de los obtenidos empleando los espectros de absorción para la boca de escena de diversas fuentes. El resultado se muestra en la Tabla 144 y en la Figura 101.

Tabla 144. TR₃₀ obtenido en el modelo ajustado con telón subido, y empleando los coeficientes de absorción de otros autores

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Medición “in situ” telón subido	1,579	1,490	1,437	1,345	1,258	1,055
Modelo ajustado	1,56	1,52	1,45	1,36	1,27	1,09
Carrión	1,55	1,53	1,49	1,43	1,30	1,10
Arau	1,55	1,52	1,45	1,39	1,27	1,10
Knudsen y Harris	1,55	1,53	1,49	1,43	1,30	1,10
Cavanaugh y Wilkes	1,56	1,56	1,53	1,35	1,24	1,06
Barron	1,43	1,40	1,36	1,31	1,20	1,03

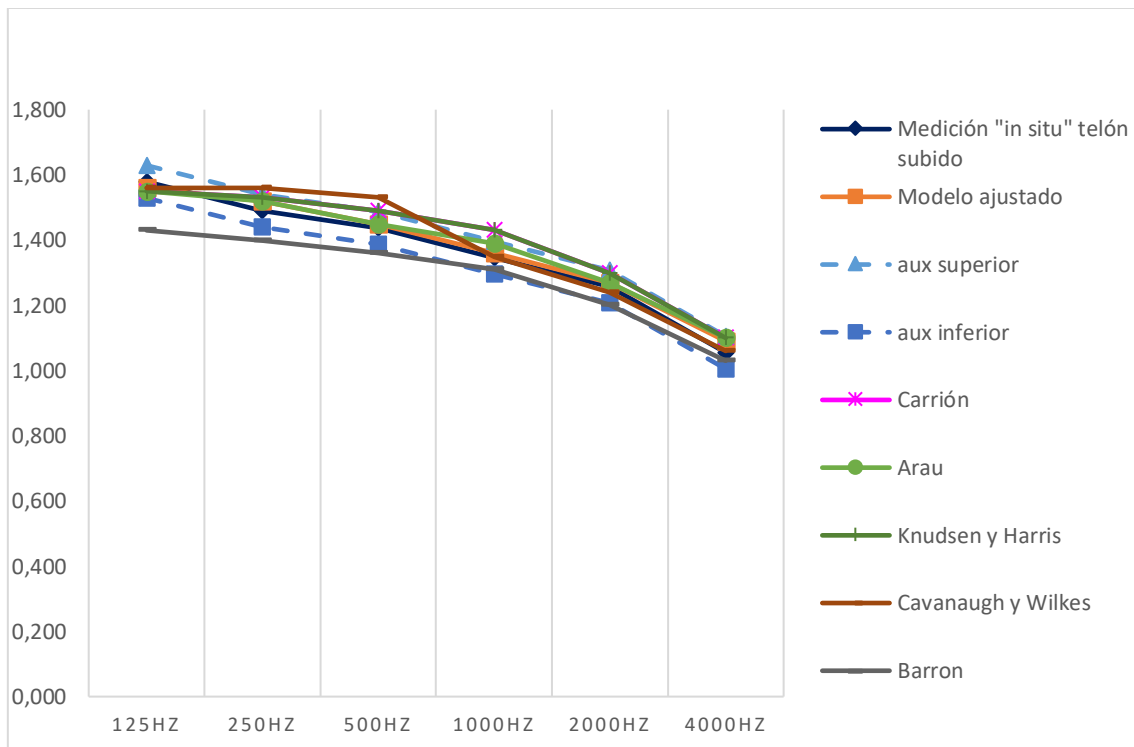


Figura 101. Comparativa TR_{30} telón subido. Medición real con límites superior e inferior, modelo ajustado, y modelos empleando los coeficientes de absorción de boca de escena de distintos autores

Los coeficientes de absorción de Cavanaugh y Wilkes, Carrión y Knudsen y Harris arrojan un resultado del tiempo de reverberación fuera de los límites admitidos en alguna frecuencia. Si bien es verdad que el teatro Talía es un teatro de pequeñas dimensiones, en el que la proporción que ocupa la boca de escena es, por tanto, mayor que en otros teatros y su dimensión puede afectar más al cálculo del TR_{30} .

Para observar la influencia de la boca de escena en el comportamiento absorbente del modelo, se calcula éste con valores distintos de absorción para la boca de escena (0,10; 0,50 y 0,90) y se obtienen los espectros del TR_{30} en cada caso.

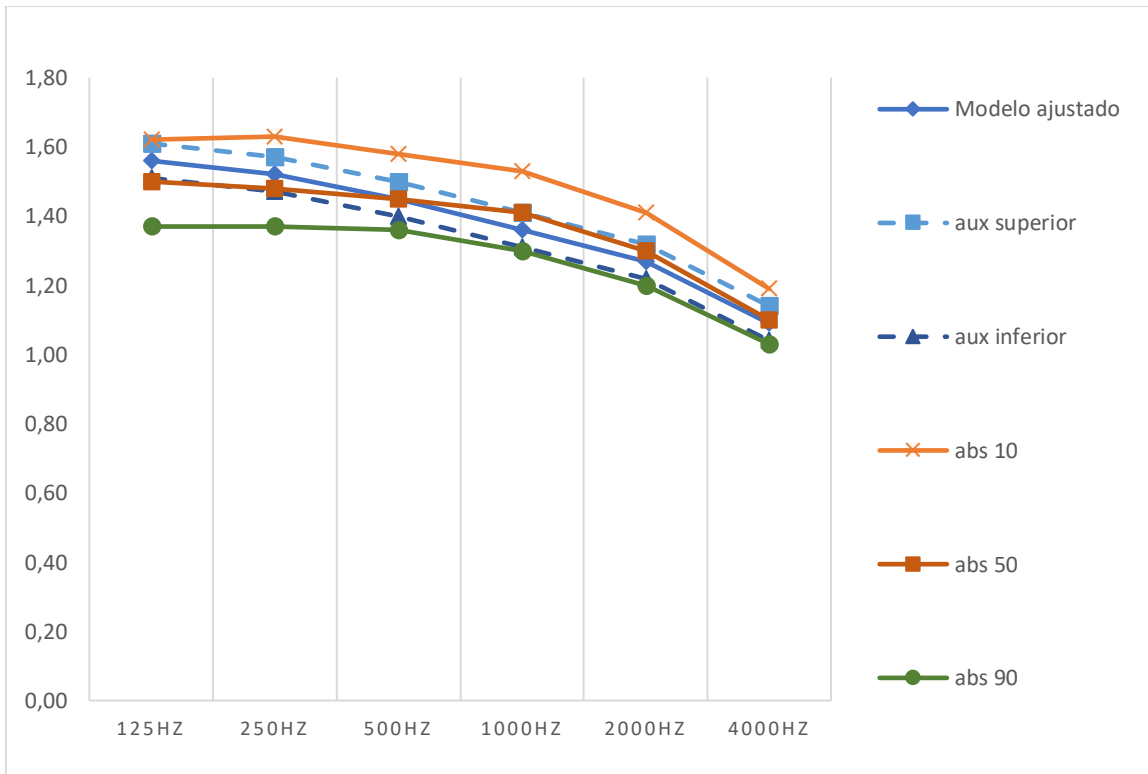


Figura 102. Comparativa TR_{30} con telón subido con distintos valores de absorción para la boca de escena

4.4 Sala 4. Teatro de la Banda Primitiva de Lliria.

4.4.1 Descripción de la sala

4.4.1.1 *Datos generales*

Dirección

Calle del Metge Miguel Pérez, 4. Lliria (Valencia).

Fecha de construcción

1951

Arquitecto

Joaquín Rieta Sister

Reformas posteriores: la última reforma data del año 1991. Fue realizada por el arquitecto José María García.

4.4.1.2 *Características morfológicas y constructivas*

El Teatro de la Banda Primitiva de Lliria se encuentra en la sede de la Escuela de Música y del Conservatorio Municipal del mismo nombre. Se construyó en 1951 basado en el proyecto del arquitecto Joaquín Rieta. Su estructura, revolucionaria para su época, permite una distribución espacial amplia de su interior. Se distribuye en platea y dos anfiteatros. En 1991 se rehabilitó y se cambiaron algunos de los materiales de la sala.

Tiene un aforo de 967 espectadores. Las medidas del escenario son aproximadamente 11 metros de ancho por 9,70 metros de fondo desde la boca de escena, a los que hay que añadir 3,80 metros de fondo de la corbata. La boca de escena mide 10,10 metros de ancho por 6,60 metros de alto. La altura del escenario a techo es de 16,75 metros. La pendiente del escenario es del 0% [47], [58].

La mayor parte de paramentos verticales y techos están enlucidos, los paramentos verticales incluyen grandes superficies acolchadas y forradas en tela, y un zócalo de madera perimetral.

Tiene varios elementos en escayola decorada: el antepecho del primer anfiteatro, el arco de la boca de escenario, y el círculo exterior adyacente a la lámpara del techo. El

encuentro de los paramentos verticales laterales y el techo es curvo en la zona de platea. El antepecho del segundo anfiteatro es de yeso atamborado, con revestimiento de madera de cara al escenario. Algunos de los paramentos laterales y del fondo de la sala también están realizados en yeso con cámara.

El pavimento de la sala en platea es de parqué de madera cubierto con moqueta en los pasillos. En el anfiteatro primero el pavimento tiene en la zona de butacas independientes cercana al escenario una tarima de madera en dos alturas, y en el anfiteatro una de linóleo. Las escaleras y el zócalo a la altura del pasamanos de acceso al anfiteatro están realizados en mármol. El anfiteatro segundo tiene un pavimento de mortero pintado. La escalera de acceso tiene pavimento de terrazo.

El techo es de yeso, tanto el general de la sala como bajo los forjados del anfiteatro. Existe una lámpara decorativa (tipo araña) de grandes dimensiones en el techo de la sala, que se considera transparente a efectos de absorción.

La cabina se comunica con el espacio de la sala por medio de un pequeño ventanuco que permaneció cerrado durante la medición.

En cuanto al escenario, el pavimento es de madera y los paramentos verticales están cubiertos por cortinas. La boca de escena se cubre con un telón de terciopelo fruncido.

Las butacas de platea y del fondo de anfiteatro primero están muy acolchadas, las butacas independientes del anfiteatro primero (delanteras) y las del anfiteatro segundo se consideran con un acolchado medio.

4.4.1.3 Fotografías

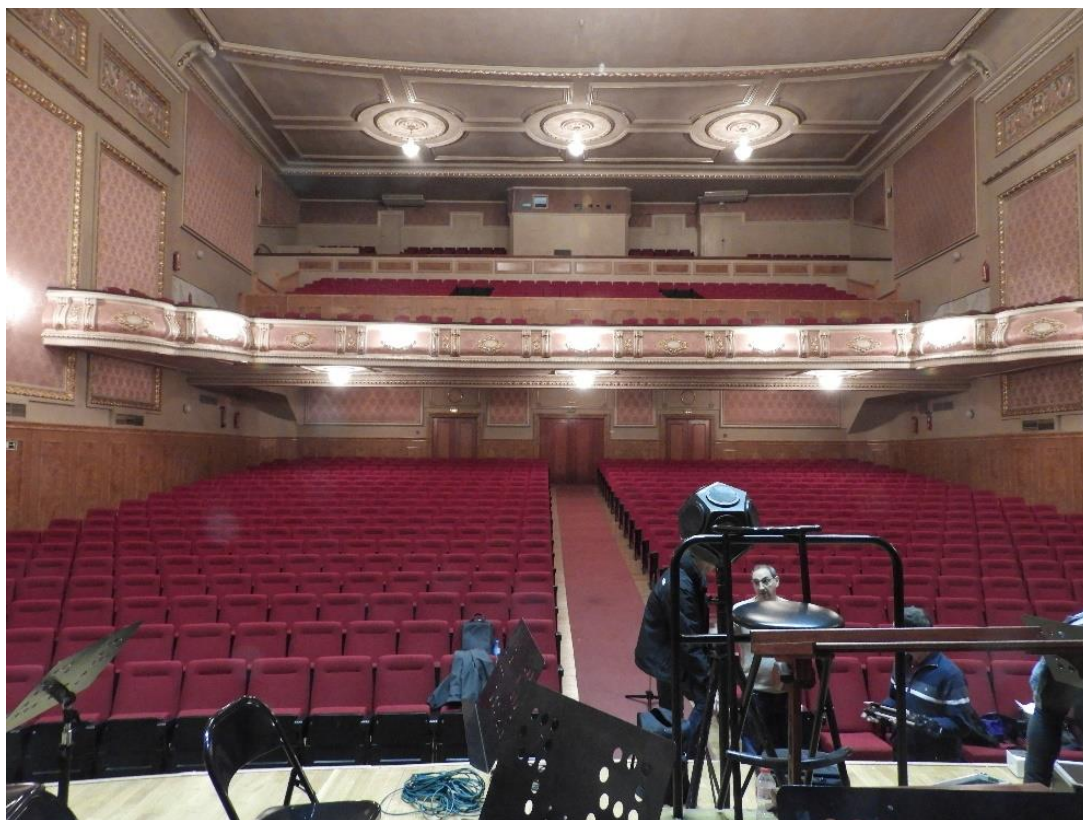


Figura 103. Vista del fondo de la sala

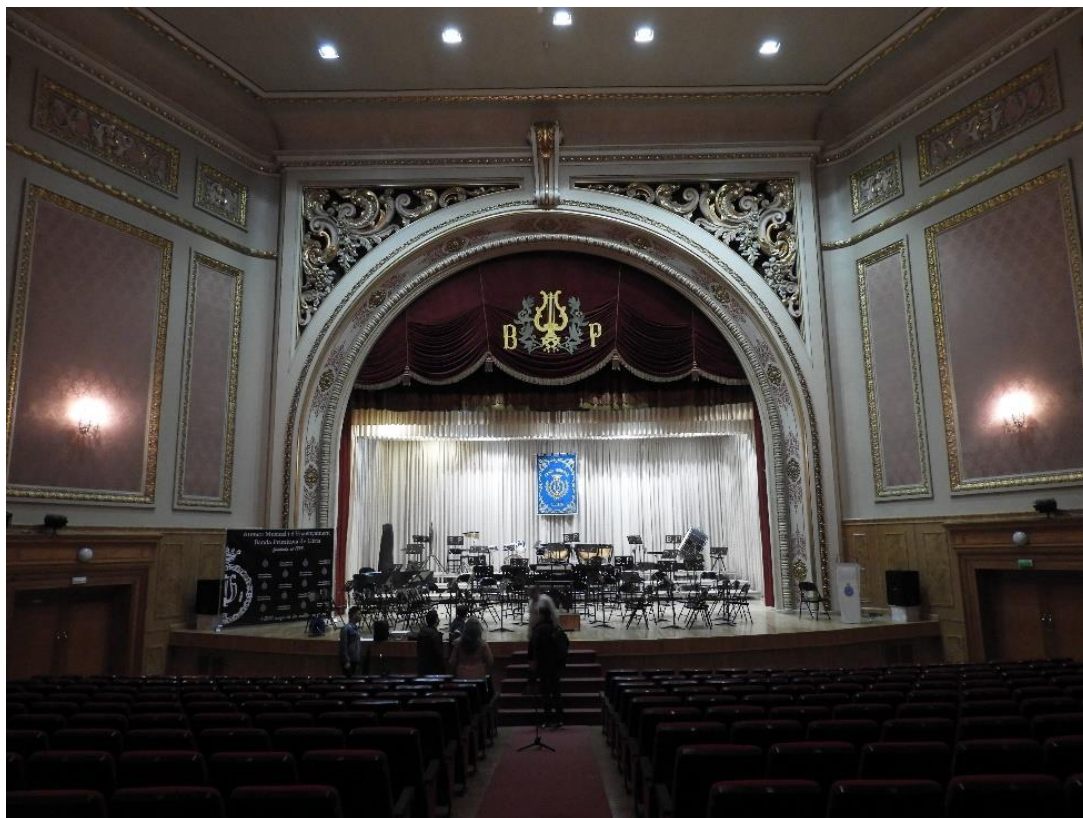


Figura 104. Vista del escenario



Figura 105. Platea



Figura 106. Platea bajo anfiteatro



Figura 107. Lámpara de techo



Figura 108. Primer anfiteatro



Figura 109. Segundo anfiteatro



Figura 110. Anfiteatro fondo

4.4.1.4 Planos

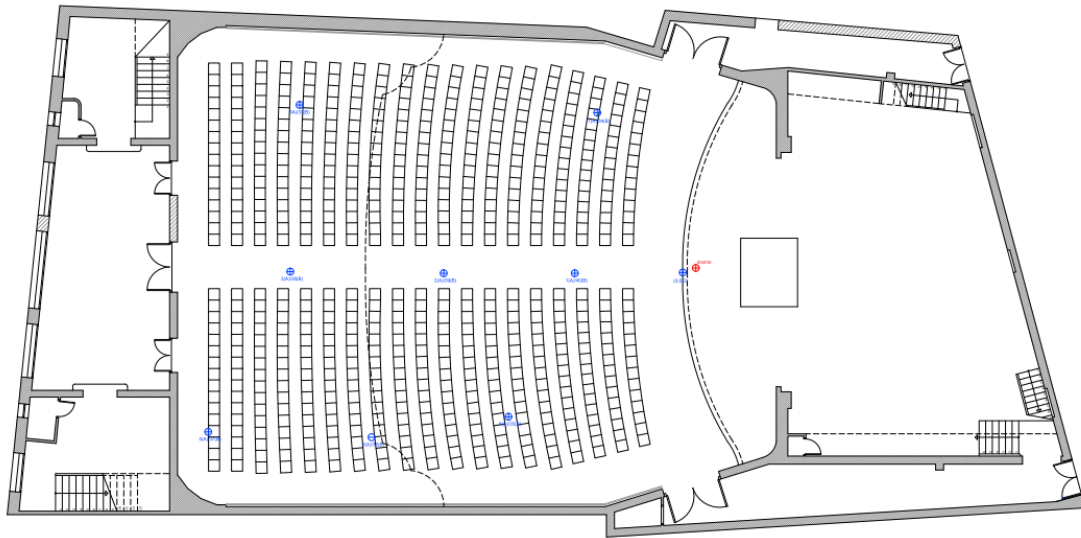


Figura 111. Planta. Posición de la fuente sonora en rojo y del micrófono en azul

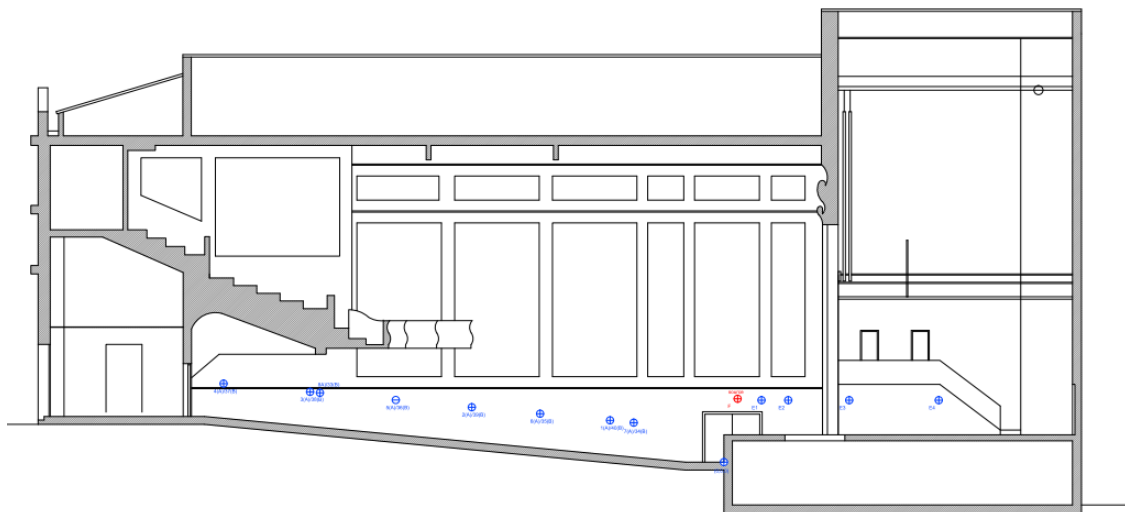


Figura 112. Sección. Posición de la fuente en rojo y de la fuente en azul.

4.4.1.5 Comportamiento absorbente de los materiales

A continuación, se detallan los coeficientes de absorción de las distintas soluciones constructivas que se encuentran en la sala.

Tabla 145. Coeficientes de absorción asignados a las distintas soluciones constructivas de la sala

Zona	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
Alrededor boca escenario, molduras y curvas de techo, antepecho P1 zona 1a	0,13	0,13	0,25	0,28	0,3	0,3
Techo escenario fondo sala, antepecho P2	0,16	0,1	0,06	0,04	0,04	0,04
Pavimento escenario y anfiteatro P1 zona 1a	0,4	0,3	0,2	0,17	0,15	0,1
Pavimento PB	0,05	0,03	0,06	0,09	0,1	0,2
Moqueta PB	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25
Pavimento anfiteatro P1, zona 2a	0,020	0,020	0,030	0,040	0,040	0,050
Pavimento anfiteatro P2	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Pavimento escaleras acceso P1 + zócalo y P2	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Paramentos verticales (sonido hueco)	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09
Paramentos verticales (sonido solido)	0,013	0,015	0,02	0,028	0,04	0,05
Antepecho P1 zona 2a, zócalo de PB, frente escenario	0,420	0,210	0,060	0,050	0,050	0,040
Puertas acceso a plantas	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
Cortina de escena y cortinas escenario	0,140	0,350	0,550	0,720	0,700	0,650
Butacas anfiteatro 1 y 2	0,56	0,64	0,7	0,72	0,68	0,62
Butacas platea	0,72	0,79	0,83	0,84	0,83	0,79
Techo general y bajo voladizo primer anfiteatro	0,26	0,2	0,1	0,07	0,04	0,07
Marcos de tela acolchada en paredes	0,05	0,19	0,35	0,84	0,98	0,89

4.4.2 Medición de parámetros

4.4.2.1 Toma de datos "in situ"

Para definir los puntos (x,y,z) tanto de la fuente como de los distintos receptores, tomamos como centro de origen la parte más baja de la corbata en su encuentro con el plano de la platea. Medimos cada punto con respecto al origen que hemos determinado y lo trasladamos a ODEON.

Se toman los datos de la colocación de la fuente dodecaédrica: a 1,50 metros de altura sobre el escenario (que está a 1,14 metros de altura sobre el origen de coordenadas determinado) y a 20 centímetros de la boca del mismo. Altura del micrófono: 1,20 metros. (Mediciones de 1 a 20, con telón subido; mediciones de 21 a 40, con telón bajado)

En la Tabla 146 se indican las coordenadas de la fuente sonora y de los distintos receptores.

Tabla 146. Coordenadas de la fuente y de los receptores

Abierto	Cerrado	X	Y	Z
Fuente		0,57	0,20	2,64
PTO_1	PTO_21	-4,74	-0,03	1,74
PTO_2	PTO_22	-10,50	-0,03	2,28
PTO_3	PTO_23	-17,24	0,03	2,92
PTO_4	PTO_24	-20,84	-7,00	3,27
PTO_5	PTO_25	-13,66	-7,22	2,58
PTO_6	PTO_26	-7,65	-6,32	2,01
PTO_7	PTO_27	-3,74	7,00	1,64
PTO_8	PTO_28	-16,82	7,34	2,88
PTO_9	PTO_29	-12,87	8,36	6,33
PTO_10	PTO_30	-14,03	0,17	6,33
PTO_11	PTO_31	15,23	-5,4	6,58
PTO_12	PTO_32	-19,30	-5,35	8,47
PTO_13	PTO_33	-15,62	0,21	7,02
PTO_14	PTO_34	-17,39	6,51	8,15
PTO_15	PTO_35	-20,21	0,49	9,11
PTO_16	PTO_36	-20,34	8,71	8,79
PTO_17	PTO_37	-23,12	7,37	10,42
PTO_18	PTO_38	-25,61	4,19	11,11
PTO_19	PTO_39	-22,23	0,05	10,42
PTO_20	PTO_40	-24,86	-7,56	10,76

4.4.2.2 *Parámetros acústicos*

Mediante la utilización del software DIRAC se han realizado las mediciones in situ de la sala, con telón bajado y con telón subido. De esta manera se han obtenido los parámetros acústicos en cada situación.

4.4.2.2.1 Parámetros acústicos con telón bajado

Tabla 147. Inteligibilidad

STI male	0,61
STI female	0,61

Tabla 148. Parámetros temporales

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
EDT	1,065	0,99	0,963	0,965	1,004	0,83
TR₃₀	1,451	1,206	1,112	1,184	1,148	1,016
TR₂₀	1,279	1,15	1,129	1,178	1,156	1,088
TR₁₀	1,345	1,219	1,151	1,199	1,191	0,992

Tabla 149. Claridad

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
C₅₀	-10,61	-8,65	-7,53	-8,26	-8,65	-7,88
C₈₀	-10,41	-8,52	-6,83	-7,00	-7,81	-6,12

Tabla 150. Definición

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
D₅₀	0,08	0,12	0,15	0,13	0,12	0,14

4.4.2.2.2 Parámetros acústicos con telón subido

Tabla 151. Inteligibilidad

STI male	0,60
STI female	0,61

Tabla 152. Parámetros temporales

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
EDT	1,125	1,032	1,006	1,033	1,016	0,813
TR₃₀	1,541	1,330	1,201	1,200	1,159	1,018
TR₂₀	1,519	1,279	1,188	1,198	1,162	1,007
TR₁₀	1,423	1,262	1,208	1,204	1,177	1,000

Tabla 153. Claridad

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
C₅₀	-10,61	-8,26	-6,89	-6,89	-7,20	-6,59
C₈₀	-9,11	-7,68	-6,09	-6,58	-7,46	-5,37

Tabla 154. Definición

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
D₅₀	0,08	0,13	0,17	0,17	0,16	0,18

4.4.3 Aplicación del método de superficies de respuesta

Se realiza el modelo virtual de la sala en Autocad y se importa el modelo a ODEON. Se introducen las coordenadas de la fuente y de los receptores, y se asignan los materiales de las distintas superficies, empleando los coeficientes de la Tabla 145.

Se comprueba que el modelo es correcto: que no tiene fugas (“deadballs”), que no hay rayos perdidos, y que las aristas del modelo están en contacto entre sí.

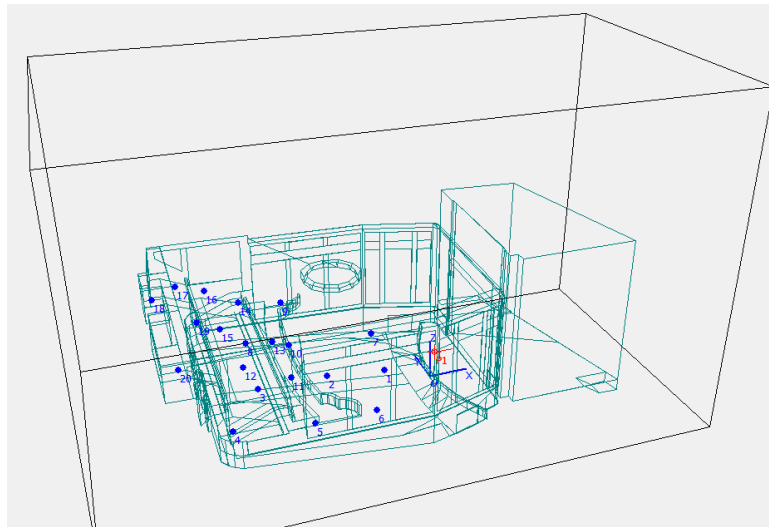


Figura 113. Modelo virtual con posiciones de la fuente y receptores.

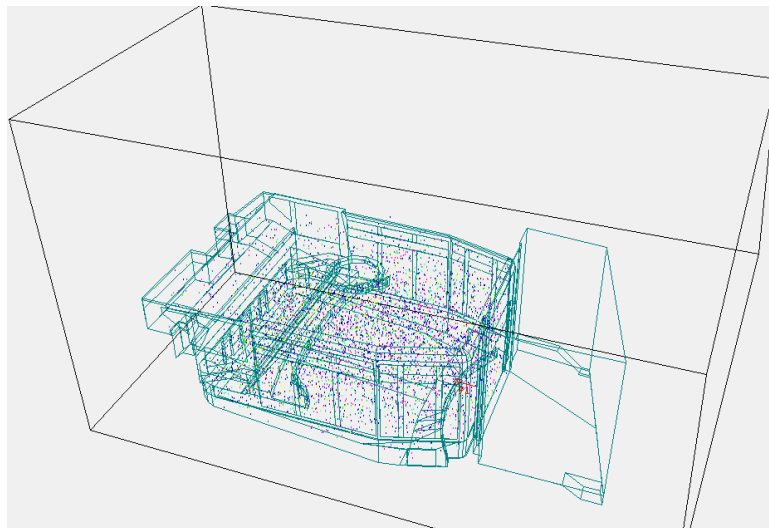


Figura 114. Captura del test 3D Billard

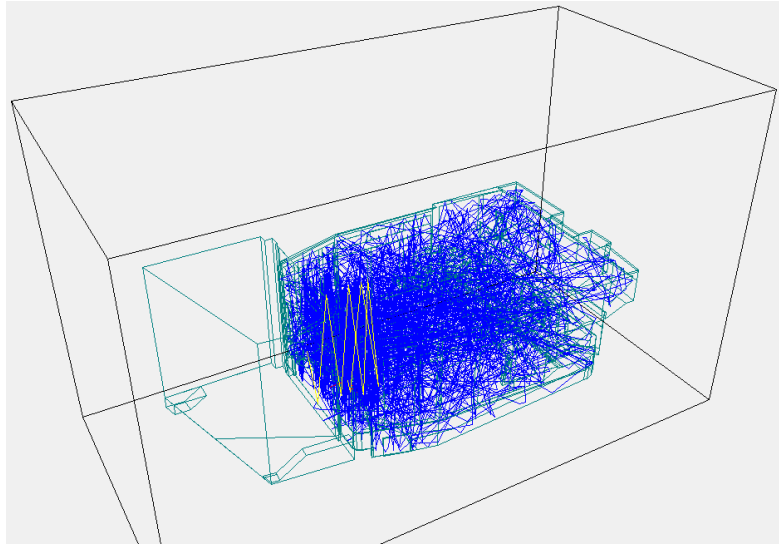


Figura 115. Captura del test de rayos perdidos

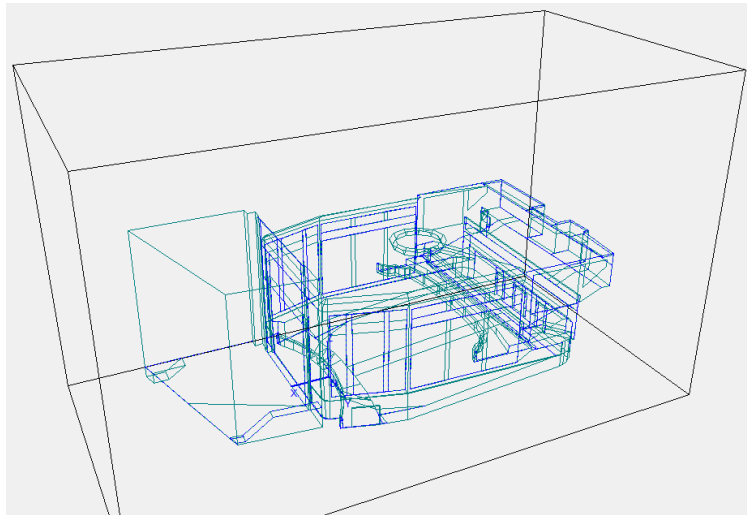


Figura 116. Captura del test de aristas únicas

4.4.3.1 Aplicación del RSM con telón bajado

En el modelo virtual de la sala con telón bajado, a la superficie de la boca de escena se le asigna el material de telón. Se calcula el modelo y se obtiene el tiempo de reverberación TR_{30} medio. El TR_{30} obtenido se compara con el de la medición realizada “in situ” (ver Tabla 155).

Tabla 155. TR₃₀ medio de la medición in situ y de la modelización con telón bajado

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Medición in situ	1,451	1,206	1,112	1,184	1,148	1,016
Modelización Primitiva	1,66	1,56	1,34	1,00	0,98	0,90

En la Figura 117 se representan el tiempo de reverberación medio, TR₃₀, medido in situ, los límites superior e inferior en los que el resultado del modelo es aceptable y el resultado del TR₃₀ de la modelización inicial. Se observa que a bajas frecuencias se necesita mayor absorción mientras que a altas, es conveniente bajar la absorción.

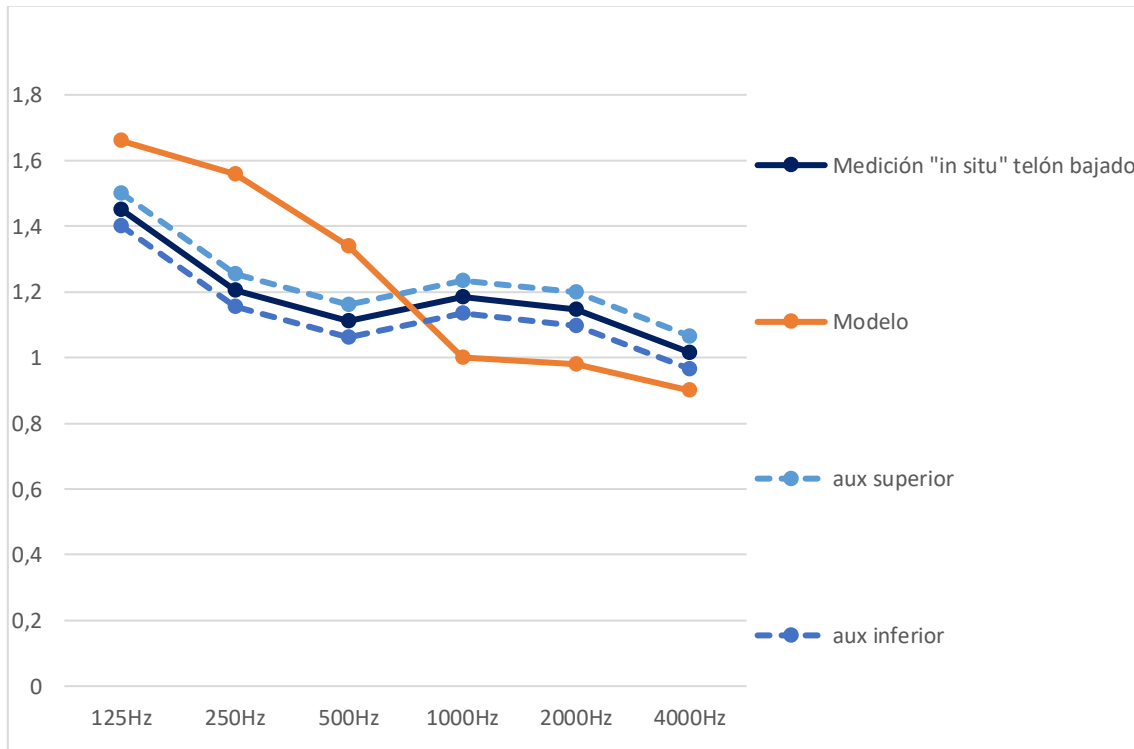


Figura 117. Representación gráfica del TR₃₀ medido "in situ" con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables y la modelización inicial

4.4.3.1.1 Ajuste mediante método de superficies de respuesta

A continuación, se va a emplear el RSM para ajustar el modelo virtual a la medición real.

En primer lugar, se reordena la tabla de coeficientes de absorción de los materiales de la sala y se les asigna un número (Tabla 156).

Tabla 156. Coeficientes de absorción de las superficies de la sala y asignación de número de superficie

Zona	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	Nº SUP
Alrededor boca escenario, molduras y curvas de techo, antepecho P1 zona 1a	0,13	0,13	0,25	0,28	0,30	0,30	1
techo escenario fondo sala, antepecho P2	0,16	0,10	0,06	0,04	0,04	0,04	2
Pavimento escenario y anfiteatro P1 zona 1a	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10	3
Pavimento PB	0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,20	4
Moqueta PB	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25	5
Pavimento anfiteatro P1, zona 2a	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	6
Pavimento anfiteatro P2	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	7
Pavimento escaleras acceso P1 + zócalo y P2	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	8
Paramentos verticales (sonido hueco)	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09	9
Paramentos verticales (sonido solido)	0,013	0,015	0,02	0,028	0,04	0,05	10
Antepecho P1 zona 2a, zócalo de PB, frente escenario	0,42	0,21	0,06	0,05	0,05	0,04	11
Puertas acceso a plantas	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	12
Cortina de escena y cortinas escenario	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65	13
Butacas anfiteatro 1 y 2	0,56	0,64	0,7	0,72	0,68	0,62	14
Butacas platea	0,72	0,79	0,83	0,84	0,83	0,79	15
Techo general y bajo voladizo primer anfiteatro	0,26	0,2	0,1	0,07	0,04	0,07	X1
Marcos de tela acolchada en paredes	0,05	0,19	0,35	0,84	0,98	0,89	X2

Se eligen como superficies incógnita el techo general de la sala y los marcos de tela de las paredes.

Se define la región de estudio en la aplicación del RSM.

$$X_{1i} = B_{1i} \pm R_{1i}$$

Siendo:

B_{1i} los valores tomados de la bibliografía y

R_{1i} , incrementos que oscilan entre 0 y 0,5

De forma análoga se realiza para X_{2i}

En la Tabla 157 se muestran los coeficientes de absorción de las superficies empleados en la simulación y las regiones de estudio.

Tabla 157. Coeficientes de absorción empleados en la simulación

Nº SUP	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
1	0,13	0,13	0,25	0,28	0,30	0,30
2	0,16	0,1	0,06	0,04	0,04	0,04
3	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
4	0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,20
5	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25
6	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05
7	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
8	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
9	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09
10	0,013	0,015	0,02	0,028	0,04	0,05
11	0,42	0,21	0,06	0,05	0,05	0,04
12	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
13	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
14	0,56	0,64	0,7	0,72	0,68	0,62
15	0,72	0,79	0,83	0,84	0,83	0,79
Techo general X1	X1 ₁₂₅	X1 ₂₅₀	X1 ₅₀₀	X1 ₁₀₀₀	X1 ₂₀₀₀	X1 ₄₀₀₀
Marcos de tela acolchada en paredes X2	X2 ₁₂₅	X2 ₂₅₀	X2 ₅₀₀	X2 ₁₀₀₀	X2 ₂₀₀₀	X2 ₄₀₀₀

4.4.3.1.2 Ajuste 1

Se especifican los valores de las dos regiones de estudio, se toman los valores de la bibliografía y se asignan unos incrementos a cada una de ellas.

En la Tabla 158 y en la Tabla 158 se observan los valores asignados a las regiones de estudio X1 y X2, respectivamente.

Tabla 158. Región de estudio de la superficie X1

X1	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
B1i-R1i	0,21	0,15	0,05	0,02	0,02	0,02
B1i	0,26	0,20	0,10	0,07	0,04	0,07
B1i+R1i	0,31	0,25	0,15	0,12	0,06	0,12
INCREMENTOS R1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,02	0,05

Tabla 159. Región de estudio de la superficie X2

X2	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
B2i-R2i	0,01	0,15	0,30	0,79	0,98	0,84
B2i	0,05	0,19	0,35	0,84	0,98	0,89
B2i+R2i	0,09	0,23	0,40	0,89	0,98	0,94
INCREMENTOS R2	0,04	0,04	0,05	0,05	0,00	0,05

Se obtienen los siguientes pares de espectros de absorción, Tabla 160.

Tabla 160

Tabla 160. Combinaciones de pares de espectros de absorción de las regiones X1 y X2.

combinación	puntos	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	
1	B1i-R1i	0,210	0,150	0,050	0,020	0,020	0,020	X11
	B2i-R2i	0,010	0,150	0,300	0,790	0,980	0,840	X21
2	B1i-R1i	0,210	0,150	0,050	0,020	0,020	0,020	X11
	B2i	0,050	0,190	0,350	0,840	0,980	0,890	X22
3	B1i-R1i	0,210	0,150	0,050	0,020	0,020	0,020	X11
	B2i+R2i	0,230	0,400	0,890	0,980	0,940	0,890	X23
4	B1i	0,200	0,100	0,070	0,040	0,070	0,070	X12
	B2i-R2i	0,010	0,150	0,300	0,790	0,980	0,840	X21
5	B1i	0,200	0,100	0,070	0,040	0,070	0,070	X12
	B2i	0,050	0,190	0,350	0,840	0,980	0,890	X22
6	B1i	0,200	0,100	0,070	0,040	0,070	0,070	X12
	B2i+R2i	0,230	0,400	0,890	0,980	0,940	0,890	X23
7	B1i+R1i	0,310	0,250	0,150	0,120	0,060	0,120	X13
	B2i-R2i	0,010	0,150	0,300	0,790	0,980	0,840	X21
8	B1i+R1i	0,310	0,250	0,150	0,120	0,060	0,120	X13
	B2i	0,050	0,190	0,350	0,840	0,980	0,890	X22
9	B1i+R1i	0,310	0,250	0,150	0,120	0,060	0,120	X13
	B2i+R2i	0,230	0,400	0,890	0,980	0,940	0,890	X23

Estas combinaciones se prueban en ODEON para obtener los tiempos de reverberación nuevos.

Se introducen las nueve combinaciones en ODEON y se calcula el tiempo de reverberación para cada una de ellas. El resultado se puede ver en la

Tabla 161. El tiempo de reverberación de las combinaciones se designa de aquí en adelante en minúsculas acompañado de un número que hace referencia a la combinación de origen de la que es su resultado.

Tabla 161. TR₃₀ obtenidos de las combinaciones definidas anteriormente

TR₃₀	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
tr1	1,77	1,67	1,44	1,07	1,00	0,95
tr2	1,72	1,61	1,39	1,05	1,00	0,93
tr3	1,66	1,57	1,35	1,02	1,00	0,93
tr4	1,70	1,61	1,39	1,03	0,98	0,91
tr5	1,53	1,51	1,35	1,02	1,00	0,92
tr6	1,60	1,52	1,29	0,99	0,98	0,89
tr7	1,70	1,56	1,34	0,99	0,97	0,87
tr8	1,64	1,51	1,29	0,97	0,97	0,86
tr9	1,60	1,45	1,25	0,95	0,97	0,85

En la Figura 118 se observa que todos los puntos objetivo se encuentran dentro de los espectros del TR₃₀ de las distintas combinaciones.

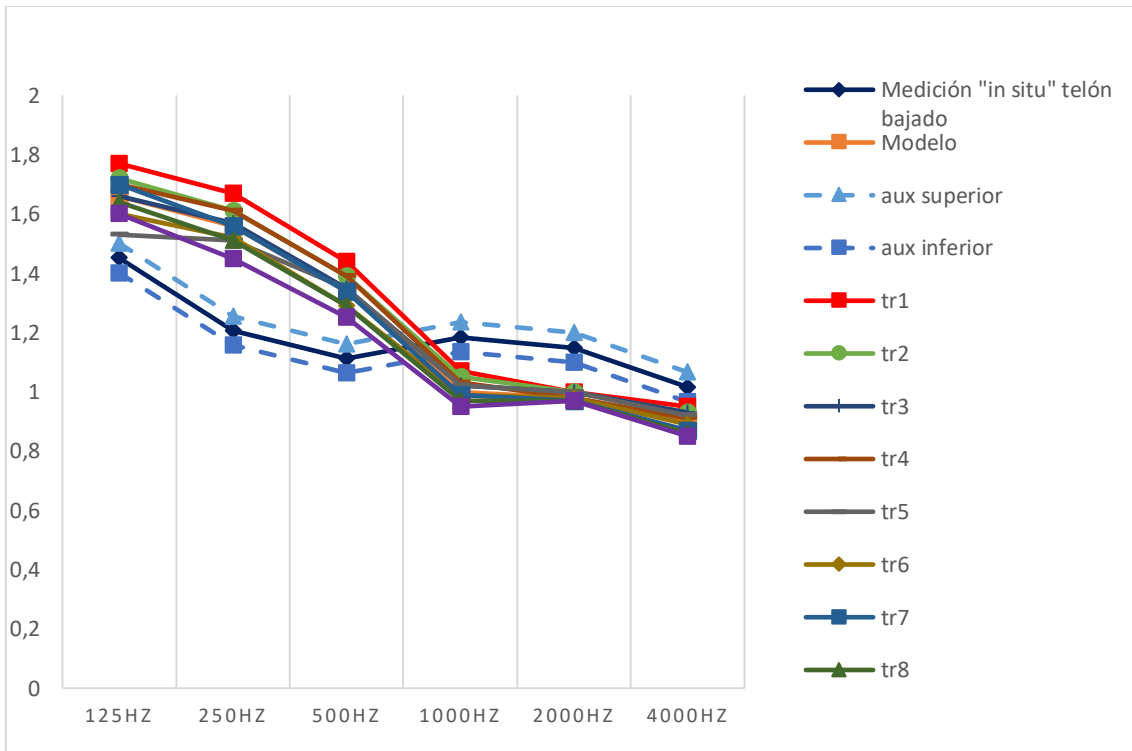


Figura 118 . Comparativa TR₃₀. Medición "in situ", modelización y resultados tras aplicación del RSM

Con esta combinación y márgenes sólo algunas combinaciones están dentro de lo límites (tr5 a 125 Hz y tr1 a 4000Hz).

4.4.3.1.3 Ajuste 2

Se sustituye el material textil paredes por otro, que al tener unos valores menos extremos permite aplicar unos incrementos mayores.

Tabla 162. Coeficientes de absorción de las superficies de la sala y asignación de número de superficie

Zona	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	Nº SUP
Alrededor boca escenario, molduras y curvas de techo, antepecho P1 zona 1a	0,13	0,13	0,25	0,28	0,3	0,3	1
Techo escenario fondo sala, antepecho P2	0,16	0,1	0,06	0,04	0,04	0,04	2
Pavimento escenario y anfiteatro P1 zona 1a	0,4	0,3	0,2	0,17	0,15	0,1	3
Pavimento PB	0,05	0,03	0,06	0,09	0,1	0,2	4
Moqueta PB	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25	5
pavimento anfiteatro P1, zona 2a	0,020	0,020	0,030	0,040	0,040	0,050	6
Pavimento anfiteatro P2	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	7
Pavimento escaleras acceso P1 + zócalo y P2	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	8
Paramentos verticales (sonido hueco)	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09	9
Paramentos verticales (sonido solido)	0,013	0,015	0,02	0,028	0,04	0,05	10
Antepecho P1 zona 2a, zócalo de PB, frente escenario	0,420	0,210	0,060	0,050	0,050	0,040	11
Puertas acceso a plantas	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	12
Cortina de escena y cortinas escenario	0,140	0,350	0,550	0,720	0,700	0,650	13
Butacas anfiteatro 1 y 2	0,56	0,64	0,7	0,72	0,68	0,62	14
Butacas platea	0,72	0,79	0,83	0,84	0,83	0,79	15
Techo general y bajo voladizo primer anfiteatro	0,26	0,2	0,1	0,07	0,04	0,07	X1
Marcos de tela acolchada en paredes	0,02	0,03	0,09	0,14	0,29	0,57	X2

El TR₃₀ obtenido se compara con el de la medición realizada “in situ”, tal y como se ve en la Tabla 163.

Tabla 163. TR₃₀ medio de la medición in situ y de la modelización con telón bajado

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Medición in situ	1,451	1,206	1,112	1,184	1,148	1,016
Modelización Primitiva	1,69	1,79	1,72	1,58	1,40	1,00

En la Figura 119 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se representan el tiempo de reverberación medio, TR₃₀, medido in situ, los márgenes superior e inferior en los que el resultado del modelo es aceptable y el resultado del TR₃₀ de la modelización inicial. Se observa que se necesita mayor absorción en todas las frecuencias.

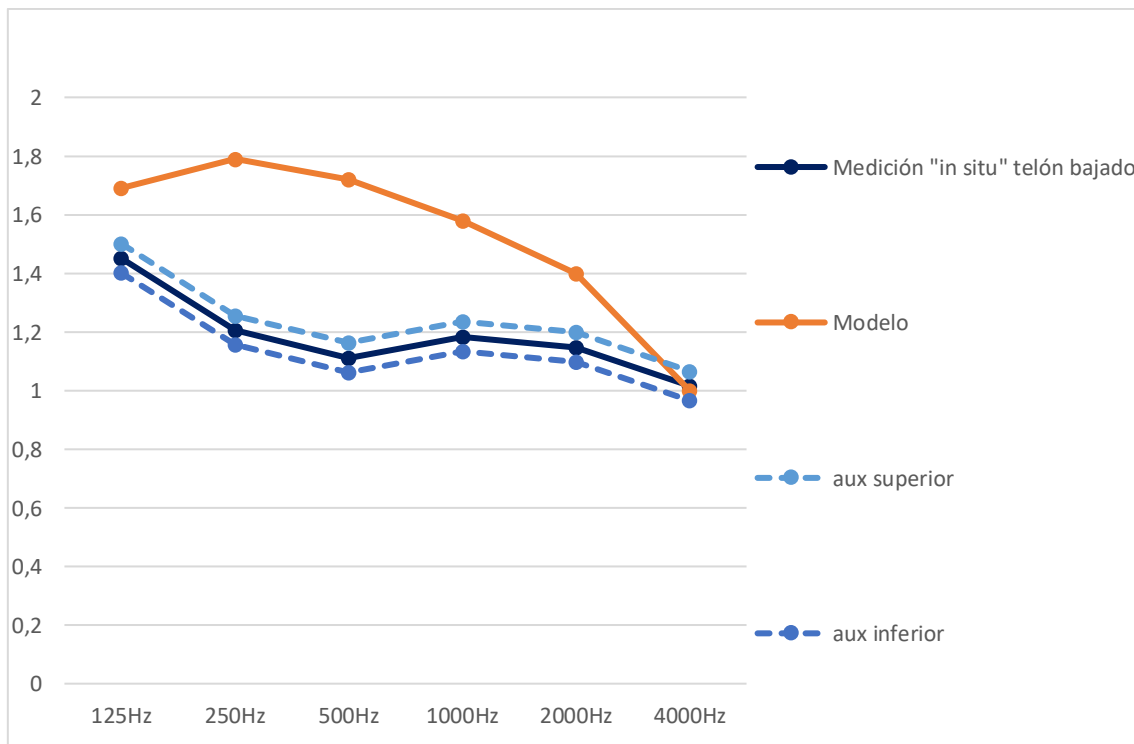


Figura 119. Representación gráfica del TR₃₀ medido “in situ” con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables y la modelización Ajuste 2

Los valores de la modelización en ODEON se encuentran por encima de la medición in situ en todas las frecuencias.

En la Tabla 164 y en la Tabla 165, se observan los valores asignados a las regiones de estudio X1 y X2, respectivamente.

Tabla 164. Región de estudio de la superficie X1

X1	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
B1i-R1i	0,21	0,15	0,05	0,02	0,02	0,02
B1i	0,26	0,2	0,1	0,07	0,04	0,07
B1i+R1i	0,31	0,25	0,15	0,12	0,06	0,12
INCREMENTOS R1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,02	0,05

Tabla 165. Región de estudio de la superficie X2

X2	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
B2i-R2i	0,01	0,15	0,30	0,79	0,98	0,84
B2i	0,05	0,19	0,35	0,84	0,98	0,89
B2i+R2i	0,09	0,23	0,40	0,89	0,98	0,94
INCREMENTOS R2	0,04	0,04	0,05	0,05	0,00	0,05

Se obtienen los siguientes pares de espectros de absorción, Tabla 166.

Tabla 166. Combinaciones de pares de espectros de absorción de las regiones X1 y X2

combinación	puntos	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	
1	B1i-R1i	0,210	0,150	0,050	0,020	0,020	0,020	X11
	B2i-R2i	0,010	0,010	0,010	0,020	0,020	0,170	X21
2	B1i-R1i	0,210	0,150	0,050	0,020	0,020	0,020	X11
	B2i	0,020	0,030	0,090	0,140	0,290	0,570	X22
3	B1i-R1i	0,210	0,150	0,050	0,020	0,020	0,020	X11
	B2i+R2i	0,030	0,050	0,170	0,260	0,560	0,970	X23
4	B1i	0,200	0,100	0,070	0,040	0,070	0,070	X12
	B2i-R2i	0,010	0,010	0,010	0,020	0,020	0,170	X21
5	B1i	0,200	0,100	0,070	0,040	0,070	0,070	X12
	B2i	0,020	0,030	0,090	0,140	0,290	0,570	X22
6	B1i	0,200	0,100	0,070	0,040	0,070	0,070	X12
	B2i+R2i	0,030	0,050	0,170	0,260	0,560	0,970	X23
7	B1i+R1i	0,310	0,250	0,150	0,120	0,060	0,120	X13
	B2i-R2i	0,010	0,010	0,010	0,020	0,020	0,170	X21
8	B1i+R1i	0,310	0,250	0,150	0,120	0,060	0,120	X13
	B2i	0,020	0,030	0,090	0,140	0,290	0,570	X22
9	B1i+R1i	0,310	0,250	0,150	0,120	0,060	0,120	X13
	B2i+R2i	0,030	0,050	0,170	0,260	0,560	0,970	X23

Se introducen las nueve combinaciones en ODEON y se calcula el tiempo de reverberación para cada una de ellas. El resultado se puede ver en la Tabla 167. El tiempo de reverberación de las combinaciones se designa de aquí en adelante en minúsculas acompañado de un número que hace referencia a la combinación de origen de la que es su resultado.

Tabla 167. TR₃₀ obtenidos de las combinaciones definidas anteriormente

TR₃₀	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
tr1	1,78	1,9	1,91	1,84	1,78	1,34
tr2	1,76	1,86	1,8	1,65	1,43	1,06
tr3	1,74	1,83	1,66	1,48	1,18	0,92
tr4	1,71	1,82	1,85	1,78	1,76	1,31
tr5	1,69	1,79	1,72	1,58	1,40	1,00
tr6	1,68	1,76	1,61	1,43	1,16	0,89
tr7	1,70	1,76	1,79	1,73	1,73	1,27
tr8	1,69	1,72	1,67	1,54	1,38	0,97
tr9	1,67	1,7	1,55	1,39	1,14	0,85

En la Figura 120 se observa que todos los puntos objetivo se encuentran dentro de los espectros del TR₃₀ de las distintas combinaciones.

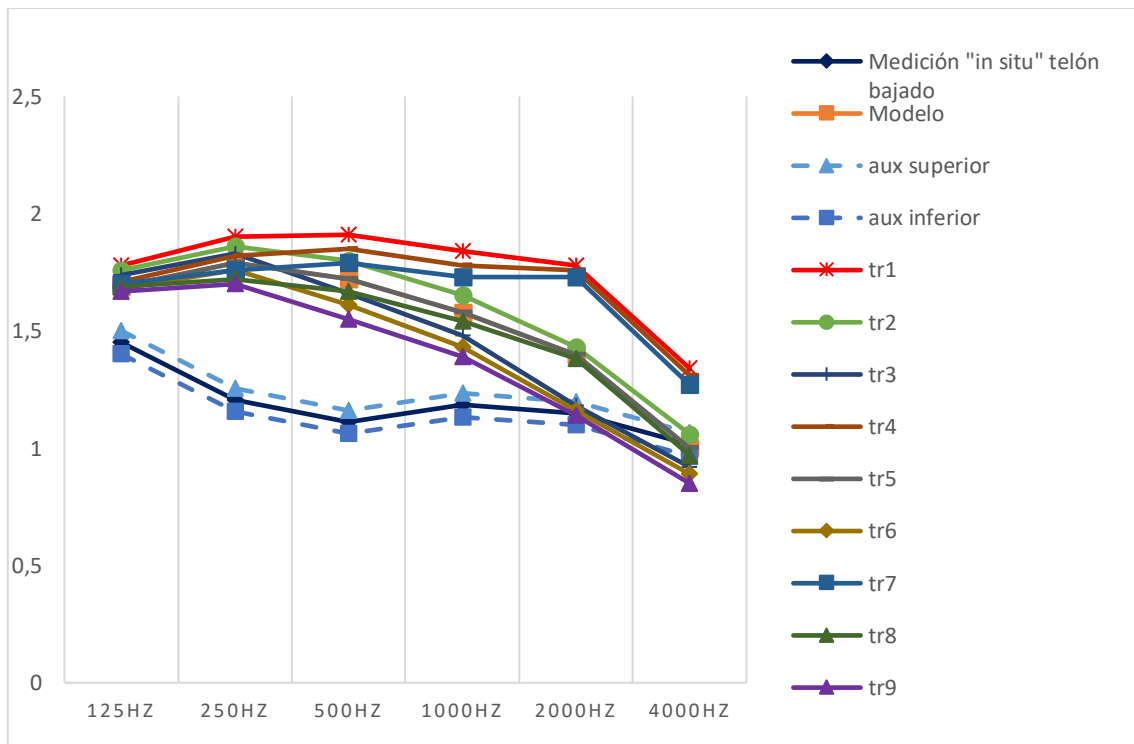


Figura 120. Comparativa TR₃₀. Medición "in situ", modelización y resultados tras aplicación del RSM

Con esta combinación y márgenes sólo algunas combinaciones están dentro de lo límites (tr9 a 2000 Hz y tr5 a 4000Hz).

