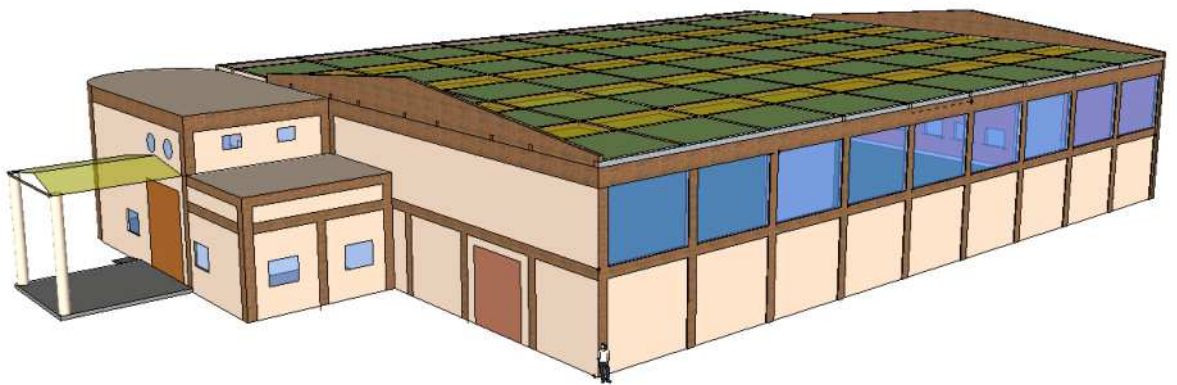


Proyecto Fin de Carrera

Refuerzo Sonoro

del Pabellón de Deportes

- Manín Larraz (Tauste, Zaragoza)-



Francisco Gabriel Rodríguez Suescun

Tutor: José Luis Sánchez Bote



Escuela Técnica Superior de Ingeniería
y Sistemas de Telecomunicación

Campus Sur

Universidad Politécnica de Madrid



PROYECTO FIN DE CARRERA PLAN 2000

E.T.S.I.S. TELECOMUNICACIÓN

TEMA: Electroacústica. Instalaciones de sonorización

TÍTULO: Refuerzo sonoro del pabellón de deportes -Manín Larraz (Tauste, Zaragoza)

AUTOR: Francisco Gabriel Rodríguez Suescun

TUTOR: José Luis Sánchez Bote

Vº Bº.

DEPARTAMENTO: DIAC

Miembros del Tribunal Calificador:

PRESIDENTE: Manuel López Vázquez

VOCAL: José Luis Sánchez Bote

VOCAL SECRETARIO: Juan José Gómez Alfageme

DIRECTOR:

Fecha de lectura: Julio 2014

Calificación:

El Secretario,

RESUMEN DEL PROYECTO:

Diseño y simulación del comportamiento acústico del recinto bajo estudio con el sistema refuerzo sonoro instalado.

En estas simulaciones se utilizarán varias herramientas de diseño para poder comparar resultados y así obtener una mejor sonorización del recinto.

Se llevarán a cabo varios diseños de sistemas de refuerzo sonoro para este recinto deportivo con el conocido programa de simulación sonora EASE, que incorpora sistemas de varias vías, filtros, etc. Otro software de simulación sonora a usar será EASE Focus, más intuitivo y principalmente enfocado a fuentes sonoras del tipo "arrays lineales", en dos dimensiones.

En cuanto al método y las fases de trabajo, inicialmente, será necesario obtener información del estado actual del mercado del sector de instalaciones de sonorización y las características que los eventos a realizar requieren de estos sistemas de refuerzo sonoro.

Se deberá a su vez estudiar los diferentes tipos de sistemas existentes (altavoces, procesadores, amplificadores...) a disposición de los técnicos de sonido.

Una vez recogida esta información, se procederá a diseñar y simular los sistemas de refuerzo sonoro elegidos con las mencionadas herramientas de simulación sonora EASE y EASE Focus.

A mi abuelo Pascual, por su genio, amor y nobleza en la misma gran
persona.

A mi abuela Gloria, siendo el cariño, la sabiduría y el esfuerzo aunado
en el cuerpo de mujer.