4.4.3.1.4 Ajuste 3

Se disponen los marcos de tela en punto medio para poder aplicar un ancho margen de incremento R. Si no entraran los tiempos de reverberación de las combinaciones en el margen del "target" quiere decir que estas dos superficies no son suficientes para ajustar la sala.

Tabla 168. Coeficientes de absorción de las superficies de la sala y asignación de número de superficie

Zona	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	Nº SUP
Alrededor boca escenario, molduras y curvas de techo, antepecho P1 zona 1a	0,13	0,13	0,25	0,28	0,3	0,3	1
Techo escenario fondo sala, antepecho P2	0,16	0,1	0,06	0,04	0,04	0,04	2
Pavimento escenario y anfiteatro P1 zona 1a	0,4	0,3	0,2	0,17	0,15	0,1	3
Pavimento PB	0,05	0,03	0,06	0,09	0,1	0,2	4
Moqueta PB	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25	5
pavimento anfiteatro P1, zona 2a	0,020	0,020	0,030	0,040	0,040	0,050	6
Pavimento anfiteatro P2	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	7
Pavimento escaleras acceso P1 + zócalo y P2	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	8
Paramentos verticales (sonido hueco)	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09	9
Paramentos verticales (sonido solido)	0,013	0,015	0,02	0,028	0,04	0,05	10
Antepecho P1 zona 2a, zócalo de PB, frente escenario	0,420	0,210	0,060	0,050	0,050	0,040	11
Puertas acceso a plantas	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	12
Cortina de escena y cortinas escenario	0,140	0,350	0,550	0,720	0,700	0,650	13
Butacas anfiteatro 1 y 2	0,56	0,64	0,7	0,72	0,68	0,62	14
Butacas platea	0,72	0,79	0,83	0,84	0,83	0,79	15
Techo general y bajo voladizo primer anfiteatro	0,26	0,2	0,1	0,07	0,04	0,07	X1
Marcos de tela acolchada en paredes	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	X2

El TR₃₀ obtenido se compara con el de la medición realizada “in situ”, tal y como se refleja en la Tabla 169.

Tabla 169. TR₃₀ medio de la medición in situ y de la modelización con telón bajado

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Medición in situ	1,451	1,206	1,112	1,184	1,148	1,016
Modelización Primitiva	1,19	1,22	1,22	1,18	1,20	1,04

En la Figura 121 se representan el tiempo de reverberación medio, TR_{30} , medido in situ, los márgenes superior e inferior en los que el resultado del modelo es aceptable y el resultado del TR_{30} de la modelización inicial.

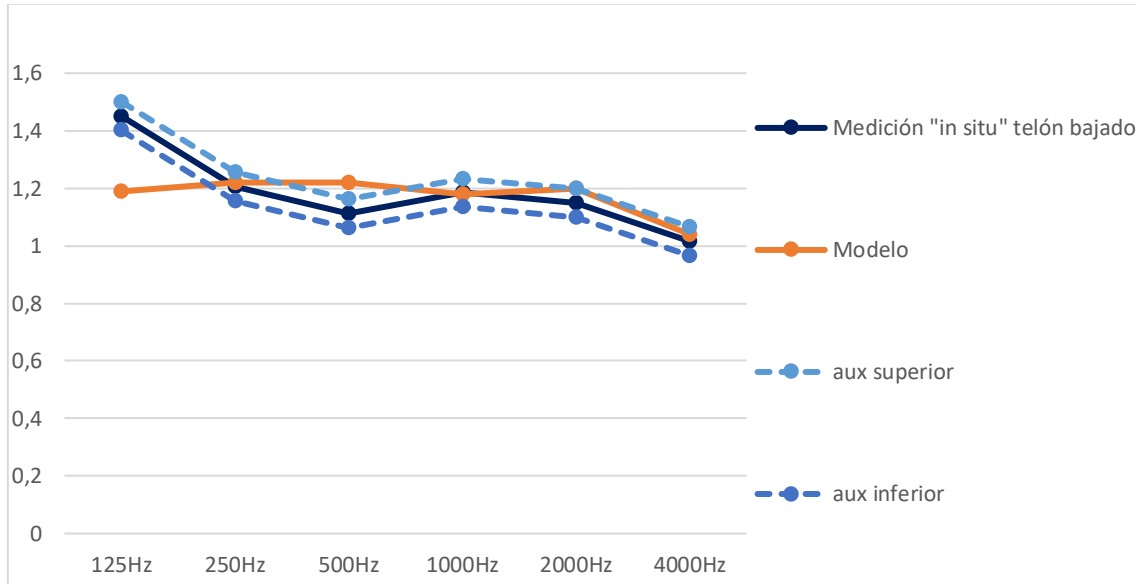


Figura 121. Comparativa TR_{30} . Medición "in situ", modelización y resultados tras aplicación del RSM

En la Tabla 170 y en la Tabla 171, se observan los valores asignados a las regiones de estudio X1 y X2, respectivamente.

Tabla 170. Región de estudio de la superficie X1

X1	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
B1i-R1i	0,21	0,15	0,05	0,02	0,02	0,02
B1i	0,26	0,2	0,1	0,07	0,04	0,07
B1i+R1i	0,31	0,25	0,15	0,12	0,06	0,12
INCREMENTOS R1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,02	0,05

Tabla 171. Región de estudio de la superficie X2

X2	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
B2i-R2i	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
B2i	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
B2i+R2i	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
INCREMENTOS R2	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45

Se obtienen los siguientes pares de espectros de absorción (Tabla 172).

Tabla 172. Combinaciones de pares de espectros de absorción de las regiones X1 y X2

combinación	puntos	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	
1	B1i-R1i	0,210	0,150	0,050	0,020	0,020	0,020	X11
	B2i-R2i	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	X21
2	B1i-R1i	0,210	0,150	0,050	0,020	0,020	0,020	X11
	B2i	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	X22
3	B1i-R1i	0,210	0,150	0,050	0,020	0,020	0,020	X11
	B2i+R2i	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	X23
4	B1i	0,200	0,100	0,070	0,040	0,070	0,070	X12
	B2i-R2i	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	X21
5	B1i	0,200	0,100	0,070	0,040	0,070	0,070	X12
	B2i	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	X22
6	B1i	0,200	0,100	0,070	0,040	0,070	0,070	X12
	B2i+R2i	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	X23
7	B1i+R1i	0,310	0,250	0,150	0,120	0,060	0,120	X13
	B2i-R2i	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	X21
8	B1i+R1i	0,310	0,250	0,150	0,120	0,060	0,120	X13
	B2i	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	X22
9	B1i+R1i	0,310	0,250	0,150	0,120	0,060	0,120	X13
	B2i+R2i	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	X23

Estas combinaciones se prueban en ODEON para obtener los tiempos de reverberación nuevos.

Tabla 173. TR₃₀ obtenidos de las combinaciones definidas anteriormente

TR ₃₀	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
tr1	1,72	1,83	1,86	1,79	1,73	1,48
tr2	1,23	1,26	1,27	1,23	1,21	1,08
tr3	0,97	0,97	1,02	1,00	1,00	0,93
tr4	1,66	1,76	1,8	1,73	1,71	1,43
tr5	1,19	1,22	1,22	1,18	1,20	1,04
tr6	0,93	0,94	0,98	0,95	0,98	0,89
tr7	1,65	1,70	1,74	1,68	1,69	1,39
tr8	1,18	1,18	1,18	1,14	1,18	1,00
tr9	0,9	0,92	0,96	0,94	0,97	0,85

En la Figura 122 se observa que todos los puntos objetivo se encuentran dentro de los espectros del TR₃₀ de las distintas combinaciones.

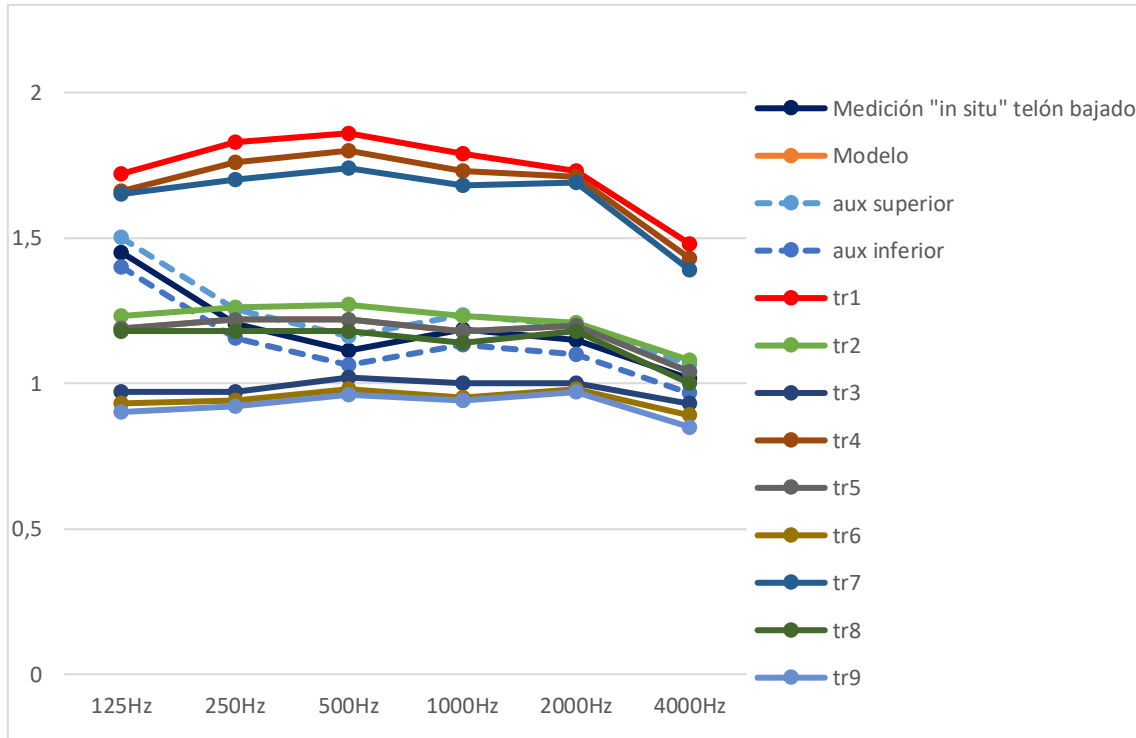


Figura 122. Comparativa TR₃₀. Medición "in situ", modelización y resultados tras aplicación del RSM

Para obtener las superficies de respuesta se agrupan los datos por frecuencia, formando nueve combinaciones de ternas de puntos por frecuencia. A partir de dichas superficies se obtienen nuevos pares de puntos que satisfacen el "target".

Ternas de datos por frecuencia y representación mediante superficie de respuesta:

Tabla 174. Ternas de datos a 125 Hz

125HZ			
	X1	X2	TR
	0,21	0,05	1,72
	0,21	0,50	1,23
	0,21	0,95	0,97
	0,20	0,05	1,66
	0,20	0,50	1,19
	0,20	0,95	0,93
	0,31	0,05	1,65
	0,31	0,50	1,18
	0,31	0,95	0,90

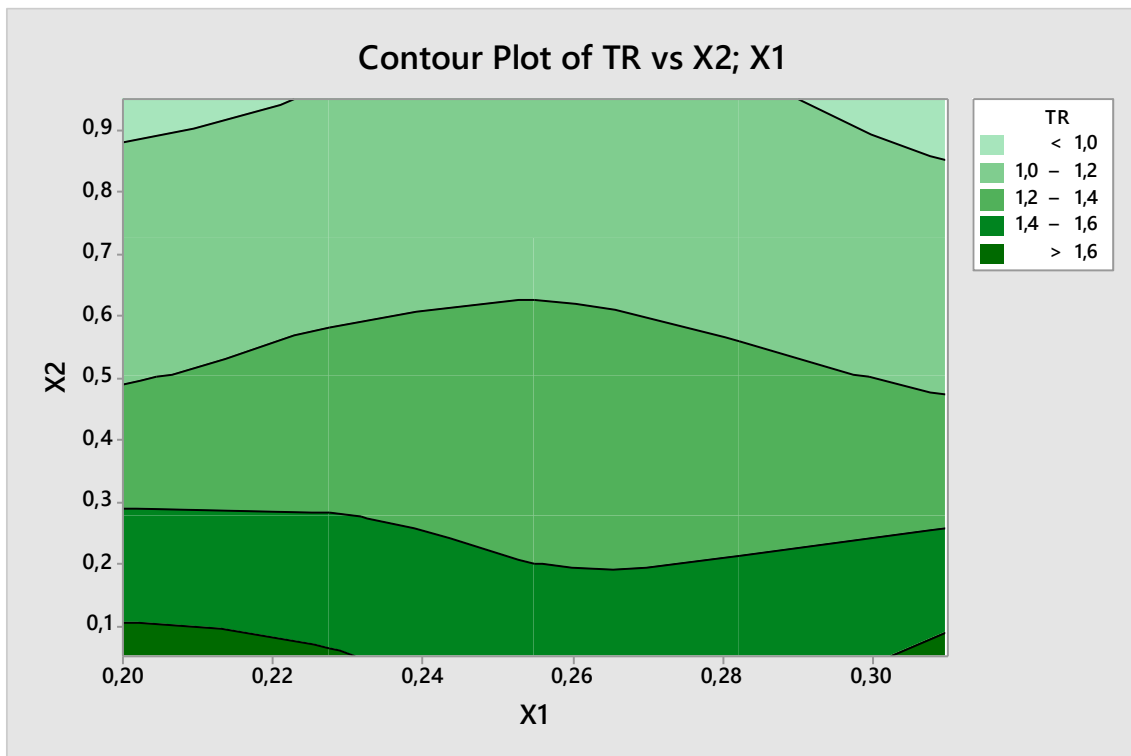


Figura 123. Superficie de respuesta a 125 Hz.

Tabla 175. Pares de puntos a 125 Hz

X1	0,26	0.24	0.28
X2	0,20	0.20	0.20

Tabla 176. Ternas de datos a 250 Hz

250HZ			
	X1	X2	TR
	0,15	0,05	1,83
	0,15	0,50	1,26
	0,15	0,95	0,97
	0,10	0,05	1,76
	0,10	0,50	1,22
	0,10	0,95	0,94
	0,25	0,05	1,70
	0,25	0,50	1,18
	0,25	0,95	0,92

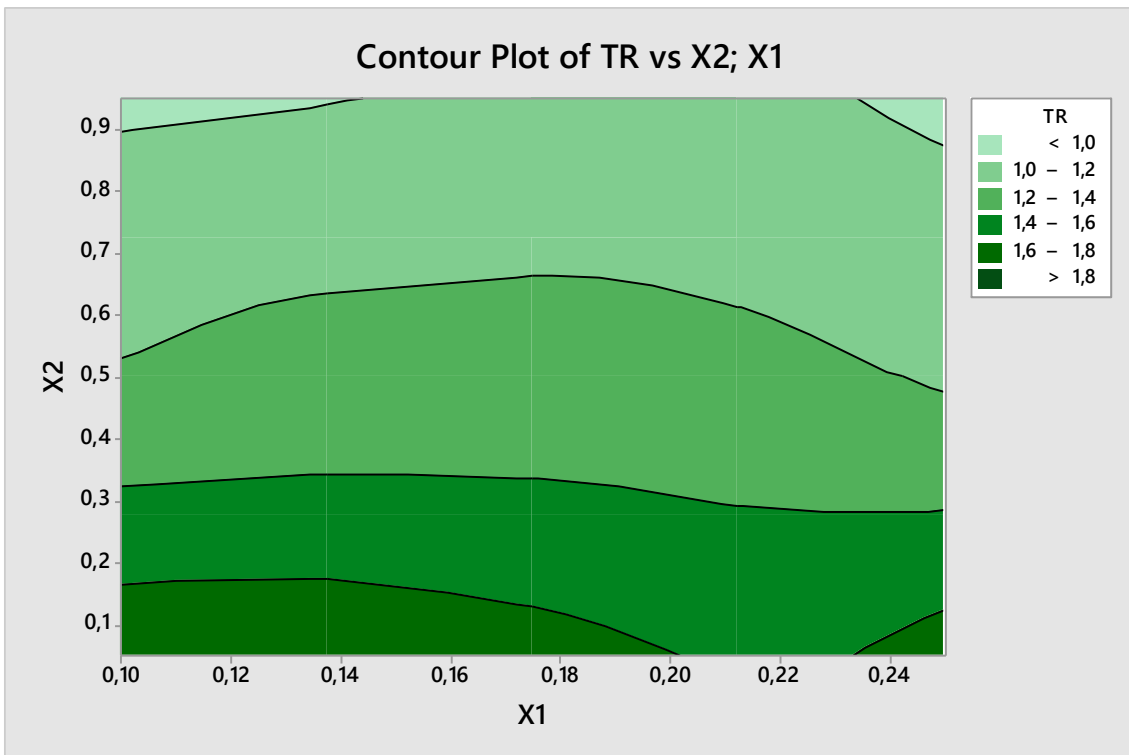


Figura 124. Superficie de respuesta a 250 Hz

Tabla 177. Pares de puntos a 250 HZ

X1	0,20	0.20	0.13-
X2	0,50	0.55	0.50

Tabla 178. ternas de datos a 500 Hz

500HZ			
	X1	X2	TR
	0,05	0,05	1,86
	0,05	0,50	1,27
	0,05	0,95	1,02
	0,07	0,05	1,80
	0,07	0,50	1,22
	0,07	0,95	0,98
	0,15	0,05	1,74
	0,15	0,50	1,18
	0,15	0,95	0,96

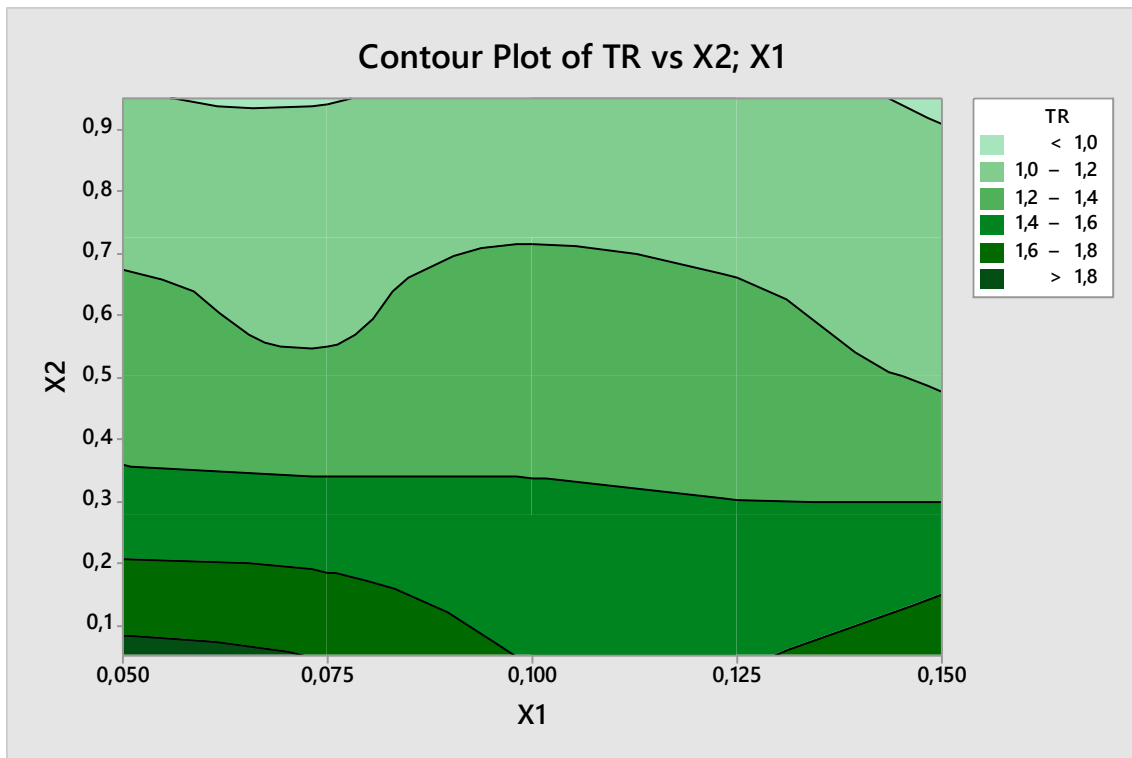


Figura 125. Superficie de respuesta a 500 Hz

Tabla 179. Pares de puntos a 500 Hz

X1	0,10	0,10	0,12	0,07
X2	0,60	0,58	0,60	0,56

Tabla 180. Ternas de datos a 1000 Hz

1000HZ

	X1	X2	TR
	0,02	0,05	1,79
	0,02	0,50	1,23
	0,02	0,95	1,00
	0,04	0,05	1,73
	0,04	0,50	1,18
	0,04	0,95	0,95
	0,12	0,05	1,68
	0,12	0,50	1,14
	0,12	0,95	0,94

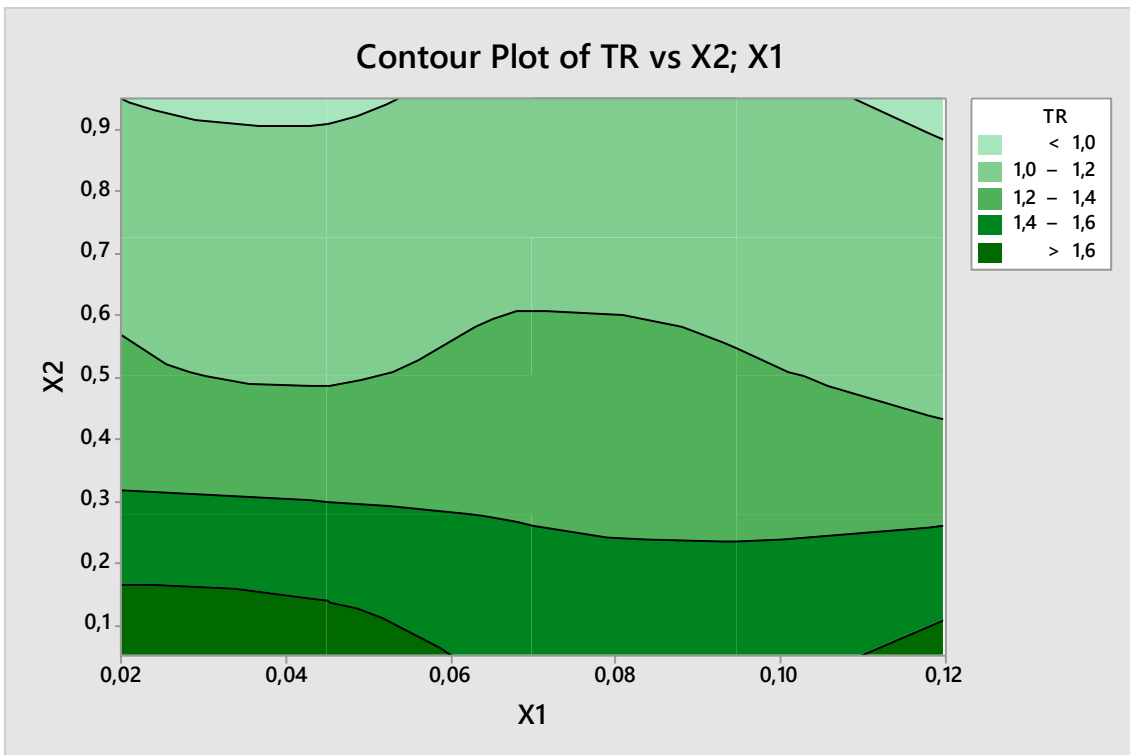


Figura 126. Superficie de respuesta a 1000 Hz

Tabla 181. Pares de puntos a 1000 Hz

X1	0,07	0,07	0,60
X2	0,50	0,45	0,41

Tabla 182. Ternas de datos a 2000 Hz

2000HZ			
	X1	X2	TR
	0,02	0,05	1,73
	0,02	0,50	1,21
	0,02	0,95	1,00
	0,07	0,05	1,71
	0,07	0,50	1,20
	0,07	0,95	0,98
	0,06	0,05	1,69
	0,06	0,50	1,18
	0,06	0,95	0,97

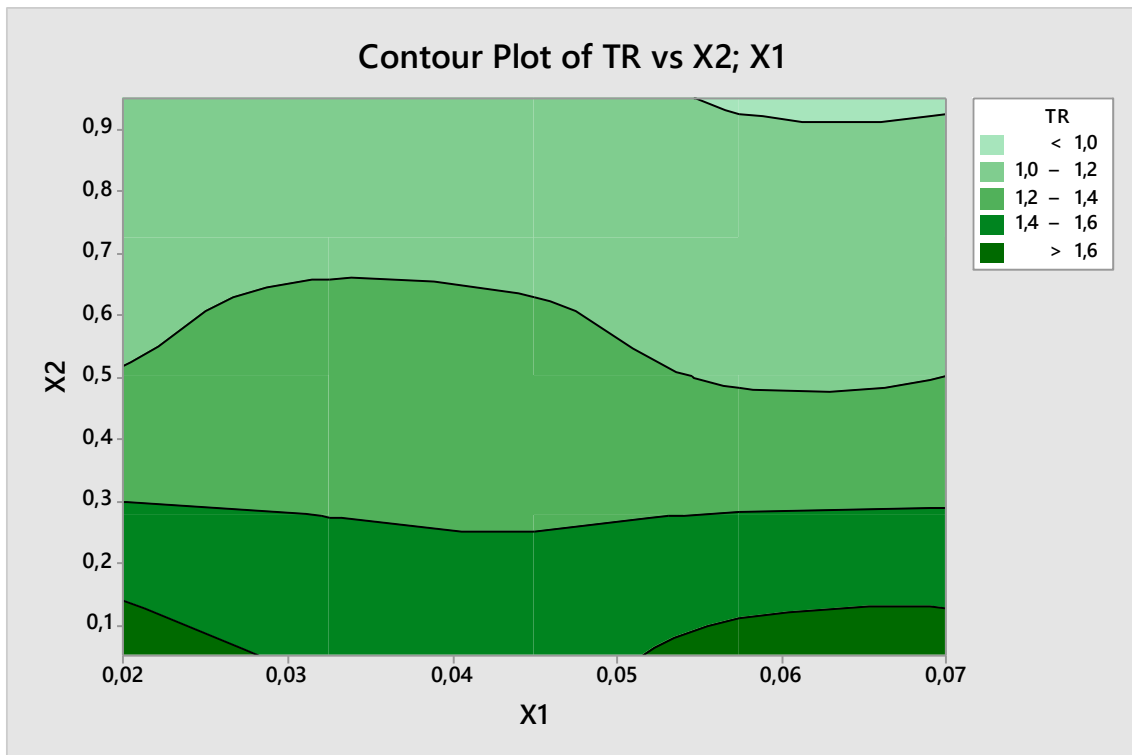


Figura 127. Superficie de respuesta a 2000 Hz

Tabla 183. Pares de puntos a 2000 Hz

X1	0,04	0,04	0,05	0,30
X2	0,5	0,55	0,55	0,49

Tabla 184. Ternas de datos a 4000 Hz

4000HZ			
	X1	X2	TR
	0,02	0,05	1,48
	0,02	0,50	1,08
	0,02	0,95	0,93
	0,07	0,05	1,43
	0,07	0,50	1,04
	0,07	0,95	0,89
	0,12	0,05	1,39
	0,12	0,50	1,00
	0,12	0,95	0,85

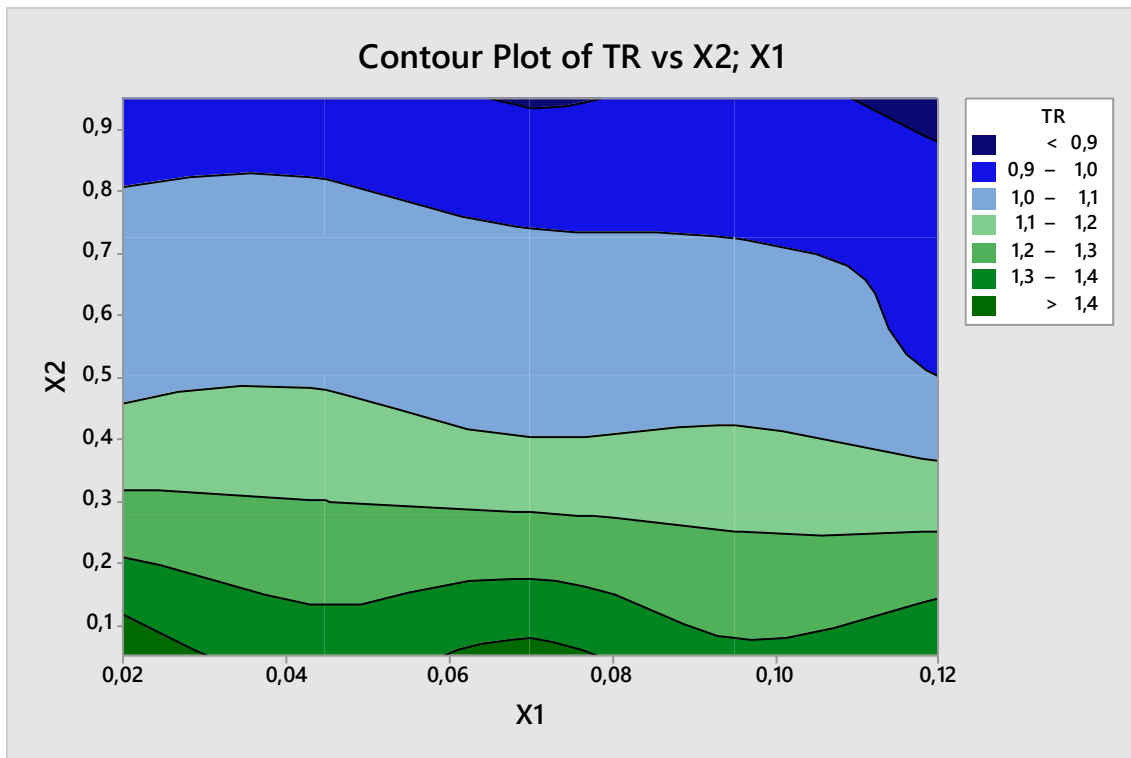


Figura 128. Superficie de respuesta a 4000 Hz

Tabla 185. Pares de puntos a 4000 Hz

X1	0.07	0.07	0.10
X2	0.5	0.55	0.58

4.4.3.1.4.1 Combinaciones

En la Tabla 186 se muestran los conjuntos de pares obtenidos.

En principio habría que descartar aquellos pares que se encuentren en los límites de la región estudiada. En este caso, dado que los pares se han obtenido de forma visual evitando los límites de la región, no es necesario descartar ningún par por esa razón.

Tabla 186. Pares de puntos obtenidos para el cálculo

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
X1	0,26	0,20	0,10	0,07	0,04	0,07
X2	0,20	0,50	0,60	0,50	0,50	0,50
X1	0,24	0,20	0,10	0,07	0,04	0,07
X2	0,20	0,55	0,60	0,45	0,55	0,55
X1	0,28		0,12		0,05	
X2	0,20		0,60		0,55	

Se seleccionan los pares que más se ajustan a los valores esperados de cada uno de ellos.

Probamos los nuevos pares en el modelo virtual.

Combinación 1.

En la Tabla 187 aparecen los espectros de absorción de las superficies X1 y X2 empleadas en la simulación.

Tabla 187. Combinación de espectros de absorción de las superficies estudiadas

puntos	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
X1	0,28	0,20	0,12	0,07	0,05	0,07
X2	0,20	0,55	0,60	0,50	0,55	0,55

La combinación anterior da como resultado el tiempo de reverberación que se muestra en la Tabla 188 y en la Figura 129.

Tabla 188. TR_{30} obtenido

TR_{30}	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
tr1	1,46	1,19	1,15	1,19	1,16	1,02

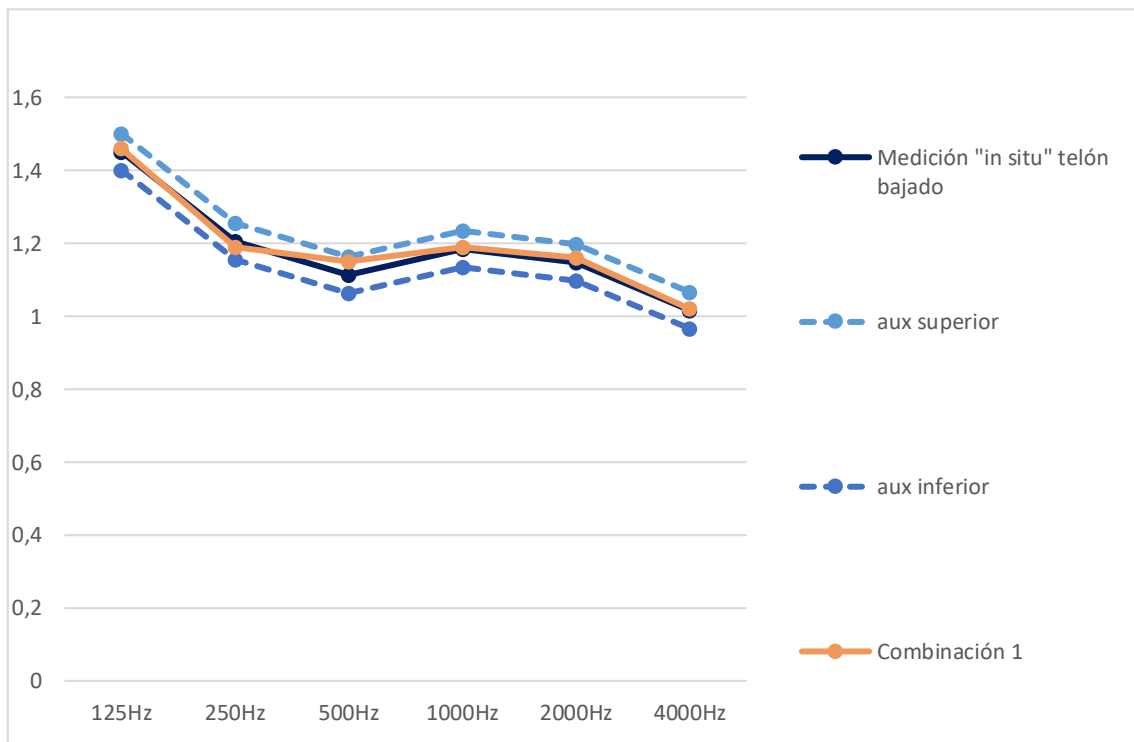


Figura 129. Representación gráfica del TR_{30} medido "in situ" con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables, la modelización inicial, y la modelización de la combinación 1

En la Figura 129 se observan los valores del TR_{30} de la medición real con un margen superior e inferior de 0,05 segundos, del modelo inicial y del modelo tras la aplicación del RSM. Los valores de la modelización que se encuentren dentro de estos márgenes se consideran aceptables.

El espectro de absorción tr1 se encuentra dentro de los márgenes establecidos como aceptables, por lo que se admite la combinación 1. Los cambios del espectro de absorción del material X1, X2 y de las butacas, se muestran en la Figura 130 y en la Figura 131Figura 72 respectivamente.

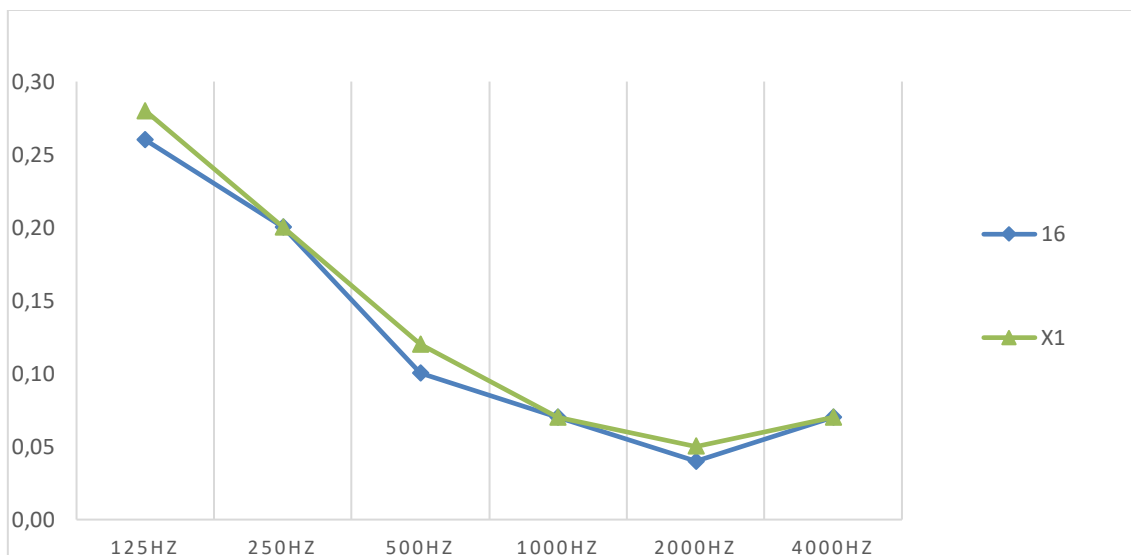


Figura 130. Espectro de absorción del techo de la sala (bibliografía- azul- y aplicación RSM-verde-)

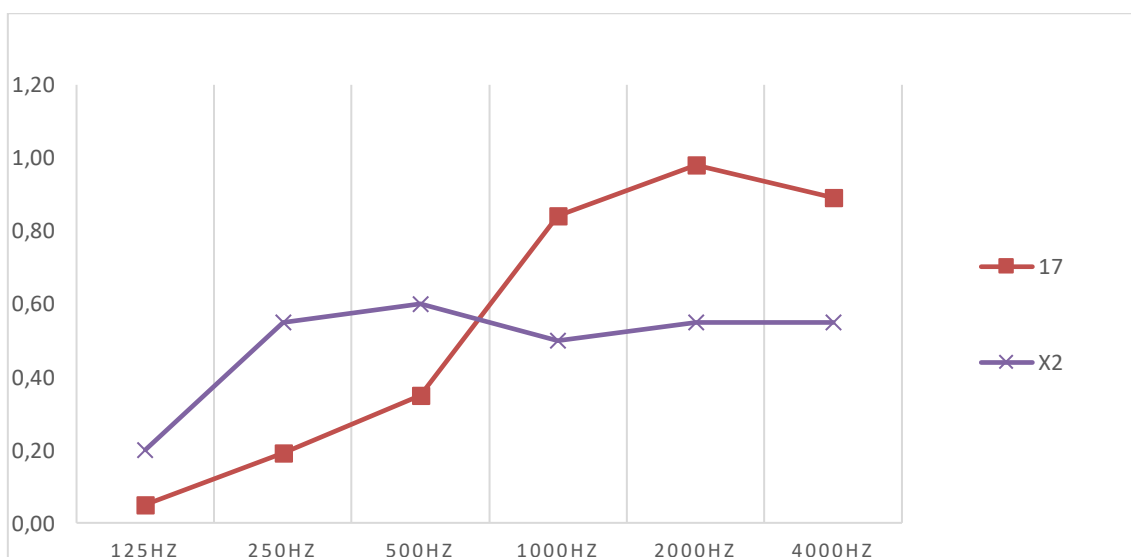


Figura 131. Espectro de absorción marcos de tela acolchados en las paredes (bibliografía-rojo- y aplicación RSM-morado-)

Los espectros de absorción 16 y 17 se corresponden con los datos de la bibliografía del techo y de los marcos acolchados en paredes Figura 130 respectivamente. X1 y X2, representan los ajustes realizados a cada uno de ellos tras la aplicación del RSM.

Se aceptan los nuevos valores de los materiales de la sala, en la Tabla 189 se muestran los coeficientes de absorción de las superficies tras el ajuste realizado con el telón bajado.

Tabla 189. Coeficientes de absorción de las superficies tras aplicación del RSM con telón bajado

Zona	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	Nº SUP
Molduras	0,13	0,13	0,25	0,28	0,3	0,3	1
Techo escenario fondo sala, antepecho P2	0,16	0,1	0,06	0,04	0,04	0,04	2
Pavimento escenario y anfiteatro P1 zona 1a	0,4	0,3	0,2	0,17	0,15	0,1	3
Pavimento PB	0,05	0,03	0,06	0,09	0,1	0,2	4
Moqueta PB	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25	5
Pavimento anfiteatro P1, zona 2a	0,020	0,020	0,030	0,040	0,040	0,050	6
Pavimento anfiteatro P2	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	7
Pavimento escaleras acceso P1 + zócalo y P2	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	8
Paramentos verticales (sonido hueco)	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09	9
Paramentos verticales (sonido solido)	0,013	0,015	0,02	0,028	0,04	0,05	10
Antepecho P1 zona 2a, zócalo de PB, frente escenario	0,420	0,210	0,060	0,050	0,050	0,040	11
Puertas acceso a plantas	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	12
Cortina de escena y cortinas escenario	0,140	0,350	0,550	0,720	0,700	0,650	13
Butacas anfiteatro 1 y 2	0,56	0,64	0,7	0,72	0,68	0,62	14
Butacas platea	0,72	0,79	0,83	0,84	0,83	0,79	15
Techo general y bajo anfiteatro	0,28	0,20	0,12	0,07	0,05	0,07	16
Marcos de tela acolchada en paredes	0,20	0,55	0,60	0,50	0,55	0,55	17

4.4.3.2 Aplicación del RSM con telón subido

Acabada la evaluación de la sala con la boca de escena cerrada (telón bajado), se procede a estudiar la sala con la boca de escena abierta (telón subido).

4.4.3.2.1 Modelo virtual de la sala con telón subido

En el modelo virtual de la sala, se sustituye la cortina de la boca de escena por una superficie nueva, la abertura de escenario, que será nuestra incógnita. Se asignan los coeficientes hallados en el proceso anterior.

Las coordenadas de la fuente y de los receptores son las mismas que en el caso anterior.

Se cambia el material de la boca de escena en el modelo ajustado anterior y se calcula el modelo para boca de escena abierta. En la Tabla 190 se muestran los coeficientes de

absorción empleados en la modelización inicial con boca de escena abierta, reordenados.

Tabla 190. Superficies de la sala con distinta materialidad y comportamiento absorbente, asignación de número de superficie

Zona	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	Nº SUP
Molduras	0,13	0,13	0,25	0,28	0,30	0,30	1
Techo escenario fondo sala, antepecho P2	0,16	0,10	0,06	0,04	0,04	0,04	2
Pavimento escenario y anfiteatro P1 zona 1a	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10	3
Pavimento PB	0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,20	4
Moqueta PB	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25	5
Pavimento anfiteatro P1, zona 2a	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	6
Pavimento anfiteatro P2	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	7
Pavimento escaleras acceso P1 + zócalo y P2	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	8
Paramentos verticales (sonido hueco)	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09	9
Paramentos verticales (sonido solido)	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	10
Antepecho P1 zona 2a, zócalo de PB, frente escenario	0,42	0,21	0,06	0,05	0,05	0,04	11
puertas acceso a plantas	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	12
Butacas anfiteatro 1 y 2	0,56	0,64	0,70	0,72	0,68	0,62	13
Butacas platea	0,72	0,79	0,83	0,84	0,83	0,79	14
Techo general y bajo anfiteatro	0,28	0,20	0,12	0,07	0,05	0,07	15
Marcos de tela acolchada en paredes	0,20	0,55	0,60	0,50	0,55	0,55	X1
Boca de escena	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	X2

Se obtiene el tiempo de reverberación TR_{30} medio. El TR_{30} obtenido se compara con el de la medición realizada “in situ”, tal y como se ve en la Tabla 191 y en la Figura 132.

Tabla 191. Comparativa TR₃₀ medición real y modelo virtual

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Medición "in situ" telón subido	1,541	1,330	1,201	1,200	1,159	1,018
Modelización Primitiva	1,44	1,16	1,16	1,22	1,18	1,05

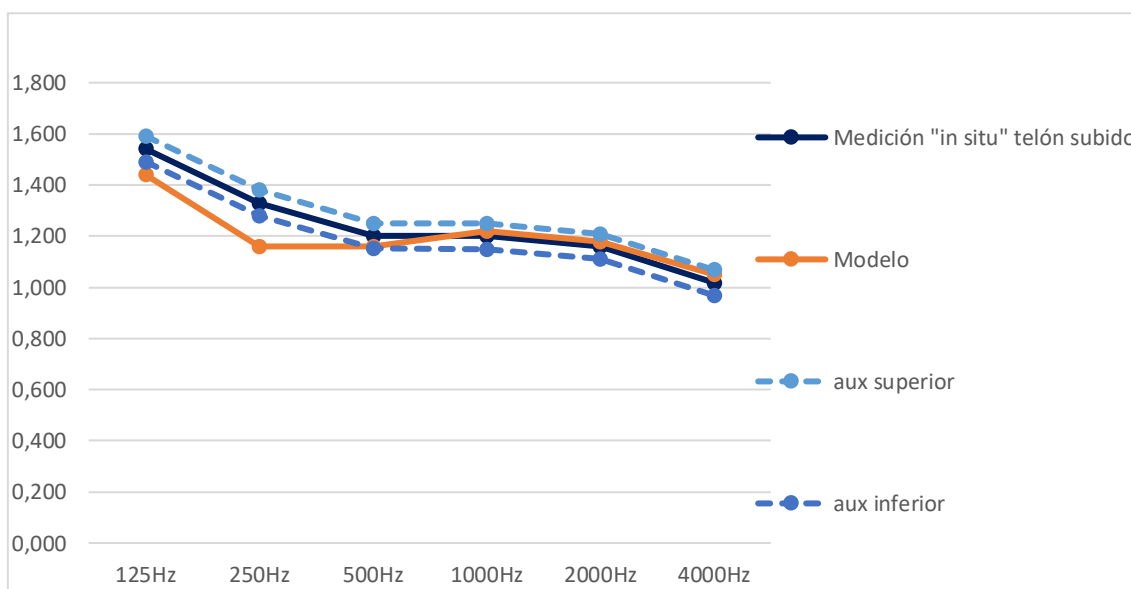


Figura 132. Comparativa TR₃₀, medición "in situ" con telón subido y modelización inicial con boca de escena abierta

En Figura 132 se representan el tiempo de reverberación medio, TR₃₀, medido "in situ" de la sala con telón subido, los límites superior e inferior y el resultado del TR₃₀ de la modelización con los ajustes realizados con telón bajado. En altas frecuencias, los valores del tiempo de reverberación del modelo se encuentran dentro de los límites aceptables. En bajas frecuencias se requiere menos absorción.

Es necesario ajustar el modelo virtual a la medición real con telón subido.

4.4.3.2.2 Ajuste mediante método de superficies de respuesta

Completada la evaluación de la sala con la boca de escena cerrada (telón bajado), se procede a estudiar la sala con la boca de escena abierta (telón subido).

4.4.3.2.3 Ajuste 1

Se especifican los valores de las dos regiones de estudio, se toman los valores de la bibliografía y se asignan unos incrementos a cada una de ellas.

En la Tabla 192 y en la Tabla 193, se observan los valores asignados a las regiones de estudio X1 y X2, respectivamente.

Tabla 192. Región de estudio de la superficie incógnita X1

X1	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
B1i-R1i	0,05	0,400	0,45	0,35	0,400	0,400
B1i	0,20	0,55	0,60	0,50	0,55	0,55
B1i+R1i	0,35	0,700	0,75	0,65	0,700	0,700
INCREMENTOS R1	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15

Tabla 193. Región de estudio de la superficie incógnita X2

X2	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
B2i-R2i	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
B2i	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
B2i+R2i	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70
INCREMENTOS R2	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15

Tabla 194. Combinaciones de pares de espectros absorbentes a estudiar

combinación	puntos	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	
1	B1i-R1i	0,05	0,40	0,45	0,35	0,40	0,40	X11
	B2i-R2i	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	X21
2	B1i-R1i	0,05	0,40	0,45	0,35	0,40	0,40	X11
	B2i	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	X22
3	B1i-R1i	0,05	0,40	0,45	0,35	0,40	0,40	X11
	B2i+R2i	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	X23
4	B1i	0,20	0,55	0,60	0,50	0,55	0,55	X12
	B2i-R2i	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	X21
5	B1i	0,20	0,55	0,60	0,50	0,55	0,55	X12
	B2i	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	X22
6	B1i	0,20	0,55	0,60	0,50	0,55	0,55	X12
	B2i+R2i	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	X23
7	B1i+R1i	0,35	0,70	0,75	0,65	0,70	0,70	X13
	B2i-R2i	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	X21
8	B1i+R1i	0,35	0,70	0,75	0,65	0,70	0,70	X13
	B2i	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	X22
9	B1i+R1i	0,35	0,70	0,75	0,65	0,70	0,70	X13
	B2i+R2i	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	X23

Estas combinaciones se introducen en ODEON para obtener los tiempos de reverberación para cada una de ellas. El resultado se puede ver en la Tabla 195

Tabla 195.. TR₃₀ obtenidos de las combinaciones definidas anteriormente

TR ₃₀	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
tr1	1,65	1,30	1,27	1,38	1,32	1,14
tr2	1,62	1,30	1,27	1,33	1,28	1,13
tr3	1,59	1,28	1,25	1,33	1,27	1,09
tr4	1,46	1,22	1,23	1,28	1,23	1,06
tr5	1,44	1,16	1,16	1,22	1,18	1,05
tr6	1,42	1,15	1,15	1,22	1,17	1,01
tr7	1,30	1,13	1,14	1,18	1,15	0,99
tr8	1,28	1,07	1,07	1,12	1,11	0,99
tr9	1,26	1,06	1,06	1,12	1,10	0,95

En la Figura 133 se observa que tras la aplicación del RSM, el “target” se encuentra dentro de los espectros del TR₃₀ de las distintas combinaciones.

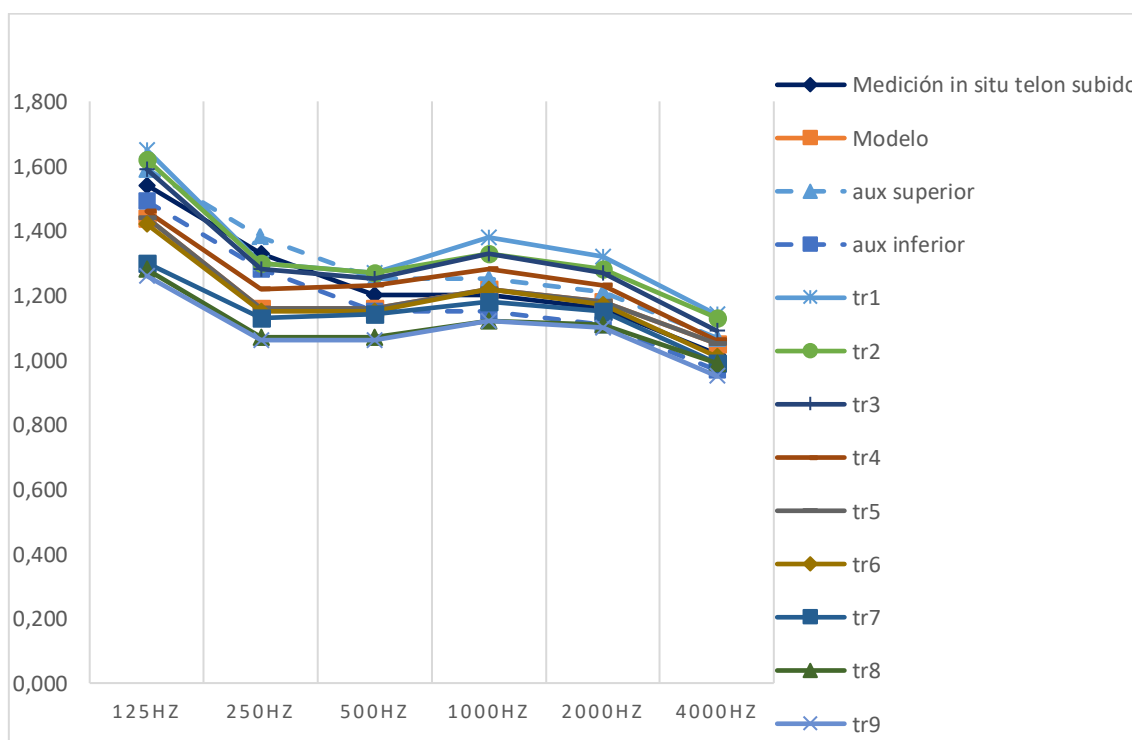


Figura 133. Comparativa TR₃₀. Medición in situ, modelización, y resultados TR₃₀ tras aplicación RSM

Para obtener las superficies de respuesta, se agrupan los datos por frecuencia, formando nueve combinaciones de ternas de puntos por frecuencia. A partir de dichas superficies se obtienen nuevos pares de puntos que satisfacen el “target”.

Ternas de datos por frecuencia y representación mediante superficie de respuesta:

Tabla 196. Ternas de datos a 125 Hz

125HZ			
	X1	X2	TR
	0,05	0,15	1,65
	0,05	0,30	1,62
	0,05	0,45	1,59
	0,20	0,15	1,46
	0,20	0,30	1,44
	0,20	0,45	1,42
	0,35	0,15	1,30
	0,35	0,30	1,28
	0,35	0,45	1,26

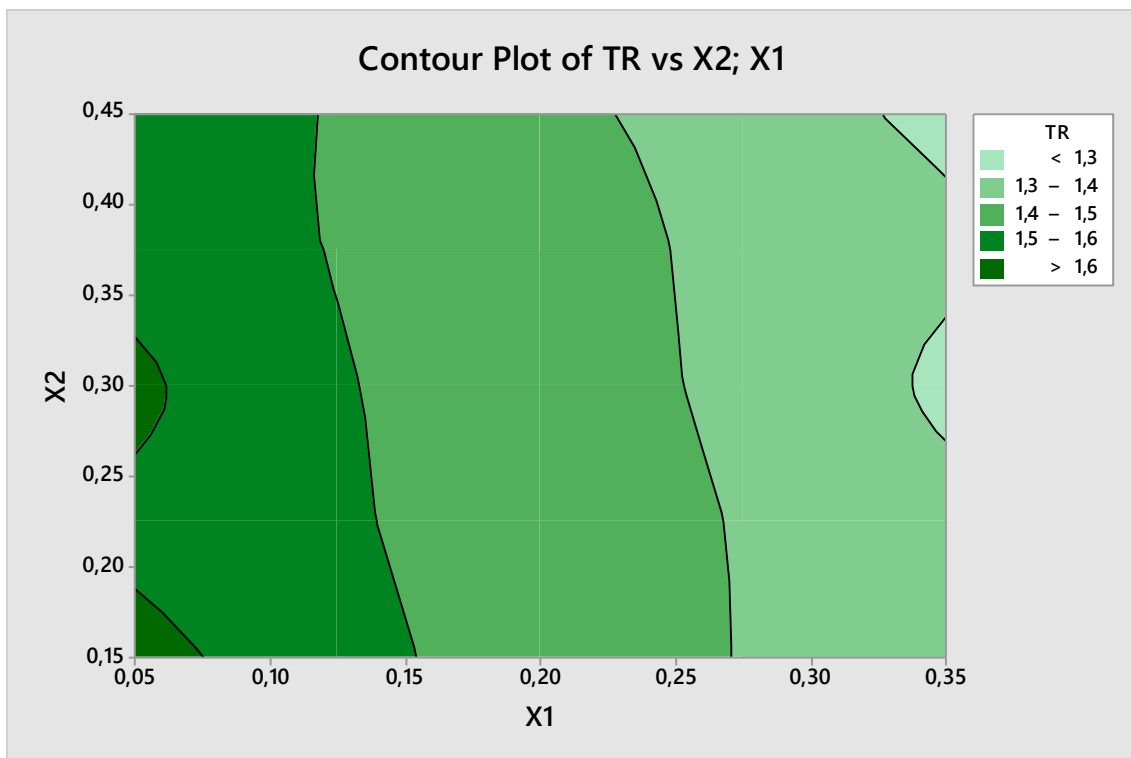


Figura 134. Superficie de respuesta a 125 Hz.

Tabla 197. Pares de puntos a 125 Hz

X1	0.17	0.12
X2	0.15	0.33

Tabla 198. Ternas de datos a 250 Hz

250HZ			
	X1	X2	TR
	0,40	0,20	1,30
	0,40	0,35	1,30
	0,40	0,50	1,28
	0,55	0,20	1,22
	0,55	0,35	1,16
	0,55	0,50	1,15
	0,70	0,20	1,13
	0,70	0,35	1,07
	0,70	0,50	1,06

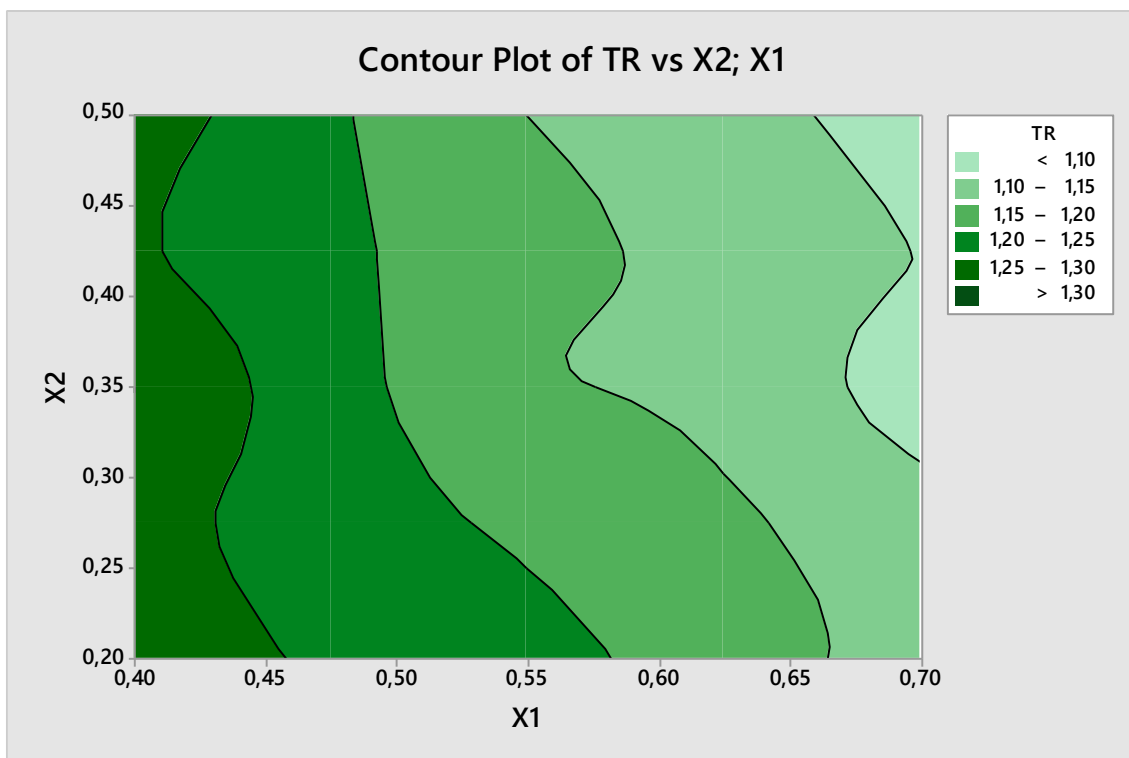


Figura 135. Superficie de respuesta a 250 Hz

Tabla 199. Pares de puntos a 250 HZ

X1	0.40	0.40
X2	0.20	0.30

Tabla 200. ternas de datos a 500 Hz

500HZ			
	X1	X2	TR
	0,45	0,25	1,27
	0,45	0,40	1,27
	0,45	0,55	1,25
	0,60	0,25	1,23
	0,60	0,40	1,16
	0,60	0,55	1,15
	0,75	0,25	1,14
	0,75	0,40	1,07
	0,75	0,55	1,06

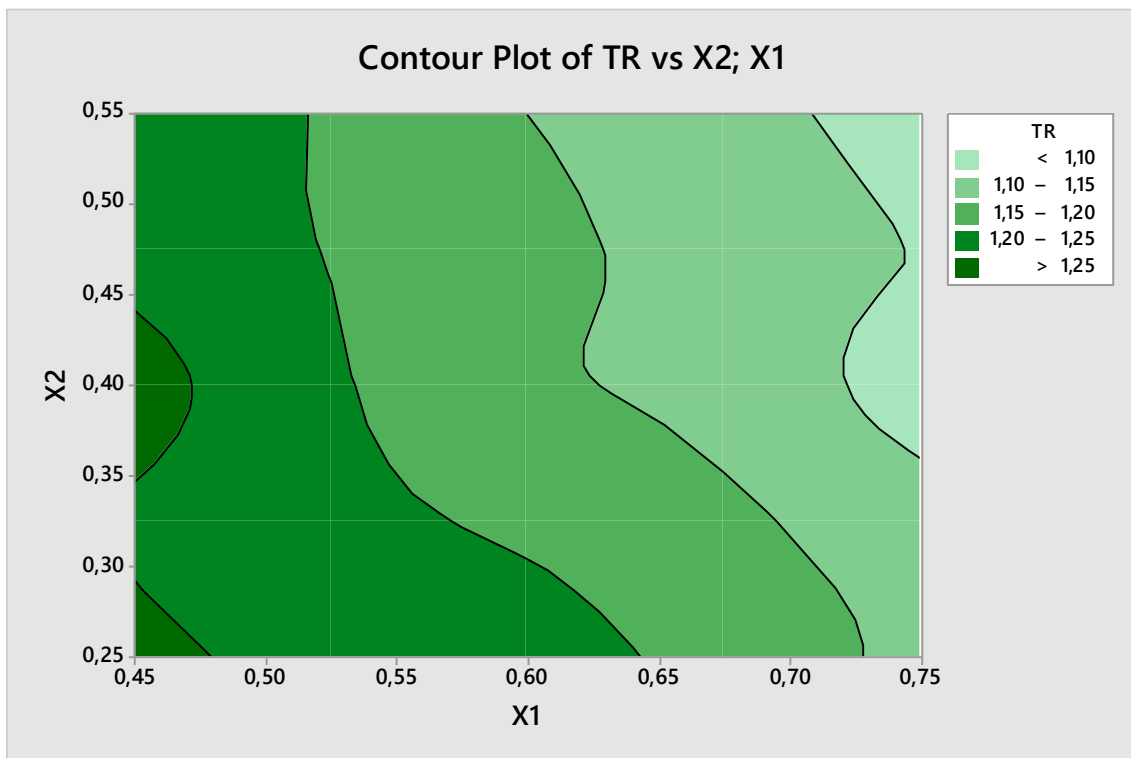


Figura 136.. Superficie de respuesta a 500 Hz

Tabla 201. Pares de puntos a 500 Hz

X1	0.65	0.60	0.55	0.52
X2	0.25	0.30	0.37	0.40

Tabla 202. Ternas de datos a 1000 Hz

1000HZ			
	X1	X2	TR
	0,35	0,30	1,38
	0,35	0,45	1,33
	0,35	0,60	1,33
	0,50	0,30	1,28
	0,50	0,45	1,22
	0,50	0,60	1,22
	0,65	0,30	1,18
	0,65	0,45	1,12
	0,65	0,60	1,12

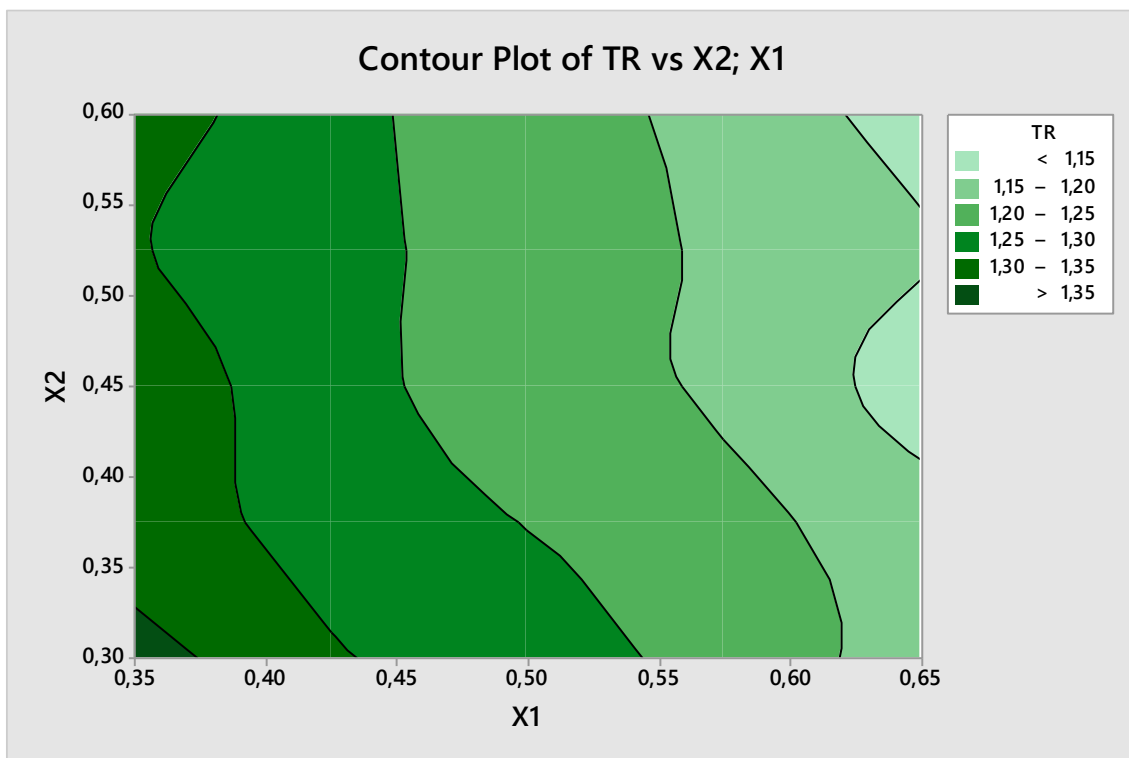


Figura 137. Superficie de respuesta a 1000 Hz

Tabla 203. Pares de puntos a 1000 Hz

X1	0.51	0.55	0.53
X2	0.51	0.40	0.45

Tabla 204. Ternas de datos a 2000 Hz

2000HZ			
	X1	X2	TR
	0,40	0,35	1,32
	0,40	0,50	1,28
	0,40	0,65	1,27
	0,55	0,35	1,23
	0,55	0,50	1,18
	0,55	0,65	1,17
	0,70	0,35	1,15
	0,70	0,50	1,11
	0,70	0,65	1,10

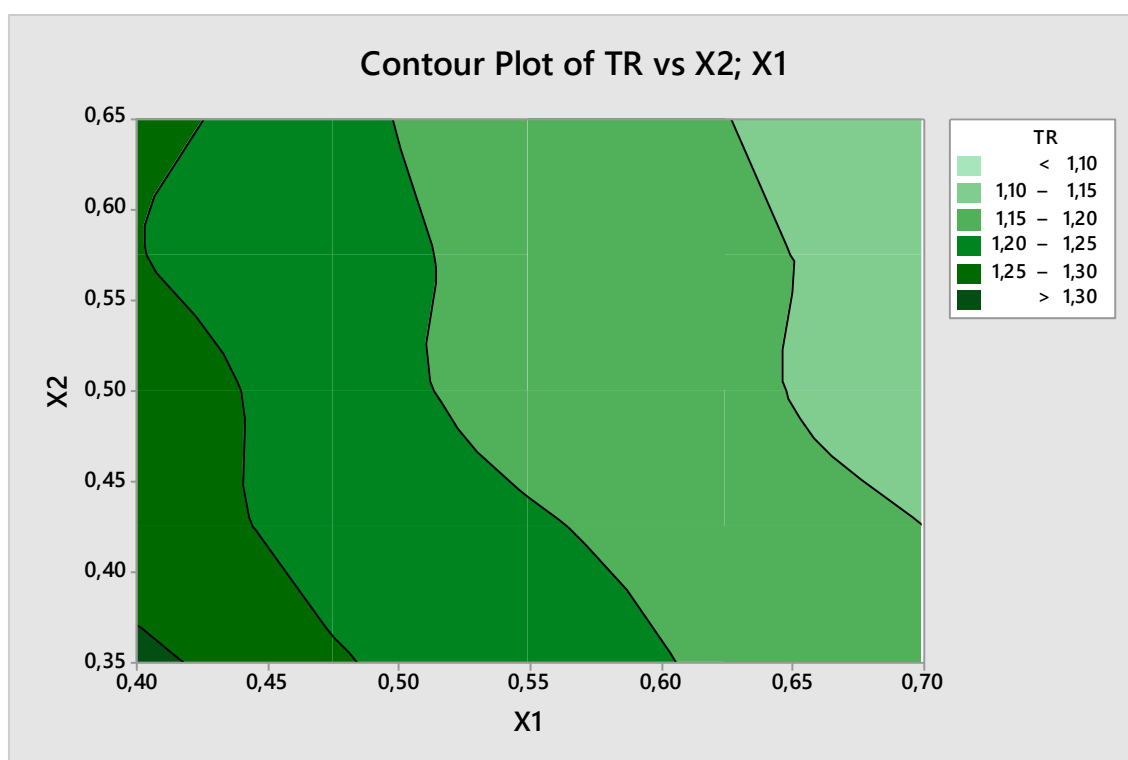


Figura 138. Superficie de respuesta a 2000 Hz

Tabla 205. Pares de puntos a 2000 Hz

X1	0.55	0.62
X2	0.50	0.45

Tabla 206. Ternas de datos a 4000 Hz

4000HZ			
	X1	X2	TR
	0,40	0,40	1,14
	0,40	0,55	1,13
	0,40	0,70	1,09
	0,55	0,40	1,06
	0,55	0,55	1,05
	0,55	0,70	1,01
	0,70	0,40	0,99
	0,70	0,55	0,99
	0,70	0,70	0,95

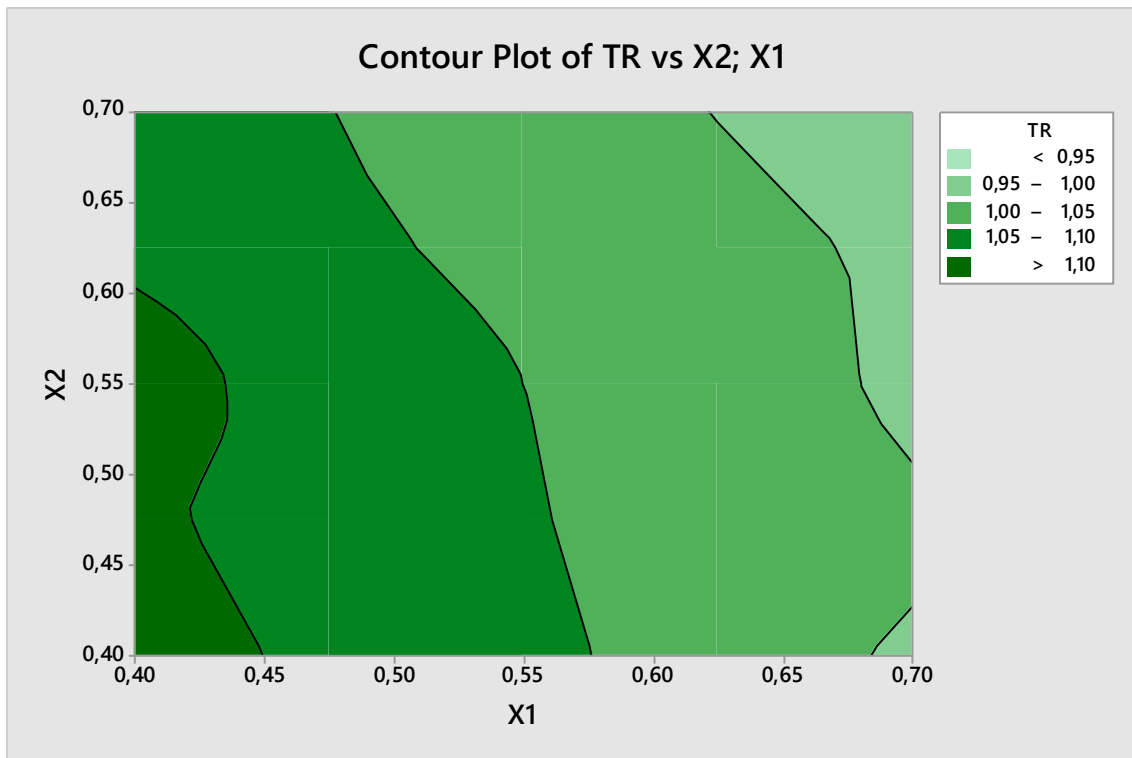


Figura 139. Superficie de respuesta a 4000 Hz

Tabla 207. Pares de puntos a 4000 Hz

X1	0.55	0.63
X2	0.55	0.55

4.4.3.2.3.1 Combinaciones

Se organizan en una tabla los conjuntos de pares obtenidos:

Tabla 208. Pares de puntos obtenidos para el cálculo

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
X1	0,17	0,40	0,55	0,55	0,55	0,55
X2	0,15	0,20	0,37	0,40	0,50	0,55
X1	0,17	0,50	0,57	0,55	0,55	0,50
X2	0,15	0,18	0,37	0,45	0,50	0,57

Se seleccionan los pares que más se ajustan a los valores esperados de cada uno de ellos, y se prueban en el modelo virtual.

Combinación 1.

En la Tabla 209 se muestran los espectros de absorción de las superficies X1 y X2 empleadas en la simulación.

Tabla 209. Combinación de espectros de absorción de las superficies estudiadas

puntos	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
X1	0,17	0,40	0,55	0,50	0,50	0,50
X2	0,15	0,20	0,37	0,45	0,50	0,55

La combinación anterior da como resultado el tiempo de reverberación que se muestra en la Tabla 210 y en la Figura 140.

Tabla 210. TR₃₀ obtenido

TR₃₀	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
tr1	1,49	1,35	1,22	1,24	1,23	1,07

En la Figura 140 se observan los valores del TR_{30} de la medición real con un margen superior e inferior de 0,05 segundos y del modelo tras la aplicación del RSM. El espectro de absorción se puede ajustar más en altas frecuencias.

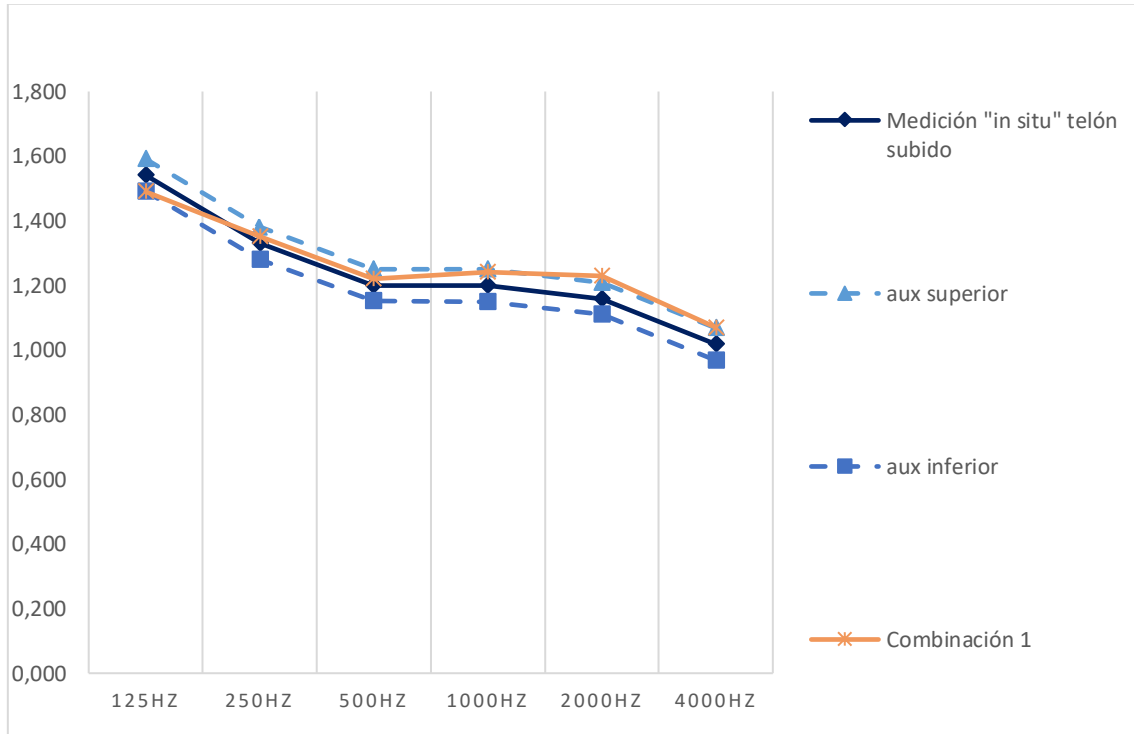


Figura 140. Comparativa TR_{30} , medición "in situ" con telón subido y modelización inicial con boca de escena abierta

Combinación 2.

En la Tabla 211 se muestran los espectros de absorción de las superficies X1 y X2 empleadas en la simulación.

Tabla 211. Combinación de espectros de absorción de las superficies estudiadas

puntos	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
X1	0,17	0,50	0,57	0,55	0,55	0,50
X2	0,15	0,18	0,37	0,45	0,50	0,57

La combinación anterior da como resultado el tiempo de reverberación que se muestra en la Tabla 212. TR y en la Figura 141.

Tabla 212. TR₃₀ obtenido

TR ₃₀	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
tr1	1,49	1,27	1,21	1,21	1,20	1,06

En la Figura 141 se observan los valores del TR₃₀ de la medición real con un margen superior e inferior de 0,05 segundos y del modelo tras la aplicación del RSM. El espectro de absorción se encuentra dentro de los márgenes establecidos como aceptables, por lo que se admite la combinación 2.

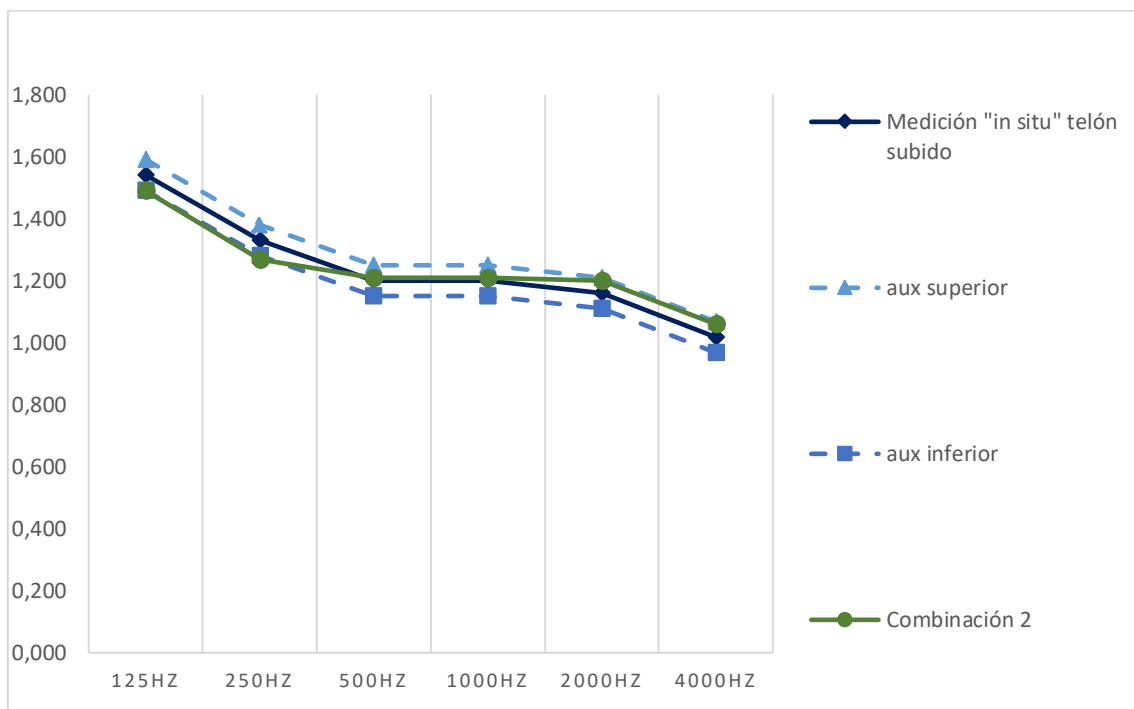


Figura 141. Comparativa TR₃₀, medición "in situ" con telón subido y modelización inicial con boca de escena abierta

Se prueban los materiales empleados con el modelo virtual con el telón bajado. El resultado se muestra en la Figura 142.

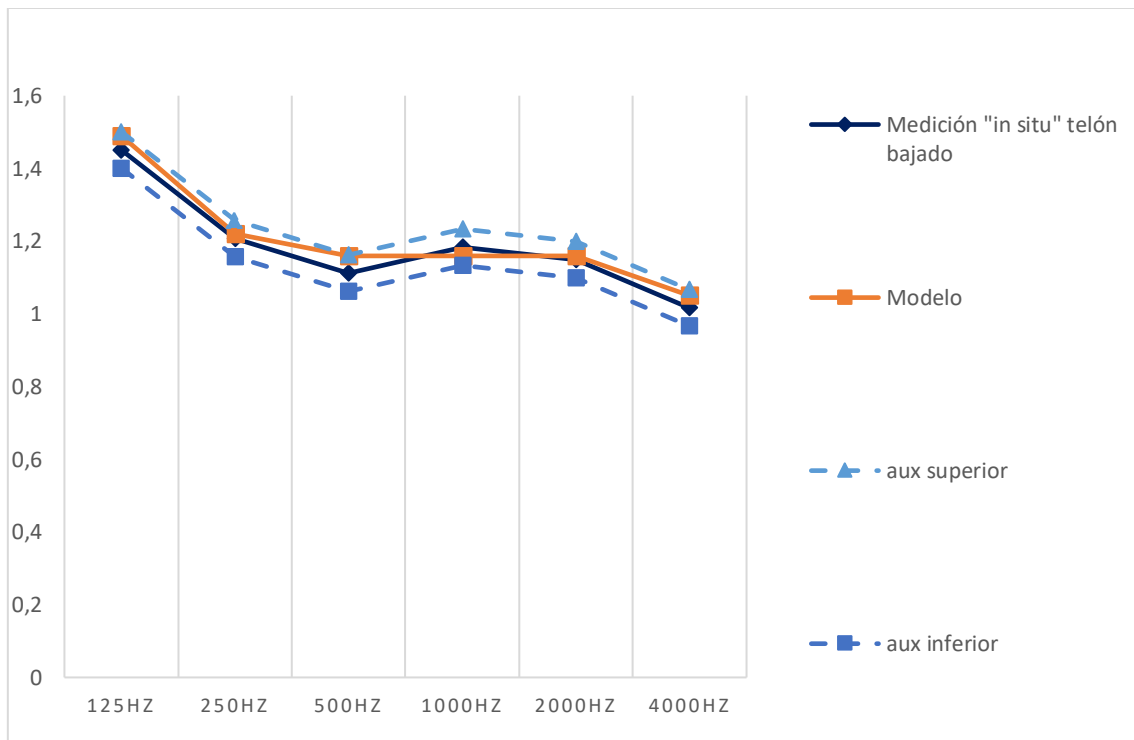


Figura 142. Comparativa TR_{30} telón bajado, medición real con límites superior e inferior aceptables, resultado obtenido en modelo con telón bajado tras análisis con telón subido

El tiempo de reverberación obtenido del modelo se encuentra dentro de los límites aceptables por lo que se aceptan los cambios de absorción de los materiales.

A continuación, se representa la variación del espectro de absorción de los materiales estudiados como incógnita respecto al valor del coeficiente de absorción inicial considerado, tomado de la bibliografía; y el valor finalmente empleado en la combinación ajustada.

Las variaciones correspondientes al material X1 (paredes cubiertas con cortinas) y de X2 (boca de escena), se muestran en la Figura 143 y en la Figura 144, respectivamente.

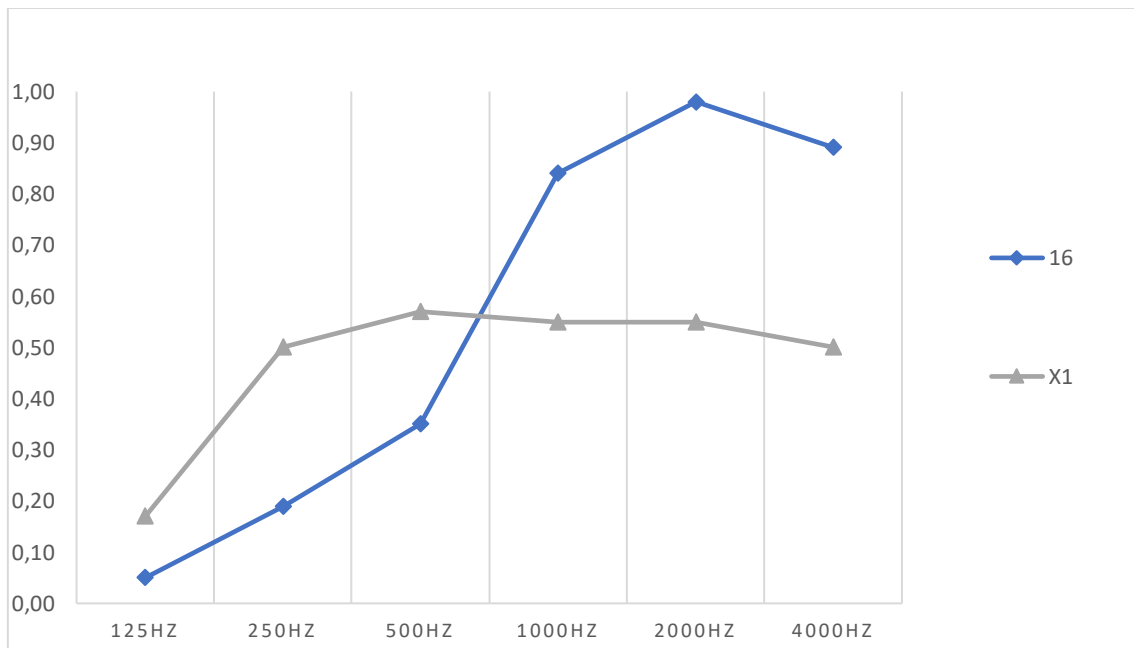


Figura 143. Espectro de marcos acolchados en paredes (bibliografía-azul- y aplicación RSM- gris-).

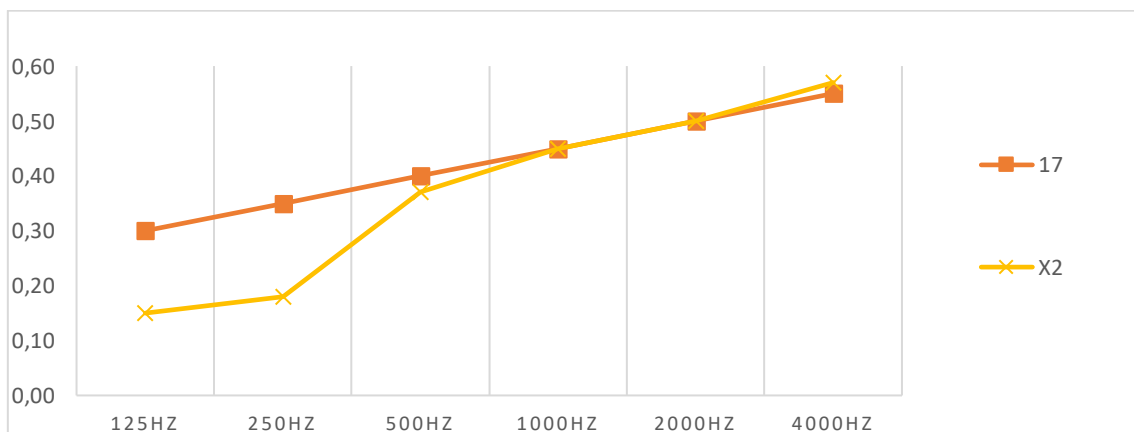


Figura 144 . Espectro de la boca de escena (bibliografía-naranja- y aplicación RSM- amarillo-).

Los espectros de absorción 16 y 17 de la combinación 2, del ajuste con boca de escena abierta, se corresponden con los datos de la bibliografía de los marcos acolchados en paredes y de la boca de escena, respectivamente. X1 y X2, representan los ajustes realizados a cada uno de ellos tras la aplicación del RSM.

En la Tabla 213 se muestran los coeficientes de absorción de las superficies tras aceptar los nuevos valores de los materiales de la sala.

Tabla 213. Coeficientes de absorción de las soluciones constructivas empleadas en el modelo tras ajuste con telón subido

Zona	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	Nº SUP
Molduras	0,13	0,13	0,25	0,28	0,30	0,30	1
Techo escenario fondo sala, antepecho P2	0,16	0,10	0,06	0,04	0,04	0,04	2
Pavimento escenario y anfiteatro P1 zona 1a	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10	3
Pavimento PB	0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,20	4
Moqueta PB	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25	5
Pavimento anfiteatro P1, zona 2a	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	6
Pavimento anfiteatro P2	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	7
Pavimento escaleras acceso P1 + zócalo y P2	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	8
Paramentos verticales (sonido hueco)	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09	9
Paramentos verticales (sonido solido)	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	10
Antepecho P1 zona 2a, zócalo de PB, frente escenario	0,42	0,21	0,06	0,05	0,05	0,04	11
puertas acceso a plantas	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	12
Butacas anfiteatro 1 y 2	0,56	0,64	0,70	0,72	0,68	0,62	13
Butacas platea	0,72	0,79	0,83	0,84	0,83	0,79	14
Techo general y bajo anfiteatro	0,28	0,20	0,12	0,07	0,05	0,07	15
Marcos de tela acolchada en paredes	0,17	0,50	0,57	0,55	0,55	0,50	X1
Boca de escena	0,15	0,18	0,37	0,45	0,50	0,57	X2

4.4.4 Resultados

El espectro de absorción de la boca de escena de la sala obtenido tras aplicación del RSM, se muestra en la Tabla 214.

Tabla 214. Coeficiente de absorción de la boca de escena

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Tras análisis RSM	0,15	0,18	0,37	0,45	0,50	0,57

A continuación, se compara el tiempo de reverberación del modelo ajustado con telón subido con el obtenido empleando los espectros de absorción para la boca de escena de diversas fuentes. El resultado se muestra en la Tabla 215 y la Figura 145.

Tabla 215. TR_{30} obtenido en el modelo ajustado con telón subido, y empleando los coeficientes de absorción de otros autores

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Medición "in situ" telón subido	1,286	1,075	1,037	1,035	1,005	0,886
Modelo ajustado	1,29	1,05	0,99	1,05	1,01	0,91
Carrión	1,336	1,125	1,087	1,085	1,055	0,936
Arau	1,236	1,025	0,987	0,985	0,955	0,836
Knudsen y Harris	1,29	1,05	0,99	1,04	1,01	0,91
Cavanaugh y Wilkes	1,29	1,05	0,97	1,01	1,00	0,92
Barron	1,41	1,15	1,11	1,12	1,12	1,01

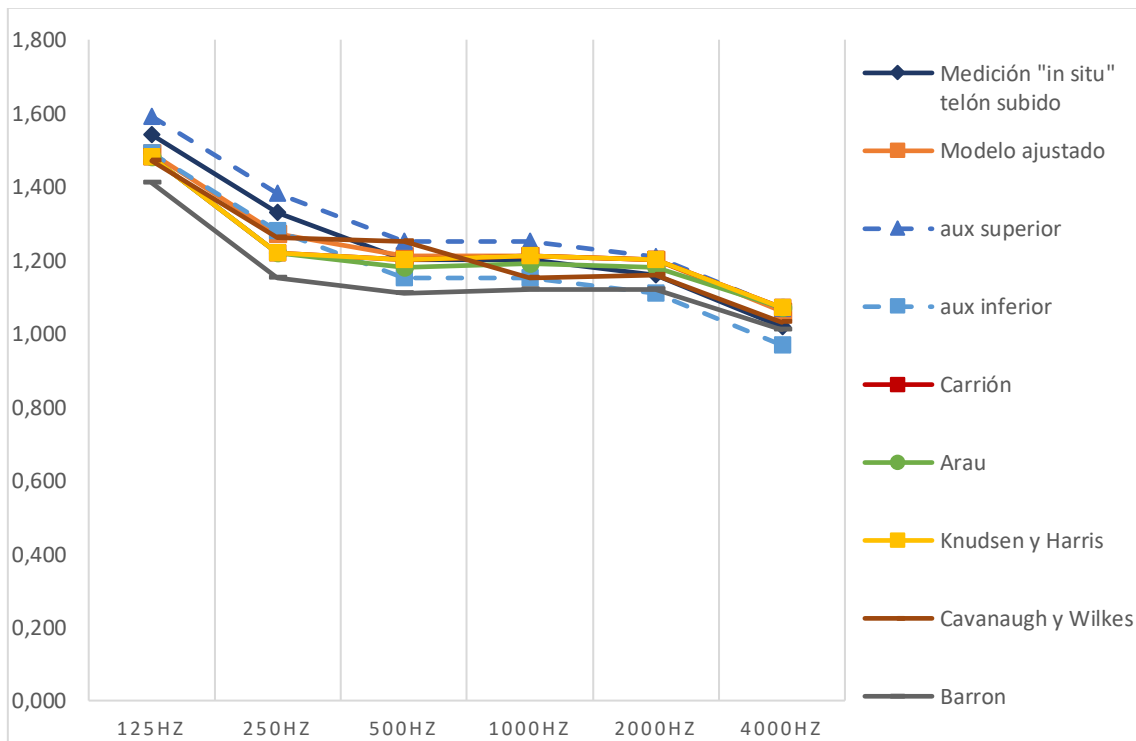


Figura 145. Comparativa TR_{30} telón subido. Medición real con límites superior e inferior, modelo ajustado, y modelos empleando los coeficientes de absorción de boca de escena de distintos autores

Los espectros de absorción propuestos por los distintos autores encajan sólo en algunas frecuencias.

Para observar la influencia de la boca de escena en el comportamiento absorbente del modelo, se calcula éste con valores distintos de absorción para la boca de escena (0,10; 0,50 y 0,90) y se obtienen los espectros del TR_{30} en cada caso.

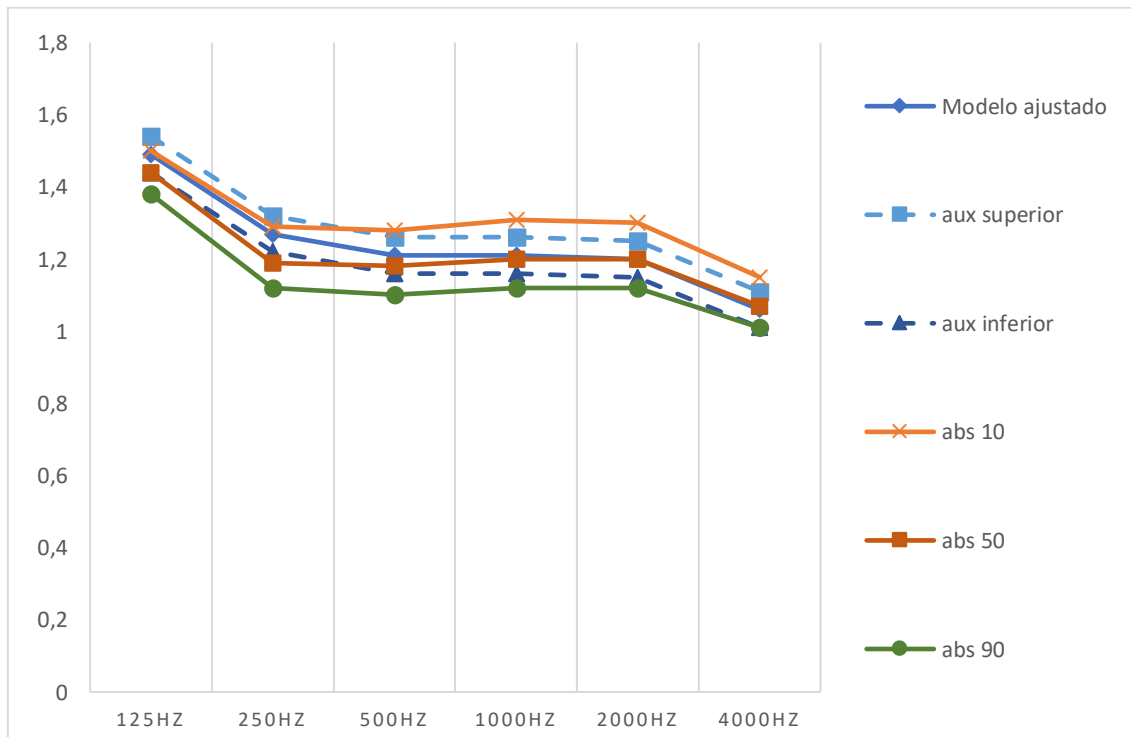


Figura 146. Comparativa TR_{30} con telón subido con distintos valores de absorción para la boca de escena

4.5 Sala 5. Teatro El Musical. Valencia

4.5.1 Descripción de la sala

4.5.1.1 *Datos generales*

Dirección

Plaza del Rosari 3, 46011 Valencia

Fecha de construcción

2004

Arquitecto

Eduardo de Miguel Arbonés

4.5.1.2 *Características morfológicas y constructivas*

El edificio del Teatro Musical se construyó en 2004 sobre el conjunto de 1929, sede entonces de la sociedad del Ateneo Musical del Puerto de Valencia, de la que sólo se conservó la fachada. La sociedad musical ocupó el edificio original hasta 1933. Desde entonces hasta los años 70 se utilizó como cine con el nombre de Musical del Cabanyal-Canyamelar.

El edificio cuenta con centro cívico, un área de servicios y la sala principal multiusos con aforo para 402 espectadores. El proyecto ganó el premio a “Obra de arquitectura” en los premios 2003-2004 del Colegio de Arquitectos de la Comunidad Valenciana.

El escenario tiene unas medidas de 16,40 metros de anchura por casi 9 metros de profundidad mínima. La boca de escena mide 12 metros de ancho por 6,34 metros de alto. La altura de escenario a peine es de 17m.

La sala, de una longitud aproximada de 21,50 metros, tiene una platea a la italiana sin palcos, con forma ligeramente en abanico invertido, por lo que la anchura de la sala varía de los 9,87 metros arriba a los 12,25 abajo. La altura libre máxima de la sala es de 11 metros. El volumen de la sala de 3000 m³ El volumen aproximado de la torre de escenario es de 2700 m³ [59].

Los materiales principales empleados en la sala son el hormigón visto de los paramentos verticales y la madera. La madera se encuentra en varios elementos de la sala: como parqué en el pavimento, como revestimiento en forma de lamas en techos y como acabado en el paramento vertical tras el que se encuentra la cabina.

Uno de los elementos singulares de la sala es la solución del techo. Se trata de un techo lineal, en aluminio luxalón tipo 30B revestido con listón de madera laminada, trasdosado de panel acústico panover 40 de madera. Los listones comienzan en la zona del escenario y continúan en curva hacia la pared del fondo de la sala por detrás de la cabina de sonido. La cámara de aire posterior es de profundidad variable. Esta solución también se encuentra en el techo de los accesos a la sala y en los paramentos verticales de los lucernarios de hormigón de los laterales de la sala.

Los paramentos verticales son en su mayoría de hormigón visto, a excepción de los accesos, que son de mármol blanco, del frente de los lucernarios laterales que muestran el acabado en listones de madera descrito anteriormente, y el frente de cabina. Los cerramientos de la cabina al fondo de la sala son de tablero contrachapado de 2 cm con poliestireno de 6 cm en su interior. La parte inferior del tablero se encuentra directamente trasdosando la pared de ladrillo.

El pavimento de la sala es de madera de haya maciza de 22 mm, sobre rastreles de madera de 3x7 cm.

Las butacas, abatibles, están muy bien acolchadas, los reposabrazos y la parte inferior del asiento son de madera.

Los paramentos verticales del escenario son de hormigón pintado en negro, y el pavimento es de planchas metálicas cubierto con tarimas de 2 x 1,6 metros sobre patas de altura variable.

Las puertas de acceso a la sala y a cabina son de madera.

La boca de escena está rodeada de cortinas; el frente de escenario está cubierto con cortinas lisas.

Sobre la cabina hay una sala que no está cerrada al espacio del patio de butacas.

4.5.1.3 Fotografías



Figura 147. Vista de la boca de escena



Figura 148. Vista de la sala



Figura 149. Hormigón visto de los paramentos verticales

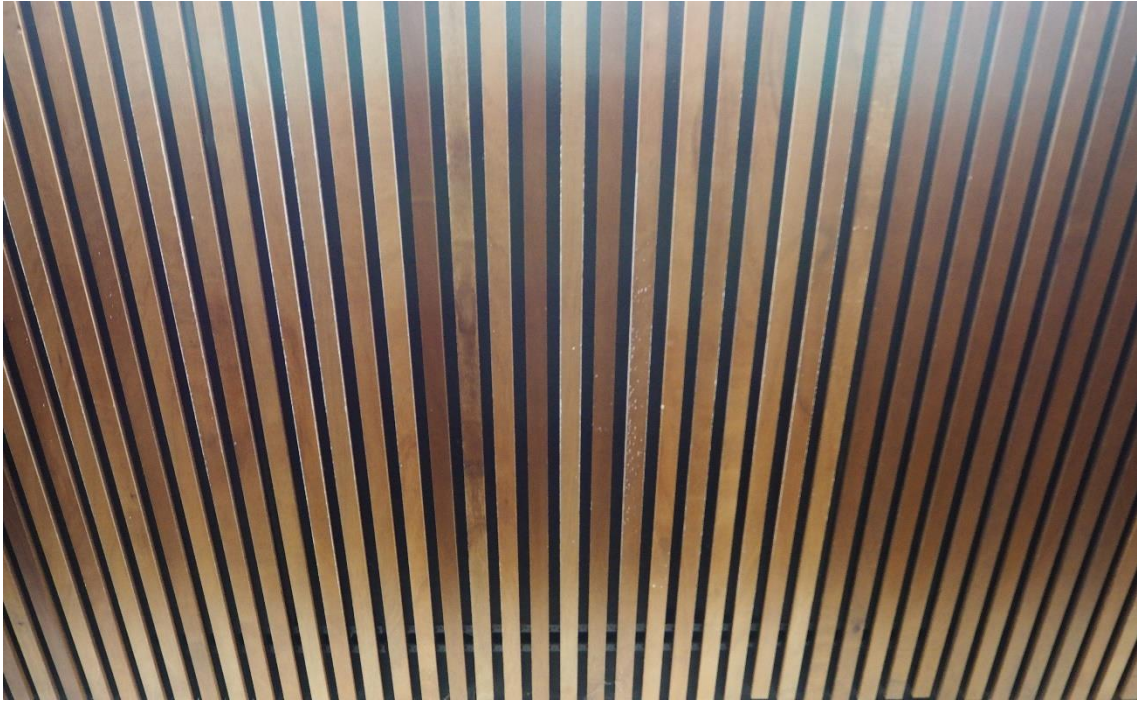


Figura 150. Lamas de madera del techo



Figura 151. Cabina



Figura 152. Lucernarios laterales y butacas

4.5.1.4 Planos

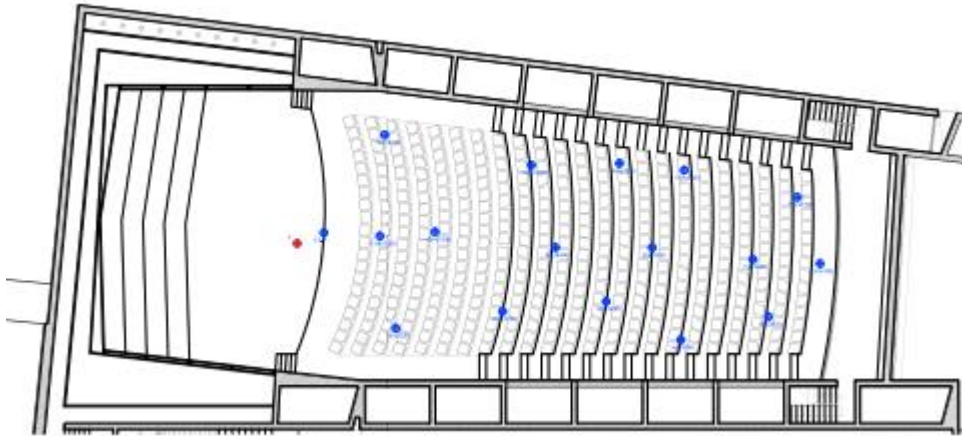


Figura 153. Planta. Posición de la fuente, en rojo, y de los receptores, en azul (Fuente: Eduardo de Miguel)

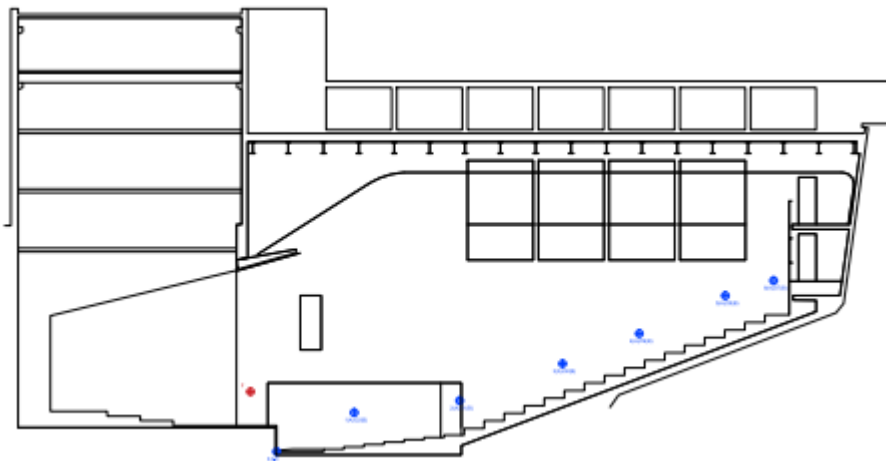


Figura 154. Sección. Posición de la fuente, en rojo, y de los receptores, en azul (Fuente: Eduardo de Miguel)

4.5.1.5 Comportamiento absorbente de los materiales

A continuación, se detallan los coeficientes de absorción de las distintas soluciones constructivas que se encuentran en la sala.

Tabla 216. Coeficientes e absorción asignados a las distintas soluciones constructivas de la sala.

Zona	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
Pavimento escenario	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Boca de escena	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
Frente de escenario, marco boca escena	0,05	0,07	0,13	0,22	0,32	0,35
Pavimento sala	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Paramentos verticales laterales, forjado superior, galerías laterales	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,07
Puertas	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
Paramentos verticales acceso sala	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Fondo sala	0,11	0,21	0,10	0,05	0,04	0,02
Vidrio grande	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Butacas	0,35	0,45	0,57	0,61	0,59	0,55
Techo sala y accesos	0,46	0,80	0,84	0,65	0,27	0,27

4.5.2 Medición de parámetros

4.5.2.1 Toma de datos "in situ"

Para definir los puntos (x,y,z) tanto de la fuente como de los distintos receptores, tomamos como centro de origen la parte trasera del escenario en el punto más bajo del dibujo. Así medimos cada punto con respecto al origen que hemos determinado. Se coloca la fuente sonora a una altura de 1,43 metros en el centro de la corbata, a 1, 10 metros de la boca. El escenario tiene un desnivel con platea de 1,05 metros. Altura general del micro: 1,45 metros. Se evalúan 16 posiciones con el telón subido (1-16) y otras tantas con el telón bajdo (17-32).

En la Tabla 217 se indican las coordenadas de la fuente sonora y de los distintos receptores.

Tabla 217. Coordenadas de la fuente y de los receptores

Abierto	Cerrado	X	Y	Z
Fuente		1,11	0,52	2,48
PTO_1	PTO_32	-3,29	3,84	1,75
PTO_2	PTO_31	-7,76	2,85	2,42
PTO_3	PTO_30	-12,12	2,17	4,03
PTO_4	PTO_29	-15,37	3,60	5,31
PTO_5	PTO_28	-19,02	2,39	6,59
PTO_6	PTO_27	-21,07	0,00	7,23
PTO_7	PTO_26	-18,22	0,00	4,82
PTO_8	PTO_25	-13,93	0,00	4,67
PTO_9	PTO_24	-9,83	0,00	3,07
PTO_10	PTO_23	-4,70	-0,32	1,85
PTO_11	PTO_22	-2,38	0,00	1,55
PTO_12	PTO_21	-2,32	-4,28	1,65
PTO_13	PTO_20	-8,61	-3,38	2,75
PTO_14	PTO_19	-12,32	-3,67	4,35
PTO_15	PTO_17	-15,08	-3,56	5,31
PTO_16	PTO_18	-19,93	-2,70	6,91

4.5.2.2 Parámetros acústicos

Mediante la utilización del software DIRAC se han realizado las mediciones in situ de la sala, con telón bajado y con telón subido. De esta manera se han obtenido los parámetros acústicos en cada situación.

4.5.2.2.1 Parámetros acústicos con telón bajado

Tabla 218. Inteligibilidad

STI male	0,72
STI female	0,73

Tabla 219. Parámetros temporales

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
EDT	1,279	0,797	0,532	0,547	0,568	0,562
TR₃₀	1,443	1,186	0,947	1,001	0,888	0,826
TR₂₀	1,391	1,114	0,869	0,890	0,820	0,787
TR₁₀	0,685	0,685	0,685	0,685	0,685	0,685

Tabla 220. Claridad

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
C₅₀	0,00	6,02	6,30	6,02	5,75	5,75
C₈₀	2,87	8,67	9,99	9,84	9,06	9,29

Tabla 221. Definición

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
D₅₀	0,50	0,80	0,81	0,80	0,79	0,79

4.5.2.2.2 Parámetros acústicos con telón subido

Tabla 222. Inteligibilidad

STI male	0,68
STI female	0,68

Tabla 223. Parámetros temporales

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
EDT	1,286	0,884	0,651	0,658	0,661	0,640
TR₃₀	1,513	1,256	0,958	0,945	0,898	0,888
TR₂₀	1,454	1,190	0,907	0,883	0,846	0,828
TR₁₀	1,354	1,064	0,777	0,735	0,770	0,776

Tabla 224. Parámetros energéticos

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
C₅₀	-0,872	3,475	3,889	3,274	3,475	2,881
C₈₀	2,42	7,00	8,24	8,01	7,92	7,98

Tabla 225. Definición

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
D₅₀	0,45	0,69	0,71	0,68	0,69	0,66

4.5.3 Aplicación del método de superficies de respuesta

Se realiza el modelo virtual de la sala en Autocad y se importa el modelo a ODEON. Se comprueba que el modelo es correcto: que no tiene fugas (“deadballs”); que no hay rayos perdidos, y que las aristas del modelo están en contacto entre sí.

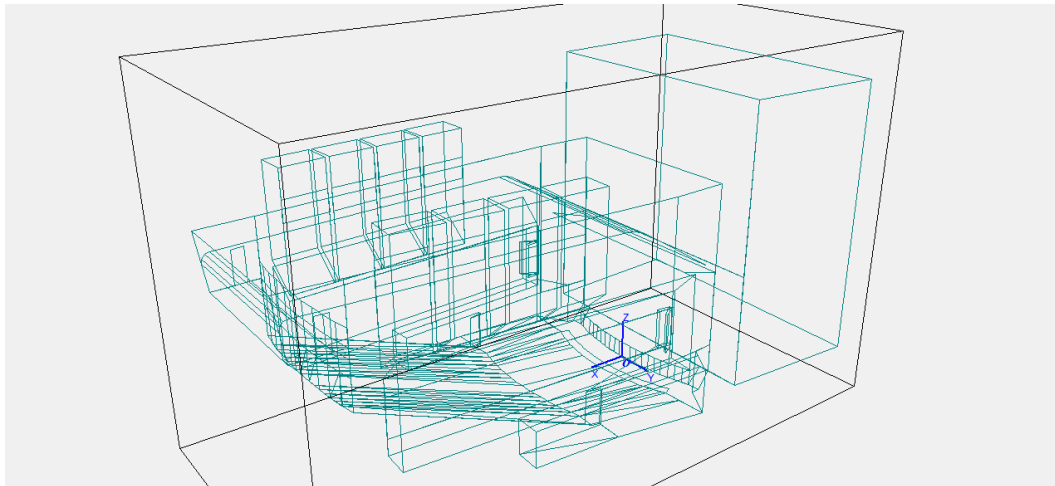


Figura 155. Modelo virtual de la sala

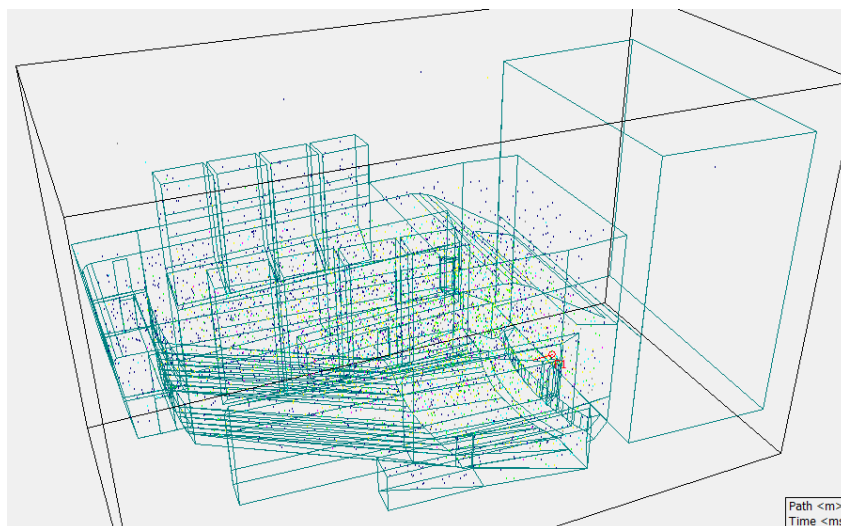


Figura 156. Captura del test 3D Billard

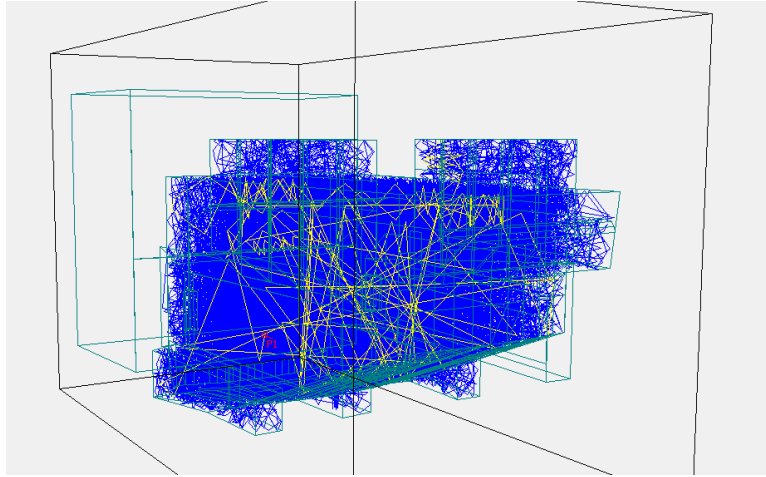


Figura 157. Captura del test rayos perdidos

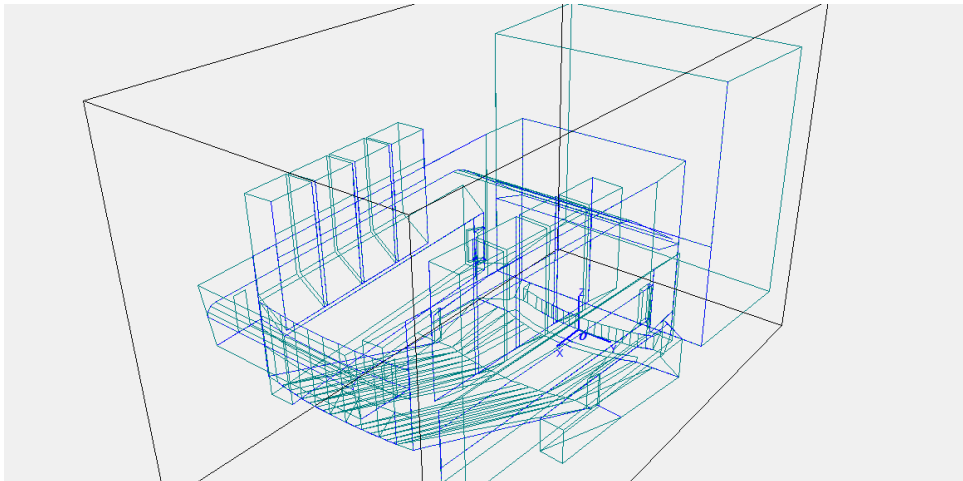


Figura 158. Captura del test de aristas únicas

Se introducen las coordenadas de la fuente y de los receptores, y se asignan los materiales de las distintas superficies.

4.5.3.1 Aplicación del RSM con telón bajado

En el modelo virtual de la sala con telón bajado, a la superficie de la boca de escena se le asigna el material de telón. Se calcula el modelo y se obtiene el tiempo de reverberación TR_{30} medio. El TR_{30} obtenido se compara con el de la medición realizada “in situ”, tal y como se ve en la Tabla 226.

Tabla 226. TR_{30} medio de la medición in situ y de la modelización con telón bajado

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Medición in situ	1,443	1,186	0,947	1,001	0,888	0,826
Modelización Musical	1,43	1,16	1,03	1,05	1,13	0,98

En la Figura 159 se representa el tiempo de reverberación medio, TR_{30} , medido “in situ”, los márgenes superior e inferior en los que el resultado del modelo es aceptable y el resultado del TR_{30} de la modelización inicial. Se observa que está ajustado a bajas frecuencias mientras que a altas necesita mayor absorción.

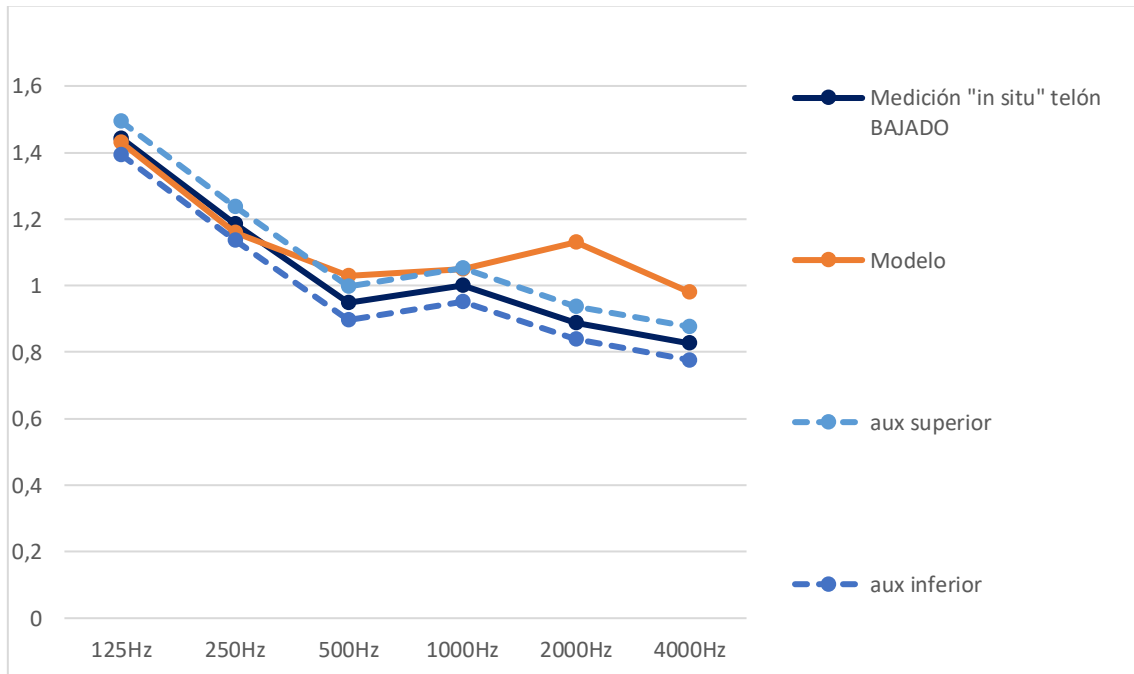


Figura 159. Representación gráfica del TR_{30} medido “in situ” con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables y la modelización inicial

4.5.3.1.1 Ajuste mediante método de superficies de respuesta

A continuación, se va a emplear el RSM para ajustar el modelo virtual a la medición real.

En primer lugar, se reordena la tabla de coeficientes de absorción de los materiales de la sala y se les asigna un número, tal y como se observa en la Tabla 227.

Tabla 227. Coeficientes de absorción de las superficies de la sala y asignación de número de superficie

Zona	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	Nº SUP
Pavimento escenario	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10	1
Boca de escena	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65	2
Frente de escenario, marco boca escena	0,05	0,07	0,13	0,22	0,32	0,35	3
Pavimento sala	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10	4
Paramentos verticales laterales, forjado superior, galerías laterales	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,07	5
Puertas	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	6
Paramentos verticales acceso sala	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	7
Fondo sala	0,11	0,21	0,10	0,05	0,04	0,02	8
Vidrio grande	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	9
Butacas	0,35	0,45	0,57	0,61	0,59	0,55	X1
Techo sala, y accesos	0,46	0,80	0,84	0,65	0,27	0,27	X2

Se eligen como superficies incógnita las butacas y el techo de la sala.

Se define la región de estudio en la aplicación del RSM.

$$X_{1i} = B_{1i} \pm R_{1i}$$

Siendo:

B_{1i} los valores tomados de la bibliografía y

R_{1i} , incrementos que oscilan entre 0 y 0,5

De forma análoga se realiza para X_{2i}

En la Tabla 228 se muestran los coeficientes de absorción de las superficies empleados en la simulación y las regiones de estudio.

Tabla 228.. Coeficientes de absorción empleados en la simulación

Nº SUP	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
1	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
2	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
3	0,05	0,07	0,13	0,22	0,32	0,35
4	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
5	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,07
6	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
7	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
8	0,11	0,21	0,10	0,05	0,04	0,02
9	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Butacas X1	X1₁₂₅	X1₂₅₀	X1₅₀₀	X1₁₀₀₀	X1₂₀₀₀	X1₄₀₀₀
Listones techo X2	X2₁₂₅	X2₂₅₀	X2₅₀₀	X2₁₀₀₀	X2₂₀₀₀	X2₄₀₀₀

4.5.3.1.2 Ajuste 1

Se especifican los valores de las dos regiones de estudio, se toman los valores de la bibliografía y se asignan unos incrementos a cada una de ellas.

En la Tabla 229 y en la Tabla 230, se observan los valores asignados a las regiones de estudio X1 y X2, respectivamente.

Tabla 229. Región de estudio de la superficie X1

X1	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
B1i-R1i	0,20	0,30	0,39	0,46	0,28	0,42
B1i	0,35	0,45	0,57	0,61	0,59	0,55
B1i+R1i	0,50	0,60	0,75	0,76	0,90	0,68
INCREMENTOS R1	0,15	0,15	0,18	0,15	0,31	0,13

Tabla 230. Región de estudio de la superficie X2

X2	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
B2i-R2i	0,31	0,65	0,78	0,55	0,10	0,10
B2i	0,46	0,80	0,84	0,65	0,50	0,50
B2i+R2i	0,61	0,95	0,90	0,75	0,90	0,90
INCREMENTOS R2	0,15	0,15	0,06	0,10	0,40	0,40

Se obtienen los siguientes pares de espectros de absorción (Tabla 231).

Tabla 231. Combinaciones de pares de espectros de absorción de las regiones X1 y X2.

combinación	puntos	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	
1	B1i-R1i	0,20	0,30	0,39	0,46	0,28	0,42	X11
	B2i-R2i	0,31	0,65	0,78	0,55	0,10	0,10	X21
2	B1i-R1i	0,20	0,30	0,39	0,46	0,28	0,42	X11
	B2i	0,46	0,80	0,84	0,65	0,50	0,50	X22
3	B1i-R1i	0,20	0,30	0,39	0,46	0,28	0,42	X11
	B2i+R2i	0,61	0,95	0,90	0,75	0,90	0,90	X23
4	B1i	0,35	0,45	0,57	0,61	0,59	0,55	X12
	B2i-R2i	0,31	0,65	0,78	0,55	0,10	0,10	X21
5	B1i	0,35	0,45	0,57	0,61	0,59	0,55	X12
	B2i	0,46	0,80	0,84	0,65	0,50	0,50	X22
6	B1i	0,35	0,45	0,57	0,61	0,59	0,55	X12
	B2i+R2i	0,61	0,95	0,90	0,75	0,90	0,90	X23
7	B1i+R1i	0,50	0,60	0,75	0,76	0,90	0,68	X13
	B2i-R2i	0,31	0,65	0,78	0,55	0,10	0,10	X21
8	B1i+R1i	0,50	0,60	0,75	0,76	0,90	0,68	X13
	B2i	0,46	0,80	0,84	0,65	0,50	0,50	X22
9	B1i+R1i	0,50	0,60	0,75	0,76	0,90	0,68	X13
	B2i+R2i	0,61	0,95	0,90	0,75	0,90	0,90	X23

Estas combinaciones se prueban en ODEON para obtener los tiempos de reverberación nuevos.

Se introducen las nueve combinaciones en ODEON y se calcula el tiempo de reverberación para cada una de ellas. El resultado se puede ver en la Tabla 232. El tiempo de reverberación de las combinaciones se designa de aquí en adelante en minúsculas acompañado de un número que hace referencia a la combinación de origen de la que es su resultado.

Tabla 232. TR₃₀ obtenidos de las combinaciones definidas anteriormente.

TR ₃₀	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
tr1	1,96	1,29	1,12	1,11	1,71	1,22
tr2	1,79	1,23	1,10	1,07	1,12	0,89
tr3	1,66	1,17	1,07	1,04	0,98	0,80
tr4	1,46	1,21	1,06	1,08	1,28	1,12
tr5	1,43	1,16	1,03	1,05	1,04	0,87
tr6	1,40	1,10	1,01	1,03	0,97	0,79
tr7	1,40	1,15	1,02	1,05	1,11	1,03
tr8	1,36	1,11	1,00	1,04	1,00	0,85
tr9	1,33	1,03	0,96	1,01	0,94	0,80

En la Figura 160 se observa que todos los puntos objetivo se encuentran dentro de los espectros del TR₃₀ de las distintas combinaciones.

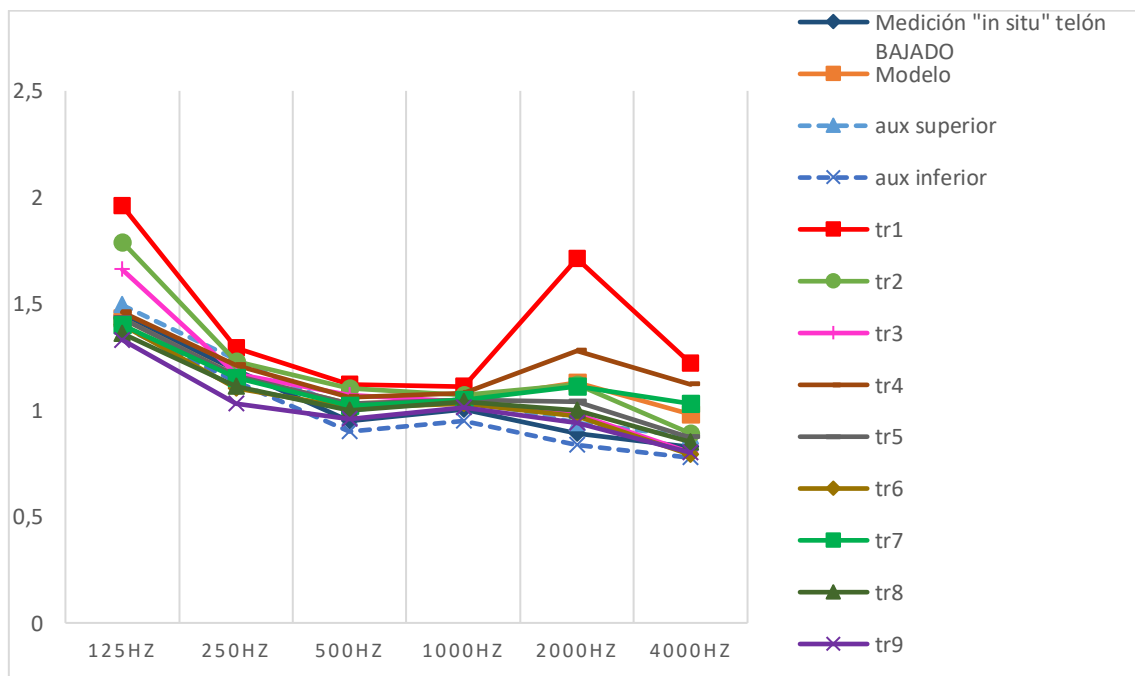


Figura 160. Comparativa TR₃₀. Medición "in situ", modelización y resultados tras aplicación del RSM

Para obtener las superficies de respuesta, se agrupan los datos por frecuencia, formando nueve combinaciones de ternas de puntos por frecuencia. A partir de dichas superficies se obtienen nuevos pares de puntos que satisfacen el “target”.

Ternas de datos por frecuencia y representación mediante superficie de respuesta:

Tabla 233. Ternas de datos a 125 Hz

125HZ			
	X1	X2	TR
	0,20	0,31	1,96
	0,20	0,46	1,79
	0,20	0,61	1,66
	0,35	0,31	1,46
	0,35	0,46	1,43
	0,35	0,61	1,40
	0,50	0,31	1,40
	0,50	0,46	1,36
	0,50	0,61	1,33

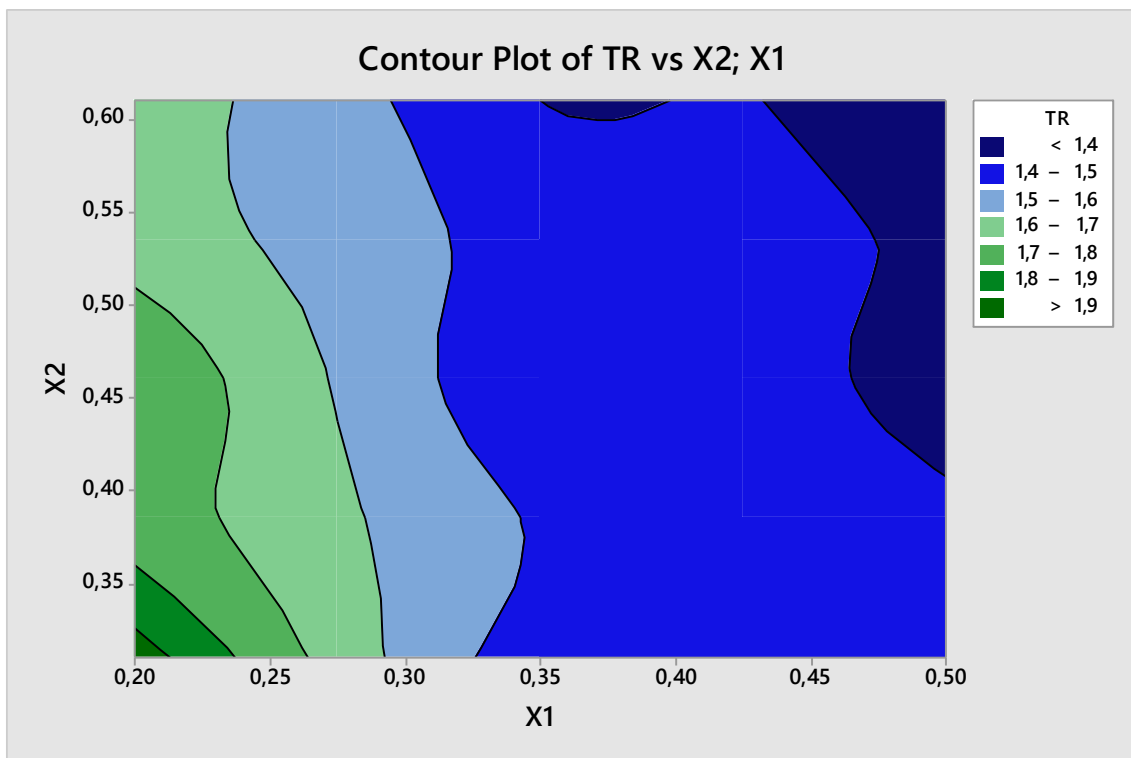


Figura 161. Superficie de respuesta a 125 Hz.

Tabla 234. Pares de puntos a 125 Hz

X1	0,35	0,35	0,50	0,32
X2	0,31	0,61	0,31	0,50

Tabla 235. Ternas de datos a 250 Hz

250HZ			
	X1	X2	TR
	0,30	0,65	1,29
	0,30	0,80	1,23
	0,30	0,95	1,17
	0,45	0,65	1,21
	0,45	0,80	1,16
	0,45	0,95	1,10
	0,60	0,65	1,15
	0,60	0,80	1,11
	0,60	0,95	1,03

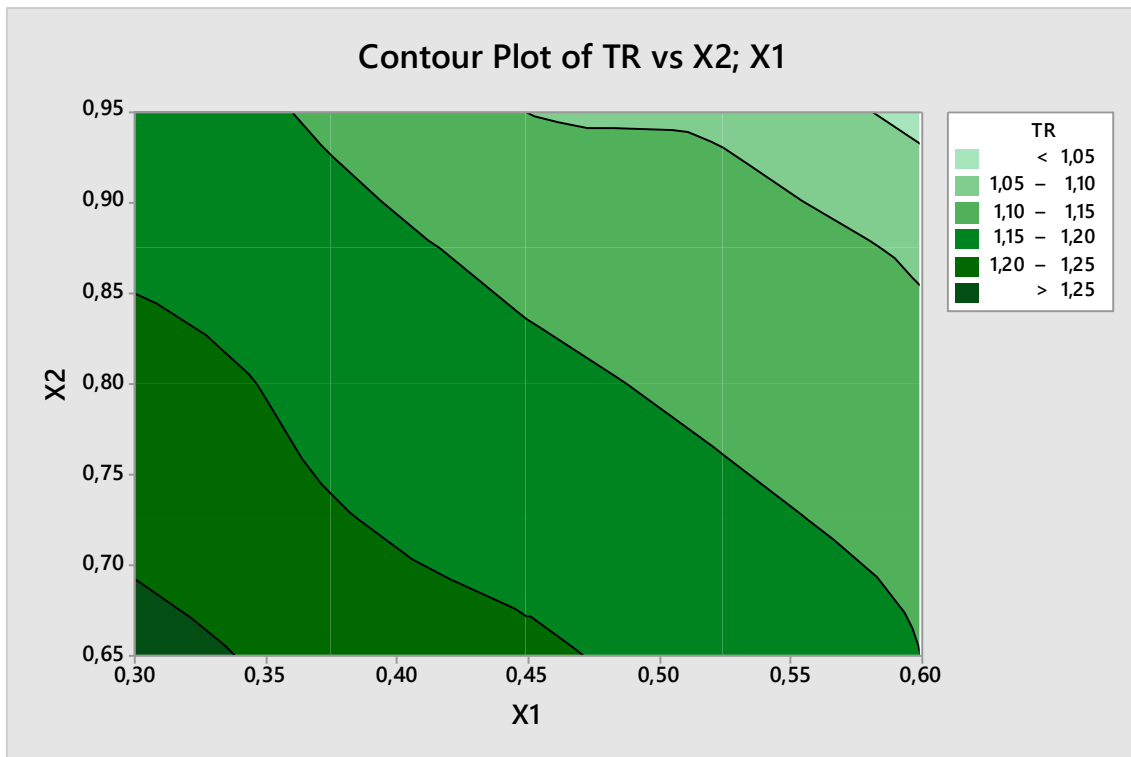


Figura 162. Superficie de respuesta a 250 Hz

Tabla 236. Pares de puntos a 250 HZ

X1	0,45	0,45	0,40
X2	0,65	0,75	0,80

Tabla 237. ternas de datos a 500 Hz

500HZ			
	X1	X2	TR
	0,39	0,78	1,12
	0,39	0,84	1,10
	0,39	0,90	1,07
	0,57	0,78	1,06
	0,57	0,84	1,03
	0,57	0,90	1,01
	0,75	0,78	1,02
	0,75	0,84	1,00
	0,75	0,90	0,96

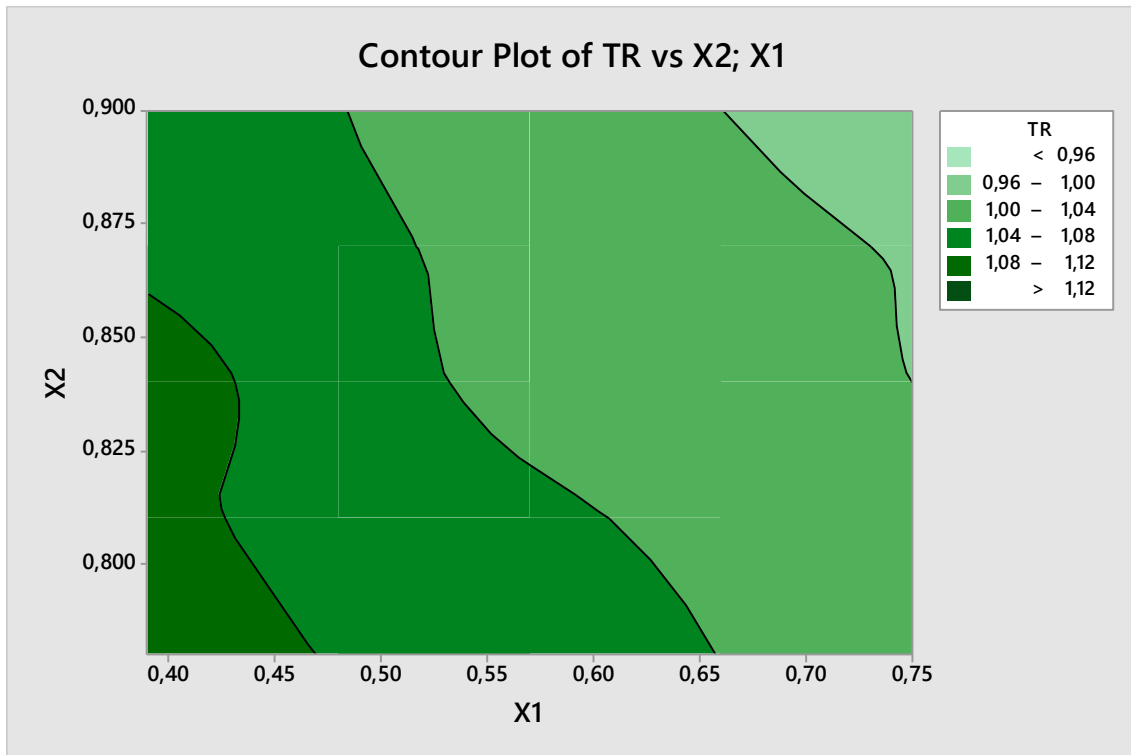


Figura 163. Superficie de respuesta a 500 Hz

Tabla 238. Pares de puntos a 500 Hz

X1	0,75	0,75	0,70
X2	0,90	0,85	0,87

Tabla 239. Ternas de datos a 1000 Hz

1000HZ			
	X1	X2	TR
	0,46	0,55	1,11
	0,46	0,65	1,07
	0,46	0,75	1,04
	0,61	0,55	1,08
	0,61	0,65	1,05
	0,61	0,75	1,03
	0,76	0,55	1,05
	0,76	0,65	1,04
	0,76	0,75	1,01

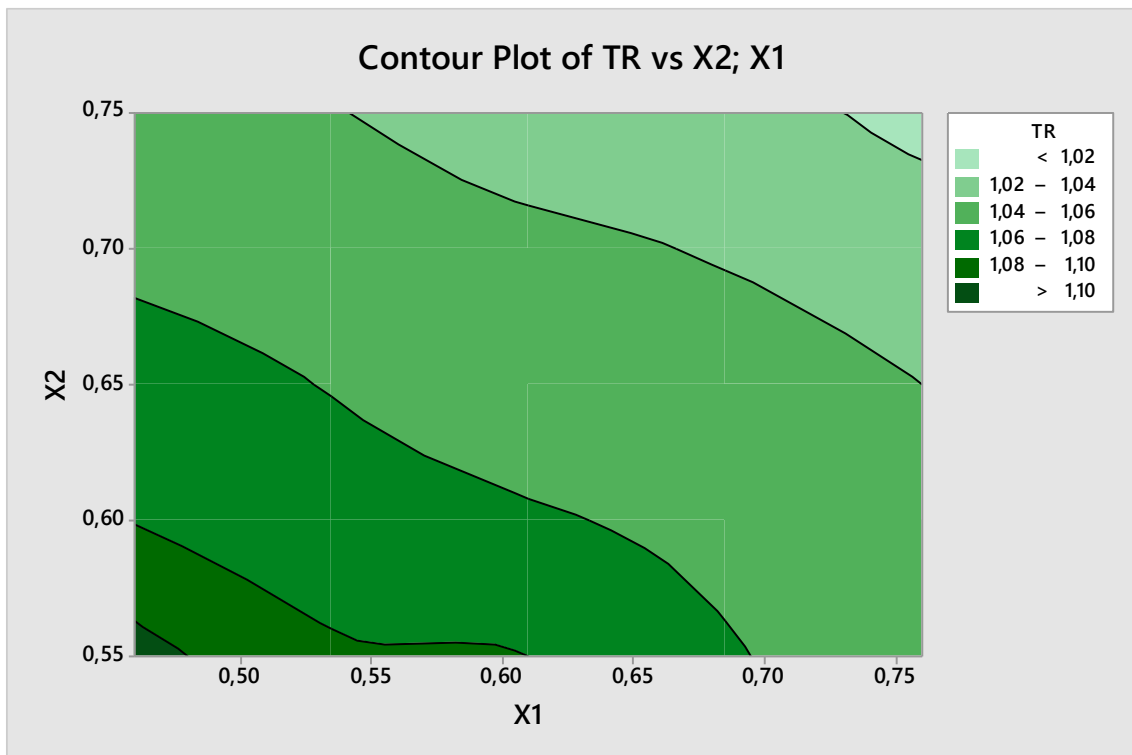


Figura 164. Superficie de respuesta a 1000 Hz

Tabla 240. Pares de puntos a 1000 Hz

X1	0,61	0,70	0,75
X2	0,75	0,70	0,73

Tabla 241. Ternas de datos a 2000 Hz

2000HZ			
	X1	X2	TR
	0,28	0,10	1,71
	0,28	0,50	1,12
	0,28	0,90	0,98
	0,59	0,10	1,28
	0,59	0,50	1,04
	0,59	0,90	0,97
	0,90	0,10	1,11
	0,90	0,50	1,00
	0,90	0,90	0,94

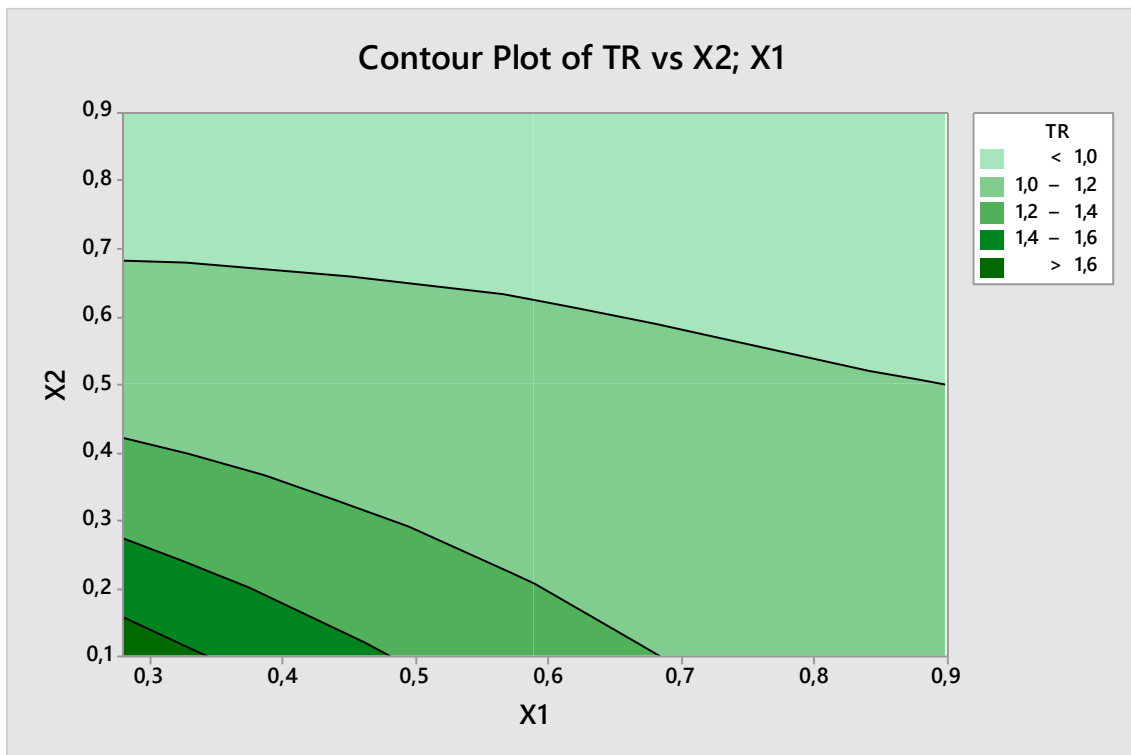


Figura 165. Superficie de respuesta a 2000 Hz

Tabla 242. Pares de puntos a 2000 Hz

X1	0,88	0,80
X2	0,88	0,80

Tabla 243. Ternas de datos a 4000 Hz

4000HZ			
	X1	X2	TR
	0,42	0,10	1,22
	0,42	0,50	0,89
	0,42	0,90	0,80
	0,55	0,10	1,12
	0,55	0,50	0,87
	0,55	0,90	0,79
	0,68	0,10	1,03
	0,68	0,50	0,85
	0,68	0,90	0,80

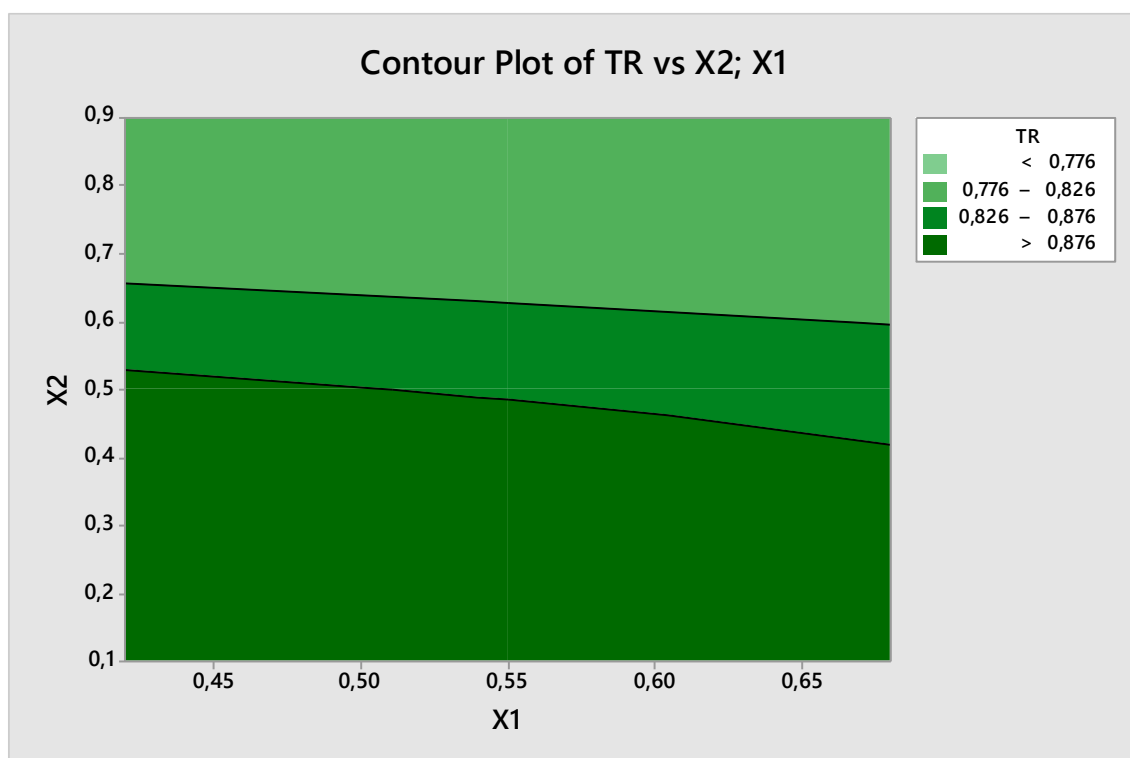


Figura 166. Superficie de respuesta a 4000 Hz

Tabla 244. Pares de puntos a 4000 Hz

X1	0,68	0,45	0,55	0,65
X2	0,70	0,63	0,63	0,63

4.5.3.1.2.1 Combinaciones

En la Tabla 245 se muestran los conjuntos de pares obtenidos:

En principio habría que descartar aquellos pares que se encuentren en los límites de la región estudiada. En este caso, dado que los pares se han obtenido de forma visual evitando los límites de la región, no es necesario descartar ningún par por esa razón.

Tabla 245. Pares de puntos obtenidos para el cálculo

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
X1	0,35	0,45	0,75	0,61	0,88	0,68
X2	0,46	0,80	0,90	0,75	0,88	0,50
X1	0,35	0,45	0,75	0,70	0,80	0,45
X2	0,61	0,75	0,85	0,70	0,80	0,63
X1	0,35	0,40	0,70	0,75		0,55
X2	0,31	0,65	0,87	0,73		0,63
X1	0,32					0,65
X2	0,50					0,63

Se seleccionan los pares que más se ajustan a los valores esperados de cada uno de ellos.

Probamos los nuevos pares en el modelo virtual.

Combinación 1.

En la Tabla 246 se muestran los espectros de absorción de las superficies X1 y X2 empleadas en la simulación.

Tabla 246. Combinación de espectros de absorción de las superficies estudiadas

puntos	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
X1	0,35	0,45	0,75	0,61	0,88	0,68
X2	0,31	0,65	0,90	0,75	0,88	0,50

La combinación anterior da como resultado el tiempo de reverberación que se muestra en la Tabla 247 y en la Figura 167.

Tabla 247. TR_{30} obtenido

TR_{30}	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
tr1	1,46	1,19	0,96	1,00	0,92	0,85

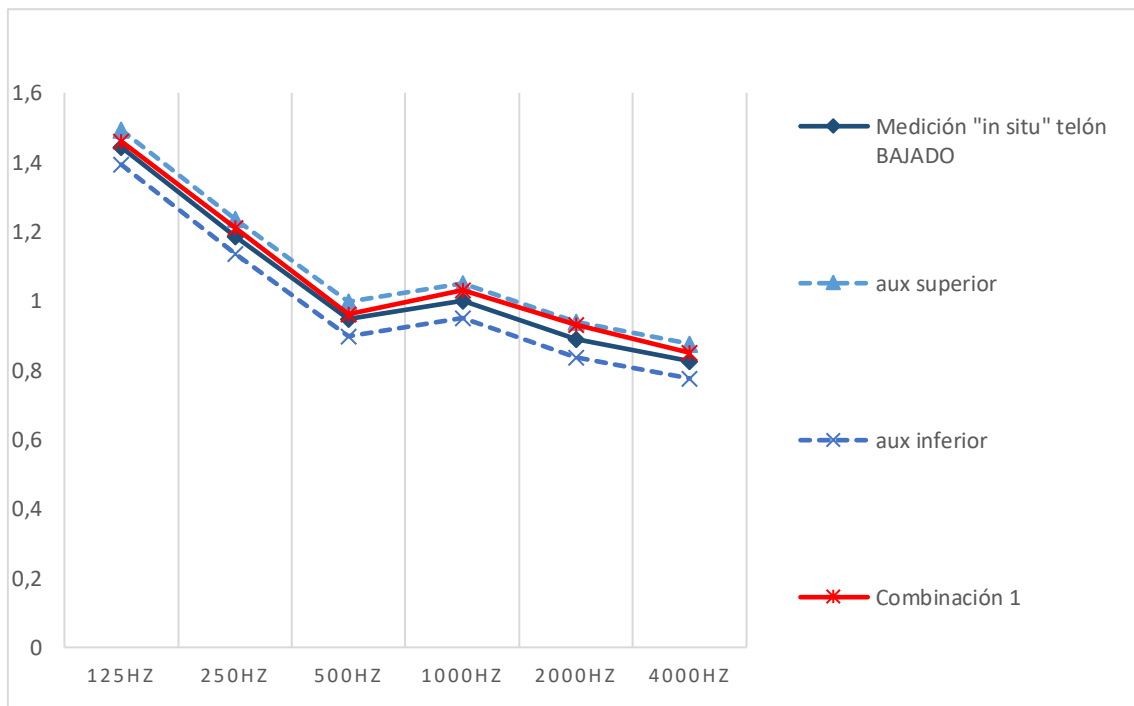


Figura 167. Representación gráfica del TR_{30} medido "in situ" con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables, la modelización inicial, y la modelización de la combinación 1

En la Figura 167 se observan los valores del TR_{30} de la medición real con un límite superior e inferior de 0,05 segundos, del modelo inicial y del modelo tras la aplicación

del RSM. Los valores de la modelización que se encuentren dentro de estos márgenes se consideran aceptables.

El espectro de absorción tr1 se encuentra dentro de los márgenes establecidos como aceptables, por lo que se admite la combinación 1. Los cambios del espectro de absorción del material X1, butacas, y X2, techo, se muestran en la Figura 168 y en la Figura 169 respectivamente.

Los espectros de absorción 10 y 11 se corresponden con los datos de la bibliografía de las butacas y de techo, respectivamente. X1 y X2, representan los ajustes realizados a cada uno de ellos tras la aplicación del RSM.

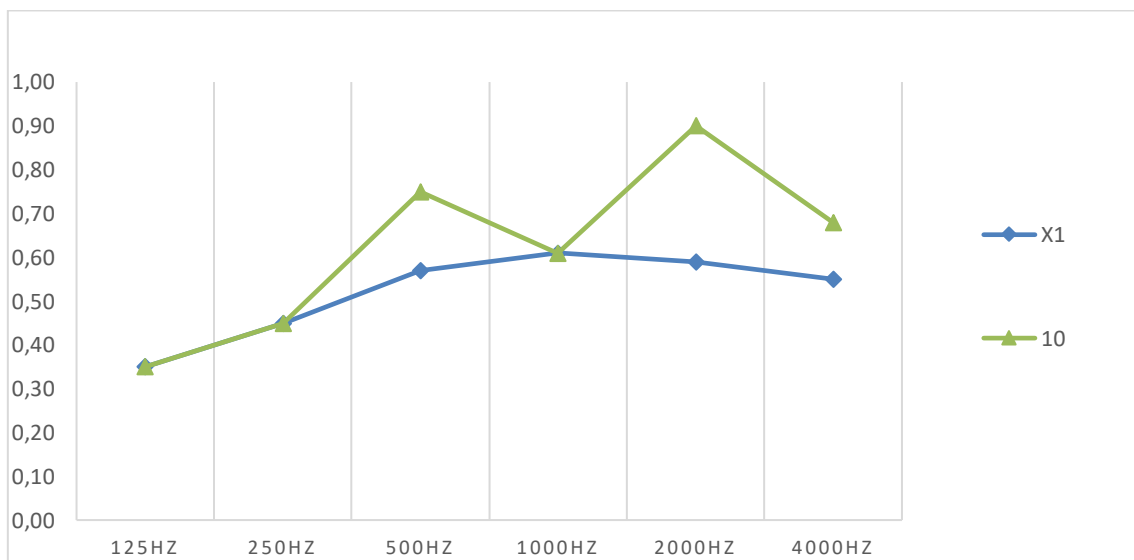


Figura 168. Espectro de absorción de las butacas (bibliografía- azul- y aplicación RSM-verde-)

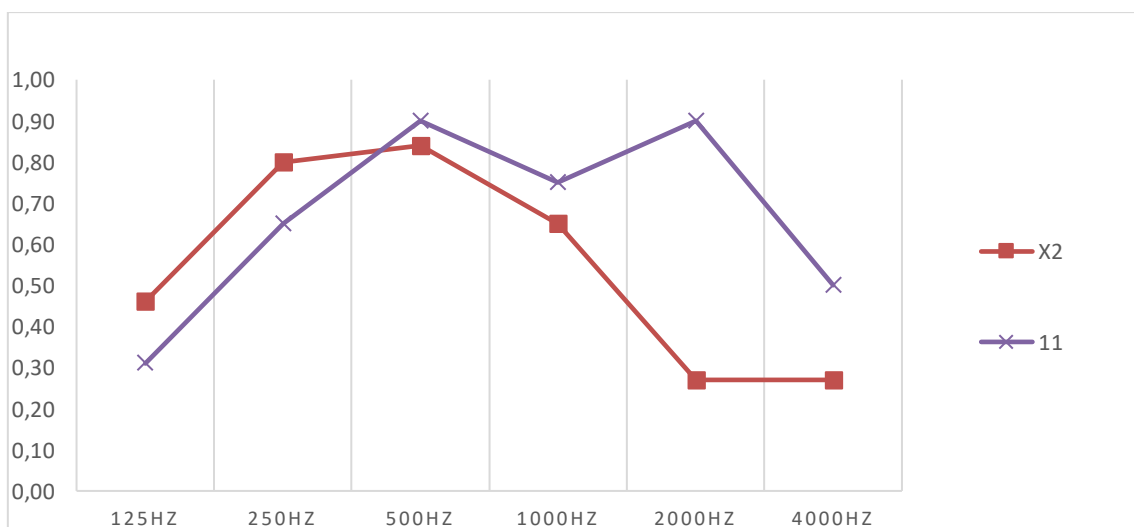


Figura 169 . Espectro de absorción techo (bibliografía-rojo- y aplicación RSM- morado-)

Se aceptan los nuevos valores de los materiales de la sala, en la Tabla 248 se muestran los coeficientes de absorción de las superficies tras el ajuste realizado con el telón bajado.

Tabla 248. Coeficientes de absorción de las superficies tras aplicación del RSM con telón bajado

Zona	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
Pavimento escenario	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Boca de escena	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
Frente de escenario, marco boca escena	0,05	0,07	0,13	0,22	0,32	0,35
Pavimento sala	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Paramentos verticales laterales, forjado superior, galerías laterales	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,07
Puertas	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
Paramentos verticales acceso sala	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Fondo sala	0,11	0,21	0,10	0,05	0,04	0,02
Vidrio grande	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Butacas	0,35	0,45	0,75	0,61	0,88	0,68
Techo sala, y accesos	0,46	0,80	0,90	0,75	0,88	0,70

4.5.3.2 Aplicación del RSM con telón subido

Una vez evaluada la sala con la boca de escena cerrada (telón bajado), se procede a estudiar la sala con la boca de escena abierta (telón subido).

4.5.3.2.1 Modelo virtual de la sala con telón subido

En el modelo virtual de la sala, se sustituye la cortina de la boca de escena, por una superficie nueva, la abertura de escenario, que será nuestra incógnita. Se asignan los coeficientes hallados en el proceso anterior.

Las coordenadas de la fuente y de los receptores, son las mismas que en el caso anterior. Se cambia el material de la boca de escena en el modelo ajustado anterior y se calcula el modelo para boca de escena abierta. En la Tabla 249 se muestran los coeficientes de absorción empleados en la modelización inicial con boca de escena abierta, reordenados.

Tabla 249. Superficies de la sala con distinta materialidad y comportamiento absorbente

Zona	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
Pavimento escenario	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Frente de escenario, marco boca escena	0,05	0,07	0,13	0,22	0,32	0,35
Pavimento sala	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Paramentos verticales laterales, forjado superior, galerías laterales	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,07
Puertas	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
Paramentos verticales acceso sala	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Fondo sala	0,11	0,21	0,10	0,05	0,04	0,02
Vidrio grande	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Butacas	0,35	0,45	0,75	0,61	0,88	0,68
Techo sala, y accesos	0,46	0,80	0,90	0,75	0,88	0,70
Boca de escena	0,30	0,40	0,50	0,60	0,60	0,50

Se obtiene el tiempo de reverberación TR₃₀ medio. El TR₃₀ obtenido se compara con el de la medición realizada “in situ”, tal y como se ve en la Tabla 250 y en la Figura 170.

Tabla 250. Comparativa TR₃₀ medición real y modelo virtual

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Medición in situ	1,513	1,256	0,958	0,945	0,898	0,888
Modelización El Musical	1,37	1,14	0,98	1,08	0,97	0,84

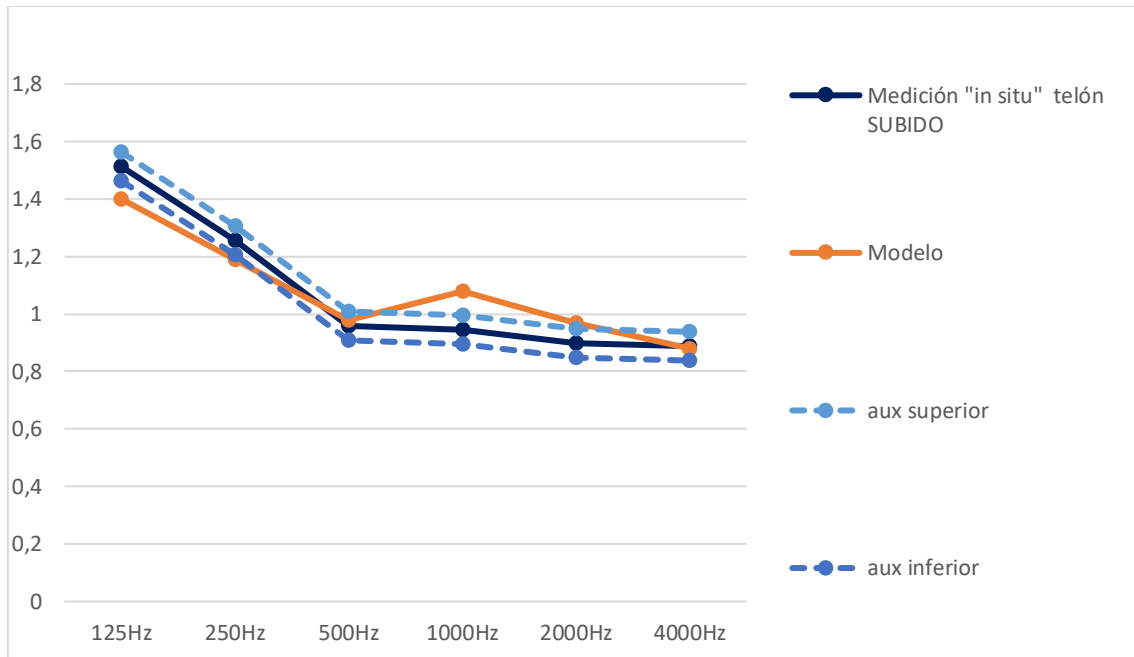


Figura 170. Comparativa TR₃₀, medición "in situ" con telón subido y modelización inicial con boca de escena abierta

En Figura 170 se representa el tiempo de reverberación medio, TR₃₀, medido "in situ" de la sala con telón subido, los límites superior e inferior y el resultado del TR₃₀ de la modelización con los ajustes realizados con el telón bajado. Los valores del tiempo de reverberación del modelo se encuentran dentro de los límites aceptables a 500Hz y a 4000Hz; en el resto de las frecuencias se requiere ajuste.

Se procede a aplicar el método de las superficies de repuesta.

4.5.3.2.2 Ajuste mediante el método de superficies de respuesta

Acabada la sala con la boca de escena cerrada (telón bajado), se procede a estudiar la sala con la boca de escena abierta (telón subido).

Se elige como s incógnita la boca de escena y el techo.

Se define la región de estudio en la aplicación del RSM.

$$X_{1i} = B_{1i} \pm R_{1i}$$

Siendo:

B_{1i} los valores tomados de la bibliografía y

R_{1i}, incrementos que oscilan entre 0 y 0,5

De forma análoga se realiza para X_{2i}

En la Tabla 251 se muestran los coeficientes de absorción de las superficies empleados en la simulación y las regiones de estudio.

Tabla 251. Coeficientes de absorción empleados en la simulación

Nº SUP	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
1	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
2	0,05	0,07	0,13	0,22	0,32	0,35
3	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
4	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,07
5	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
6	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
7	0,11	0,21	0,10	0,05	0,04	0,02
8	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
9	0,35	0,45	0,75	0,61	0,88	0,68
Listones techo X1	X1₁₂₅	X1₂₅₀	X1₅₀₀	X1₁₀₀₀	X1₂₀₀₀	X1₄₀₀₀
Boca de escena X2	X2₁₂₅	X2₂₅₀	X2₅₀₀	X2₁₀₀₀	X2₂₀₀₀	X2₄₀₀₀

4.5.3.2.3 Ajuste 1

Se especifican los valores de las dos regiones de estudio, se toman los valores de la bibliografía y se asignan unos incrementos a cada una de ellas.

En la Tabla 252 y en la Tabla 253 se observan los valores asignados a las regiones de estudio X1 y X2, respectivamente.

Tabla 252. Región de estudio de la superficie incógnita X1

X1	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
B1i-R1i	0,36	0,70	0,90	0,65	0,81	0,60
B1i	0,46	0,80	0,90	0,75	0,88	0,70
B1i+R1i	0,56	0,90	0,90	0,85	0,95	0,80
INCREMENTOS R1	0,10	0,10	0,00	0,10	0,07	0,10

Tabla 253. Región de estudio de la superficie incógnita X2

X2	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
B2i-R2i	0,10	0,20	0,50	0,40	0,45	0,50
B2i	0,30	0,40	0,50	0,60	0,60	0,50
B2i+R2i	0,50	0,60	0,50	0,80	0,75	0,50
INCREMENTOS R2	0,20	0,20	0,00	0,20	0,15	0,00

Tabla 254. Combinaciones de pares de espectros absorbentes a estudiar

combinación	puntos	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	
1	B1i-R1i	0,36	0,70	0,80	0,65	0,81	0,60	X11
	B2i-R2i	0,10	0,20	0,50	0,40	0,45	0,50	X21
2	B1i-R1i	0,36	0,70	0,80	0,65	0,81	0,60	X11
	B2i	0,30	0,40	0,50	0,60	0,60	0,50	X22
3	B1i-R1i	0,36	0,70	0,80	0,65	0,81	0,60	X11
	B2i+R2i	0,50	0,60	0,50	0,80	0,75	0,50	X23
4	B1i	0,46	0,80	0,90	0,75	0,88	0,70	X12
	B2i-R2i	0,10	0,20	0,50	0,40	0,45	0,50	X21
5	B1i	0,46	0,80	0,90	0,75	0,88	0,70	X12
	B2i	0,30	0,40	0,50	0,60	0,60	0,50	X22
6	B1i	0,46	0,80	0,90	0,75	0,88	0,70	X12
	B2i+R2i	0,50	0,60	0,50	0,80	0,75	0,50	X23
7	B1i+R1i	0,56	0,90	0,90	0,85	0,95	0,80	X13
	B2i-R2i	0,10	0,20	0,50	0,40	0,45	0,50	X21
8	B1i+R1i	0,56	0,90	0,90	0,85	0,95	0,80	X13
	B2i	0,30	0,40	0,50	0,60	0,60	0,50	X22
9	B1i+R1i	0,56	0,90	0,90	0,85	0,95	0,80	X13
	B2i+R2i	0,50	0,60	0,50	0,80	0,75	0,50	X23

Estas combinaciones se introducen en ODEON para obtener los tiempos de reverberación para cada una de ellas. El resultado se puede ver en la Tabla 255.

Tabla 255. TR₃₀ obtenidos de las combinaciones definidas anteriormente.

TR ₃₀	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
tr1	1,49	1,24	0,98	1,19	1,00	0,86
tr2	1,40	1,17	0,98	1,10	0,98	0,86
tr3	1,28	1,07	0,98	1,01	0,95	0,86
tr4	1,47	1,19	0,98	1,17	1,00	0,84
tr5	1,37	1,14	0,98	1,08	0,97	0,84
tr6	1,25	1,04	0,98	0,99	0,93	0,84
tr7	1,44	1,16	0,98	1,15	0,98	0,83
tr8	1,35	1,11	0,98	1,05	0,95	0,83
tr9	1,22	1,00	0,98	0,96	0,90	0,83

En la Figura 171 se observa que tras la aplicación del RSM, el "target" se encuentra dentro de los espectros del TR₃₀ de las distintas combinaciones.

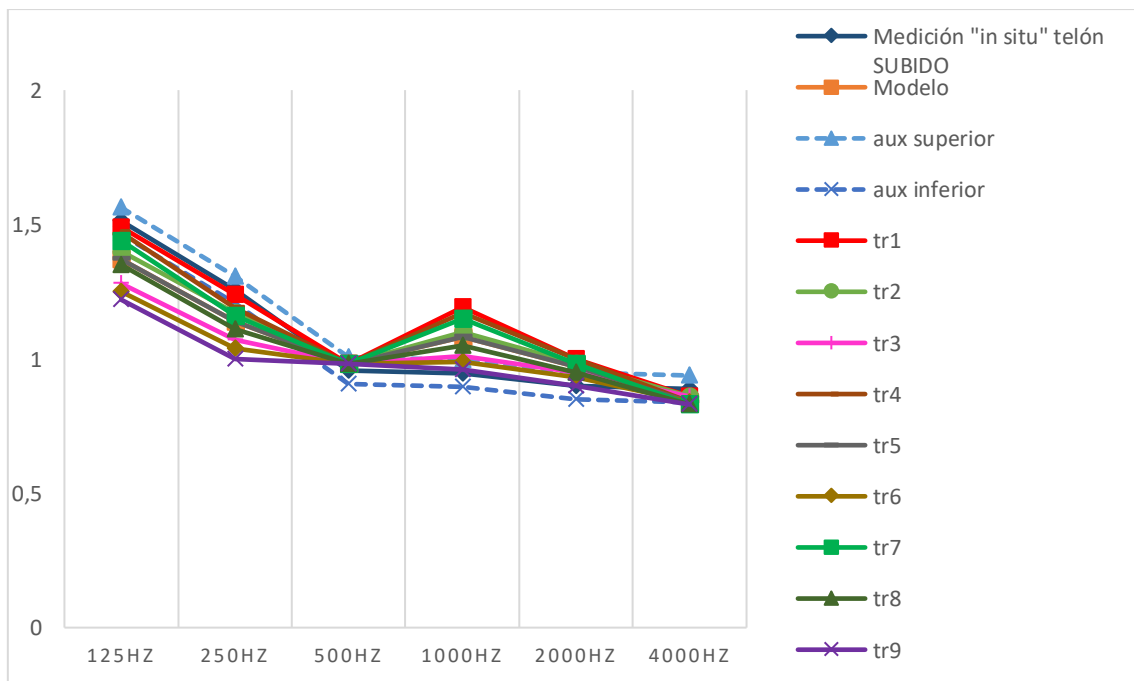


Figura 171. Comparativa TR₃₀. Medición in situ, modelización, y resultados TR₃₀ tras aplicación RSM

Para obtener las superficies de respuesta, se agrupan los datos por frecuencia, formando nueve combinaciones de ternas de puntos por frecuencia. A partir de dichas superficies se obtienen nuevos pares de puntos que satisfacen el “target”.

Ternas de datos por frecuencia y representación mediante superficie de respuesta, sólo para las frecuencias que requieren ajuste:

Tabla 256. Ternas de datos a 125 Hz

125HZ			
	X1	X2	TR
	0,36	0,10	1,49
	0,36	0,30	1,40
	0,36	0,50	1,28
	0,46	0,10	1,47
	0,46	0,30	1,37
	0,46	0,50	1,25
	0,56	0,10	1,44
	0,56	0,30	1,35
	0,56	0,50	1,22

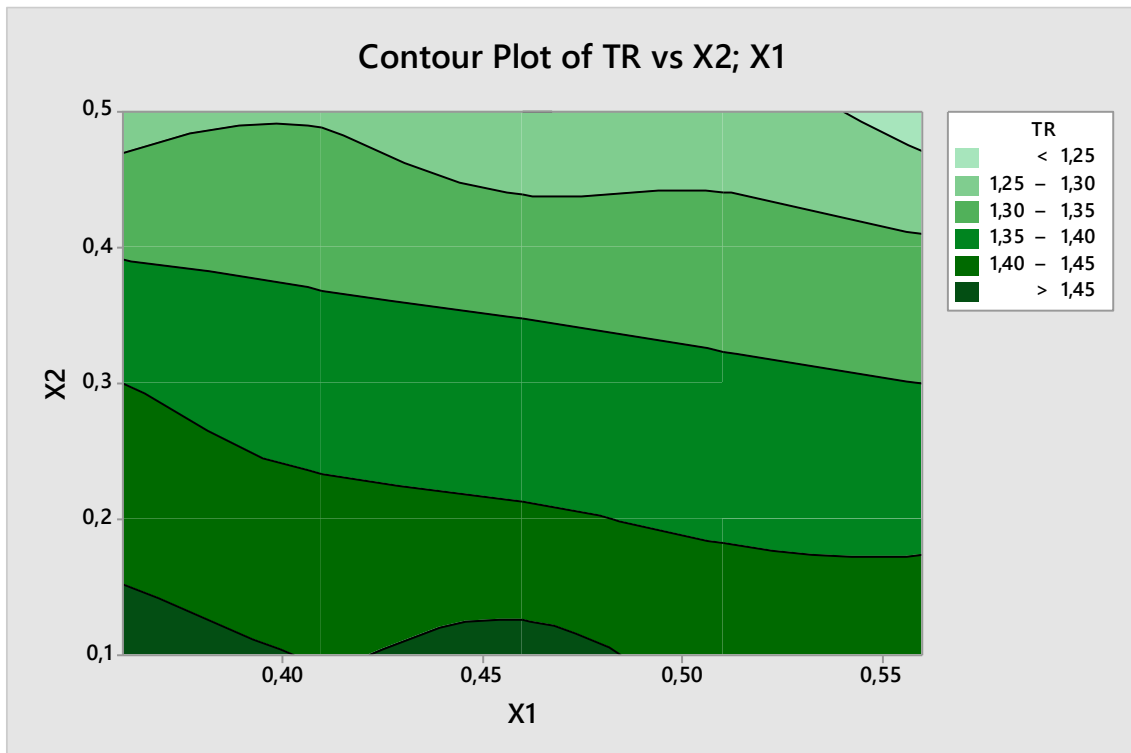


Figura 172. Superficie de respuesta a 125 Hz.

Tabla 257. Pares de puntos a 125 Hz

X1	0,36	0,48	0,38	0,36
X2	0,10	0,10	0,13	0,16

Tabla 258. Ternas de datos a 250 Hz

250HZ

	X1	X2	TR
	0,70	0,20	1,24
	0,70	0,40	1,17
	0,70	0,60	1,07
	0,80	0,20	1,19
	0,80	0,40	1,14
	0,80	0,60	1,04
	0,90	0,20	1,16
	0,90	0,40	1,11
	0,90	0,60	1,00

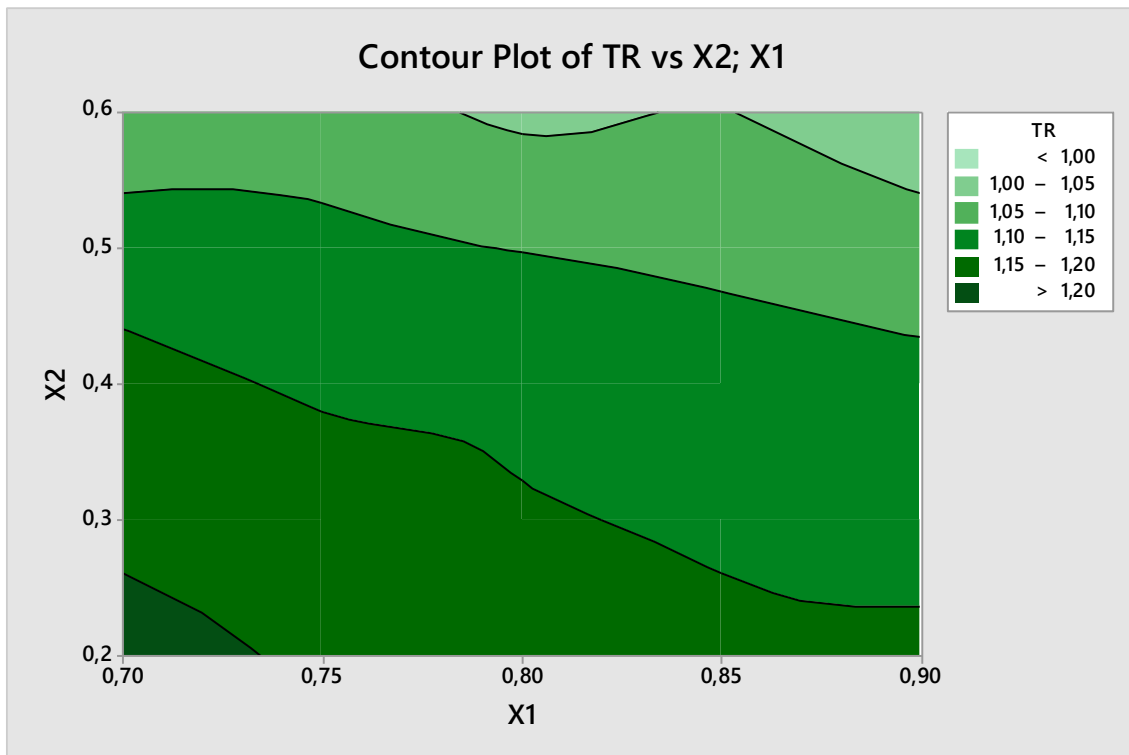


Figura 173. Superficie de respuesta a 250 Hz

Tabla 259. Pares de puntos a 250 HZ

X1	0,70	0,73	0,70	0,72
X2	0,20	0,20	0,26	0,23

Tabla 260. Ternas de datos a 1000 Hz

1000HZ			
	X1	X2	TR
	0,65	0,40	1,19
	0,65	0,60	1,10
	0,65	0,80	1,01
	0,75	0,40	1,17
	0,75	0,60	1,08
	0,75	0,80	0,99
	0,85	0,40	1,15
	0,85	0,60	1,05
	0,85	0,80	0,96

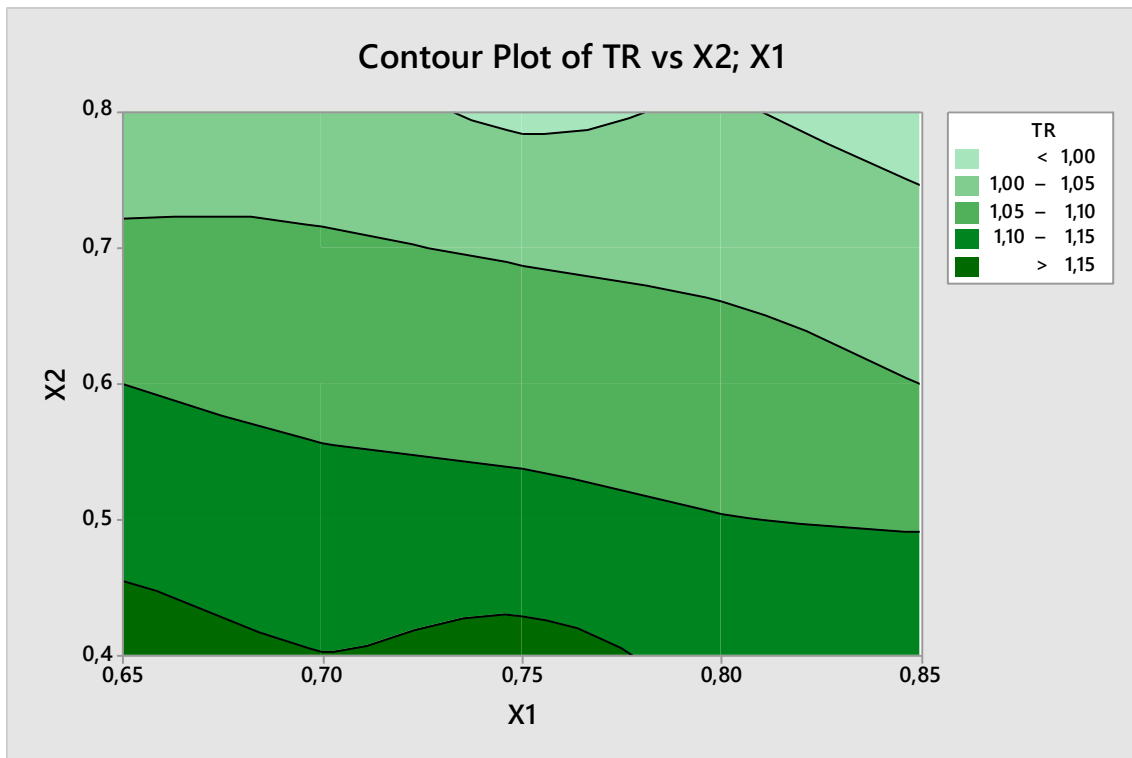


Figura 174. Superficie de respuesta a 1000 Hz

Tabla 261. Pares de puntos a 1000 Hz

X1	0,85	0,82	0,84	0,83
X2	0,80	0,79	0,77	0,76

Tabla 262. Ternas de datos a 2000 Hz

2000HZ			
	X1	X2	TR
	0,85	0,45	1,00
	0,85	0,60	0,98
	0,85	0,75	0,95
	0,90	0,45	1,00
	0,90	0,60	0,97
	0,90	0,75	0,93
	0,95	0,45	0,98
	0,95	0,60	0,95
	0,95	0,75	0,90

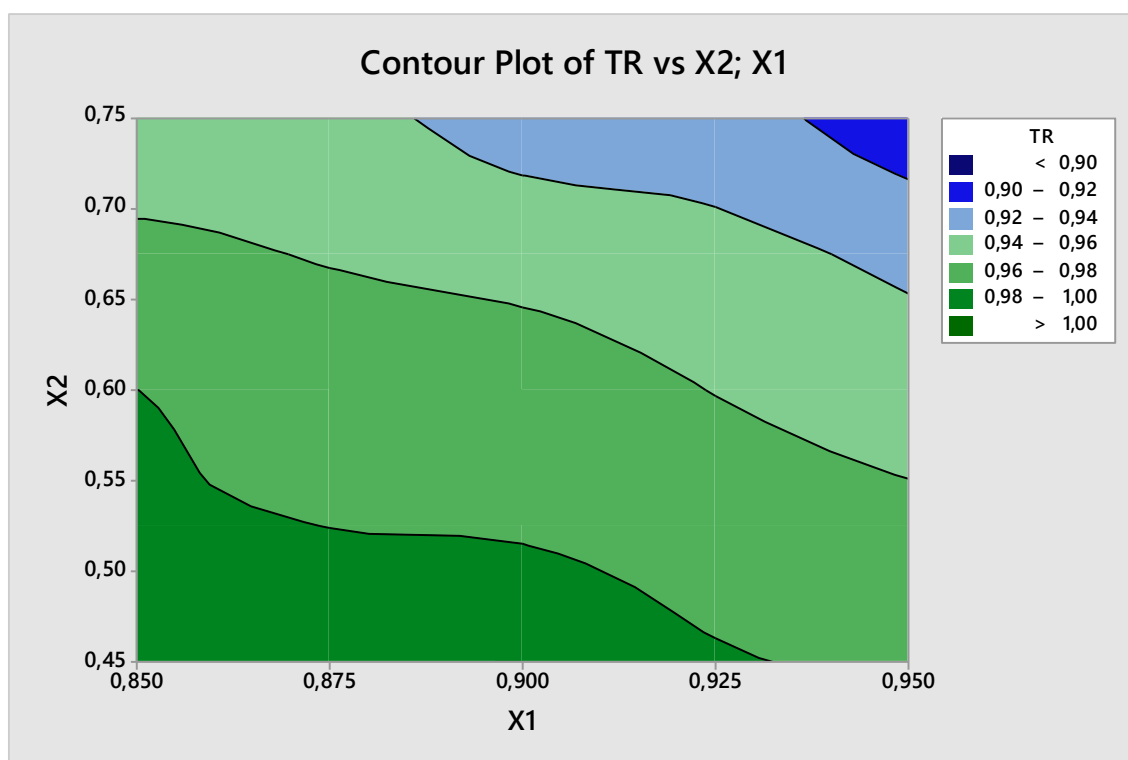


Figura 175. Superficie de respuesta a 2000 Hz

Tabla 263. Pares de puntos a 2000 Hz

X1	0,90	0,95	0,95
X2	0,71	0,75	0,50

4.5.3.2.3.1 Combinaciones

En la Tabla 264 se muestran los conjuntos de pares obtenidos.

Como se ha explicado previamente habría que descartar aquellos pares que se encuentren en los límites de la región estudiada, pero como en este caso los pares se han obtenido de forma visual evitando los límites de la región, no es necesario descartar ningún par por esa razón.

Tabla 264. Pares de puntos obtenidos para el cálculo

	125Hz	250Hz	1000Hz	2000Hz
X1	0,36	0,70	0,85	0,90
X2	0,10	0,20	0,80	0,71
X1	0,48	0,73	0,82	0,95
X2	0,10	0,20	0,79	0,75
X1	0,38	0,70	0,84	0,95
X2	0,13	0,26	0,77	0,50
X1	0,36	0,72	0,83	
X2	0,16	0,23	0,76	

Se seleccionan los pares que mejor se ajustan a los valores esperados de cada uno de ellos, y se prueban en el modelo virtual.

Combinación 1.

En la Tabla 265 se muestran los espectros de absorción de las superficies X1 y X2 empleadas en la simulación.

Tabla 265. Combinación de espectros de absorción de las superficies estudiadas

puntos	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
X1	0,36	0,70	0,90	0,85	0,90	0,70
X2	0,13	0,20	0,50	0,80	0,71	0,50

La combinación anterior da como resultado el tiempo de reverberación que se muestra en la Tabla 266.

Tabla 266. TR_{30} obtenido

TR_{30}	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
tr1	1,47	1,24	0,98	0,96	0,90	0,84

En la Figura 176 se observan los valores del TR_{30} de la medición real con un margen superior e inferior de 0,05 segundos y del modelo tras la aplicación del RSM. El espectro de absorción tr1 se encuentra dentro de los márgenes establecidos como aceptables, por lo que se admite la combinación 1.

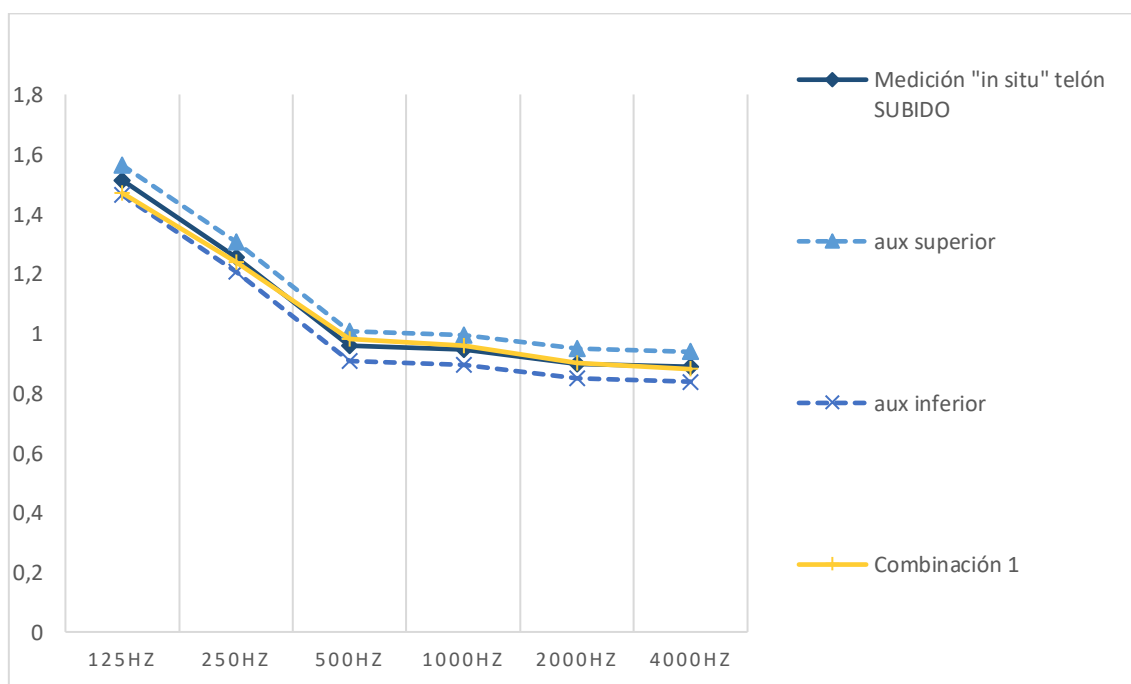


Figura 176. Representación gráfica del TR_{30} medido "in situ" con telón subido, los límites superior e inferior aceptables, la modelización inicial, y la modelización de la combinación 1

A continuación, se va a comprobar si el cambio que se ha realizado en las lamas del techo funciona también en el modelo de la sala con el telón bajado

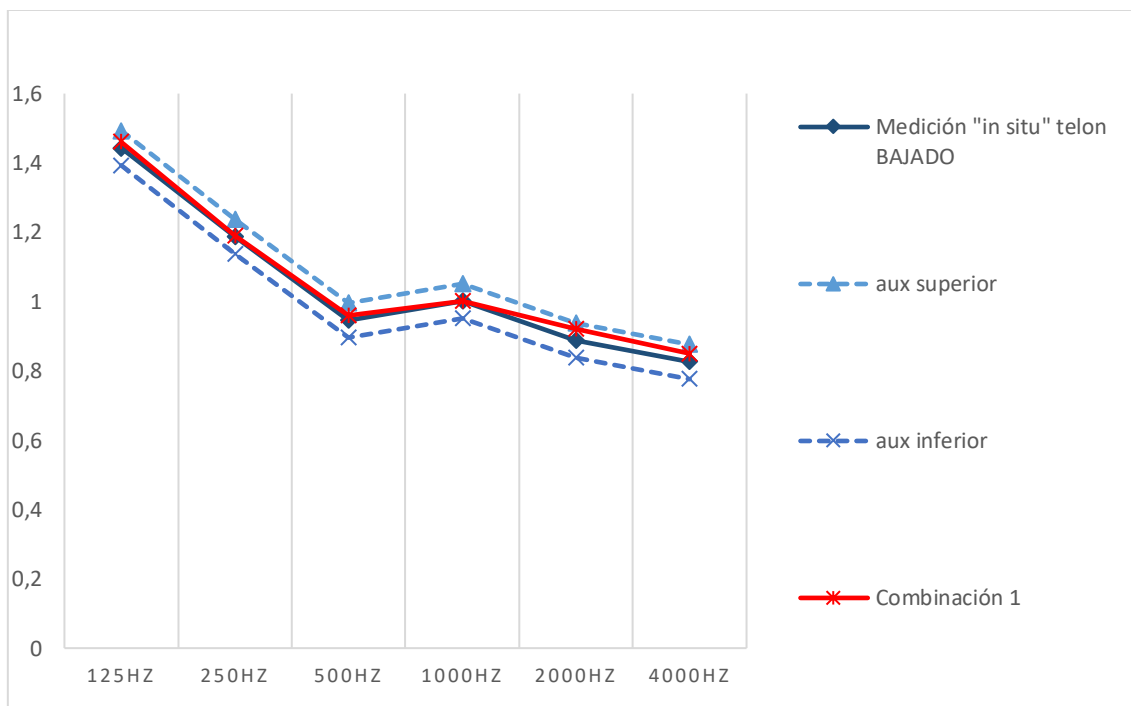


Figura 177. Comparativa TR₃₀ telón bajado, medición real con límites superior e inferior aceptables, resultado obtenido en modelo con telón bajado tras análisis con telón subido

A continuación, se representa la variación del espectro de absorción de los materiales estudiados como incógnita respecto al valor del coeficiente de absorción inicial considerado, tomado de la bibliografía, y el valor finalmente empleado en la combinación ajustada.

Las variaciones correspondientes al material X1 (techo) y de X2 (boca de escena), se muestran en la Figura 178 y en la Figura 179, respectivamente.

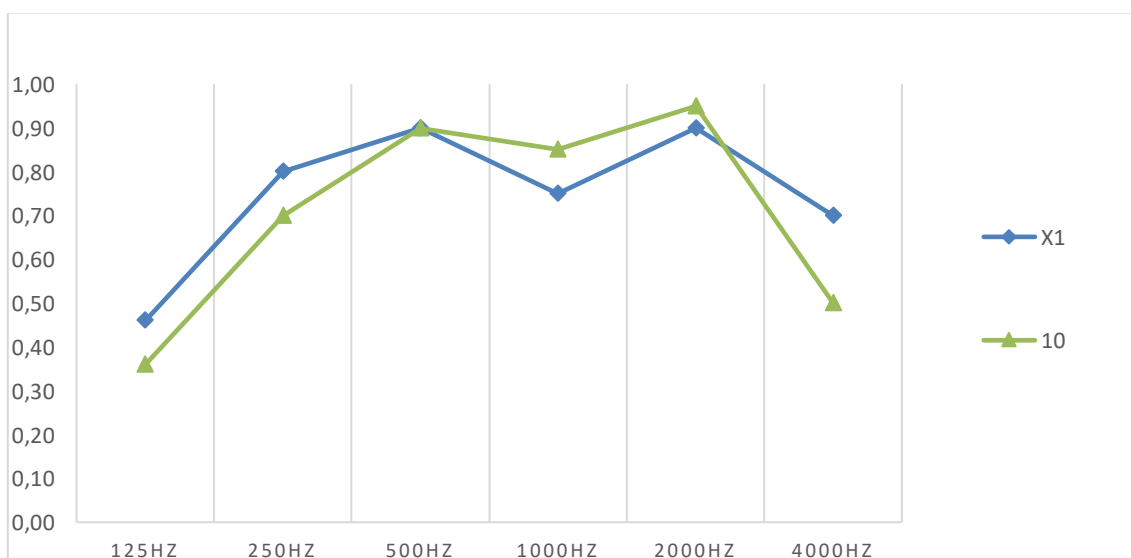


Figura 178. Espectro de absorción del techo (bibliografía-azul- y aplicación RSM- gris-).

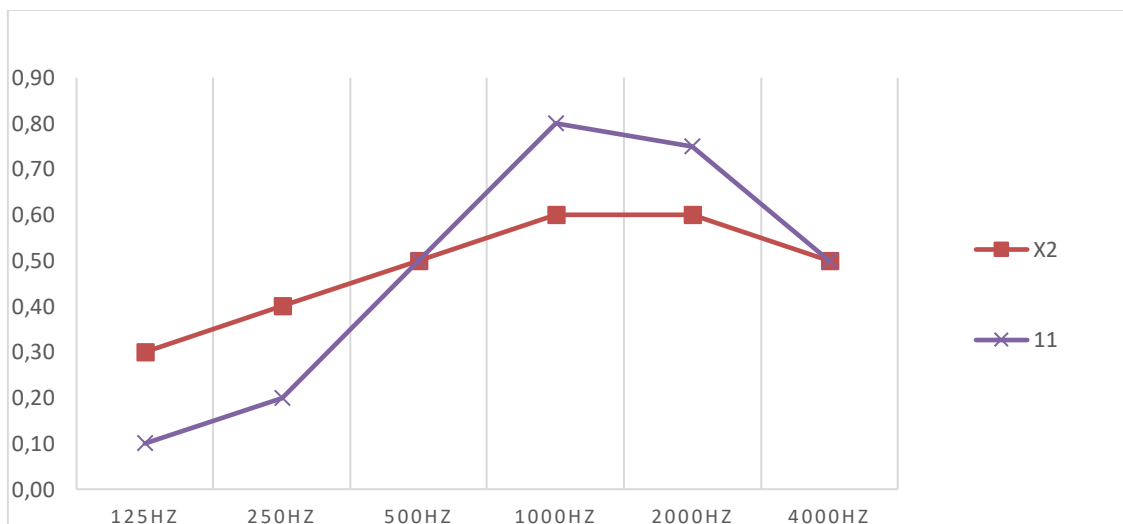


Figura 179. Figura 61. Espectro de absorción de la boca de escena (bibliografía-rojo- y aplicación RSM- morado-).

Los espectros de absorción 10 y 11 de la combinación 1, del ajuste con boca de escena abierta, se corresponden con los datos ajustados en el proceso anterior del techo y de la bibliografía de la boca de escena, respectivamente. X1 y X2, representan los ajustes realizados a cada uno de ellos tras la aplicación del RSM.

En la Tabla 267 se muestran los coeficientes de absorción de las superficies tras aceptar los nuevos valores de los materiales de la sala.

Tabla 267. Coeficientes de absorción de las soluciones constructivas empleadas en el modelo tras ajuste con telón subido

Zona	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
Pavimento escenario	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Frente de escenario, marco boca escena	0,05	0,07	0,13	0,22	0,32	0,35
Pavimento sala	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Paramentos verticales laterales, forjado superior, galerías laterales	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,07
Puertas	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
Paramentos verticales acceso sala	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Fondo sala	0,11	0,21	0,10	0,05	0,04	0,02
Vidrio grande	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Butacas	0,35	0,45	0,75	0,61	0,88	0,68
Techo sala, y accesos	0,36	0,70	0,90	0,85	0,95	0,50
Boca de escena	0,10	0,20	0,50	0,80	0,75	0,50

4.5.4 Resultados

El espectro de absorción de la boca de escena de la sala obtenido tras aplicación del RSM, se muestra en la tabla a continuación:

Tabla 268. Coeficiente de absorción de la boca de escena

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Tras análisis RSM	0,10	0,20	0,50	0,80	0,75	0,50

A continuación, se compara el tiempo de reverberación del modelo ajustado con telón subido, con el obtenido empleando los espectros de absorción para la boca de escena de diversas fuentes. El resultado se muestra en la y en la Tabla 269.

Tabla 269. TR₃₀ obtenido en el modelo ajustado con telón subido, y empleando los coeficientes de absorción de otros autores

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Medición in situ telón subido	1,513	1,256	0,958	0,945	0,898	0,888
El Musical	1,47	1,24	0,98	0,96	0,90	0,88
Carrión	1,37	1,19	1,05	0,98	0,90	0,83
Arau	1,40	1,19	1,02	1,13	0,97	0,87
Knudsen y Harris	1,40	1,17	0,98	1,05	0,95	0,88
Cavanaugh y Wilkes	1,40	1,19	1,02	1,13	0,97	0,87
Barron	1,15	0,95	0,84	0,91	0,84	0,80

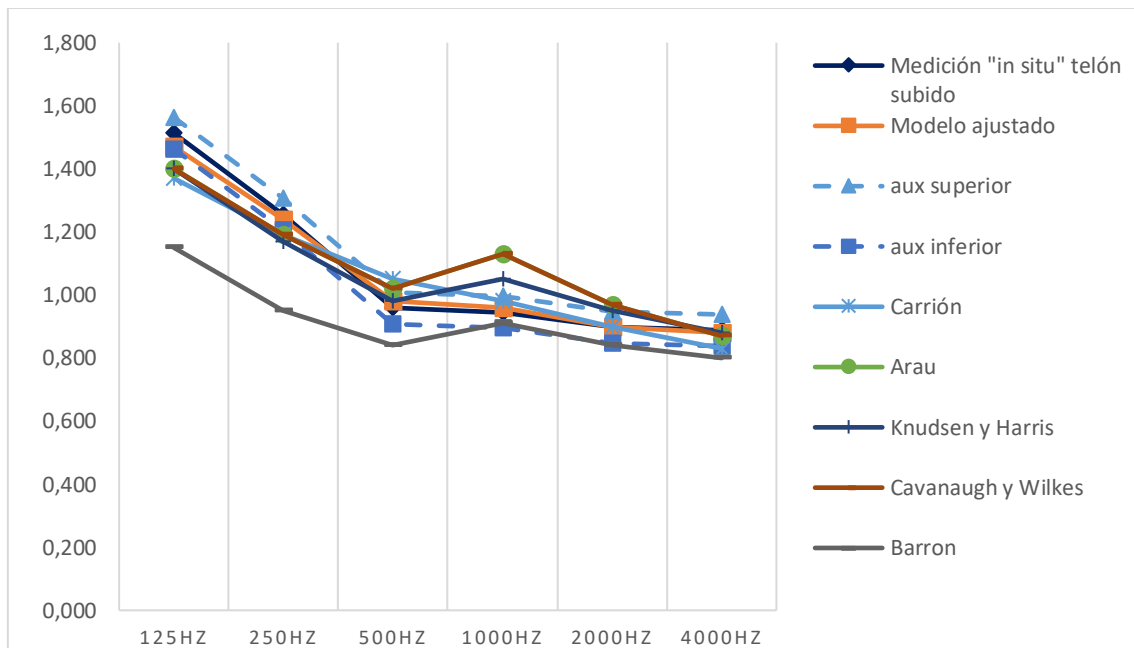


Figura 180. Comparativa TR_{30} telón subido. Medición real con límites superior e inferior, modelo ajustado, y modelos empleando los coeficientes de absorción de boca de escena de distintos autores.

En la Figura 180 se observa que el tiempo de reverberación obtenido empleando los distintos coeficientes de absorción para la boca de escena se encuentran fuera de los límites aceptables en casi todas las frecuencias.

Para observar la influencia de la boca de escena en el comportamiento absorbente del modelo, se calcula éste con valores distintos de absorción para la boca de escena (0,10; 0,50 y 0,90) y se obtienen los espectros del TR_{30} en cada caso.

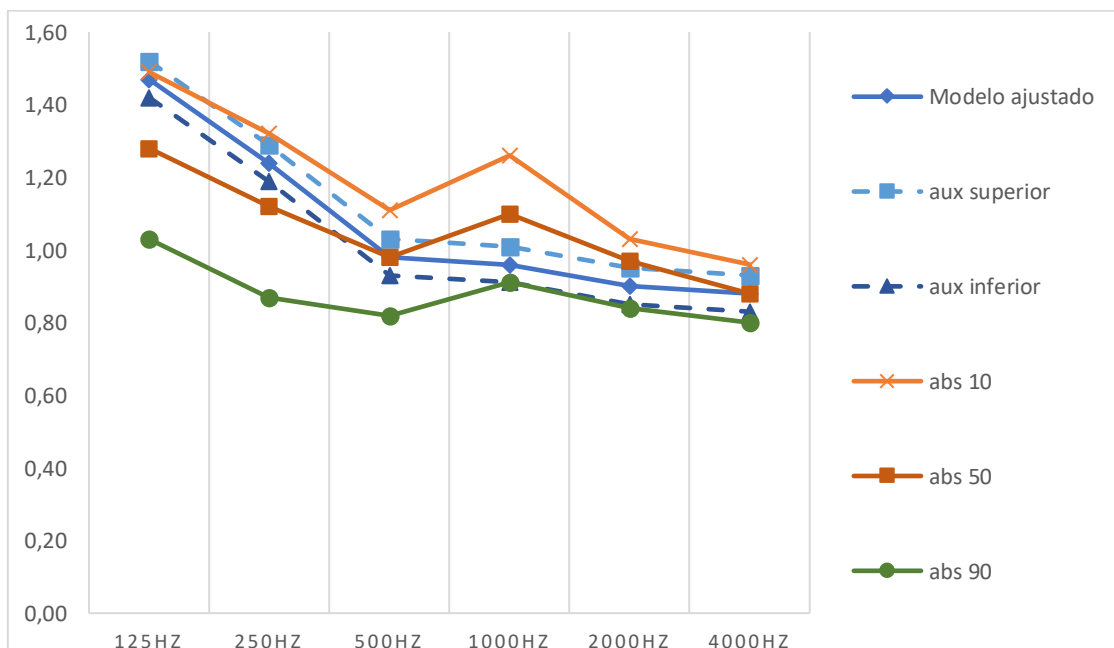


Figura 181. Comparativa TR_{30} con telón subido con distintos valores de absorción para la boca de escena

4.6 Sala 6. Auditori Alfons Roig. Facultat de Belles Artes. UPV. Valencia

4.6.1 Descripción de la sala

4.6.1.1 *Datos generales*

Dirección

Camino de Vera s/n. Facultat de Belles Artes de San Carlos. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia

Fecha de construcción

Año de finalización de la facultad, 2011.

Arquitecto

Juan de Dios Pérez Botella (ESCALA ARQUITECTOS)

4.6.1.2 *Características morfológicas y constructivas*

El auditorio Alfons Roig forma parte de las instalaciones de la Facultat de Belles Artes de San Carlos (UPV). Es una sala de planta rectangular, con inclinación del patio de butacas, de unas dimensiones aproximadas de 16 metros de anchura por 20 de profundidad. La sala tiene un aforo de 300 espectadores. En el techo del auditorio hay colocados, de manera transversal, grandes reflectores planos. Las medidas del escenario son 18 metros de anchura por 7 metros de profundidad, y tiene una altura de un metro con respecto al patio de butacas. La boca de escena, mide 12,40 metros de ancho por 5,40 metros de alto. La altura de la caja de escena es de 14,13 metros, y su volumen aproximado es de 1.800m³. El volumen de la sala bajo los reflectores es de 1709,84 m³. Estos elementos están separados del techo de la construcción con una distancia variable de entre 2,70 metros y 3,40 metros. El volumen total de la sala con los reflectores abiertos al volumen superior es de 2.578,4 m³ [47].

El principal material empleado en la sala es tablero fenólico liso un centímetro de espesor. Este material se ha empleado en los laterales y en el fondo de la sala, montado sobre rastreles de entre ocho y diez centímetros formando cámara de aire en el dorso; en el antepecho que delimita la zona de butacas, montado sobre estructura metálica; y en el frente de escenario, colocado sobre ladrillo perforado. Al fondo de la sala, la cabina se sitúa en un volumen en la planta primera. Bajo ésta, la pared del fondo de la sala está dividida en tres bandas horizontales, ejecutadas con el mismo material, pero con distinto acabado; la banda inferior tiene un acabado liso (llega hasta la altura de las escaleras, 1,38 cm), la banda intermedia está perforada (con un diámetro de perforación de 8 mm, una distancia entre ejes de 16mm, y una altura de 1,39 cm) y la banda superior está ranurada (tiene una altura 1,16cm). El acabado del techo del fondo es de tablero de madera ranurado con cámara. El comportamiento de los tableros lisos es tipo membrana y el de los tableros perforados y ranurado, de tipo resonador.

El techo está formado por reflectores de tablero fenólico liso de un centímetro de espesor, colocados sobre estructura de madera, abiertos al espacio superior. La apertura permite la incorporación de bandas de iluminación.

La cabina está cerrada al espacio de la sala por medio de una ventana corrida (Akustik glass).

El pavimento de la sala es de pvc sobre forjado y el del escenario de tarima de madera sobre estructura metálica.

Las butacas son absorbentes (modelo Marlene de Oken).

4.6.1.3 Fotografías



Figura 182. Vista del fondo de la sala



Figura 183. Vista del escenario



Figura 184. Lateral



Figura 185. Butacas y cabina



Figura 186. Fondo de la sala



Figura 187. Detalle de los materiales del fondo de la sala



Figura 188. Vista lateral de la sala desde el escenario

4.6.1.4 Planos

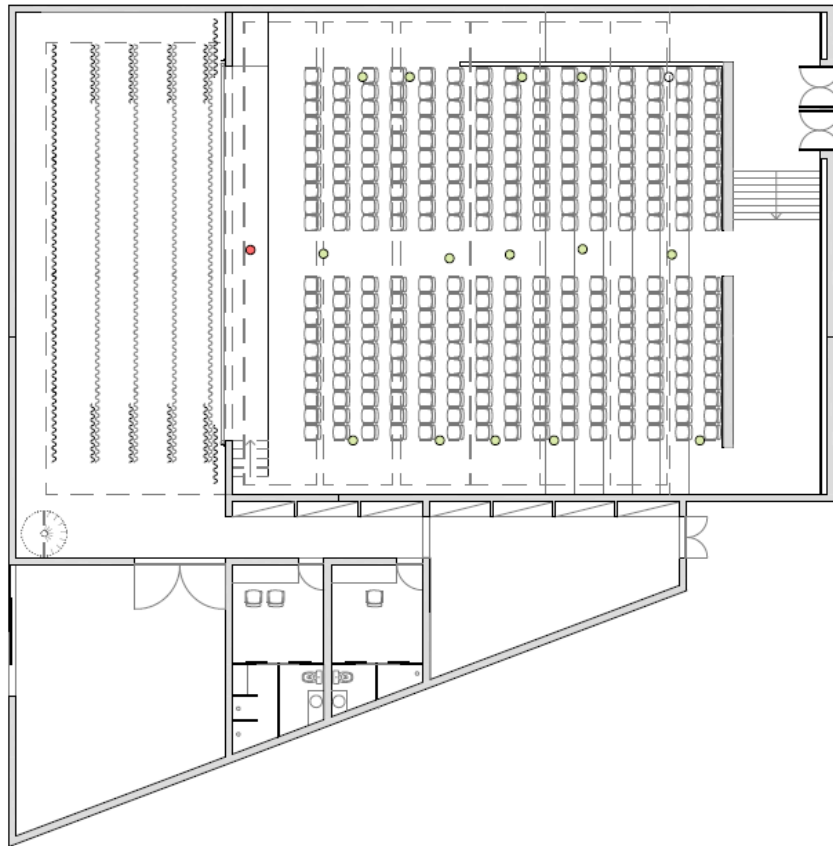


Figura 189. Planta. Disposición de la fuente sonora en rojo, y de los receptores en verde (Planos fuente: Escala Arquitectos).

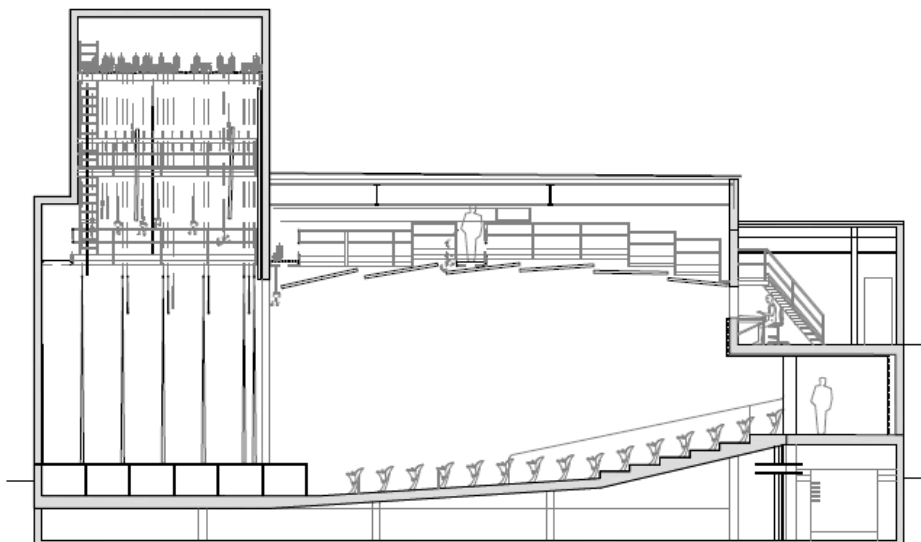


Figura 190. Sección (Planos fuente: Escala Arquitectos).

4.6.1.5 Comportamiento absorbente de los materiales

A continuación, en la Tabla 270 se detallan los coeficientes de absorción de las distintas soluciones constructivas que se encuentran en la sala.

Tabla 270. Coeficientes e absorción asignados a las distintas soluciones constructivas de la sala.

Zona	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Boca de escena	0,140	0,350	0,550	0,720	0,700	0,650
Pavimento escenario	0,400	0,300	0,200	0,170	0,150	0,100
Frente escenario	0,420	0,210	0,060	0,050	0,050	0,040
Cabina	0,180	0,060	0,040	0,030	0,020	0,018
Paramentos laterales	0,420	0,210	0,060	0,050	0,050	0,040
Fondo superior (junto cabina)	0,420	0,210	0,060	0,050	0,050	0,040
Fondo inferior ranurado	0,030	0,400	0,790	0,910	0,760	0,700
Fondo inferior perforado	0,330	1,000	0,960	0,770	0,710	0,590
Fondo inferior liso	0,420	0,210	0,060	0,050	0,050	0,040
Pavimento	0,020	0,020	0,030	0,040	0,040	0,050
Butacas	0,490	0,660	0,800	0,880	0,820	0,700
Antepecho	0,420	0,210	0,060	0,050	0,050	0,040
Techo fondo	0,030	0,400	0,790	0,910	0,760	0,700
Lamas	0,300	0,200	0,200	0,100	0,050	0,050
Techo sala	0,020	0,030	0,030	0,030	0,040	0,070
Caja de escena	0,420	0,210	0,060	0,050	0,050	0,040

4.6.2 Medición de parámetros

4.6.2.1 Toma de datos "in situ"

Para definir los puntos (x,y,z) tanto de la fuente como de los distintos receptores, tomamos como centro de origen la parte trasera del escenario en el punto más bajo del

dibujo, así medimos cada punto con respecto al origen que hemos determinado. Se coloca la fuente sonora a una altura de 1,25 metros en el centro de la corbata. El escenario tiene un desnivel con la platea de un metro.

En la Tabla 271 se indican las coordenadas de la fuente sonora y de los distintos receptores.

Tabla 271. Coordenadas de la fuente y de los receptores.

Cerrado	Abierto	X	Y	Z
Fuente		7,8	1,17	2,2
PTO_1	PTO_30	11,21	-5,15	1,18
PTO_2	PTO_29	10,23	1,04	1,12
PTO_3	PTO_28	11,53	6,92	1,20
PTO_4	PTO_27	14,10	-5,15	1,36
PTO_5	PTO_26	14,42	0,89	1,38
PTO_6	PTO_25	13,10	6,92	1,30
PTO_7	PTO_24	15,94	-5,15	1,48
PTO_8	PTO_23	16,43	1,01	1,51
PTO_9	PTO_22	16,84	6,92	1,53
PTO_10	PTO_21	17,90	-5,15	1,80
PTO_11	PTO_20	18,85	1,19	2,02
PTO_12	PTO_19	18,83	6,92	2,02
PTO_13	PTO_18	22,75	-5,15	2,96
PTO_14	PTO_17	21,82	1,01	2,72
PTO_15	PTO_16	21,72	6,92	2,72

4.6.2.2 Parámetros acústicos

Mediante la utilización del software DIRAC se han realizado las mediciones in situ de la sala, con telón bajado y con telón subido. De esta manera se han obtenido los parámetros acústicos en cada situación.

4.6.2.2.1 Parámetros acústicos con telón bajado

Tabla 272. Inteligibilidad

STI male	0,65
STI female	0,66

Tabla 273. Parámetros temporales

	125	250	500	1000	2000	4000
EDT	1,092	0,891	0,872	0,854	0,812	0,668
TR₃₀	1,286	1,052	0,984	0,993	0,99	0,863
TR₂₀	1,274	1,044	0,98	0,988	0,987	0,861
TR₁₀	1,247	1,087	1,004	1,001	1,003	0,844

Tabla 274. Claridad

	125	250	500	1000	2000	4000
C₅₀	-4,10	-3,08	-3,27	-2,50	-2,69	-1,94
C₈₀	-1,03	0,89	1,02	1,77	1,57	3,54

Tabla 275. Definición

	125	250	500	1000	2000	4000
D₅₀	0,28	0,33	0,32	0,36	0,35	0,39

4.6.2.2.2 Parámetros acústicos con telón subido

Tabla 276. Inteligibilidad

STI male	0,64
STI female	0,64

Tabla 277. Parámetros temporales

	125	250	500	1000	2000	4000
EDT	1,117	0,987	0,914	0,904	0,857	0,703
TR₃₀	1,286	1,075	1,037	1,035	1,005	0,886
TR₂₀	1,277	1,072	1,029	1,035	1,01	0,876
TR₁₀	1,319	1,111	1,093	1,073	1,056	0,856

Tabla 278. Parámetros energéticos

	125	250	500	1000	2000	4000
C₅₀	-2,13	-0,87	-0,52	-0,17	-0,17	0,52
C₈₀	0,84	2,97	3,36	3,51	3,68	4,79

Tabla 279. Definición

	125	250	500	1000	2000	4000
D₅₀	0,38	0,45	0,47	0,49	0,49	0,53

4.6.3 Aplicación del método de superficies de respuesta

4.6.3.1 Modelo virtual de la sala

Se realiza el modelo virtual de la sala en Autocad y se importa el modelo a ODEON. Se comprueba que el modelo es correcto: que no tiene fugas (“deadballs”), que no hay rayos perdidos, y que las aristas del modelo están en contacto entre sí.

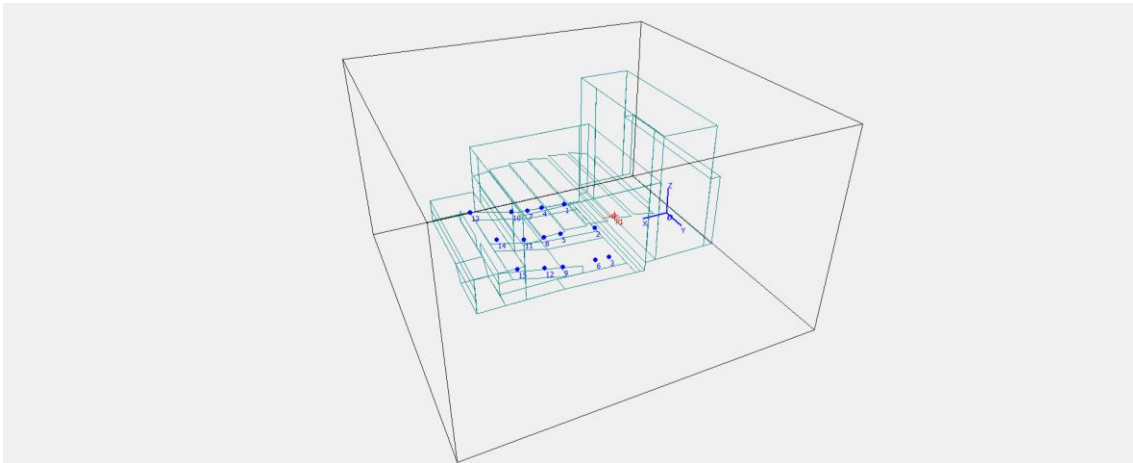


Figura 191. Modelo virtual de la sala

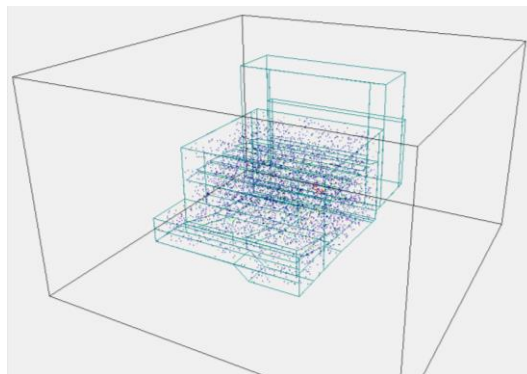


Figura 192. Captura del test 3DBillard

Se introducen las coordenadas de la fuente y de los receptores, y se asignan los materiales de las distintas superficies, empleando los coeficientes de la Tabla 270.

4.6.3.2 Aplicación del RSM con telón bajado

En el modelo virtual de la sala con telón bajado, a la superficie de la boca de escena se le asigna el material de telón. Se calcula el modelo y se obtiene el tiempo de reverberación TR_{30} medio. El TR_{30} obtenido se compara con el de la medición realizada “in situ”, tal y como se ve en la Tabla 280.

Tabla 280. TR_{30} medio de la medición in situ y de la modelización con telón bajado

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Medición in situ	1,084	1,029	1,066	1,249	1,243	1,016
Modelización BBAA	0,86	0,94	1,14	1,25	1,35	1,12

En Figura 193 se representa el tiempo de reverberación medio, TR_{30} , medido in situ, los márgenes superior e inferior en los que el resultado del modelo es aceptable y el resultado del TR_{30} de la modelización inicial. Se observa que el valor a 1000 Hz es idéntico al de la medición “in situ”, que los valores a 250Hz y 500Hz están muy cercanos al “target”, que los valores a 2000Hz y 4000Hz, siguen la misma tendencia que la medición, aunque falta absorción; y que a 125Hz sobra absorción.

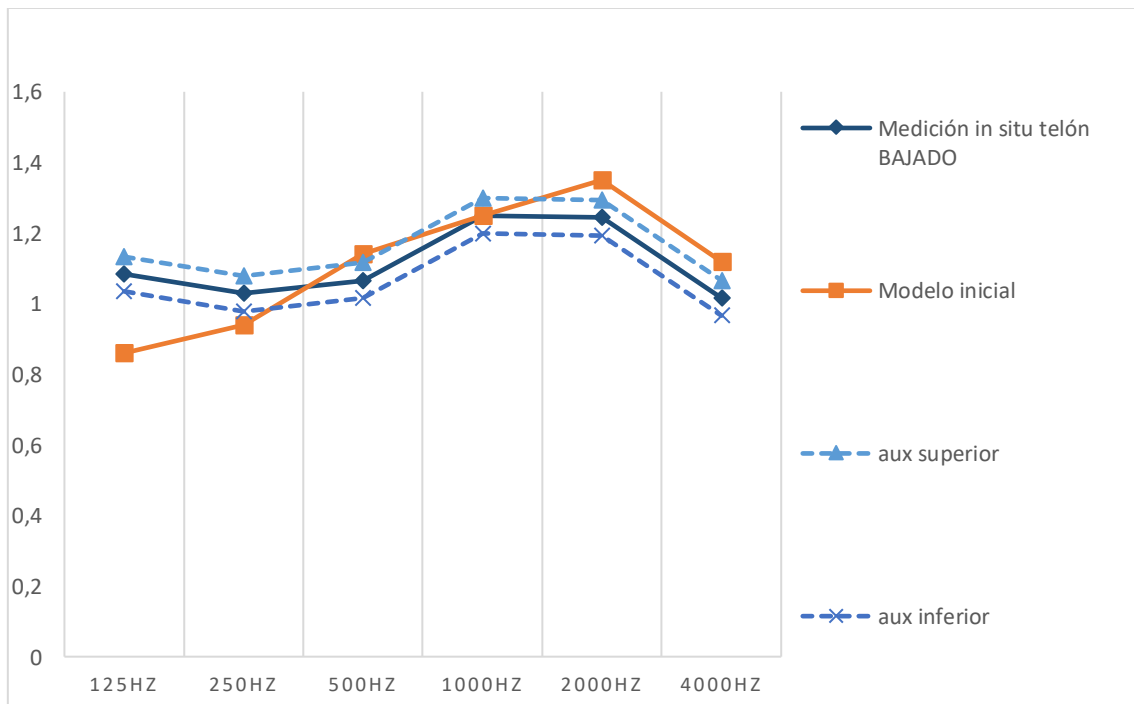


Figura 193. Representación gráfica del TR_{30} medido “in situ” con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables y la modelización inicial

4.6.3.2.1 Ajuste mediante método de superficies de respuesta

A continuación, se va a emplear el RSM para ajustar el modelo virtual a la medición real.

En primer lugar, se reordenan la tabla de coeficientes de absorción de los materiales de la sala y se les asigna un número, tal y como se observa en la Tabla 281.

Tabla 281. Coeficientes de absorción de las superficies de la sala y asignación de número de superficie.

Escena	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	Nº SUP
Techo sala	0,020	0,030	0,030	0,030	0,040	0,070	1
Laterales sobre lamas	0,020	0,030	0,030	0,030	0,040	0,070	2
Techo fondo y fondo inferior ranurado	0,030	0,400	0,790	0,910	0,760	0,700	3
Pavimento	0,020	0,020	0,030	0,040	0,040	0,050	4
Butacas	0,490	0,660	0,800	0,880	0,820	0,700	5
Fondo inferior perforado	0,330	1,000	0,960	0,770	0,710	0,590	6
Boca	0,140	0,350	0,550	0,720	0,700	0,650	7
Pavimento frente escenario	0,400	0,300	0,200	0,170	0,150	0,100	8
Cabina	0,180	0,060	0,040	0,030	0,020	0,018	9
Frente escenario, laterales, fondo superior e inferior, antepecho, caja escena	0,420	0,210	0,060	0,050	0,040	0,040	10
Lamas del techo	0,300	0,200	0,200	0,100	0,050	0,050	11

Se eligen como superficies incógnita el acabado superficial fenólico y los reflectores o lamas del techo.

Se define la región de estudio en la aplicación del RSM.

$$X_{1i} = B_{1i} \pm R_{1i}$$

Siendo:

B_{1i} los valores tomados de la bibliografía y

R_{1i} , incrementos que oscilan entre 0 y 0,5

De forma análoga se realiza para X_{2i}

En la Tabla 282 se muestran los coeficientes de absorción de las superficies empleados en la simulación y las regiones de estudio.

Tabla 282. Coeficientes de absorción empleados en la simulación

	Nº SUP	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
	1	0,020	0,030	0,030	0,030	0,040	0,070
	2	0,020	0,030	0,030	0,030	0,040	0,070
	3	0,030	0,400	0,790	0,910	0,760	0,700
	4	0,020	0,020	0,030	0,040	0,040	0,050
	5	0,490	0,660	0,800	0,880	0,820	0,700
	6	0,330	1,000	0,960	0,770	0,710	0,590
	7	0,140	0,350	0,550	0,720	0,700	0,650
	8	0,400	0,300	0,200	0,170	0,150	0,100
	9	0,180	0,060	0,040	0,030	0,020	0,018
Paramentos fenólico	10	$X_{1_{125}}$	$X_{1_{250}}$	$X_{1_{500}}$	$X_{1_{1000}}$	$X_{1_{2000}}$	$X_{1_{4000}}$
Techo lamas	11	$X_{2_{125}}$	$X_{2_{250}}$	$X_{2_{500}}$	$X_{2_{1000}}$	$X_{2_{2000}}$	$X_{2_{4000}}$

4.6.3.2.2 Ajuste 1

Se especifican los valores de las dos regiones de estudio, se toman los valores de la bibliografía y se asignan unos incrementos a cada una de ellas.

En la Tabla 283 y en la Tabla 284, se observan los valores asignados a las regiones de estudio X_1 y X_2 , respectivamente.

Tabla 283. Región de estudio de la superficie X1

X1	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
B1i-R1i	0,05	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03
B1i	0,42	0,21	0,08	0,08	0,08	0,08
B1i+R1i	0,79	0,37	0,13	0,13	0,13	0,13
INCREMENTOS R1	0,37	0,16	0,05	0,05	0,05	0,05

Tabla 284. Región de estudio de la superficie X2

X2	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
B2i-R2i	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03	0,03
B2i	0,30	0,26	0,20	0,10	0,06	0,06
B2i+R2i	0,55	0,47	0,35	0,15	0,09	0,09
INCREMENTOS R2	0,25	0,21	0,15	0,05	0,03	0,03

Se obtienen los siguientes pares de espectros de absorción (Tabla 285).

Tabla 285. Combinaciones de pares de espectros de absorción de las regiones X1 y X2.

combinación	puntos	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	
1	B1i-R1i	0,05	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	X11
	B2i-R2i	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03	0,03	X21
2	B1i-R1i	0,05	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	X11
	B2i	0,30	0,26	0,20	0,10	0,06	0,06	X22
3	B1i-R1i	0,05	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	X11
	B2i+R2i	0,55	0,47	0,35	0,15	0,09	0,09	X23
4	B1i	0,42	0,21	0,08	0,08	0,08	0,08	X12
	B2i-R2i	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03	0,03	X21
5	B1i	0,42	0,21	0,08	0,08	0,08	0,08	X12
	B2i	0,30	0,26	0,20	0,10	0,06	0,06	X22
6	B1i	0,42	0,21	0,08	0,08	0,08	0,08	X12
	B2i+R2i	0,55	0,47	0,35	0,15	0,09	0,09	X23
7	B1i+R1i	0,79	0,37	0,13	0,13	0,13	0,13	X13
	B2i-R2i	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03	0,03	X21
8	B1i+R1i	0,79	0,37	0,13	0,13	0,13	0,13	X13
	B2i	0,30	0,26	0,20	0,10	0,06	0,06	X22
9	B1i+R1i	0,79	0,37	0,13	0,13	0,13	0,13	X13
	B2i+R2i	0,55	0,47	0,35	0,15	0,09	0,09	X23

Estas combinaciones se prueban en ODEON para obtener los tiempos de reverberación nuevos.

Se introducen las nueve combinaciones en ODEON y se calcula el tiempo de reverberación para cada una de ellas. El resultado se puede ver en la Tabla 9 . El tiempo de reverberación de las combinaciones se designa de aquí en adelante en minúsculas acompañado de un número que hace referencia a la combinación de origen de la que es su resultado.

Tabla 286. TR₃₀ obtenidos de las combinaciones definidas anteriormente.

TR₃₀	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
tr1	2,18	1,65	1,63	1,55	1,48	1,17
tr2	1,32	1,20	1,37	1,31	1,27	1,08
tr3	1,18	1,13	1,22	1,22	1,20	1,03
tr4	1,48	1,15	1,27	1,43	1,41	1,12
tr5	0,88	0,86	1,08	1,22	1,22	1,04
tr6	0,79	0,78	0,96	1,11	1,14	0,98
tr7	1,07	0,89	1,01	1,33	1,34	1,07
tr8	0,68	0,68	0,85	1,13	1,17	0,98
tr9	0,60	0,57	0,75	1,01	1,08	0,93

En la Figura 194 se observa que todos los puntos objetivo se encuentran dentro de los espectros del TR₃₀ de las distintas combinaciones.

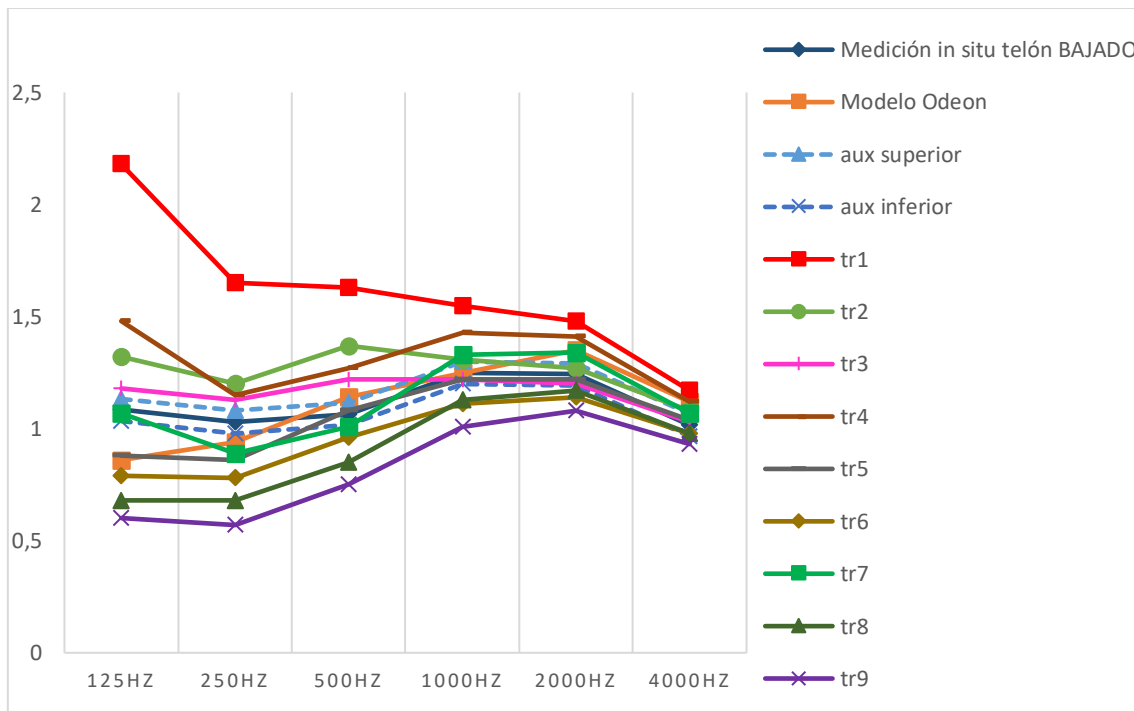


Figura 194. Comparativa TR₃₀. Medición "in situ", modelización y resultados tras aplicación del RSM

Para obtener las superficies de respuesta, se agrupan los datos por frecuencia, formando nueve combinaciones de ternas de puntos por frecuencia. A partir de dichas superficies se obtienen nuevos pares de puntos que satisfacen el "target".

Ternas de datos por frecuencia y representación mediante superficie de respuesta:

Tabla 287. Ternas de datos a 125 Hz

125HZ			
	X1	X2	TR
	0,05	0,05	2,18
	0,05	0,3	1,32
	0,05	0,55	1,18
	0,42	0,05	1,48
	0,42	0,3	0,88
	0,42	0,55	0,79
	0,79	0,05	1,07
	0,79	0,3	0,68
	0,79	0,55	0,6

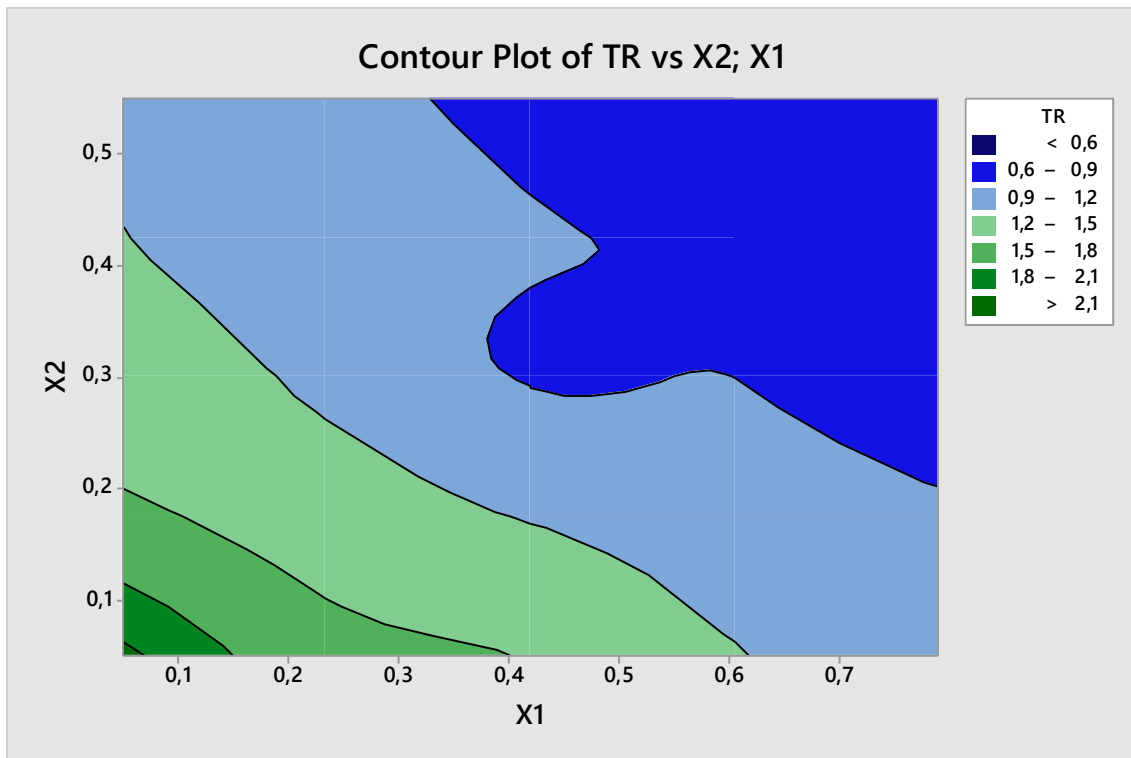


Figura 195. Superficie de respuesta a 125 Hz.

Tabla 288. Pares de puntos a 125 Hz

X1	0,30	0,22	0,68	0,60	0,05	0,35
X2	0,20	0,50	0,13	0,19	0,21	0,20

Tabla 289. Ternas de datos a 250 Hz

250Hz		
X1	X2	TR
0,05	0,05	1,65
0,05	0,26	1,2
0,05	0,47	1,13
0,21	0,05	1,15
0,21	0,26	0,86
0,21	0,47	0,78
0,37	0,05	0,89
0,37	0,26	0,68
0,37	0,47	0,57

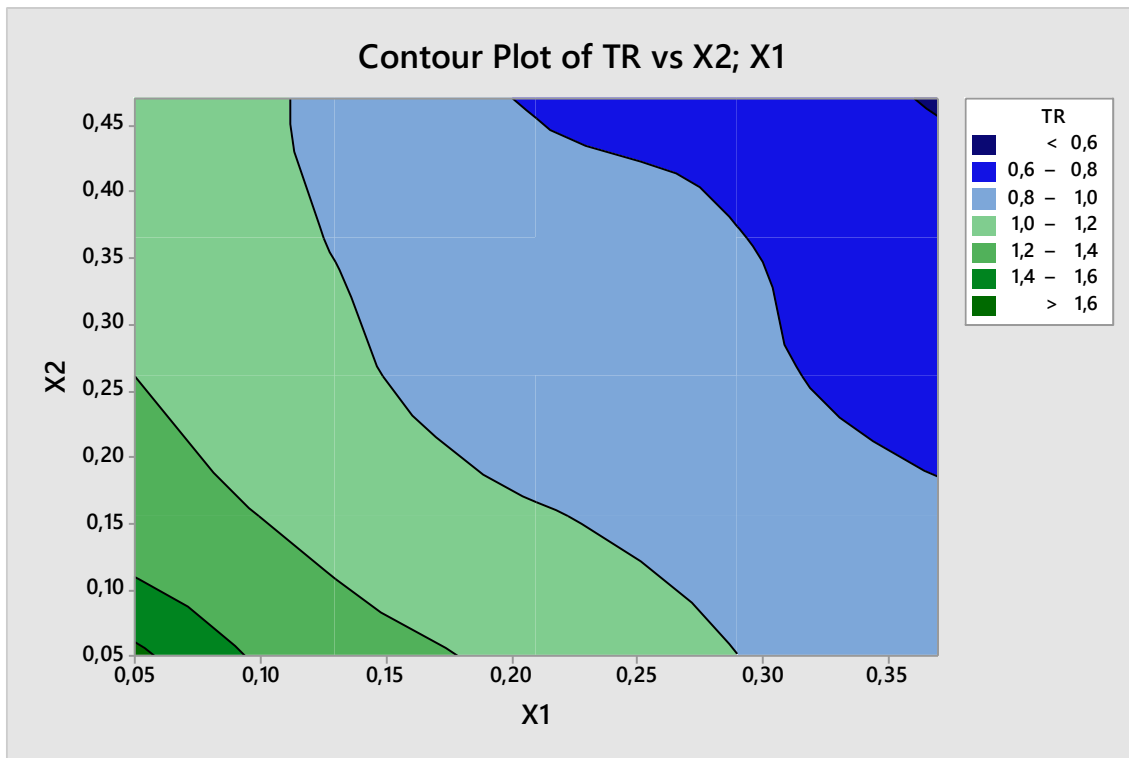


Figura 196. Superficie de respuesta a 250 Hz

Tabla 290. Pares de puntos a 250 Hz

X1	0,15	0,12	0,14	0,26
X2	0,20	0,46	0,34	0,10

Tabla 291. ternas de datos a 500 Hz

500Hz			
	X1	X2	TR
	0,03	0,05	1,63
	0,05	0,2	1,37
	0,03	0,35	1,22
	0,2	0,05	1,27
	0,03	0,2	1,08
	0,35	0,35	0,96
	0,08	0,05	1,01
	0,05	0,2	0,85
	0,08	0,35	0,75

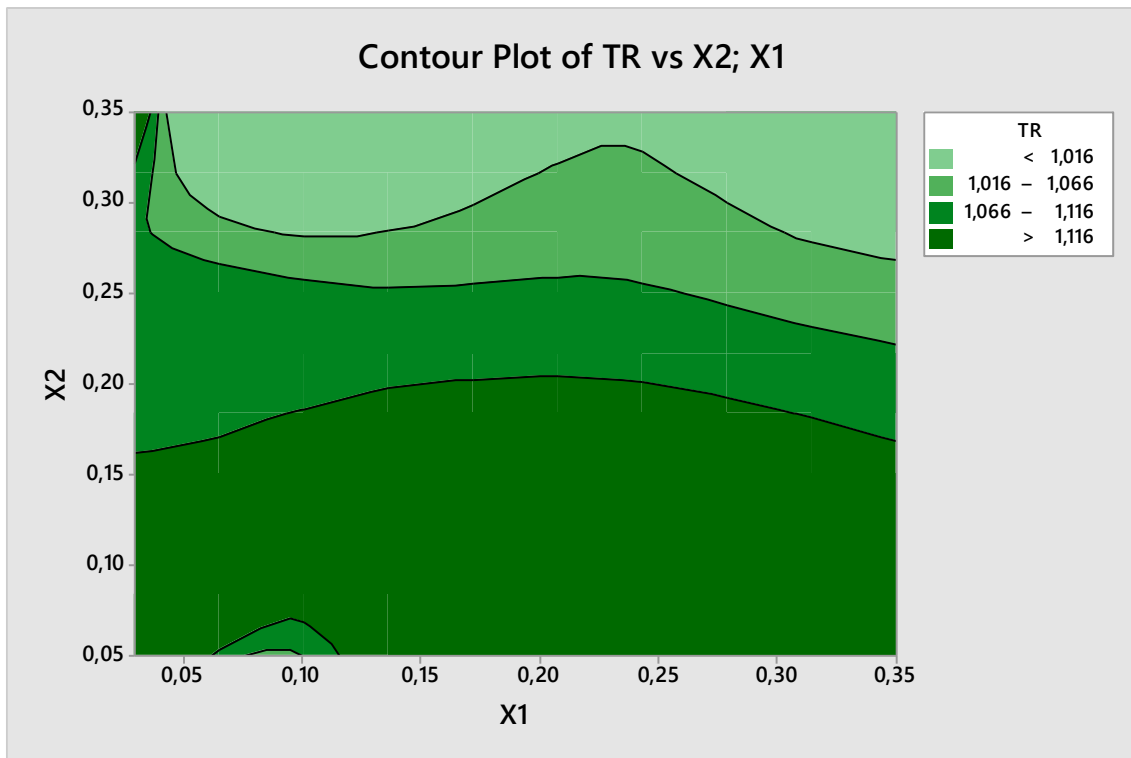


Figura 197 . Superficie de respuesta a 500 Hz

Tabla 292. Pares de puntos a 500 Hz

X1	0,10	0,35	0,35	0,23	0,04
X2	0,20	0,26	0,26	0,32	0,35

Tabla 293. Ternas de datos a 1000 Hz

1000Hz			
	X1	X2	TR
	0,03	0,05	1,55
	0,03	0,1	1,31
	0,03	0,15	1,22
	0,08	0,05	1,43
	0,08	0,1	1,22
	0,08	0,15	1,11
	0,13	0,05	1,33
	0,13	0,1	1,13
	0,13	0,15	1,01

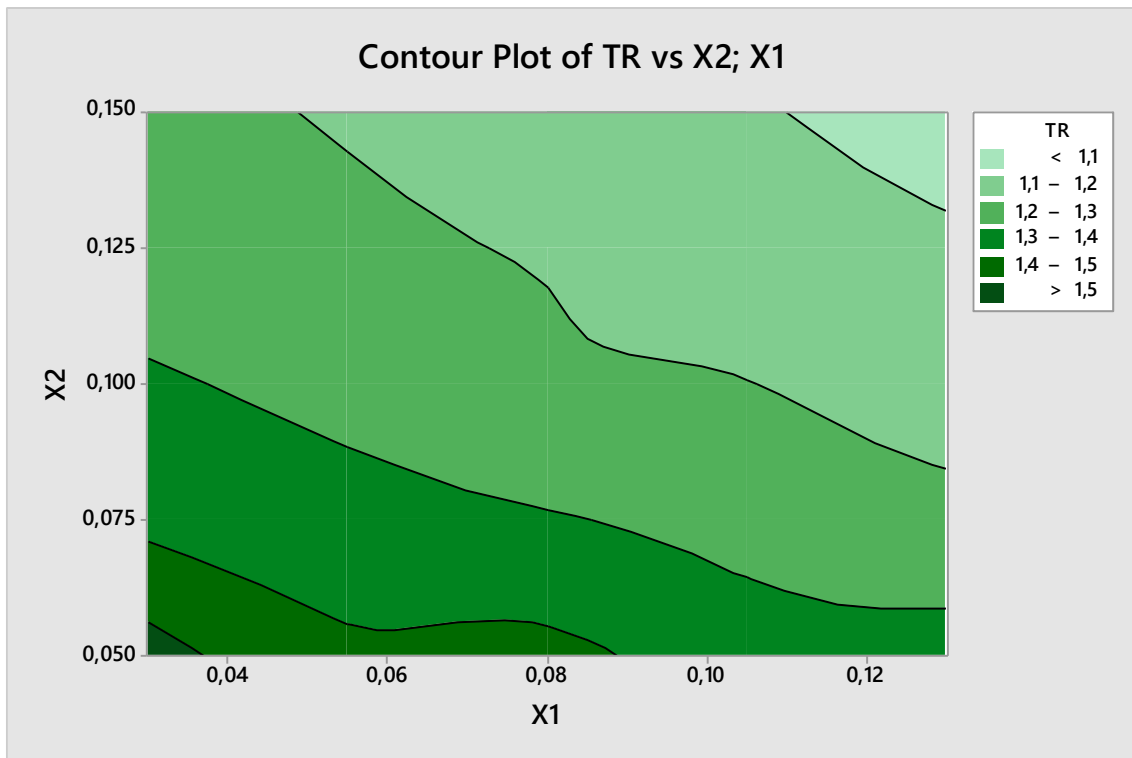


Figura 198. Superficie de respuesta a 1000 Hz

Tabla 294. Pares de puntos a 1000 Hz

X1	0,05	0,05	0,10	0,13
X2	0,10	0,15	0,11	0,08

Tabla 295. Ternas de datos a 2000 Hz

2000Hz			
	X1	X2	TR
	0,03	0,03	1,48
	0,03	0,06	1,27
	0,03	0,09	1,2
	0,08	0,03	1,41
	0,08	0,06	1,22
	0,08	0,09	1,14
	0,13	0,03	1,34
	0,13	0,06	1,17
	0,13	0,09	1,08

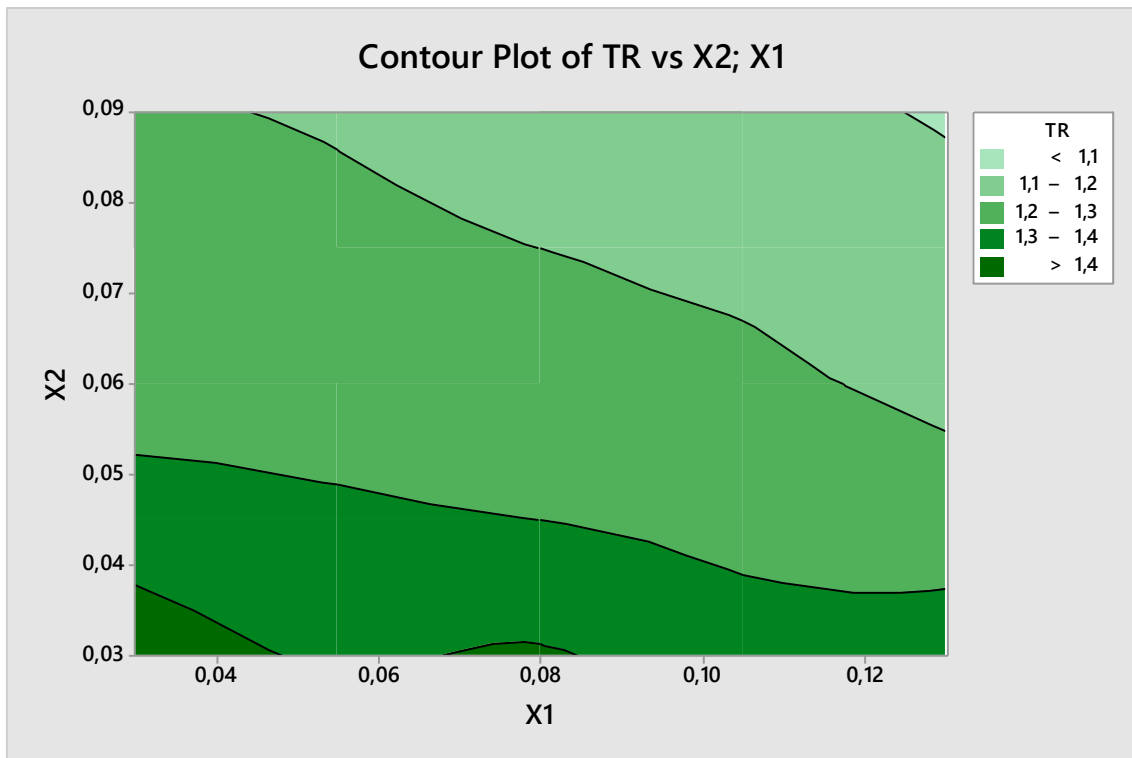


Figura 199. Superficie de respuesta a 2000 Hz

Tabla 296. Pares de puntos a 2000 Hz

X1	0,08	0,03	0,05	0,11
X2	0,06	0,09	0,07	0,05

Tabla 297. Ternas de datos a 4000 Hz

4000Hz			
	X1	X2	TR
	0,03	0,03	1,17
	0,03	0,06	1,08
	0,03	0,09	1,03
	0,08	0,03	1,12
	0,08	0,06	1,04
	0,08	0,09	0,98
	0,13	0,03	1,07
	0,13	0,06	0,98
	0,13	0,09	0,93

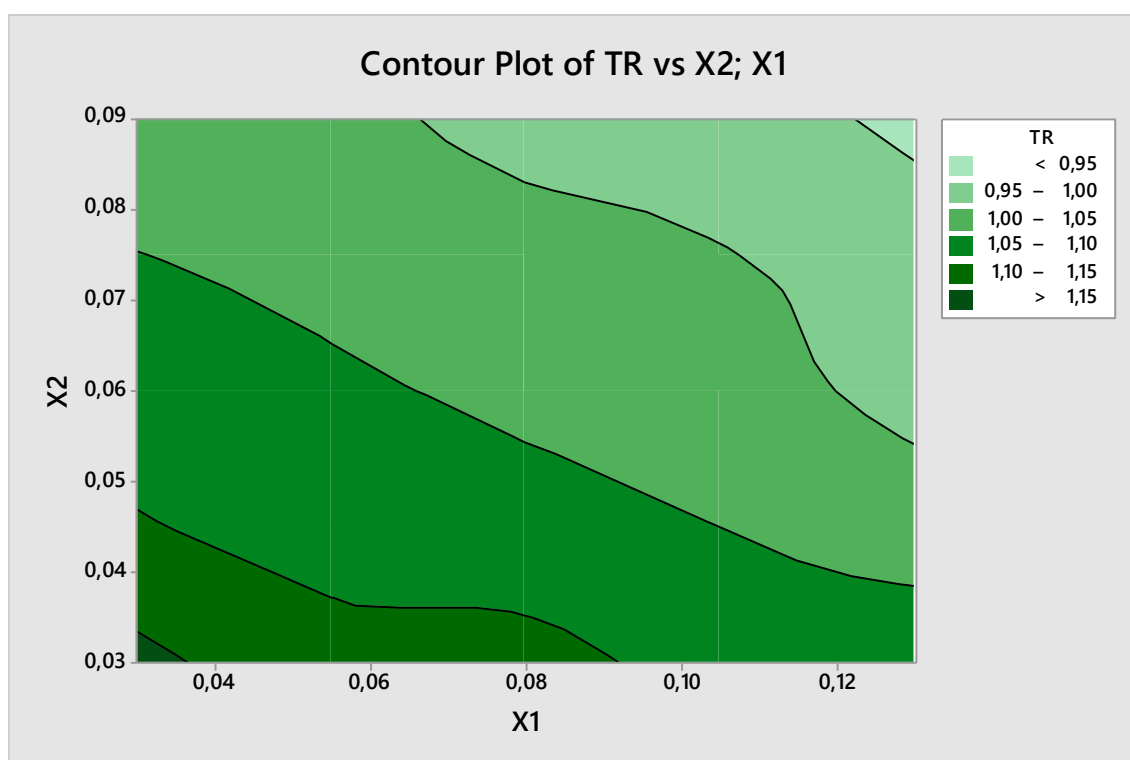


Figura 200. Superficie de respuesta a 4000 Hz

Tabla 298. Pares de puntos a 4000 Hz

X1	0,08	0,11	0,06	0,11
X2	0,06	0,09	0,05	0,08

4.6.3.2.2.1 Combinaciones

En la Tabla 299 se muestran los conjuntos de pares obtenidos.

En principio habría que descartar aquellos pares que se encuentren en los límites de la región estudiada. En este caso, dado que los pares se han obtenido de forma visual evitando los límites de la región, no es necesarios descartar ningún par por esa razón.

Tabla 299. Pares de puntos obtenidos para el cálculo

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
X1	0,30	0,15	0,10	0,05	0,08	0,08
X2	0,20	0,20	0,20	0,10	0,06	0,06
X1	0,35	0,13	0,23	0,04	0,06	0,07
X2	0,22	0,25	0,20	0,13	0,065	0,07

Se seleccionan los pares que mejor se ajustan a los valores esperados de cada uno de ellos.

Probamos los nuevos pares en el modelo virtual.

Combinación 1.

En la Tabla 300 se presentan los espectros de absorción de las superficies X1 y X2 empleadas en la simulación.

Tabla 300. Combinación de espectros de absorción de las superficies estudiadas

puntos	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
X1	0,30	0,15	0,10	0,05	0,08	0,08
X2	0,20	0,20	0,20	0,10	0,06	0,06

La combinación anterior da como resultado el tiempo de reverberación que se muestra en la Tabla 301 y en la Figura 201.

Tabla 301. TR₃₀ obtenido

TR ₃₀	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
tr1	1,08	1,04	1,10	1,25	1,24	1,03

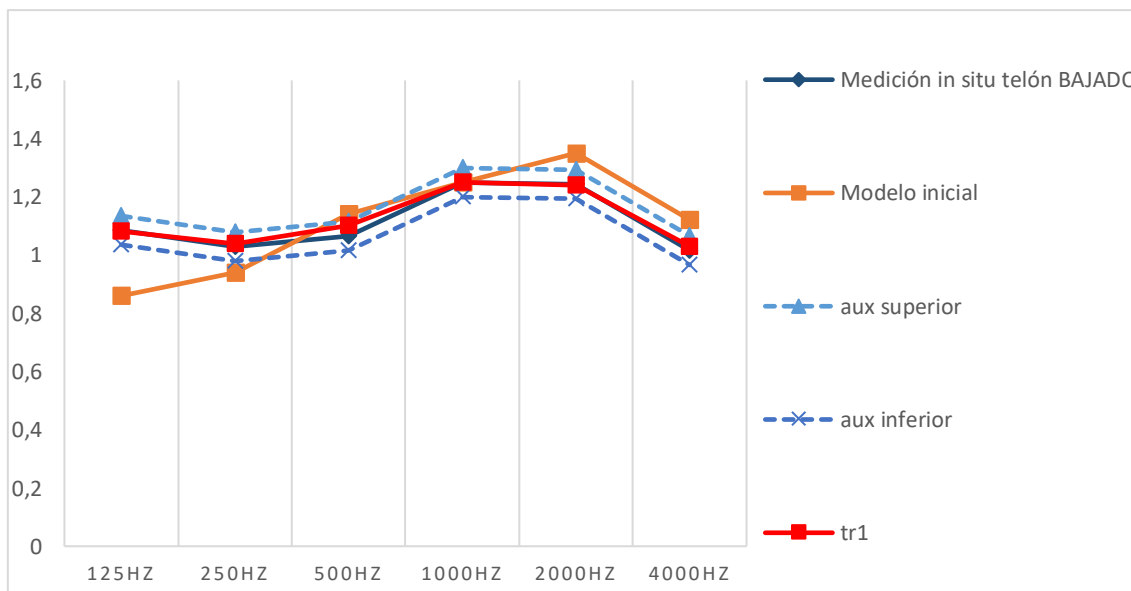


Figura 201. Representación gráfica del TR₃₀ medido "in situ" con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables, la modelización inicial, y la modelización de la combinación 1

En la Figura 201 se observan los valores del TR₃₀ de la medición real con un margen superior e inferior de 0,05 segundos, del modelo inicial y del modelo tras la aplicación del RSM. Los valores de la modelización que se encuentren dentro de estos márgenes se consideran aceptables.

El espectro de absorción tr1 se encuentra dentro de los márgenes establecidos como aceptables, por lo que se admite la combinación 1. Los cambios del espectro de absorción del material X1 (panel fenólico) y X2 (techo de la sala), se muestran en la Figura 202 y Figura 203 en la respectivamente.

Los espectros de absorción 10 y 11 se corresponden con los datos de la bibliografía de los laterales fenólicos y del techo de la sala, respectivamente. X1 y X2, representan los ajustes realizados a cada uno de ellos tras la aplicación del RSM.

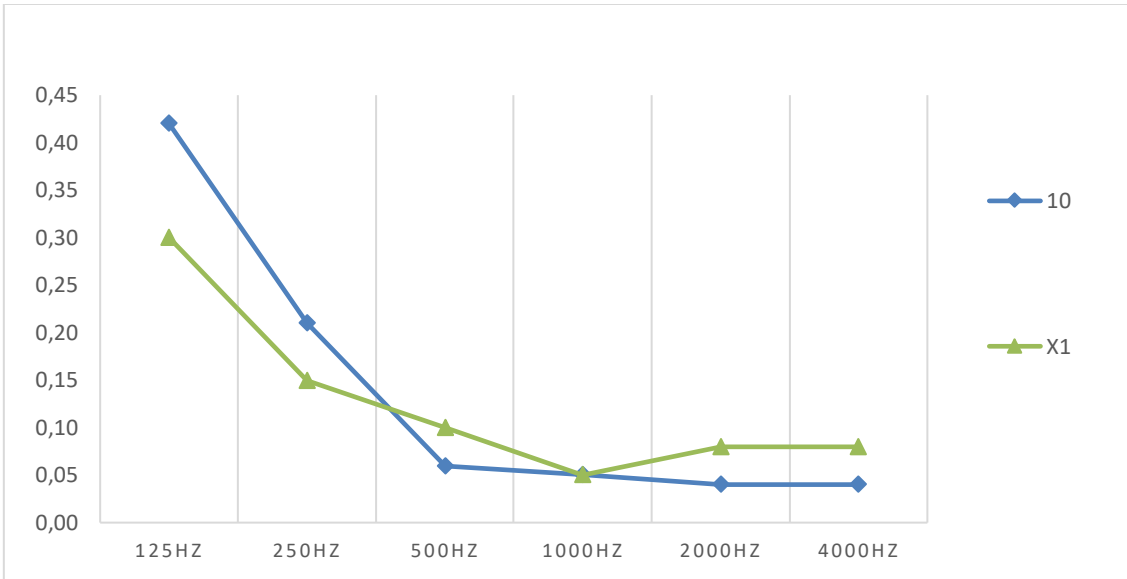


Figura 202. Espectro de absorción del panel fenólico (bibliografía - azul- y tras aplicación RSM - verde-)

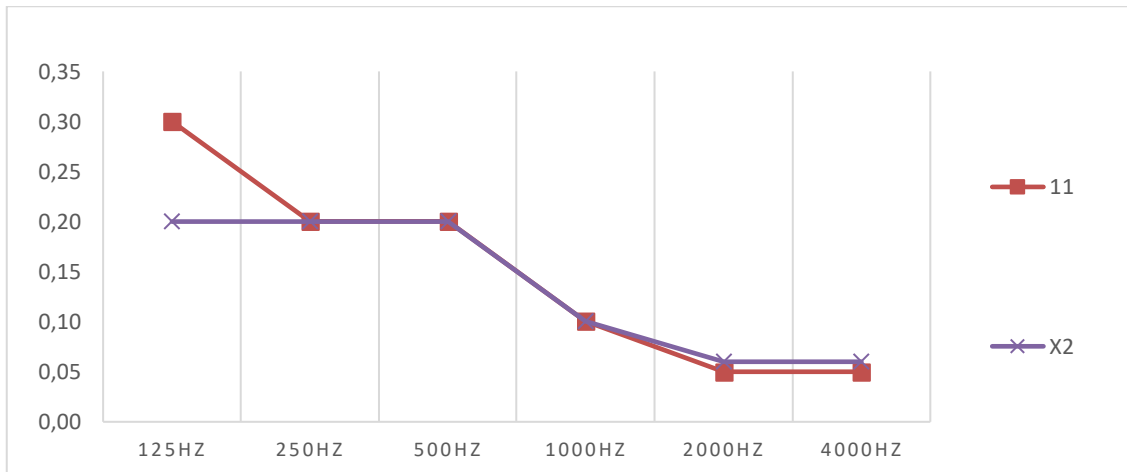


Figura 203. Espectro de absorción del techo de la sala (bibliografía-rojo- y aplicación RSM- morado-).

Se aceptan los nuevos valores de los materiales de la sala, en la Tabla 302 se muestran los coeficientes de absorción de las superficies tras el ajuste realizado con el telón bajado.

Tabla 302. Coeficientes de absorción de las superficies tras aplicación del RSM con telón bajado

Zona	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Techo sala	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
Laterales volumen sobre lamas	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
Techo fondo y Fondo inferior ranurado	0,03	0,40	0,79	0,91	0,76	0,70
Pavimento	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05
Butacas	0,49	0,66	0,80	0,88	0,82	0,70
Fondo inferior perforado	0,33	1,00	0,96	0,77	0,71	0,59
Boca	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
Pavimento frente escenario	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Cabina	0,180	0,060	0,040	0,030	0,020	0,018
Frente escenario, laterales, fondo, antepecho, caja escena	0,30	0,15	0,10	0,05	0,08	0,08
Lamas	0,20	0,20	0,20	0,10	0,06	0,06

4.6.3.3 Aplicación del RSM con telón subido

Evaluada la sala con la boca de escena cerrada (telón bajado) se procede a estudiar la sala con la boca de escena abierta (telón subido).

En el modelo virtual de la sala, se sustituye la cortina de la boca de escena, por una superficie nueva, la abertura de escenario, que será nuestra incógnita. Se asignan los coeficientes hallados en el proceso anterior a las superficies realizadas con material fenólico y a los reflectores del techo.

Las coordenadas de la fuente y de los receptores, son las mismas. Cambia la numeración de los puntos de medición in situ, pero dado que el dibujo base de ODEON con el que vamos a trabajar es el mismo y ya tiene localizados los puntos de la fuente y de los

receptores, en la Tabla 303 simplemente se han renombrado los puntos de medición para que concuerden con el modelo que se ha empleado.

Tabla 303. Denominación de los receptores en la medición real, en el modelo virtual y sus coordenadas

Bajado	Subido	X	Y	Z
	Fuente	7,8	1,17	2,2
PTO_30	PTO_1	11,21	-5,15	1,18
PTO_29	PTO_2	10,23	1,04	1,12
PTO_28	PTO_3	11,53	6,92	1,2
PTO_27	PTO_4	14,10	-5,15	1,36
PTO_26	PTO_5	14,42	0,89	1,38
PTO_25	PTO_6	13,10	6,92	1,30
PTO_24	PTO_7	15,94	-5,15	1,48
PTO_23	PTO_8	16,43	1,01	1,51
PTO_22	PTO_9	16,84	6,92	1,53
PTO_21	PTO_10	17,90	-5,15	1,80
PTO_20	PTO_11	18,85	1,19	2,02
PTO_19	PTO_12	18,83	6,92	2,02
PTO_18	PTO_13	22,75	-5,15	2,96
PTO_17	PTO_14	21,82	1,01	2,72
PTO_16	PTO_15	21,72	6,92	2,72

Se toma como coeficiente de absorción inicial de la boca de escena el propuesto por Arau, Tabla 304.

Tabla 304. Coeficiente de absorción de la boca de escena.

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Boca de escena	0,30	0,40	0,50	0,60	0,60	0,50

En la Tabla 305 se muestran los coeficientes de absorción empleados en la modelización inicial con boca de escena abierta, reordenados.

Tabla 305. Coeficientes de absorción de las soluciones constructivas empleadas en la simulación

Zona	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	Nº SUP
Techo sala	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07	1
Laterales volumen sobre lamas	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07	2
Techo fondo y Fondo inferior ranurado	0,03	0,40	0,79	0,91	0,76	0,70	3
Pavimento	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	4
Butacas	0,49	0,66	0,80	0,88	0,82	0,70	5
Fondo inferior perforado	0,33	1,00	0,96	0,77	0,71	0,59	6
Pavimento frente escenario	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10	7
Cabina	0,180	0,060	0,040	0,030	0,020	0,018	8
Frente escenario, laterales, fondo. Antepecho, caja escena	0,30	0,15	0,10	0,05	0,08	0,08	9
Lamas	0,20	0,20	0,20	0,10	0,06	0,06	10
Boca	0,300	0,400	0,500	0,600	0,600	0,500	11

Se introducen los materiales de la Tabla 305 en el modelo virtual y se calcula el modelo. Se obtiene el tiempo de reverberación TR₃₀ medio. El TR₃₀ obtenido se compara con el de la medición realizada “in situ”, tal y como se ve en la Tabla 306 y en la Figura 204.

Tabla 306. Comparativa TR₃₀ medición real y modelo virtual

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Medición in situ	1,213	1,127	1,126	1,227	1,247	1,008
Modelización BBAA	1,07	1,03	1,06	1,26	1,24	1,04



Figura 204. Comparativa TR₃₀, medición "in situ" con telón subido y modelización inicial con boca de escena abierta

En la Figura 204 se representa el tiempo de reverberación medio, TR₃₀, medido "in situ" de la sala con telón subido, los márgenes superior e inferior y el resultado del TR₃₀ de la modelización inicial. En frecuencias altas y medias los valores del tiempo de reverberación del modelo se encuentran dentro o muy cerca de los límites aceptables, mientras que en frecuencias bajas existe un exceso de absorción en el modelo.

Es necesario ajustar el modelo virtual a la medición real con telón subido.

4.6.3.3.1 Ajuste mediante método de superficies de respuesta

Se eligen como superficies incógnita las lamas del techo y la apertura de escenario.

Se define la región de estudio en la aplicación del RSM.

$$X_{1i} = B_{1i} \pm R_{1i}$$

Siendo:

B_{1i} los valores tomados de la bibliografía y

R_{1i} , incrementos que oscilan entre 0 y 0,5

De forma análoga se realiza para X_{2i}

En la Tabla 307 se presentan los coeficientes de absorción de las superficies empleados en la simulación y las regiones de estudio.

Tabla 307. Coeficientes de absorción empleados en la simulación

Nº SUP		125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
1		0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
2		0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
3		0,03	0,40	0,79	0,91	0,76	0,70
4		0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05
5		0,49	0,66	0,80	0,88	0,82	0,70
6		0,33	1,00	0,96	0,77	0,71	0,59
7		0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
8		0,180	0,060	0,040	0,030	0,020	0,018
9		0,30	0,15	0,10	0,05	0,08	0,08
Techo lamas	10	X1₁₂₅	X1₂₅₀	X1₅₀₀	X1₁₀₀₀	X1₂₀₀₀	X1₄₀₀₀
Boca de escena	11	X2₁₂₅	X2₂₅₀	X2₅₀₀	X2₁₀₀₀	X2₂₀₀₀	X2₄₀₀₀

4.6.3.3.2 Ajuste 1

Se especifican los valores de las dos regiones de estudio, se toman los valores de la bibliografía y se asignan unos incrementos a cada una de ellas.

En la Tabla 308 y en la Tabla 309, se observan los valores asignados a las regiones de estudio X1 y X2, respectivamente.

Tabla 308. Región de estudio de la superficie X1

X1	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
B1i-R1i	0,10	0,10	0,10	0,05	0,04	0,04
B1i	0,20	0,20	0,20	0,10	0,06	0,06
B1i+R1i	0,30	0,30	0,30	0,15	0,08	0,08
INCREMENTOS R1	0,10	0,10	0,10	0,05	0,02	0,02

Tabla 309. Región de estudio de la superficie X2

X2	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
B2i-R2i	0,10	0,20	0,40	0,50	0,50	0,40
B2i	0,30	0,40	0,50	0,60	0,60	0,50
B2i+R2i	0,50	0,60	0,60	0,70	0,70	0,60
INCREMENTOS R2	0,20	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10

Se obtienen los siguientes pares de espectros de absorción (Tabla 310).

Tabla 310. Combinaciones de pares de espectros de absorción de las regiones X1 y X2.

combinación	puntos	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	
1	B1i-R1i	0,10	0,10	0,10	0,05	0,04	0,04	X11
	B2i-R2i	0,10	0,20	0,40	0,50	0,50	0,40	X21
2	B1i-R1i	0,10	0,10	0,10	0,05	0,04	0,04	X11
	B2i	0,30	0,40	0,50	0,60	0,60	0,50	X22
3	B1i-R1i	0,10	0,10	0,10	0,05	0,04	0,04	X11
	B2i+R2i	0,50	0,60	0,60	0,70	0,70	0,60	X23
4	B1i	0,20	0,20	0,20	0,10	0,06	0,06	X12
	B2i-R2i	0,10	0,20	0,40	0,50	0,50	0,40	X21
5	B1i	0,20	0,20	0,20	0,10	0,06	0,06	X12
	B2i	0,30	0,40	0,50	0,60	0,60	0,50	X22
6	B1i	0,20	0,20	0,20	0,10	0,06	0,06	X12
	B2i+R2i	0,50	0,60	0,60	0,70	0,70	0,60	X23
7	B1i+R1i	0,30	0,30	0,30	0,15	0,08	0,08	X13
	B2i-R2i	0,10	0,20	0,40	0,50	0,50	0,40	X21
8	B1i+R1i	0,30	0,30	0,30	0,15	0,08	0,08	X13
	B2i	0,30	0,40	0,50	0,60	0,60	0,50	X22
9	B1i+R1i	0,30	0,30	0,30	0,15	0,08	0,08	X13
	B2i+R2i	0,50	0,60	0,60	0,70	0,70	0,60	X23

Estas combinaciones se introducen en ODEON para obtener los tiempos de reverberación para cada una de ellas. El resultado se puede ver en la Tabla 311.

Tabla 311. TR₃₀ obtenidos de las combinaciones definidas anteriormente.

TR ₃₀	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
tr1	1,31	1,22	1,24	1,46	1,32	1,08
tr2	1,27	1,19	1,22	1,45	1,31	1,07
tr3	1,23	1,17	1,23	1,44	1,31	1,07
tr4	1,09	1,06	1,11	1,26	1,25	1,04
tr5	1,06	1,03	1,10	1,26	1,24	1,04
tr6	1,03	1,01	1,10	1,25	1,24	1,03
tr7	0,99	0,99	1,06	1,18	1,20	1,02
tr8	0,95	0,95	1,05	1,18	1,19	1,01
tr9	0,92	0,94	1,06	1,19	1,20	0,99

En la Figura 205 se observa que tras la aplicación del RSM, el “target” se encuentra dentro de los espectros del TR₃₀ de las distintas combinaciones.

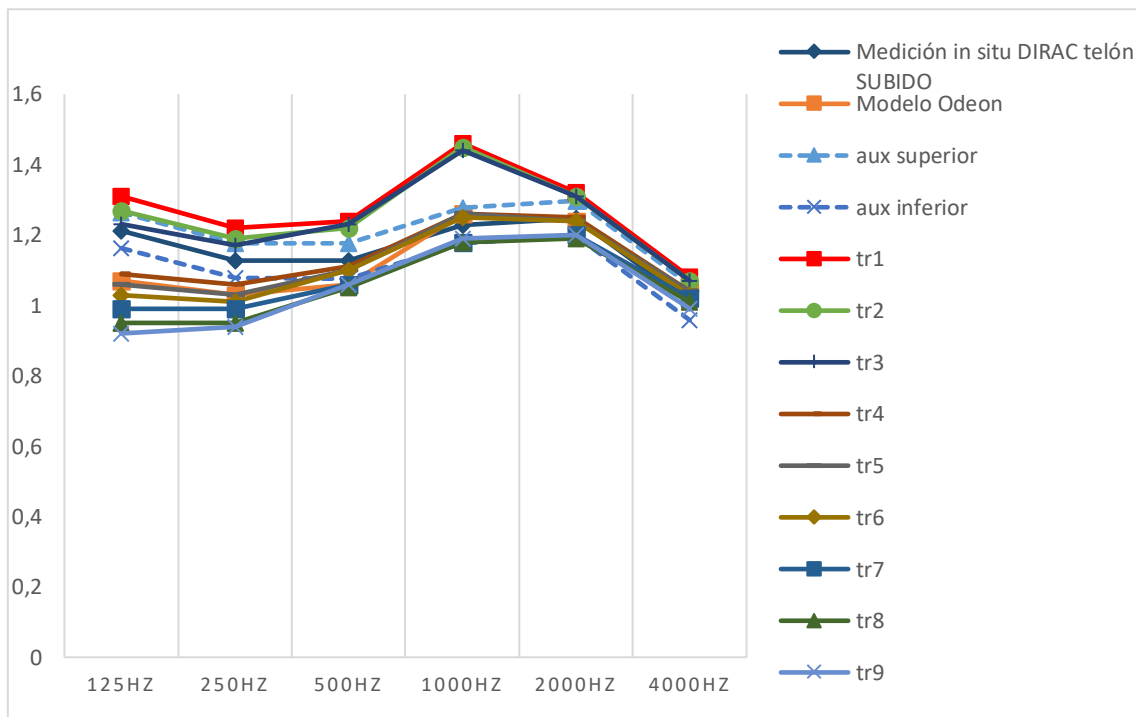


Figura 205. Comparativa TR₃₀. Medición “in situ”, modelización y resultados tras aplicación del RSM

Para obtener las superficies de respuesta, se agrupan los datos por frecuencia, formando nueve combinaciones de ternas de puntos por frecuencia. A partir de dichas superficies se obtienen nuevos pares de puntos que satisfacen el “target”.

Ternas de datos por frecuencia y representación mediante superficie de respuesta:

Tabla 312. Ternas de datos a 125 Hz

125HZ			
	X1	X2	TR
	0,10	0,10	1,31
	0,10	0,30	1,27
	0,10	0,50	1,23
	0,20	0,10	1,09
	0,20	0,30	1,06
	0,20	0,50	1,03
	0,30	0,10	0,99
	0,30	0,30	0,95
	0,30	0,50	0,92

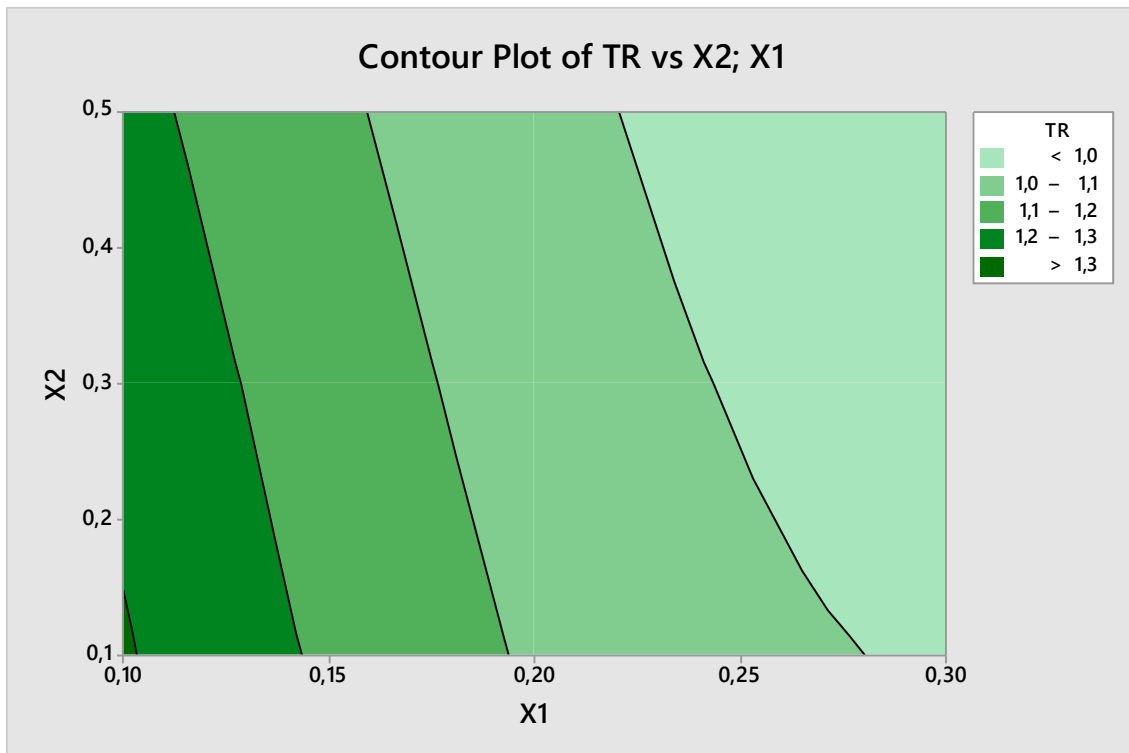


Figura 206. Superficie de respuesta a 125 Hz.

Tabla 313. Pares de puntos a 125Hz

X1	0.15	0.10	0.12
X2	0.10	0.10	0.30

Tabla 314. Ternas de datos a 250 Hz

250HZ			
	X1	X2	TR
	0,10	0,20	1,22
	0,10	0,40	1,19
	0,10	0,60	1,17
	0,20	0,20	1,06
	0,20	0,40	1,03
	0,20	0,60	1,01
	0,30	0,20	0,99
	0,30	0,40	0,95
	0,30	0,60	0,94

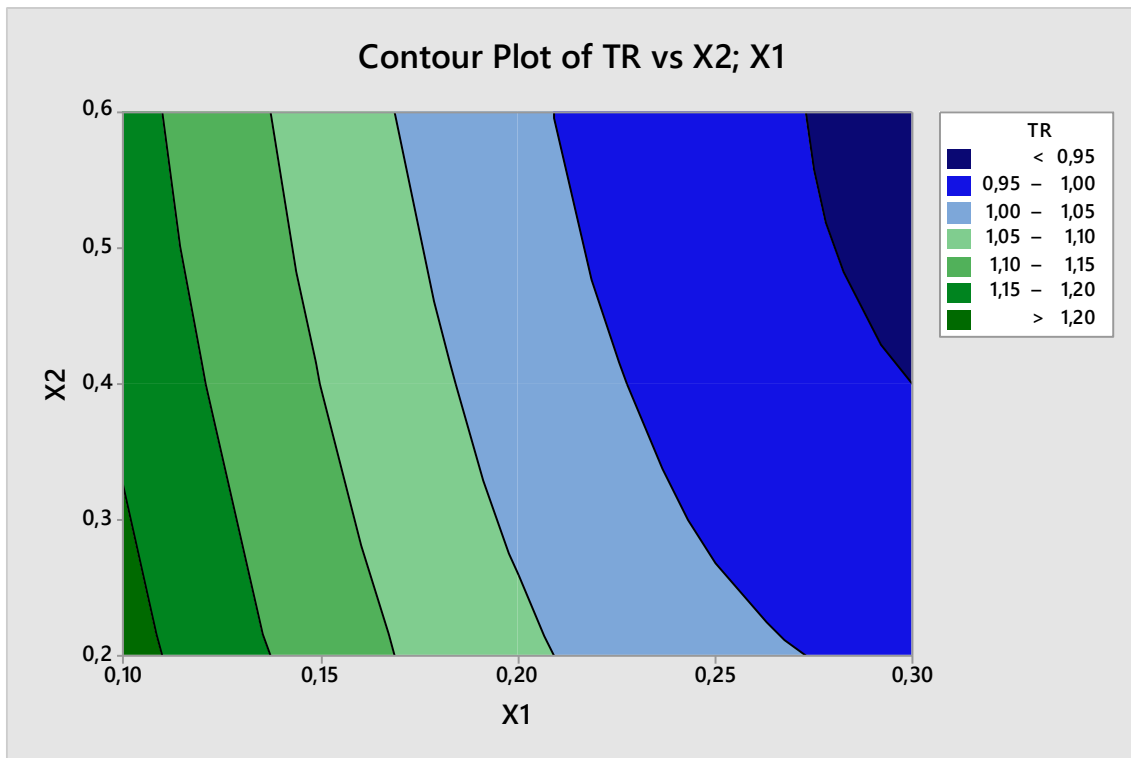


Figura 207. Superficie de respuesta a 250 Hz

Tabla 315. Pares de puntos a 250 HZ

X1	0.15	0.12
X2	0.20	0.30

Tabla 316. ternas de datos a 500 Hz

500HZ			
	X1	X2	TR
	0,10	0,40	1,24
	0,40	0,50	1,22
	0,10	0,60	1,23
	0,50	0,40	1,11
	0,10	0,50	1,10
	0,60	0,60	1,10
	0,20	0,40	1,06
	0,40	0,50	1,05
	0,20	0,60	1,06

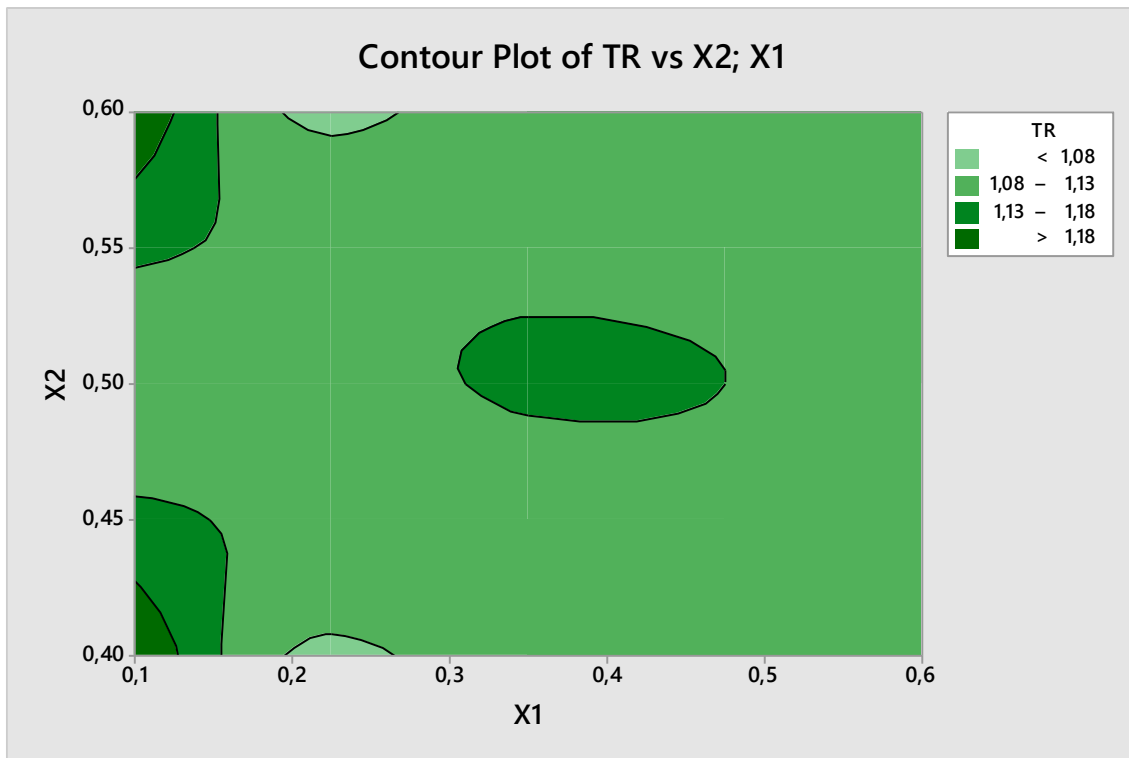


Figura 208. Superficie de respuesta a 500 Hz

Tabla 317. Pares de puntos a 500 Hz

X1	0.16	0.16	0.40
X2	0.40	0.57	0.50

Tabla 318. Ternas de datos a 1000 Hz

1000HZ			
	X1	X2	TR
	0,05	0,50	1,46
	0,05	0,60	1,45
	0,05	0,70	1,44
	0,10	0,50	1,26
	0,10	0,60	1,26
	0,10	0,70	1,25
	0,15	0,50	1,18
	0,15	0,60	1,18
	0,15	0,70	1,19

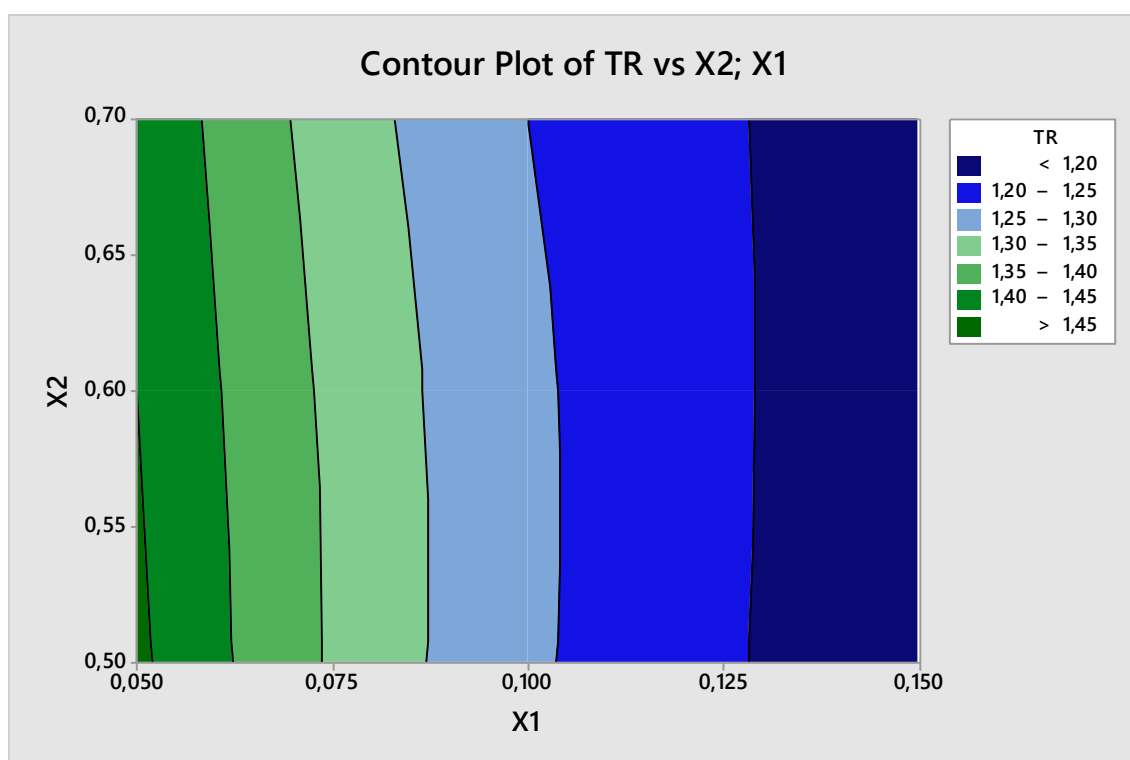


Figura 209. Superficie de respuesta a 1000 Hz

Tabla 319. Pares de puntos a 1000 Hz

X1	0.10	0.14
X2	0.60	0.50

Tabla 320. Ternas de datos a 2000 Hz

2000HZ			
	X1	X2	TR
	0,04	0,50	1,32
	0,04	0,60	1,31
	0,04	0,70	1,31
	0,06	0,50	1,25
	0,06	0,60	1,24
	0,06	0,70	1,24
	0,08	0,50	1,20
	0,08	0,60	1,19
	0,08	0,70	1,20

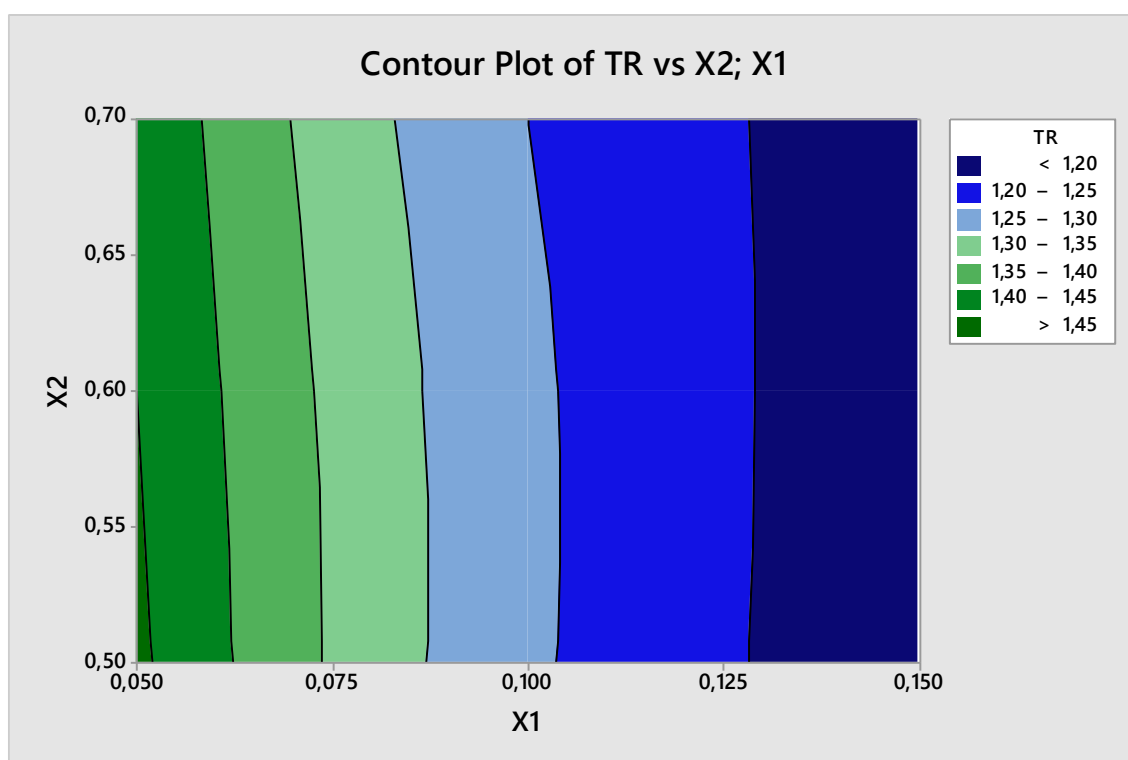


Figura 210. Superficie de respuesta a 2000 Hz

Tabla 321. Pares de puntos a 2000 Hz

X1	0.06	0.065
X2	0.60	0.50

Tabla 322. Ternas de datos a 4000 Hz

4000HZ			
	X1	X2	TR
	0,04	0,40	1,08
	0,04	0,50	1,07
	0,04	0,60	1,07
	0,06	0,40	1,04
	0,06	0,50	1,04
	0,06	0,60	1,03
	0,08	0,40	1,02
	0,08	0,50	1,01
	0,08	0,60	0,99

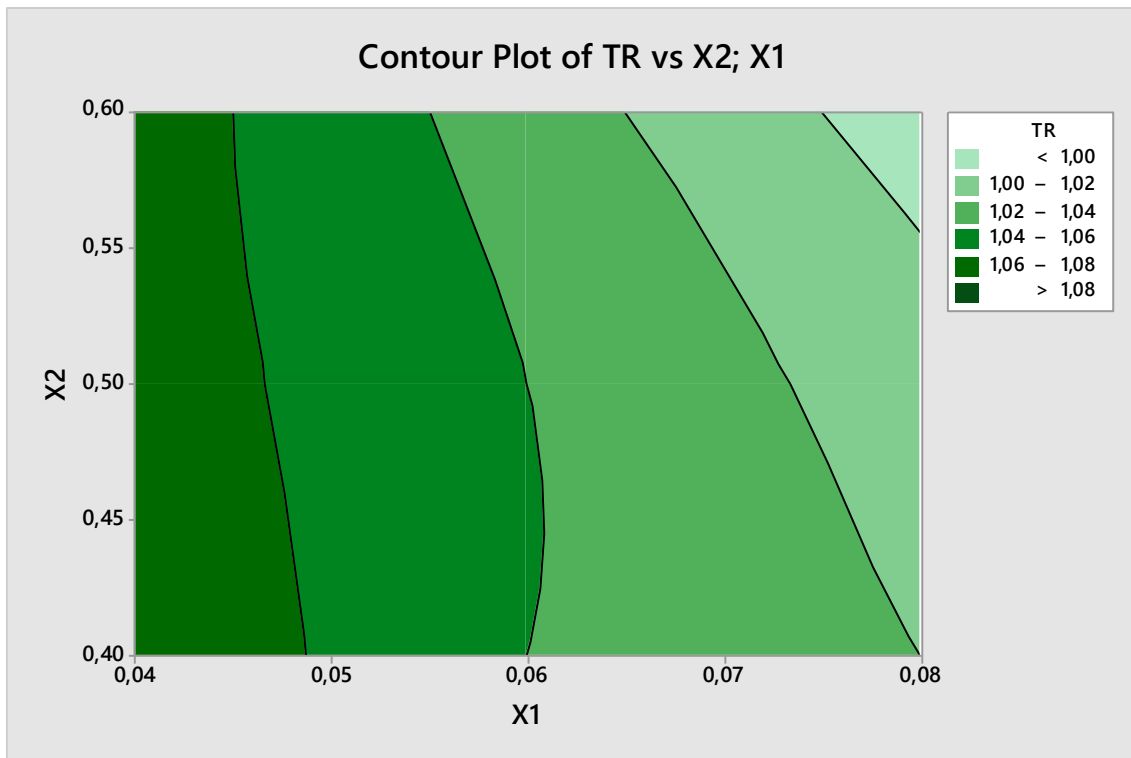


Figura 211. Superficie de respuesta a 4000 Hz

Tabla 323. Pares de puntos a 4000 Hz

X1	0.06	0.08	0.07
X2	0.50	0.55	0.45

4.6.3.3.2.1 Combinaciones

En la Tabla 324 se muestran los conjuntos de pares obtenidos.

Como se ha explicado previamente habría que descartar aquellos pares que se encuentren en los límites de la región estudiada, pero como en este caso los pares se han obtenido de forma visual evitando los límites de la región, no es necesario descartar ningún par por esa razón.

Tabla 324. Pares de puntos obtenidos para el cálculo

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
X1	0,15	0,15	0,16	0,10	0,06	0,06
X2	0,10	0,20	0,40	0,60	0,60	0,50
X1	0,12	0,12	0,16	0,14	0,55	0,08
X2	0,10	0,20	0,57	0,55	0,60	0,55

Se seleccionan los pares que más se ajustan a los valores esperados de cada uno de ellos, y se prueban en el modelo virtual.

Combinación 1.

En la Tabla 325 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran los espectros de absorción de las superficies X1 y X2 empleadas en la simulación.

Tabla 325. Combinación de espectros de absorción de las superficies estudiadas

puntos	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
X1	0,15	0,15	0,16	0,10	0,06	0,06
X2	0,10	0,20	0,40	0,60	0,60	0,50

La combinación anterior da como resultado el tiempo de reverberación que se muestra en la Tabla 326 y en la Figura 212.

Tabla 326. TR₃₀ obtenido

TR ₃₀	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
tr1	1,18	1,12	1,14	1,26	1,24	1,04

En la Figura 212 se observan los valores del TR₃₀ de la medición real con un margen superior e inferior de 0,05 segundos y del modelo tras la aplicación del RSM. El espectro de absorción tr1 se encuentra dentro de los márgenes establecidos como aceptables, por lo que se admite la combinación 1.

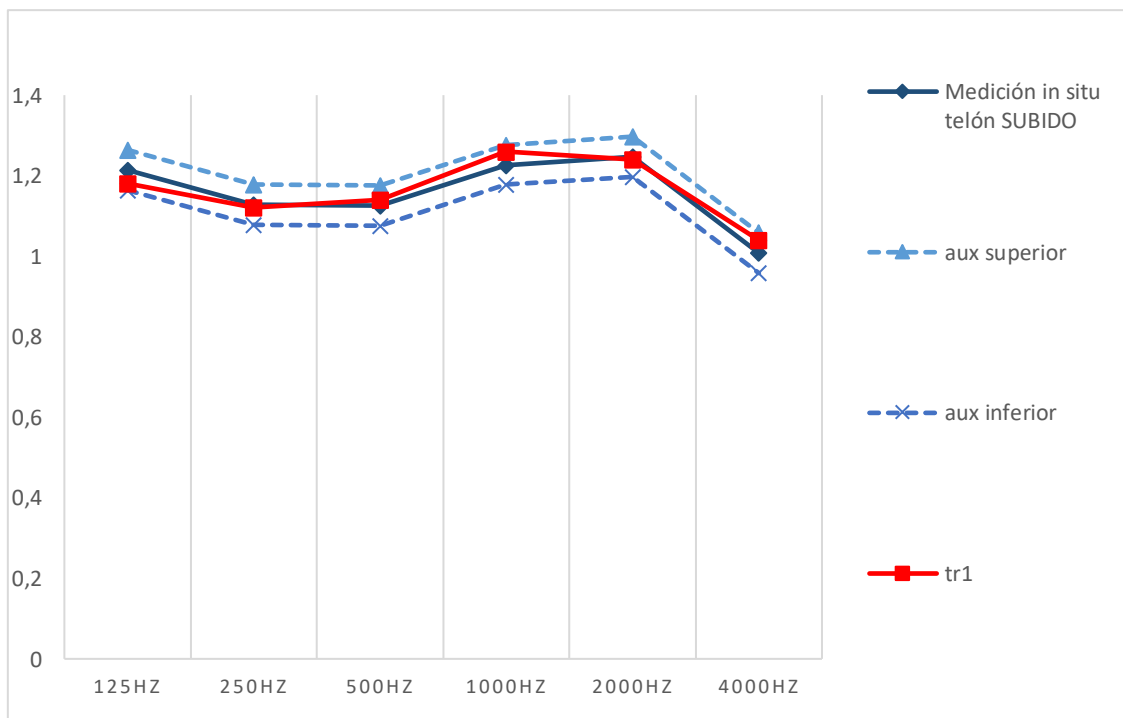


Figura 212. Representación gráfica del TR₃₀ medido "in situ" con telón bajado, los límites superior e inferior aceptables, la modelización inicial, y la modelización de la combinación 1

A continuación, se representa la variación del espectro de absorción de los materiales estudiados como incógnita respecto al valor del coeficiente de absorción inicial considerado, tomado de la bibliografía; y el valor finalmente empleado en la combinación ajustada.

En la Figura 213 se observa la variación del coeficiente de absorción de los paneles fenólicos

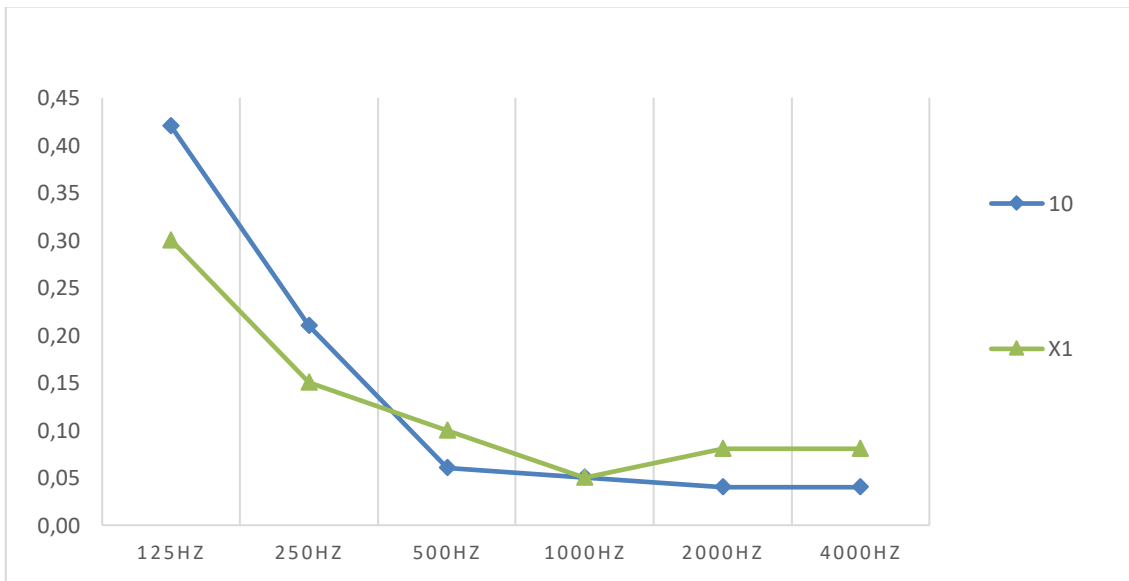


Figura 213. Espectro de absorción de los paneles fenólicos ajustados con telón bajado (bibliografía - azul- y tras aplicación RSM - verde-)

Las variaciones correspondientes al material X1 (reflectores del techo) y de X2 (boca de escena), se muestran en la Figura 214 y en la Figura 215, respectivamente.

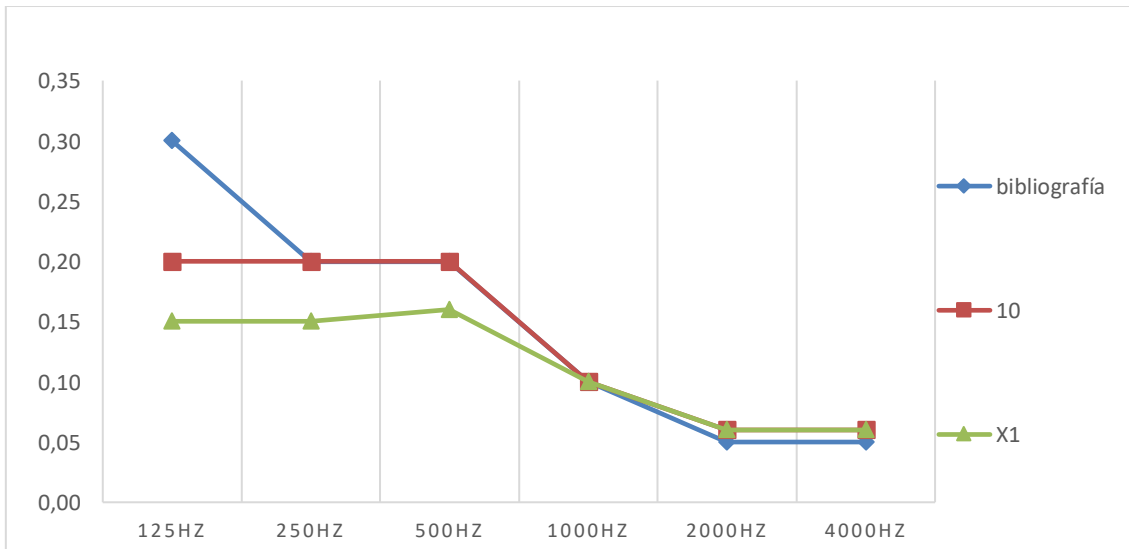


Figura 214. Espectro de absorción los reflectores del techo (bibliografía-rojo- y aplicación RSM- morado-).

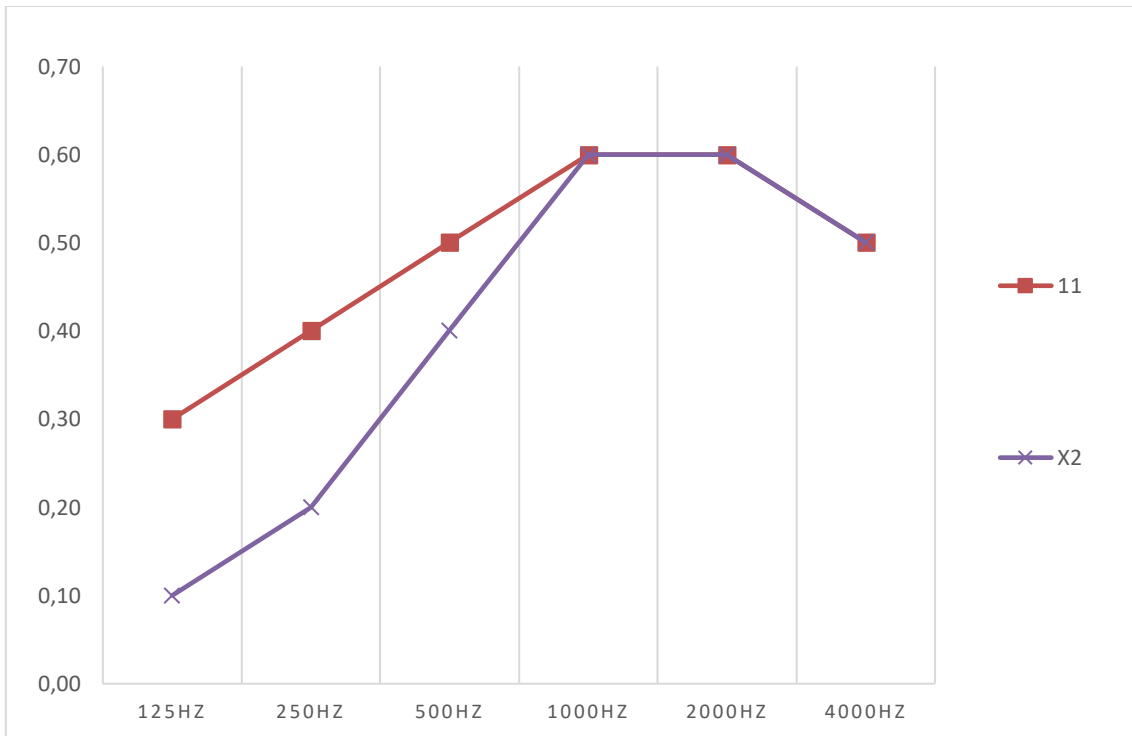


Figura 215. Espectro de absorción de la boca de escena (bibliografía - rojo- y tras aplicación RSM - morado-)

Los espectros de absorción 10 y 11 de la combinación 1, del ajuste con boca de escena abierta, se corresponden con los datos de la bibliografía de los reflectores del techo y de la boca de escena, respectivamente. X1 y X2, representan los ajustes realizados a cada uno de ellos tras la aplicación del RSM.

A continuación, se va a comprobar si el cambio que se ha realizado en las lamas del techo cumple con el telón bajado. El resultado se muestra en la Tabla 327 y en la Figura 216.

Tabla 327. TR_{30} del modelo con telón bajado tras ajuste con telón subido

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
TR_{30}	1,15	1,09	1,13	1,25	1,24	1,03

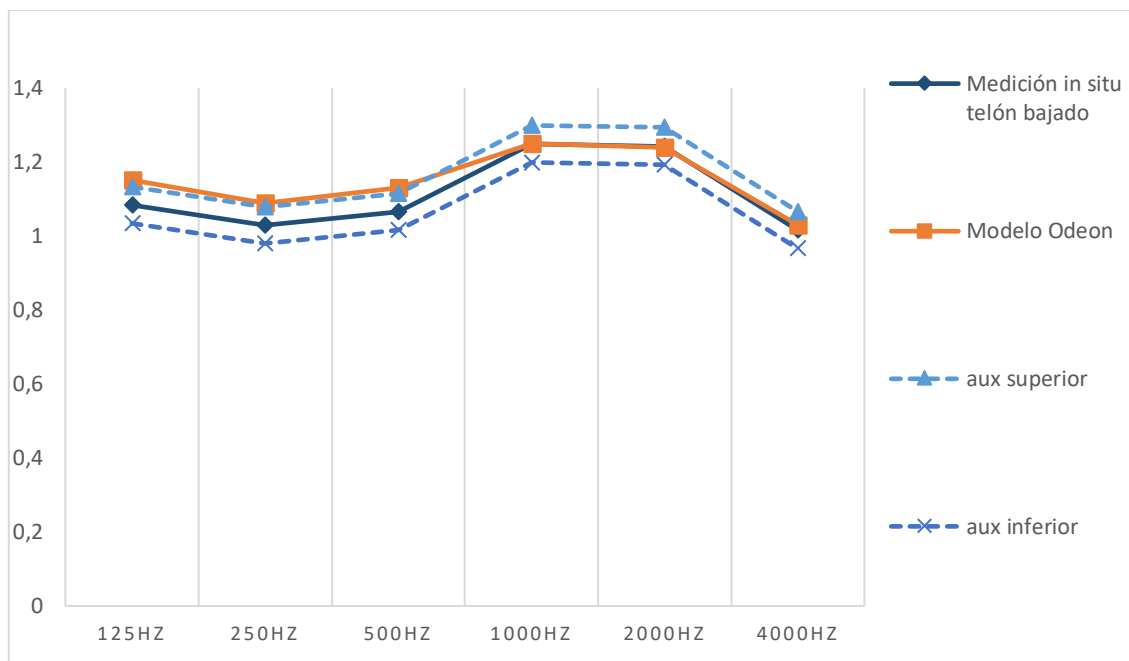


Figura 216. Comparativa TR₃₀ telón bajado, medición real con límites superior e inferior aceptables, resultado obtenido en modelo con telón bajado tras análisis con telón subido

La discrepancia en bajas frecuencias es despreciable por lo que se aceptan los cambios de absorción de los materiales.

En la Tabla 328 se muestran los coeficientes de absorción de las superficies tras aceptar los nuevos valores de los materiales de la sala.

Tabla 328. Coeficientes de absorción de las soluciones constructivas empleadas en el modelo tras ajuste con telón subido

Zona	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
Techo sala	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
Laterales volumen sobre lamas	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
Techo fondo y Fondo inferior ranurado	0,03	0,40	0,79	0,91	0,76	0,70
Pavimento	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05
Butacas	0,49	0,66	0,80	0,88	0,82	0,70
Fondo inferior perforado	0,33	1,00	0,96	0,77	0,71	0,59
Pavimento frente escenario	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Cabina	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Frente escenario, laterales, fondo superior e inferior, antepecho	0,30	0,15	0,08	0,05	0,08	0,08
Lamas	0,15	0,15	0,16	0,10	0,06	0,06
Boca	0,10	0,20	0,40	0,60	0,60	0,50

4.6.4 Resultados

El espectro de absorción de la boca de escena de la sala obtenido tras aplicación del RSM, en la Tabla 329.

Tabla 329. Coeficiente de absorción de la boca de escena del Auditorio Alfons Roig

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Tras análisis RSM	0,10	0,20	0,40	0,60	0,60	0,50

A continuación, se comparan el tiempo de reverberación del modelo ajustado con telón subido con el obtenido empleando los espectros de absorción para la boca de escena de diversas fuentes. El resultado se muestra en la Tabla 330 y en la Figura 217.

Tabla 330. TR₃₀ obtenido en el modelo ajustado con telón subido, y empleando los coeficientes de absorción de otros autores

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Medición in situ telón subido	1,213	1,127	1,126	1,227	1,247	1,008
Sala BBAA ajustada	1,18	1,12	1,14	1,26	1,24	1,04
Carrión	1,15	1,11	1,14	1,26	1,25	1,03
Arau	1,15	1,09	1,14	1,26	1,24	1,04
Knudsen y Harris	1,15	1,11	1,14	1,26	1,25	1,03
Cavanaugh y Wilkes	1,15	1,11	1,16	1,26	1,24	1,01
Barron	1,07	1,06	1,13	1,27	1,24	1,01

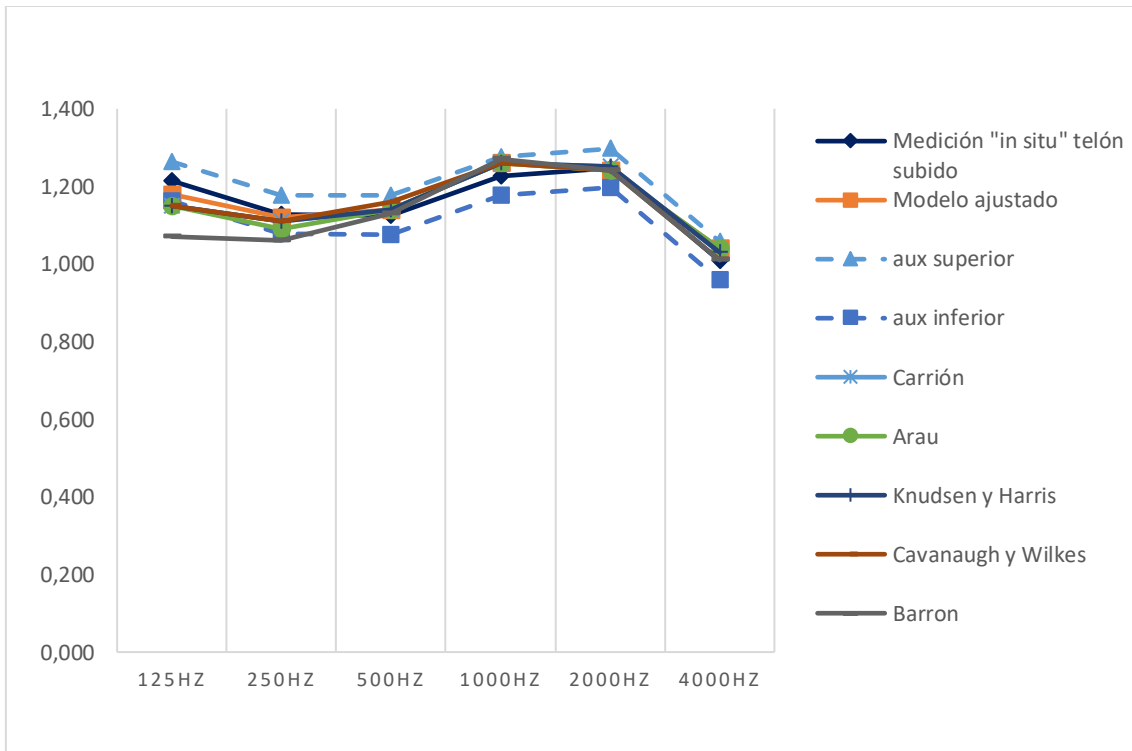


Figura 217. Comparativa TR_{30} telón subido. Medición real con límites superior e inferior, modelo ajustado, y modelos empleando los coeficientes de absorción de boca de escena de distintos autores.

En la Figura 217 se observa que el tiempo de reverberación obtenido empleando los distintos coeficientes de absorción para la boca de escena arrojan resultados muy compactos, que excepto ligeramente a 125 Hz se encuentran dentro de los límites aceptables.

Para observar la influencia de la boca de escena en el comportamiento absorbente del modelo, se calcula éste con valores distintos de absorción para la boca de escena (0,10; 0,50 y 0,90) y se obtienen los espectros del TR_{30} en cada caso.

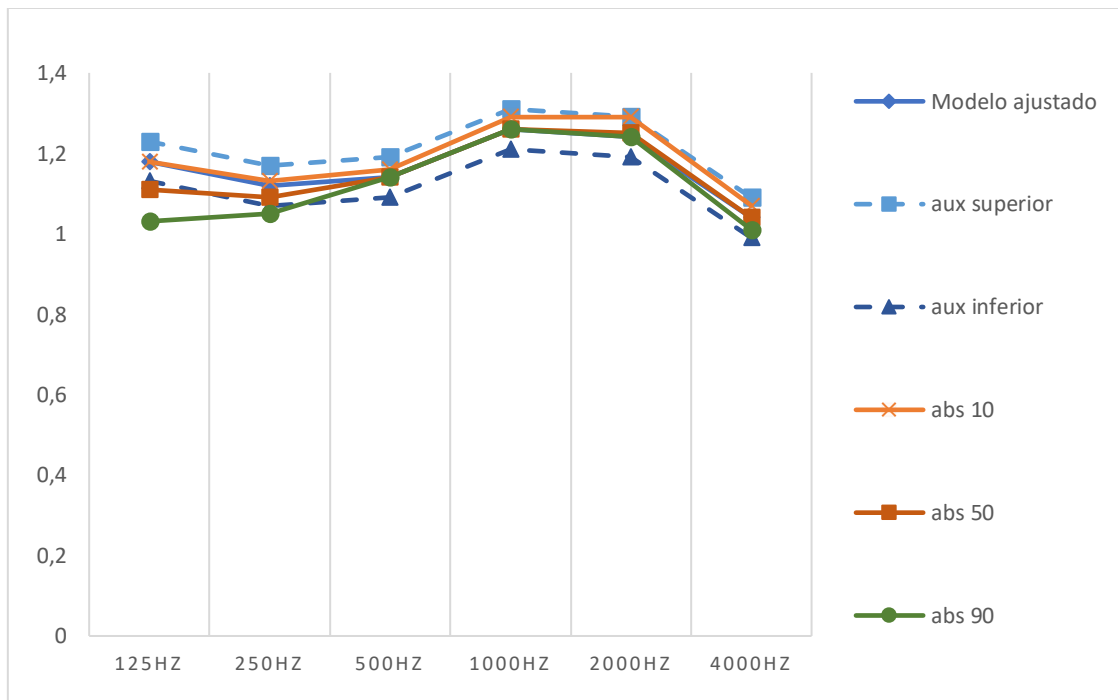


Figura 218. Comparativa TR_{30} con telón subido con distintos valores de absorción para la boca de escena

4.7 Resumen de los resultados obtenidos y discusión

4.7.1 Sobre el empleo del RSM

El empleo del método de las superficies de respuesta para ajustar los espectros de absorción de las superficies de una sala simplifica y sistematiza la identificación de las superficies determinantes en el comportamiento acústico de un espacio. El proceso de cálculo no requiere experiencia previa por parte del investigador, aunque es más lento que el método tradicional iterativo. La representación gráfica de las superficies de respuesta orienta de un vistazo qué evolución siguen las combinaciones que cumplen el “target”. En intervenciones en salas existentes puede ser útil para ajustar el coeficiente de absorción de sistemas de difícil predicción por modelos o ensayos, como membranas y resonadores.

Una de las virtudes del RSM es que posibilita obtener datos de elementos no superficiales, como espacios vacíos, para estudiar su comportamiento absorbente.

En aquellos casos en los que los valores del coeficiente de absorción empleado inicialmente son cercanos a 0 o a 1, la aplicación del RSM puede verse limitada por las propias características del método. En estos casos, en los que se sospecha que las

superficies estudiadas pueden tener un comportamiento acústico distinto al sugerido por la bibliografía, se recomienda partir de valores medios del coeficiente de absorción para poder aplicar el RSM con márgenes más amplios.

4.7.2 La absorción de la boca de escena. Investigadores y modelos virtuales

Los valores del coeficiente de absorción de la boca de escena de los teatros de la muestra obtenidos empleando el RSM son los siguientes:

Tabla 331. Coeficientes de absorción de la boca de escena de cada teatro

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Teatro Principal	0,30	0,35	0,30	0,40	0,50	0,55
Teatro Olympia	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
Teatro Talía	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
Teatro de la Primitiva	0,15	0,18	0,37	0,45	0,50	0,57
Teatro El Musical	0,10	0,20	0,50	0,80	0,75	0,50
Teatro Alfons Roig	0,10	0,20	0,40	0,60	0,60	0,50

A continuación, se hace una recapitulación de los valores que distintos investigadores han dado al coeficiente de absorción de la boca de escena.

Tabla 332. Coeficientes de absorción de la boca de escena propuestos por distintos autores.

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Carrión	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
Arau	0,30	0,40	0,50	0,60	0,60	0,50
Knudsen y Harris	0,30		0,40		0,50	
Cavanaugh y Wilkes			0,25-0,75			
Barron	0,72	0,80	0,86	0,89	0,90	0,90

Estos valores se muestran de manera gráfica en la Figura 219:

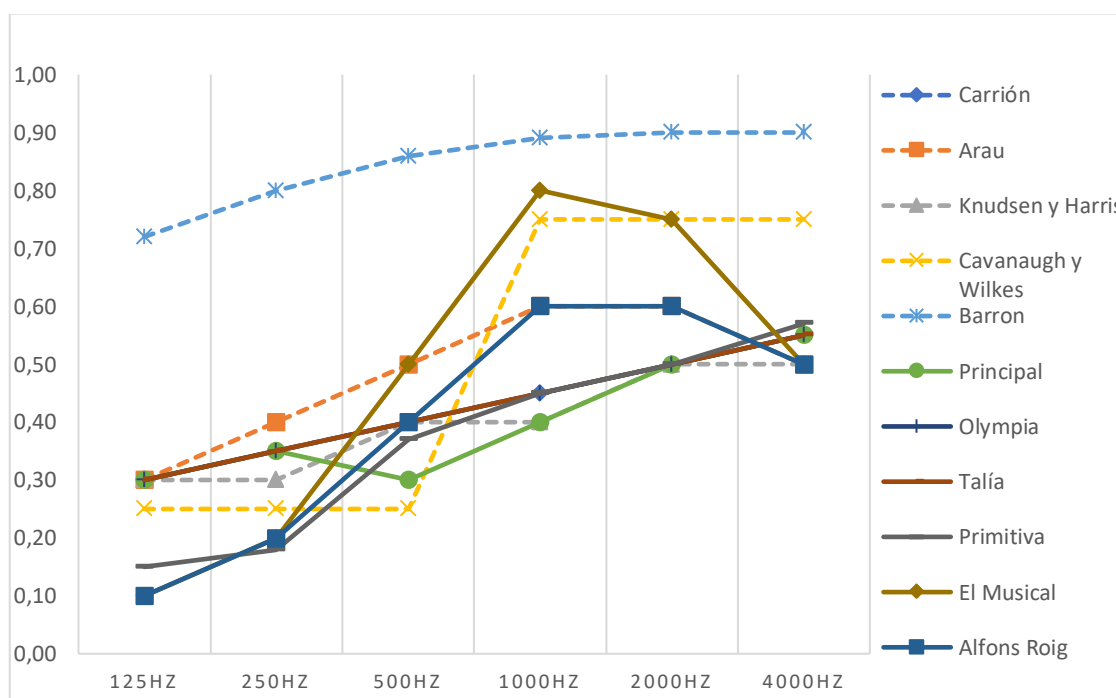


Figura 219. Espectros de absorción de la boca de escena.

De la lectura de las tablas y la figura anteriores, se observa que los coeficientes de absorción de la boca de escena propuestos por los distintos autores muestran un rango de valores bastante amplio, con una diferencia de absorción de hasta 0,60; mientras que en los valores calculados en los distintos teatros esta diferencia se sitúa en 0,40. Los investigadores proponen valores del coeficiente de absorción de la boca de escena similares entre sí, a excepción de Barron, cuyo espectro es mucho más absorbente.

En general los coeficientes de absorción de las bocas de escena de los modelos de teatros calibrados se encuentran dentro de los valores máximos y mínimos aportados por la bibliografía, excepto en bajas frecuencias en los teatros Primitiva de Llíria, El Musical y en el Auditorio Alfons Roig.

Se observa que los teatros clásicos, véase Olympia (1915) y Talía (1928) y el Teatro Principal (1832), mantienen, en casi todas las frecuencias, la absorción inicial propuesta en la modelización como referencia. A diferencia de ellos, las salas más modernas tienen unos espectros distintos con valores más bajos en bajas frecuencias y, en algún caso, ligeramente más altos en frecuencias medias y altas.

Como se ha comentado en el capítulo do, para el cálculo del tiempo de reverberación en teatros, el volumen de la caja de escena no se tiene en cuenta; es más, se considera que la práctica totalidad del sonido que entra en la caja de escena es absorbida por los materiales que en ella se encuentran. Esto es así en los tres teatros más antiguos: Teatro Principal, Olympia y Talía. En ellos, la caja de escena dispone de gran cantidad de materiales absorbentes; entre otros los decorados, escenarios y cortinajes que cuelgan de las varas.

El Teatro de la Banda Primitiva de Llíria tiene una razón de ser eminentemente musical. El escenario y la caja de escena están tratadas con materiales poco absorbentes que permiten reforzar el sonido en las representaciones musicales. Por su parte, los teatros El Musical y el auditorio Alfons Roig son salas multifuncionales, con voluntad de permitir una gran variedad de espectáculos. Las mediciones en estos teatros se realizaron con sus cajas de escena relativamente desnudas, sin decorados ni tratamientos específicos visibles. Estas circunstancias podrían explicar los menores coeficientes de absorción obtenidos para la boca de escena, en bajas frecuencias, en estas salas.

Una vez calibrados los modelos de las distintas salas, se ha probado el coeficiente de absorción propuesto por los distintos autores en los modelos. En las figuras siguientes, se muestra gráficamente la comparación del tiempo de reverberación del modelo calibrado con telón subido, con el obtenido empleando los espectros de absorción para la boca de escena de diversas fuentes, en cada teatro. En las figuras se puede observar la independencia del modelo del coeficiente de absorción de la boca de escena.

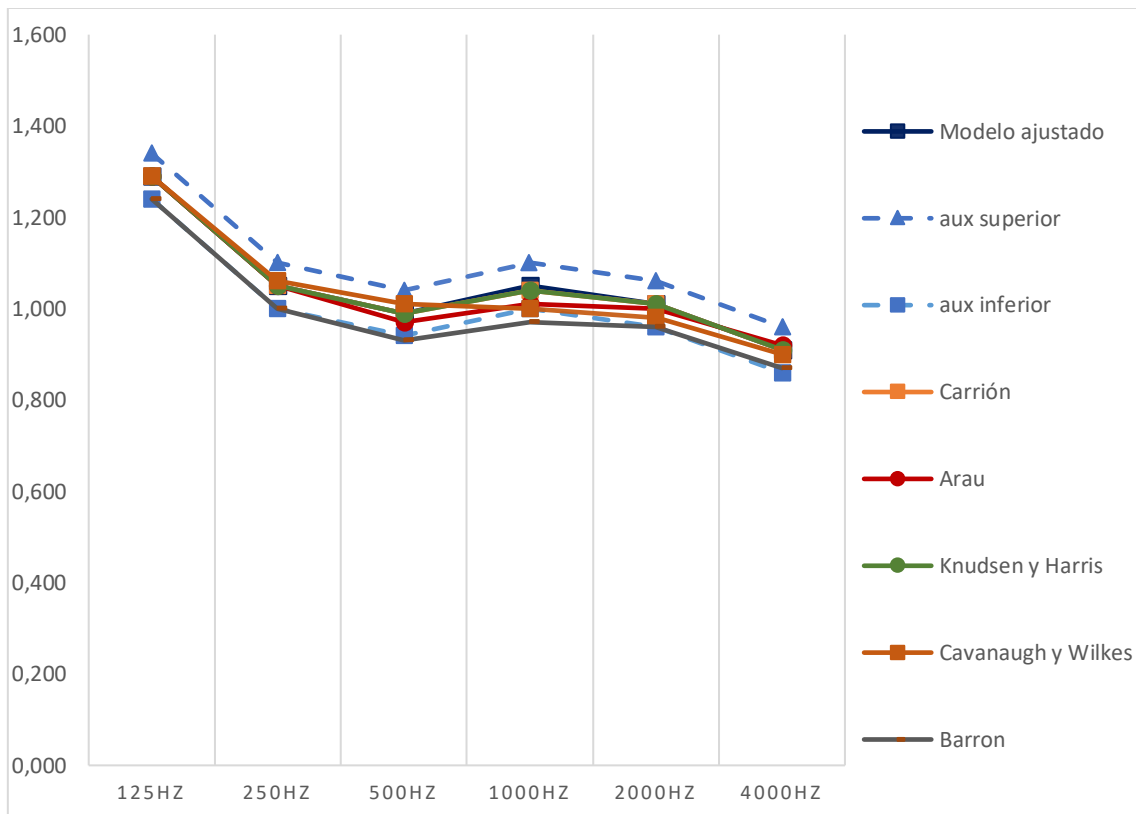


Figura 220. Teatro Principal. Comparativa TR_{30} telón subido. Medición real con límites superior e inferior, modelo ajustado, y modelos empleando los coeficientes de absorción de boca de escena de distintos autores

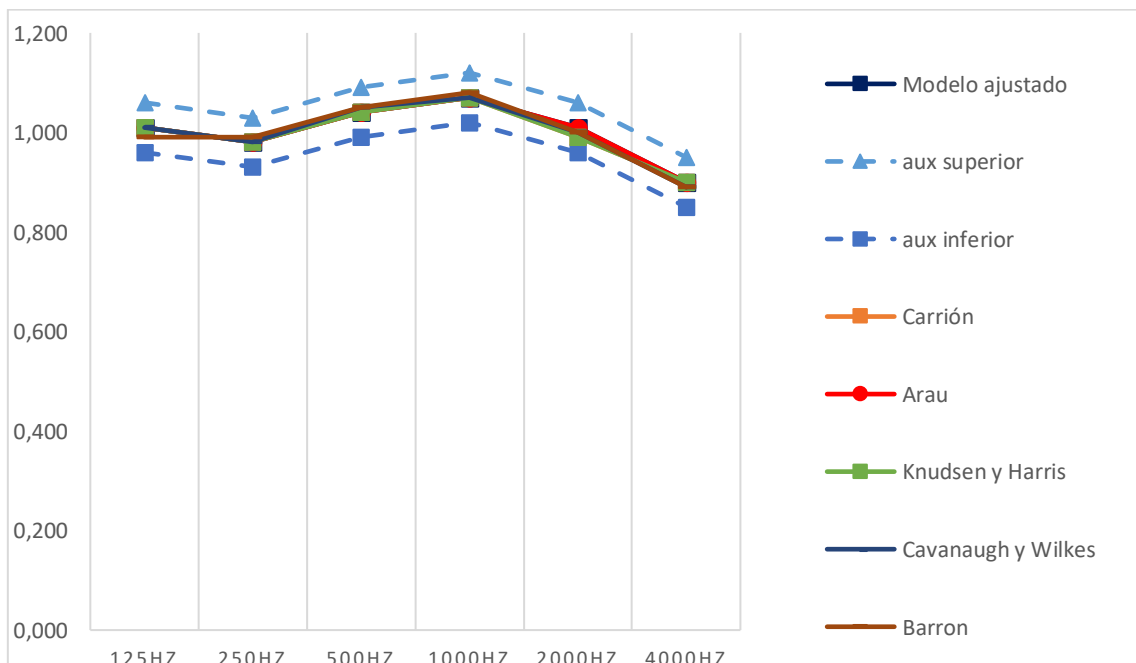


Figura 221 . Teatro Olympia. Comparativa TR_{30} telón subido. Medición real con límites superior e inferior, modelo ajustado, y modelos empleando los coeficientes de absorción de boca de escena de distintos autores

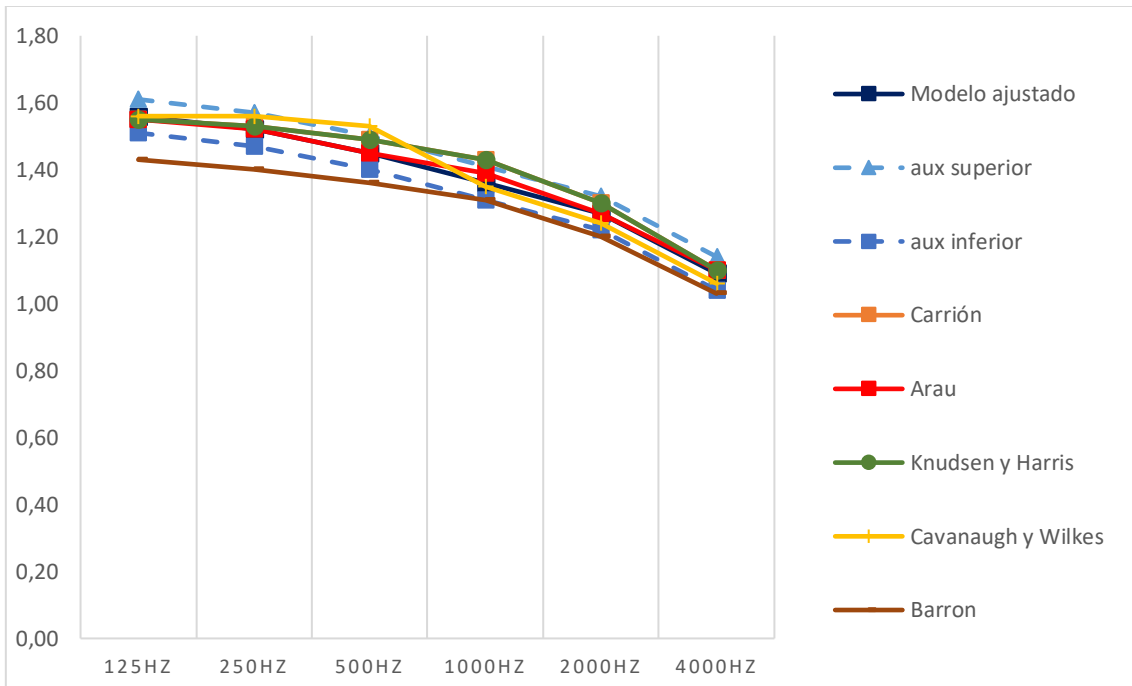


Figura 222. Teatro Talía. Comparativa TR_{30} telón subido. Medición real con límites superior e inferior, modelo ajustado, y modelos empleando los coeficientes de absorción de boca de escena de distintos autores

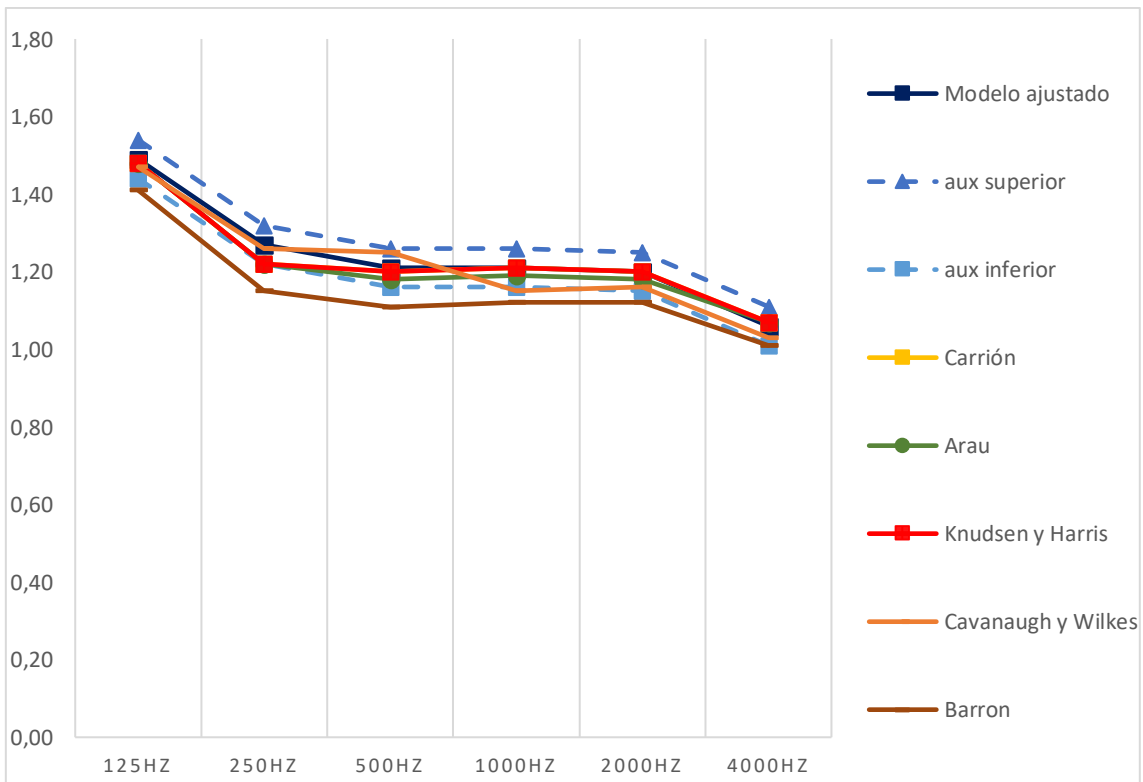


Figura 223. Teatro Banda Primitiva de Llíria. Comparativa TR_{30} telón subido. Medición real con límites superior e inferior, modelo ajustado, y modelos empleando los coeficientes de absorción de boca de escena de distintos autores

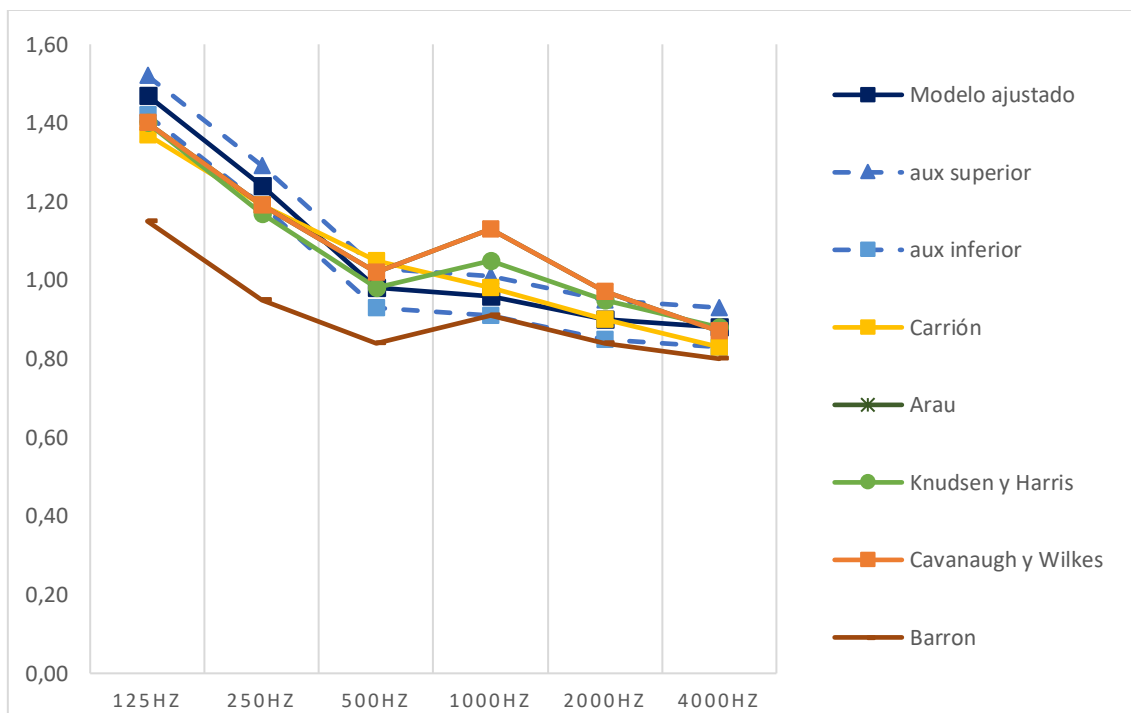


Figura 224. Teatro El Musical. Comparativa TR_{30} telón subido. Medición real con límites superior e inferior, modelo ajustado, y modelos empleando los coeficientes de absorción de boca de escena de distintos autores.

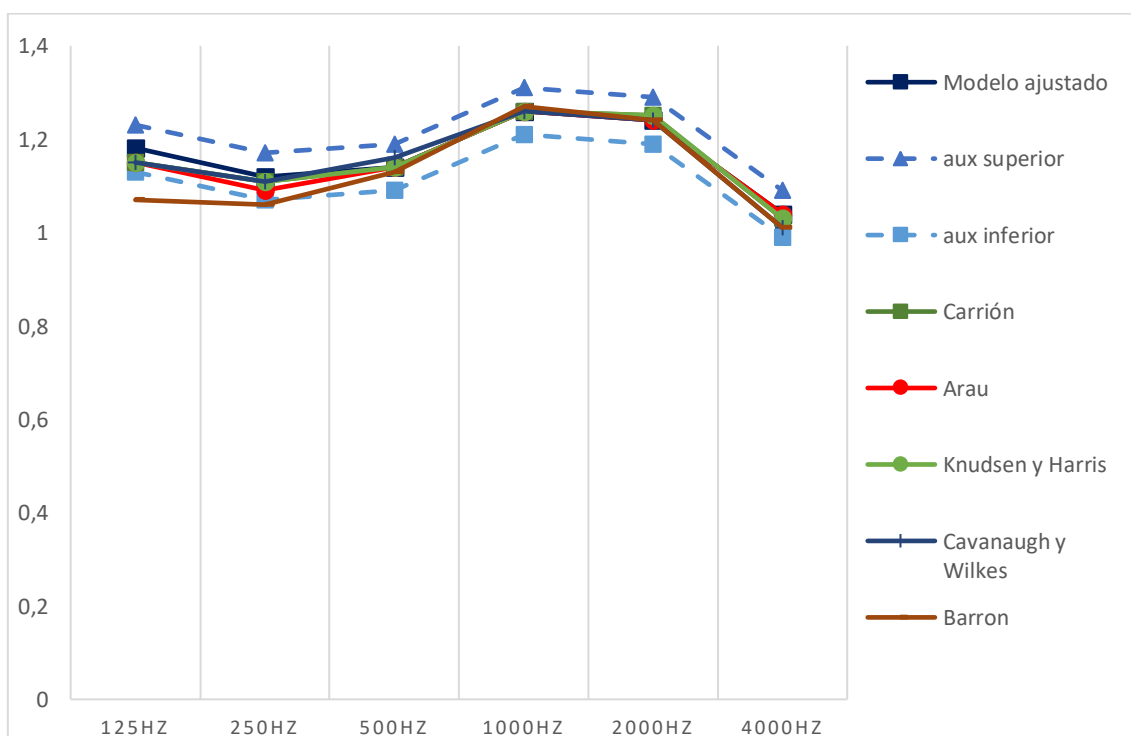


Figura 225. Auditorio Alfons Roig. Comparativa TR_{30} telón subido. Medición real con límites superior e inferior, modelo ajustado, y modelos empleando los coeficientes de absorción de boca de escena de distintos autores.

En las figuras anteriores se observa que, salvo en el Teatro El Musical, cuando en los modelos se asigna a la boca de escena el coeficiente de absorción de los autores, el espectro del tiempo de reverberación que se obtiene sigue una tendencia similar en todas las frecuencias. En el caso del Teatro Olympia, todos los coeficientes de absorción probados dan como resultado un modelo ajustado. Es decir, el tiempo de reverberación del modelo es independiente de la absorción de la boca de escena. Esto ocurre también en menor medida en el modelo del Auditorio Alfons Roig, en el que cualquier coeficiente de absorción para la boca de escena arroja tiempos de reverberación adecuados en frecuencias medias y altas, pero no tanto en bajas. Los modelos del Teatro Principal y del Teatro Talía producen tiempos de reverberación muy cercanos a los límites aceptables del 5%, pero con algunos valores que lo superan.

En el Teatro de la Banda Primitiva de Llíria y en Teatro El Musical, ningún espectro de absorción de la bibliografía predice un TR_{30} que esté dentro de los márgenes superior e inferior aceptables. En el caso del Teatro de la Banda Primitiva de Llíria los espectros del tiempo de reverberación obtenidos se encuentran muy cercanos al “target”, mientras que en Teatro El Musical se observan mayores diferencias en las frecuencias bajas, y de manera particular, a 1000Hz.

Los resultados anteriores ponen de manifiesto que la sala a la que más le afectan los cambios de absorción de la boca de escena para la predicción de su comportamiento es la del teatro El Musical. En éste, variaciones de absorción de la boca de escena arrojan resultados del tiempo de reverberación del modelo significativamente distintos.

Se aprecia que en los teatros a la italiana con profusa decoración a base de enmaderados y peines de escena más vestidos, lo que implica una mayor absorción en frecuencias bajas y medias, variaciones en el coeficiente de absorción de la boca de escena influyen poco en el tiempo de reverberación obtenido. Es decir, la absorción de la boca de escena no es determinante en el tiempo de reverberación de la sala. Por el contrario, en salas más modernas, con menor decoración, menos decorados, materiales textiles, en definitiva, con menor acumulación de elementos absorbentes en la caja de escena, la absorción de la boca de escena puede tener una gran influencia en el comportamiento acústico de la sala.

Con objeto de verificar el efecto que tiene la absorción de la boca de escena en los modelos virtuales de las salas se ha sustituido el coeficiente de absorción de la boca de escena por valores constantes: bajo=0,10; medio=0,50 y alto=0,90. Los resultados se muestran en las figuras a continuación.

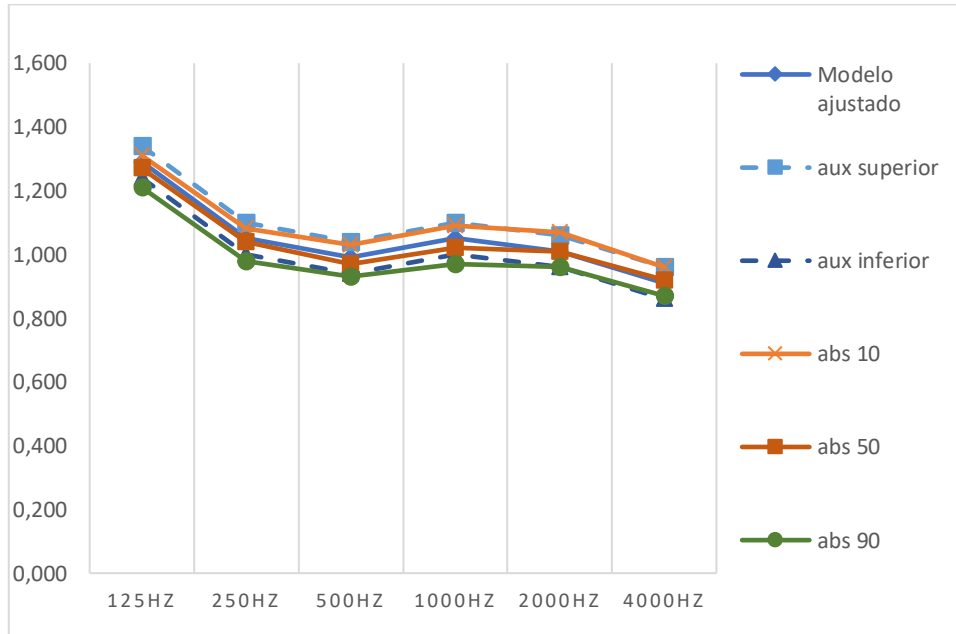


Figura 226. Teatro Principal. Comparativa TR₃₀ con telón subido con distintos valores de absorción para la boca de escena

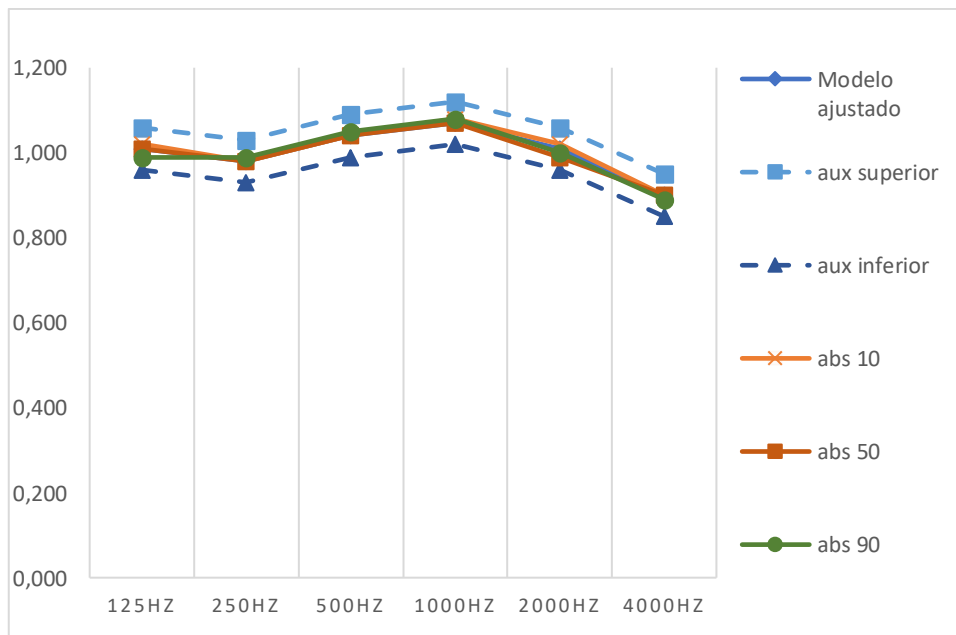


Figura 227. Teatro Olympia. Comparativa TR₃₀ con telón subido con distintos valores de absorción para la boca de escena

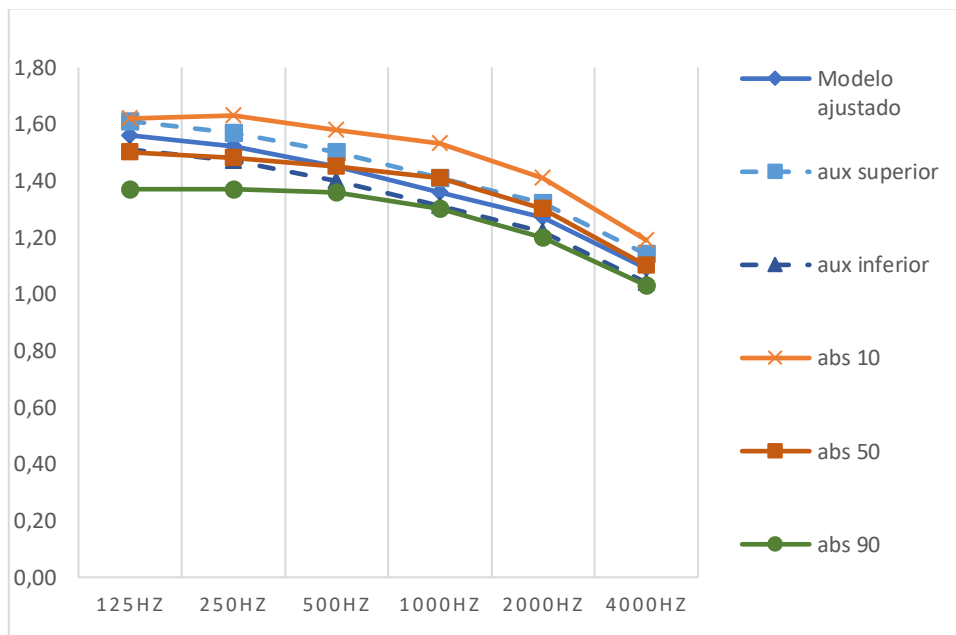


Figura 228. Teatro Talía. Comparativa TR_{30} con telón subido con distintos valores de absorción para la boca de escena

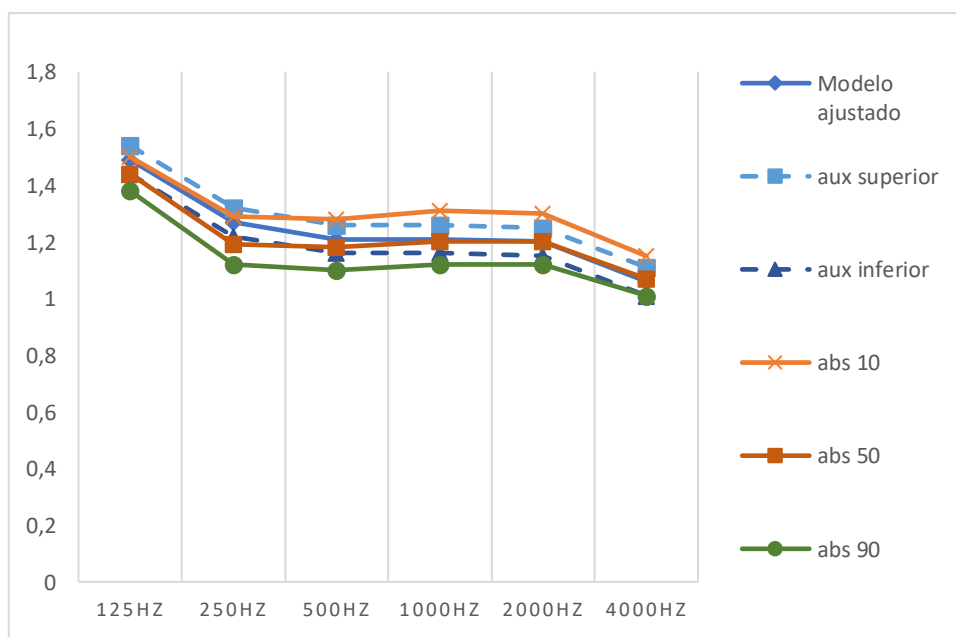


Figura 229. Teatro de la Banda Primitiva de Lliria. Comparativa TR_{30} con telón subido con distintos valores de absorción para la boca de escena

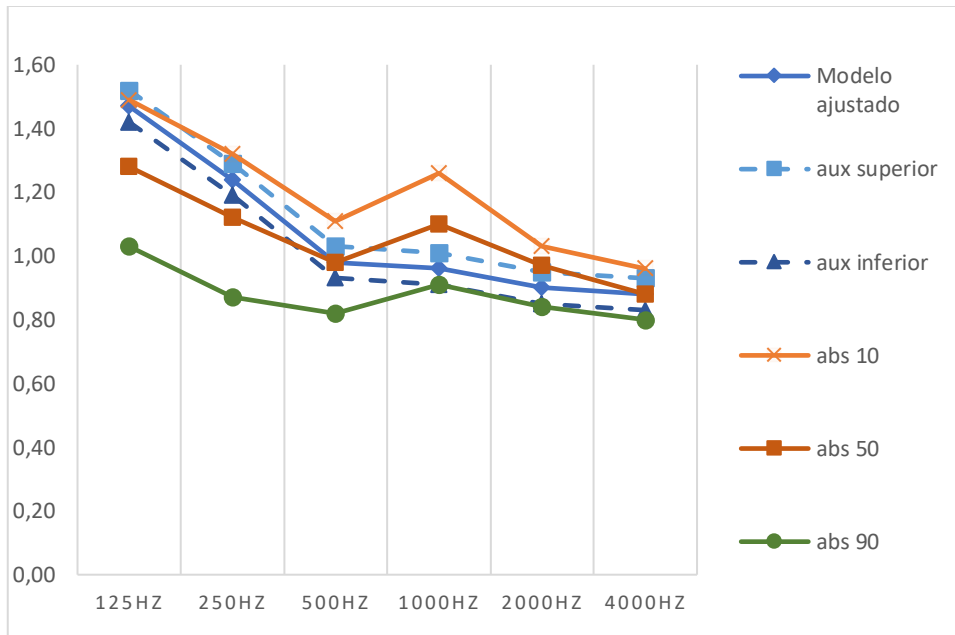


Figura 230. Teatro El Musical. Comparativa TR_{30} con telón subido con distintos valores de absorción para la boca de escena

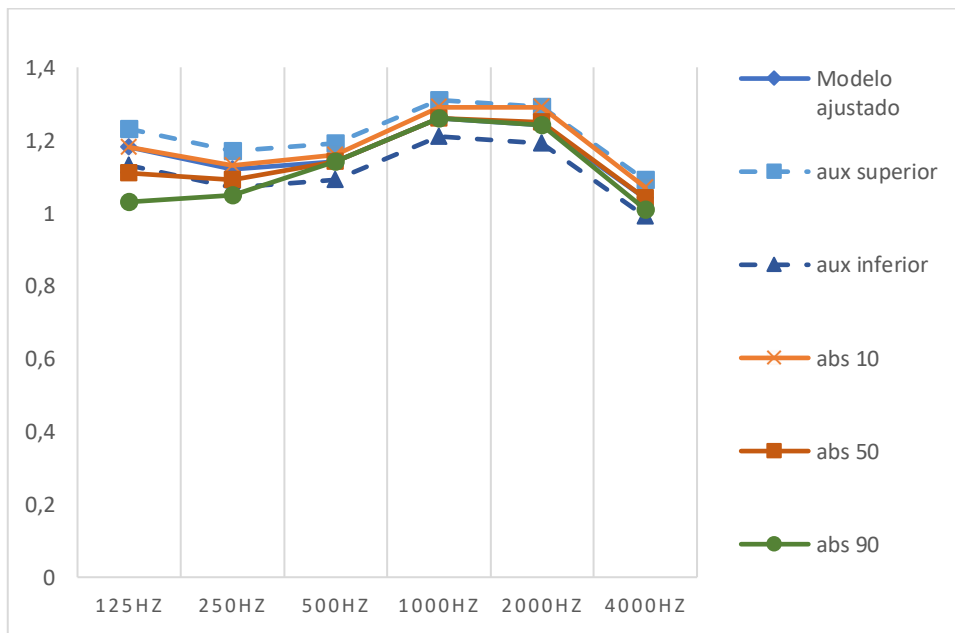


Figura 231. Auditorio Alfons Roig. Comparativa TR_{30} con telón subido con distintos valores de absorción para la boca de escena

En algunas salas, como el teatro Olympia (Figura 227), los espectros del TR_{30} obtenidos aplicando coeficientes de absorción muy bajos, medios y altos, son muy parecidos y presentan poca dispersión, quedando dentro de los márgenes aceptables. Esto significa que la absorción de la boca de escena influye muy poco en el comportamiento acústico

del modelo. Es decir, el tiempo de reverberación de la sala es independiente de la absorción de la boca de escena.

En otros teatros como el Talía (Figura 228), la Banda Primitiva de Lliria (Figura 229) o el Teatro Principal (Figura 226), se observa que empleando absorciones extremas para la boca de escena se obtienen espectros del TR_{30} bastante cercanos al comportamiento ajustado del modelo. Cuanto más cercanos son los espectros obtenidos entre sí, menos sensible es el modelo a variaciones en la absorción de la boca de escena.

El Auditorio Alfons Roig (Figura 231) presenta un comportamiento compacto en frecuencias medias y altas; es decir, valores distintos para el coeficiente de absorción de la boca de escena producen comportamientos acústicos de la sala muy similares. Sin embargo, en las frecuencias bajas se observa cierta dispersión de los resultados; es decir, el modelo se ve afectado de manera significativa por variaciones del valor de la absorción de la boca de escena.

En la Figura 230, se aprecia que El teatro El Musical se ve muy afectado por variaciones de absorción de la boca de escena en todas las frecuencias. Esto implica que el coeficiente de absorción de la boca de escena desempeña un papel importante en el comportamiento acústico de la sala.

5 CONCLUSIONS AND FUTURE PERSPECTIVES

5.1 Conclusions

In this work we have collected information on the values of the absorption coefficient of the stage opening present in the scientific literature, and it has been found that these values have great differences among them. The dispersion of the coefficients can reach a variation of up to 60%, depending on the criteria of each researcher. Previously, we pointed out that for rooms dedicated to theater, the stage house must be considered totally absorbent; therefore, the design criteria establish that the acoustic behavior of the room must be independent of the stage sets used in different performances. In fact, the equivalent absorption area of the stage opening in relation to that of the rest of the room's surfaces is small, and therefore, has little or less influence than other finishes. This means that it is not unreasonable for each author to propose those values, adapted to their experience and to the criteria they use for the design of theaters.

Moreover, we have deduced the absorption coefficient of the stage opening from calibrated virtual models of real rooms. The obtained coefficients show a variation between 7% and 40% depending on the frequency. Its values at medium and high frequencies, are within the range of the values proposed in the scientific literature, but not at low frequencies in the newest theaters. Should the results be separated, differentiating older theaters from modern ones, it could be seen that the former present very homogeneous values; they have the same coefficient at all frequencies except at medium frequencies where they show a maximum variation of 10%. On the other hand, the new rooms also present little variation in their values at low and very high frequencies, while at medium frequencies the maximum variation is 35%.

Next, the sensitivity of the calibrated models to the absorption of the stage opening has been studied. The influence of the absorption of the stage opening is different depending on the type of venue. In Italian-style theaters which tend to have more decoration and more dressed scenes, variations in the absorption coefficient of the opening affect the reverberation time of the room less than in modern rooms with many reflective surfaces and emptier stage areas. The absorption of the stage opening, as seen in the graphs of extreme absorption of the stage opening, generally has little influence

on the acoustic behavior of the room, except in rooms with low absorption, such as the El Musical theater.

It seems appropriate to apply different absorption coefficients for the stage opening attending to the type of venue that is being designed and the general absorption level used in the room's finishes.

In general, in proscenium theaters, the values assigned by different authors to the absorption coefficient of the proscenium opening result in TR_{30} values that fit within the 5% established by the JND.

Finally, In the case of new theaters and multipurpose venues, the values taken from the bibliography may not adequately predict the behavior of the room. For this reason, it is recommended to modify those values. Considering all these variables, it is our proposal to use values at low frequencies within the range of 0,10-0,30, in the case of multipurpose halls or in those that have low absorption in the stage house.

5.2 Future perspectives

A possible way to continue this work will be to make on site measurements of the theaters with an audience, and to analyze them in their standard conditions of use. In addition, it would be interesting to carry out on site measurements without scenography, or with different scenography, to evaluate the contribution of the stage house to the acoustic parameters.

It could be relevant to extend the study to other theaters and concert halls and carry out a comparative analysis of them.

To improve the calculation process using RSM, tools could be created that automate the operations, to increase speed and reduce the probability of error.

6 REFERENCIAS

- [1] L. L. Beranek, *Concert halls and opera houses : music, acoustics and architecture*, 2nd ed. New York (USA): Springer, 2004.
- [2] L. L. Beranek, *Acoustics*. Woodbury: Acoustical Society of America, 1996.
- [3] M. Barron, *Auditorium acoustics and architectural design*, 2nd. ed. London: Spon Press, 2010.
- [4] M. Forsyth, *Buildings for music : The architect, the musician, and the listener from the seventeenth century to the present day*. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- [5] "NORMA UNE-EN ISO 11654 (1998): Acústica. Absorbentes acústicos para su utilización en edificios. Evaluación de la absorción acústica." .
- [6] "NORMA UNE-EN ISO 354 (2004): Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante." .
- [7] V. O. Knudsen, "Acoustics of music rooms," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 2, no. 4, pp. 434–467, 1931.
- [8] M. Recuero López, *Acústica arquitectónica*, 2ª ed. Madrid: El autor, 1992.
- [9] V. O. Knudsen, *Acoustical designing in architecture*. S.l: American Institute of Physics, 1988.
- [10] W. T. Cavanaugh and J. A. Wilkes, *Architectural acoustics : principles and practice*. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [11] A. Carrión Isbert, *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona: Edicions UPC, 1998.
- [12] H. Arau, *ABC de la acústica arquitectónica*. Barcelona: Ceac, 1999.
- [13] J. Llinares Millán, "Contribución a la simulación virtual de parámetros de calidad acústica en espacios arquitectónicos. Aplicación del método de superficies de respuesta." Universitat Politècnica de València, 2012.
- [14] M. Vitruvio Polión, *Los diez libros de arquitectura de M. Vitruvio Polion*. En Madrid: Imprenta Real, 1787.

- [15] L. B. (1404-1472). A. du texte Alberti, *Leonis Baptistae Alberti de Re aedificatoria libri X*. Florentiae, 1485.
- [16] S. Serlio, *Libro di Sebastiano Serlio Bolognese, Con Nove Addition...* Venetia: Marcolini, 1544.
- [17] Filarete, *Tratado de arquitectura*. Vitoria-Gasteiz: Ephialte. Instituto de Estudios Iconográficos, 1990.
- [18] Á. L. León-Rodríguez, “La acústica de los teatros a través de la historia,” 1998.
- [19] J. Llinares Galiana, A. Llopis Reyna, and F. J. Sancho Vendrell, *Acústica arquitectónica y urbanística*. Editorial Universitat Politècnica de València, 1996.
- [20] W. C. Sabine and M. D. Egan, “Collected Papers on Acoustics,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 95, no. 6, pp. 3679–3680, 1994, doi: 10.1121/1.409944.
- [21] B. N. J. Postma, S. Jouan, and B. F. G. Katz, “Pre-Sabine room acoustic design guidelines based on human voice directivity,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 143, no. 4, pp. 2428–2437, 2018.
- [22] L. W. Sempeyer, “Computed frequency and angular distribution of the normal modes of vibration in rectangular rooms,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 37, no. 3, pp. 413–423, 1965.
- [23] R. H. Bolt, “Frequency Distribution of Eigentones in a Three-Dimensional Continuum,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 10, no. 3, pp. 228–234, 1939.
- [24] H. A. i Puchad, “Aproximació científica a un problema formal: contribució acústica al disseny arquitectònic,” *Rev. física*, pp. 50–57, 1994.
- [25] L. Cremer, *Principles and applications of room acoustics. Volume 1*. Westport, Connecticut: Península, 2017.
- [26] J. You, J. J. Kim, and J. Y. Jeon, “Effects of absorption elements and stage set on the stage house acoustics in a proscenium hall.”
- [27] N. Prodi and S. Velecka, “A scale value for the balance inside a historical opera house,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 117, no. 2, pp. 771–779, 2005.
- [28] A. Cocchi, R. Shimokura, and M. Cesare, “Acoustical measurements in 'Teatro

- Nuovo'(Spoleto, Italy), changing sound source position in performance area," *Temporal Des. Arch. Env.*, vol. 5, pp. 12–24, 2006.
- [29] J. I. Gustafsson and G. Natsiopolos, "Stage set and acoustical balance in an auditorium of an opera house," in *Proceedings of the 17th International Congress on Acoustics, ICA*, 2001, p. 5D.
- [30] S. Sato, H. Sakai, and N. Prodi, "Subjective preference for sound sources located on the stage and in the orchestra pit of an opera house," *J. Sound Vib.*, vol. 258, no. 3, pp. 549–561, 2002.
- [31] A. Farina, P. Fausti, and R. Pompoli, "The Acoustical Shell Of The 'Nuovo Teatro Comunale' in Cagliari," in *Proceedings of the 15th International Congress on Acoustics, Trondheim, Norway, 26*, 1995, vol. 2, pp. 449–452.
- [32] M. Luykx, R. Metkemeijer, and M. Vercammen, "Variable acoustics of theatre De Spiegel in Zwolle (NL)," *Proc. ISRA, Sevilla*, 2007.
- [33] J. Y. Jeon, R. Seo, and H. I. Jo, "Effect of Stage Volume Ratio on Audience Acoustics in Concert Halls," *Sustainability*, vol. 12, no. 4, 2020, doi: 10.3390/su12041370.
- [34] J. C. Jaffe, *The acoustic of performance halls : spaces for music from Carnegie Hall to the Hollywood Bowl*. New York ; London: W.W. Norton, 2010.
- [35] M. Long, *Architectural acoustics*. Elsevier, 2005.
- [36] W. J. Cavanaugh, "Acoustical control in buildings," *Build. Constr. Mater. Types Constr. 5th*, 1981.
- [37] C. F. Eyring, "Reverberation Time in 'Dead' Rooms," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 1, no. 2A, pp. 217–241, 1930, doi: 10.1121/1.1915175.
- [38] H. Kuttruff, *Room acoustics*, 3rd ed. London ; New York: Elsevier Applied Science, 1991.
- [39] L. L. Beranek, "Music, acoustics, and architecture," *Bull. Am. Acad. Arts Sci.*, vol. 45, no. 8, pp. 25–46, 1992.
- [40] R. Thiele, "Richtungsverteilung und zeitfolge der schallrückwürfe in räumen," *Acta Acust. United with Acust.*, vol. 3, no. 4, pp. 291–302, 1953.

- [41] H. A. i Puchades, “¿ Es el criterio acústico el paradigma de la excelencia acústica en el diseño de salas?,” in *Tecniacústica 2008: conferencias y comunicaciones de Acústica 2008. V Congreso Ibérico de Acústica y Tecniacustica 2008; 39º Congreso Español de Acústica: Coimbra, Portugal. Octubre, 2008*, 2008, p. 1.
- [42] H. J. M. Steeneken and T. Houtgast, “A physical method for measuring speech-transmission quality,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 67, no. 1, pp. 318–326, 1980.
- [43] R. H. Myers, *Response surface methodology : process and product optimization using designed experiments*. New York [etc: John Wiley & Sons, 1995.
- [44] B. Pérez-Aguilar, I. Guillén, V. Lozano, and A. Llopis, “Experimental determination approximation of the stage opening absorption spectrum in theatres by using the response surface methodology: case study,” in *Reactive proactive, architecture*, 2018, pp. 264–269.
- [45] V. Ruiz Monrabal, “Historia de las sociedades musicales de la Comunidad Valenciana,” *Vol. I y II. Val. Fed. Soc. Music. la Comunidad Valencia.*, 1993.
- [46] B. N. Pérez Aguilar, “Catalogación de teatros y auditorios con caja escénica de la Comunidad Valenciana : soluciones constructivas de algunos casos,” Apr. 2015, Accessed: Mar. 07, 2023. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/49310>.
- [47] V. (Fundación, “MIRE.” .
- [48] “UNE EN-ISO 3382-1. Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces.” International Organization for Standardization, Geneva, 2009.
- [49] “DIRAC. Manual de usuario.” Brüel & Kjaer, 2009.
- [50] M. R. Schroeder, “New Method of Measuring Reverberation Time,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 37, no. 3, pp. 409–412, 1965, doi: 10.1121/1.1909343.
- [51] Brüel & Kjaer, “ODEON 9.2 Manual del usuario.” 2010.
- [52] A. Barba Sevillano, *El Teatro Principal de Valencia : acústica y arquitectura escénica*. Valencia: Generalitat Valenciana, 2011.

- [53] V. Colomer Sendra, *Registro de arquitectura del siglo XX Comunidad Valenciana*. 2002.
- [54] “www.olympiametropolitana.com.” .
- [55] “www.teatro-olympia.com.” .
- [56] E. Herreras and D. Rodríguez, *La casa de los obreros y el Teatre Talia: cien años de teatro valenciano*. Teatres de la Generalitat Valenciana, 2008.
- [57] “www.teatretalia.es.” .
- [58] “www.bandaprimitiva.org.” .
- [59] “www.teatreelmusical.es.” .

7 BIBLIOGRAFÍA

- Alberti, L. B. (1404-1472). A. du texte. (1485). *Leonis Baptistae Alberti de Re aedificatoria libri X* [Book]. Florentiae.
- Arau, H. (1994). Aproximació científica a un problema formal: contribució acústica al disseny arquitectònic. *Revista de Física*, 50–57.
- Arau, H. (1999). *ABC de la acústica arquitectònica* [Book]. Ceac.
- Arau, H. (2008). ¿ Es el criterio acústico el paradigma de la excelencia acústica en el diseño de salas? *Tecniacústica 2008: Conferencias y Comunicaciones de Acústica 2008. V Congreso Ibérico de Acústica y Tecniacustica 2008; 39º Congreso Español de Acústica: Coimbra, Portugal. Octubre, 2008*, 1.
- Barba Sevillano, A. (2011). *El Teatro Principal de Valencia : acústica y arquitectura escénica* (A. Giménez Pérez (ed.)). Generalitat Valenciana.
- Barron, M. (2010). *Auditorium acoustics and architectural design* (2nd. ed.) [Book]. Spon Press.
- Beranek, Leo L. (1992). Music, acoustics, and architecture. *Bulletin of the American Academy of Arts and Sciences*, 45(8), 25–46.
- Beranek, Leo Leroy. (1996). *Acoustics* [Book]. Acoustical Society of America.
- Beranek, Leo Leroy. (2004). *Concert halls and opera houses : music, acoustics and architecture* (2nd ed.) [Book]. Springer.
- Bolt, R. H. (1939). Frequency Distribution of Eigentones in a Three-Dimensional Continuum. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 10(3), 228–234.
- Brüel & Kjaer. (2010). *ODEON 9.2 Manual del usuario*.
- Carrión Isbert, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos* [Book]. Edicions UPC.
- Cavanaugh, W. J. (1981). Acoustical control in buildings. *Building Construction: Materials and Types of Construction 5th*.
- Cavanaugh, W. T., & Wilkes, J. A. (1998). *Architectural acoustics : principles and practice* (W. T. Cavanaugh & J. A. Wilkes (eds.)) [Book]. John Wiley & Sons.

- Cocchi, A., Shimokura, R., & Cesare, M. (2006). Acoustical measurements in 'Teatro Nuovo'(Spoleto, Italy), changing sound source position in performance area. *Temporal Des. Arch. Environ*, 5, 12–24.
- Colomer Sendra, V. (2002). Registro de arquitectura del siglo XX Comunidad Valenciana. In C.-I.-G. Valenciana (Ed.), *Valencia: Colegio Oficial de Arquitectos de la Comunidad Valenciana*.
- Cremer, L. (2017). *Principles and applications of room acoustics. Volume 1* (H. A. Muller (ed.)) [Book]. Península.
- DIRAC. *Manual de usuario* (5.0). (2009). Brüel & Kjaer.
- Eyring, C. F. (1930). Reverberation Time in “Dead” Rooms [Article]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1(2A), 217–241. <https://doi.org/10.1121/1.1915175>
- Farina, A., Fausti, P., & Pompoli, R. (1995). The Acoustical Shell Of The “Nuovo Teatro Comunale” in Cagliari. *Proceedings of the 15th International Congress on Acoustics, Trondheim, Norway*, 26, 2, 449–452.
- Filarete. (1990). *Tratado de arquitectura* (P. Pedraza (Ed.)) [Book]. Ephialte. Instituto de Estudios Iconográficos.
- Forsyth, M. (1985). *Buildings for music : The architect, the musician, and the listener from the seventeenth century to the present day* [Book]. Cambridge University Press.
- Gustafsson, J. I., & Natsiopolos, G. (2001). Stage set and acoustical balance in an auditorium of an opera house. *Proceedings of the 17th International Congress on Acoustics, ICA*, 5D.
- Herrerias, E., & Rodríguez, D. (2008). *La casa de los obreros y el Teatre Talia: cien años de teatro valenciano*. Teatres de la Generalitat Valenciana.
- Jaffe, J. C. (2010). *The acoustic of performance halls : spaces for music from Carnegie Hall to the Hollywood Bowl* (Leo Leroy Beranek (Ed.)) [Book]. W.W. Norton.
- Jeon, J. Y., Seo, R., & Jo, H. I. (2020). Effect of Stage Volume Ratio on Audience Acoustics in Concert Halls. *Sustainability*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/su12041370>

- Knudsen, Vern O. (1931). Acoustics of music rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2(4), 434–467.
- Knudsen, Vern O. (1988). *Acoustical designing in architecture* (C. M. Harris (Ed.)) [Book]. American Institute of Physics.
- Kuttruff, H. (1991). *Room acoustics* (3rd ed.) [Book]. Elsevier Applied Science.
- León-Rodríguez, Á. L. (1998). La acústica de los teatros a través de la historia. *Segundo Congreso Nacional de Historia de La Construcción: A Coruña, 22-24 de Octubre de 1998*. Pag: 263-272.
- Llinares Galiana, J., Llopis Reyna, A., & Sancho Vendrell, F. J. (1996). *Acústica arquitectónica y urbanística* [Book]. Editorial Universitat Politècnica de València.
- Llinares Millán, J. (2012). *Contribución a la simulación virtual de parámetros de calidad acústica en espacios arquitectónicos. Aplicación del método de superficies de respuesta*. Universitat Politècnica de València.
- Long, M. (2005). *Architectural acoustics*. Elsevier.
- Luykx, M., Metkemeijer, R., & Vercammen, M. (2007). Variable acoustics of theatre De Spiegel in Zwolle (NL). *Proceedings of the ISRA, Sevilla*.
- Myers, R. H. (1995). *Response surface methodology : process and product optimization using designed experiments* (D. C. Montgomery (Ed.)) [Book]. John Wiley & Sons.
- NORMA UNE-EN ISO 11654 (1998): Acústica. Absorbentes acústicos para su utilización en edificios. Evaluación de la absorción acústica.* (n.d.).
- NORMA UNE-EN ISO 354 (2004): Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante.* (n.d.).
- Pérez-Aguilar, B., Guillén, I., Lozano, V., & Llopis, A. (2018). Experimental determination approximation of the stage opening absorption spectrum in theatres by using the response surface methodology: case study. *Reactive Proactive, Architecture*, 264–269.
- Pérez Aguilar, B. N. (2015). *Catalogación de teatros y auditorios con caja escénica de la Comunidad Valenciana : soluciones constructivas de algunos casos*.

<https://riunet.upv.es:443/handle/10251/49310>

- Postma, B. N. J., Jouan, S., & Katz, B. F. G. (2018). Pre-Sabine room acoustic design guidelines based on human voice directivity. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 143(4), 2428–2437.
- Prodi, N., & Velecka, S. (2005). A scale value for the balance inside a historical opera house. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117(2), 771–779.
- Recuero López, M. (1992). *Acústica arquitectónica* (C. Gil González (Ed.); 2ª ed.) [Book]. El autor.
- Ruiz Monrabal, V. (1993). Historia de las sociedades musicales de la Comunidad Valenciana. Vol. I y II. Valencia, Federación de Sociedades Musicales de La Comunidad Valenciana.
- Sabine, W. C., & Egan, M. D. (1994). Collected Papers on Acoustics [Article]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 95(6), 3679–3680. <https://doi.org/10.1121/1.409944>
- Sato, S., Sakai, H., & Prodi, N. (2002). Subjective preference for sound sources located on the stage and in the orchestra pit of an opera house. *Journal of Sound and Vibration*, 258(3), 549–561.
- Schroeder, M. R. (1965). New Method of Measuring Reverberation Time [Article]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 37(3), 409–412. <https://doi.org/10.1121/1.1909343>
- Sepmeyer, L. W. (1965). Computed frequency and angular distribution of the normal modes of vibration in rectangular rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 37(3), 413–423.
- Serlio, S. (1544). *Libro di Sebastiano Serlio Bolognese* (Con Nove Addition...) [Book]. Marcolini.
- Steeneken, H. J. M., & Houtgast, T. (1980). A physical method for measuring speech-transmission quality. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 67(1), 318–326.
- Thiele, R. (1953). Richtungsverteilung und zeitfolge der schallrückwürfe in räumen. *Acta*

Acustica United with Acustica, 3(4), 291–302.

UNE EN-ISO 3382-1. *Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces*. (2009). International Organization for Standardization.

Vitruvio Polión, M. (1787). *Los diez libros de arquitectura de M. Vitruvio Polion* (J. Ortiz y Sanz (Ed.)) [Book]. Imprenta Real.

You, J., Kim, J. J., & Jeon, J. Y. (n.d.). Effects of absorption elements and stage set on the stage house acoustics in a proscenium hall. *International Symposium on Room Acoustics, ISRA 2010*.

Páginas web citadas:

www.bandaprimtiva.org

www.olympiametropolitana.com

www.proyectomire.org

www.teatreelmusical.es

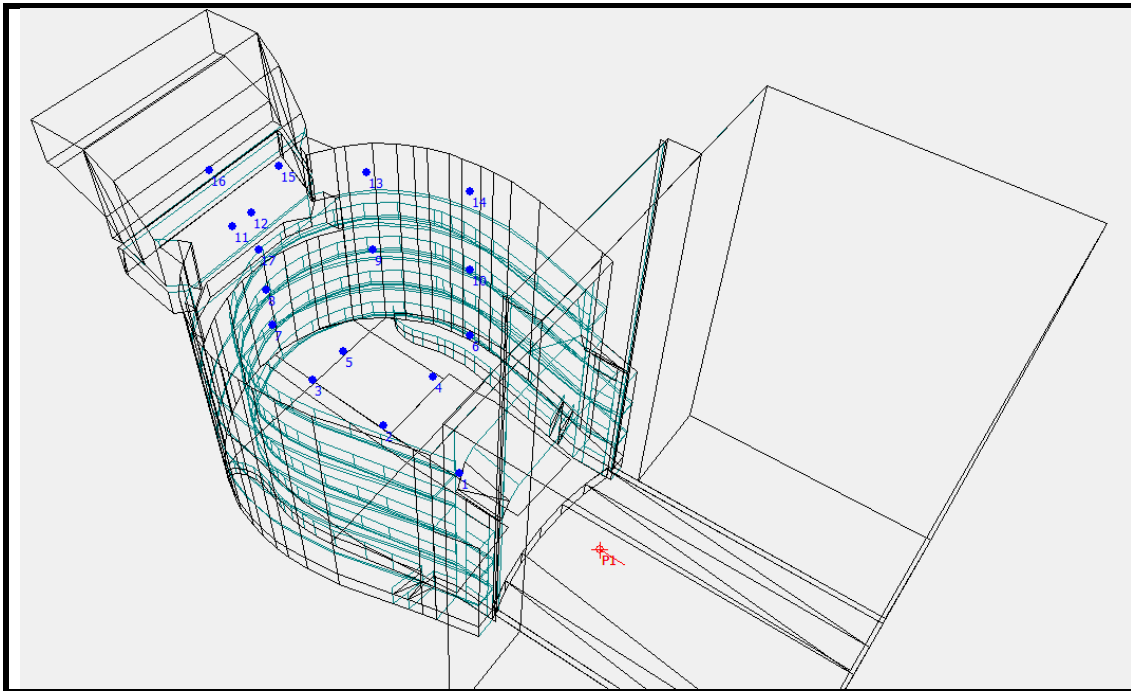
www.teatretalia.es

www.teatro-olympia.com

8 ANEXO

En el presente anexo se adjuntan fichas de las salas con información relevante de las mismas.

TEATRO PRINCIPAL DE VALENCIA



Año de construcción: 1832

Teatro a la italiana

TR_{30 mid} 1,02 s.

Absorción de la boca de escena:

0,30

0,35

0,30

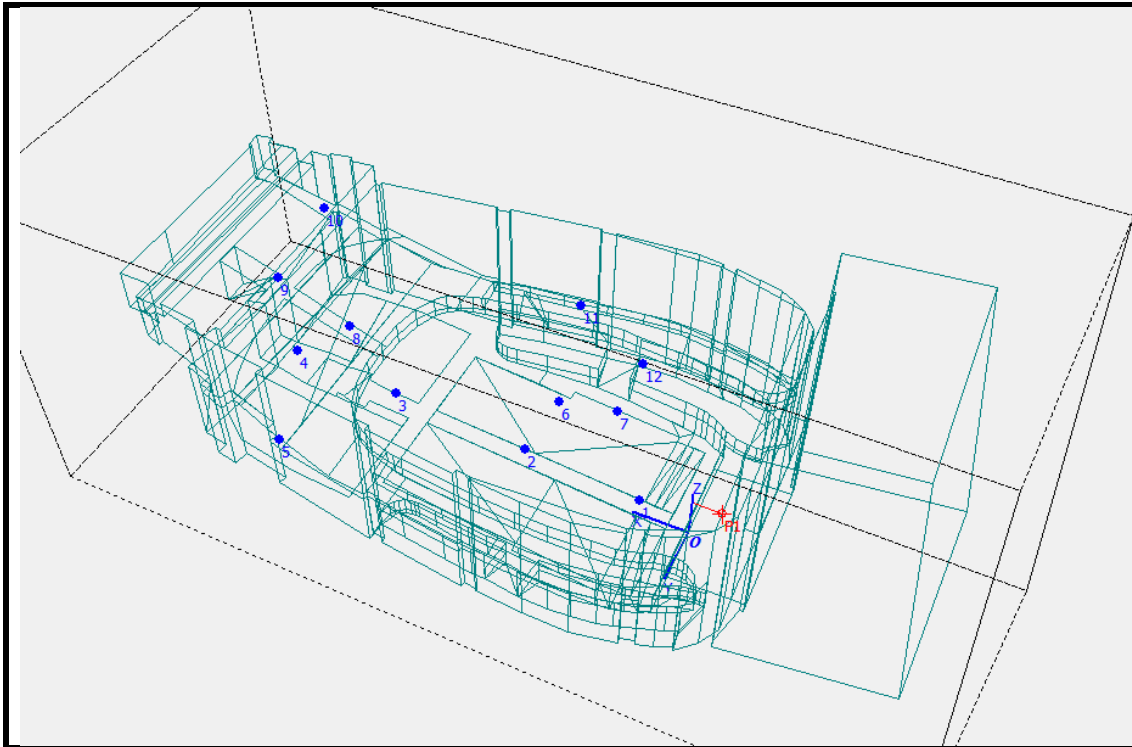
0,40

0,50

0,55



TEATRO OLYMPIA



Año de construcción: 1915

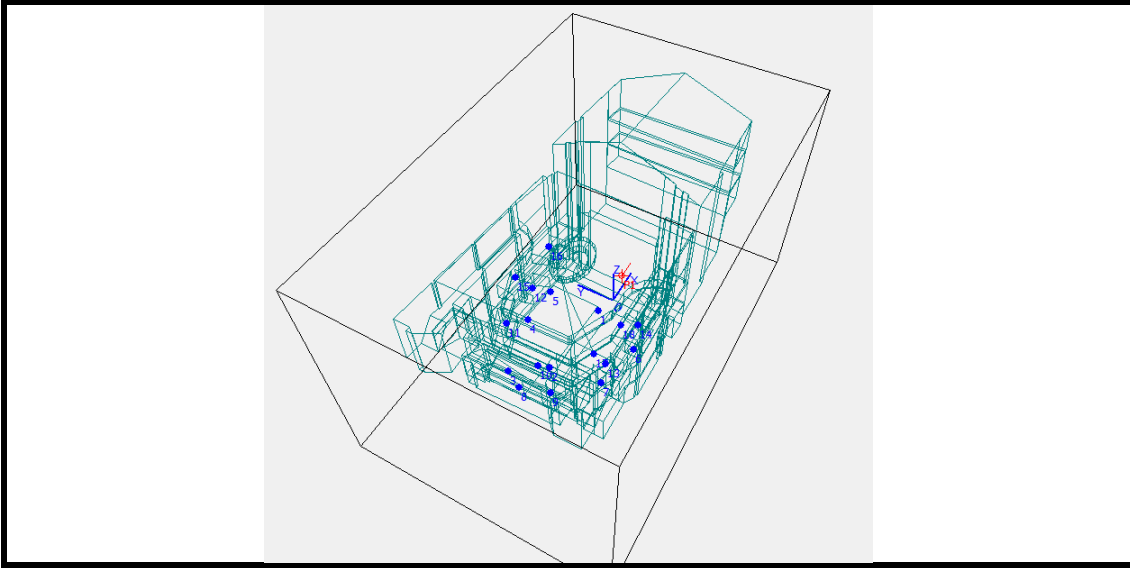
Teatro a la italiana

TR₃₀ mid Absorción de la boca de escena:

1,06 s.	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
---------	------	------	------	------	------	------



TEATRO TALÍA



Año de construcción: 1927

Teatro a la italiana

TR_{30 mid}

Absorción de la boca de escena:

1,41 s.

0,30

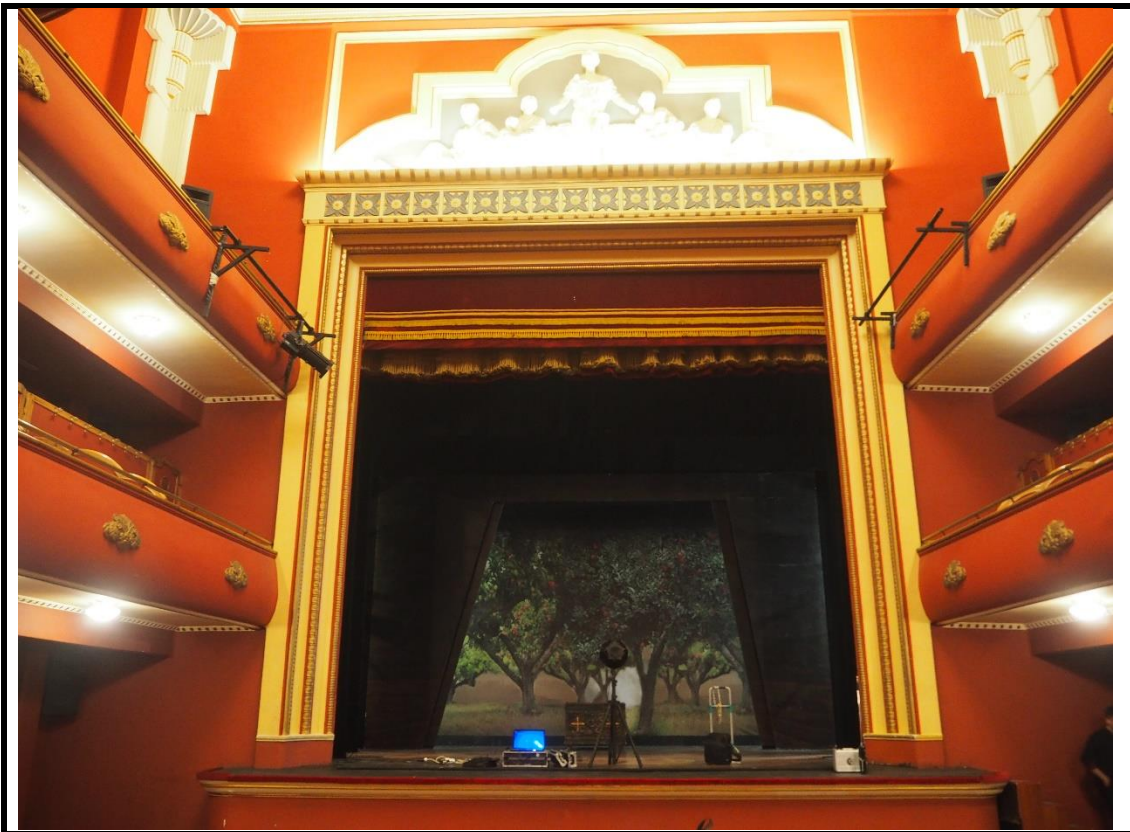
0,35

0,40

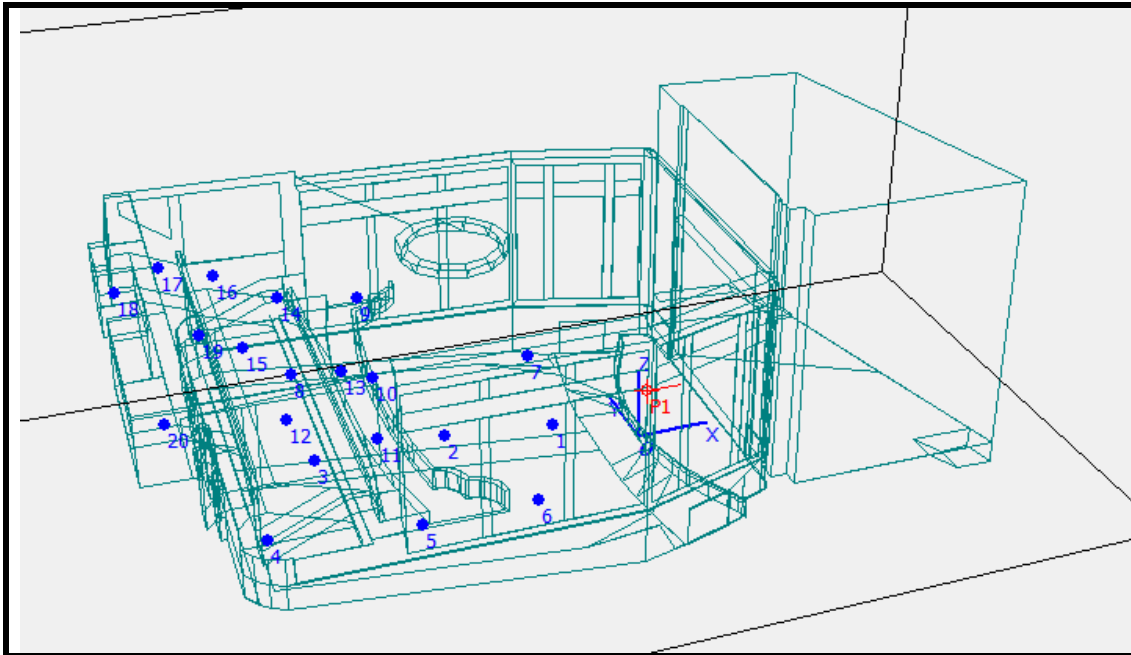
0,45

0,50

0,55



TEATRO DE LA BANDA PRIMITIVA DE LLÍRIA



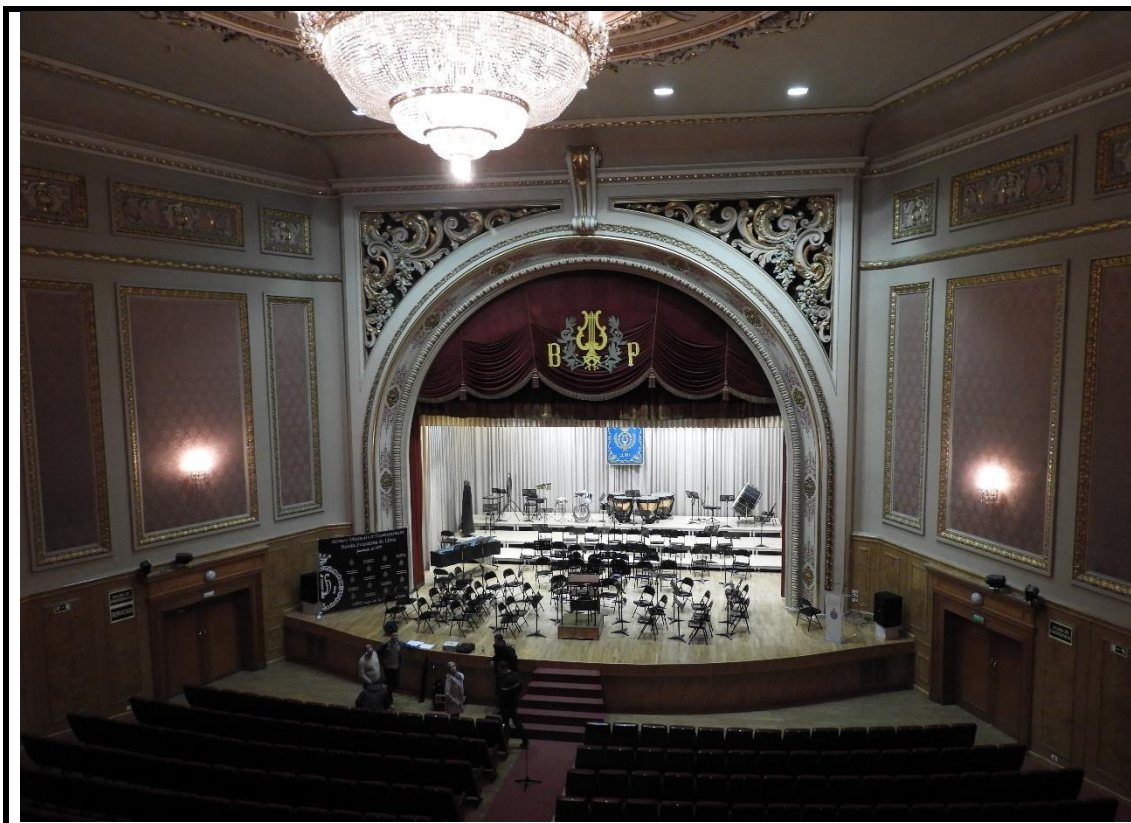
Año de construcción: 1951

Teatro con proscenio

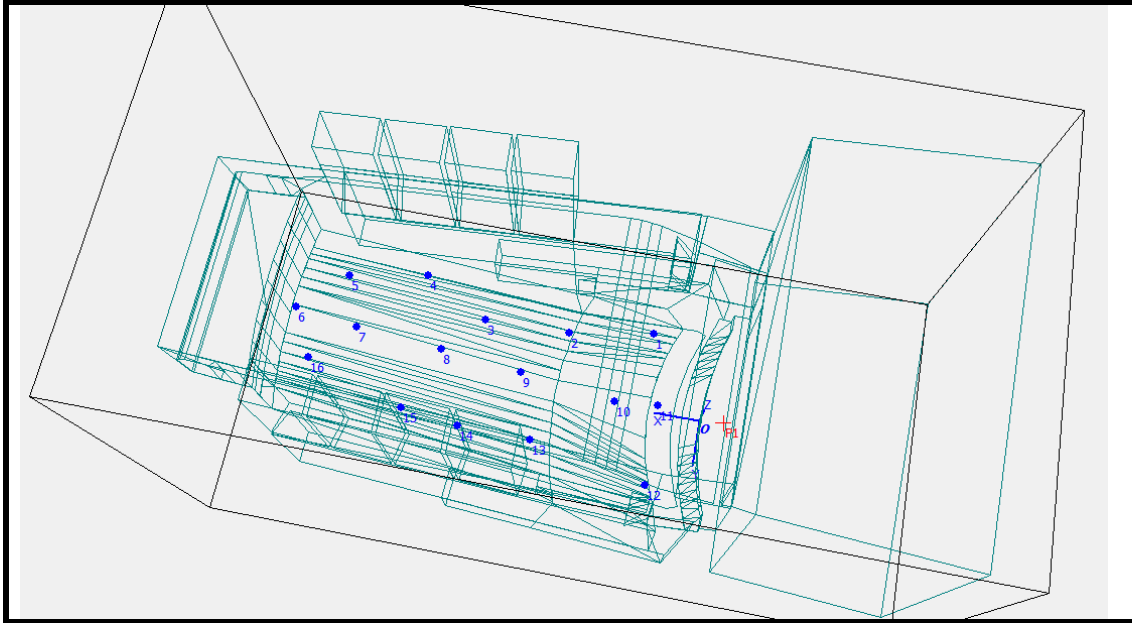
TR_{30 mid}
1,21 s.

Absorción de la boca de escena:

0,15 0,18 0,37 0,45 0,50 0,57



TEATRO EL MUSICAL



Año de construcción: 2004

Sala multifuncional

TR_{30 mid}

0,97 s.

Absorción de la boca de escena:

0,10

0,20

0,50

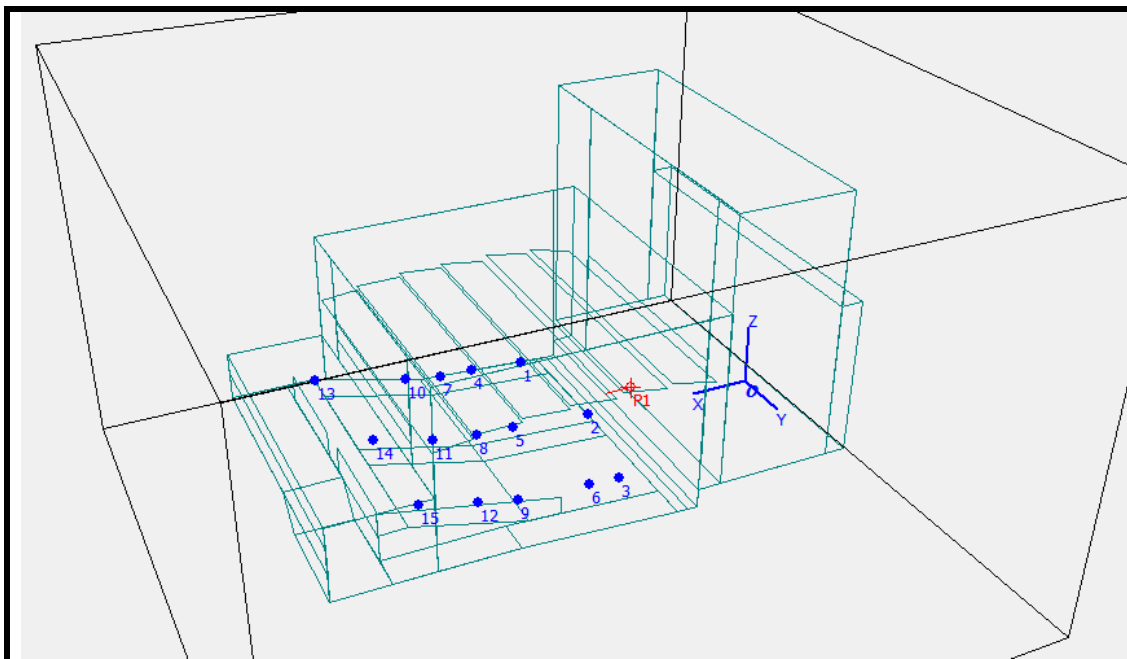
0,80

0,75

0,50



AUDITORIO ALFONS ROIG



Año de construcción: 2011

Sala multifuncional

TR_{30 mid}
1,20 s.

Absorción de la boca de escena:

0,10	0,20	0,40	0,60	0,60	0,50
------	------	------	------	------	------