A mi tío Pascual y familia Suescun, por su dulce, alegre y correcta
forma de afrontar el día a día más gallurano que existe.

Y por supuesto a mis padres Kiko y Pilarín, que siguiendo pasos
semejantes, supieron elegir el camino de la constancia para, sin pasar
por encima de nadie, superar todo y poner a Jorge a mi lado.

Vosotros, puntazos, siempre estáis ahí.

Gracias

Resumen

Diseño y simulación del comportamiento acústico del recinto bajo estudio con el sistema refuerzo sonoro instalado.

El objeto de este proyecto fin de carrera es el de diseñar y simular el comportamiento acústico de un pabellón polideportivo con la instalación de un sistema de refuerzo sonoro adecuado a sus características arquitectónicas (y a los eventos a realizar).

En estas simulaciones se utilizarán varias herramientas de diseño para poder comparar resultados y así obtener una mejor sonorización del recinto.

Se llevarán a cabo varios diseños de sistemas de refuerzo sonoro para este recinto deportivo con el conocido programa de simulación sonora EASE, que incorpora sistemas de varias vías, filtros, etc. Otro software de simulación sonora a usar será EASE Focus, más intuitivo y principalmente enfocado a fuentes sonoras del tipo "arrays lineales", en dos dimensiones.

En cuanto al método y las fases de trabajo, inicialmente, será necesario obtener información del estado actual del mercado del sector de instalaciones de sonorización y las características que los eventos a realizar requieren de estos sistemas de refuerzo sonoro.

Se deberá a su vez estudiar los diferentes tipos de sistemas existentes (altavoces, procesadores, amplificadores...) a disposición de los técnicos de sonido.

Una vez recogida esta información, se procederá a diseñar y simular los sistemas de refuerzo sonoro elegidos con las mencionadas herramientas de simulación sonora EASE y EASE Focus.

Abstract

Design and simulation of the acoustic behavior of the enclosure/complex under study with installed sound reinforcement.

The purpose of this final project is to design and simulate the acoustic behavior of a sports arena with the installation of an adequate systems sound radiation to its architectural features (and events to be organised).

In these simulations several design tools to compare results and get a better sound enclosure shall be used.

Be carried out several designs of speaker systems for this sports arena known program EASE with sound simulation and tools that incorporates several avenues systems, filters, etc. Another sound simulation software using EASE Focus is very used professionally, more intuitive and mainly focused on sound sources groupings (clusters) of type "linear array", in one or more dimensions.

It must in turn studying different types of systems (loudspeakers, processors, amplifiers ...) available to the sound technicians.

Once collected this information, proceed to design and simulate the sound reinforcement systems chosen with sound simulation tools mentioned EASE and EASE Focus.

As for the method and the phases of work initially be necessary to obtain information on the current state of the sector sound systems and features that make the events of these systems require sound reinforcement market.

Índice

DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO	17
I INTRODUCCIÓN	17
<i>USO ACTUAL DE RECINTO BAJO ESTUDIO</i>	18
<i>ANÁLISIS DE LAS INSTALACIONES ACTUALES DE MEGAFONÍA</i>	21
<i>ARQUITECTURA DEL RECINTO</i>	25
<i>DESCRIPCIÓN DEL INTERIOR DEL RECINTO</i>	28
II CONCEPTOS PREVIOS. TEORÍA ACÚSTICA	31
<i>INTRODUCCIÓN A LA ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA</i>	31
<i>ACÚSTICA Y PSICOACÚSTICA</i>	32
<i>ZONAS ACÚSTICAS EN UN LOCAL. CAMPO DIRECTO Y CAMPO REVERBERANTE</i>	35
<i>TIEMPO DE REVERBERACIÓN "TR"</i>	37
<i>COEFICIENTE DE ABSORCIÓN SONORA "A"</i>	39
<i>TIPOS DE MATERIALES</i>	41
III TIPOS DE SISTEMAS DE REFUERZO SONORO	47
<i>SISTEMAS DISTRIBUIDOS</i>	47
<i>SISTEMAS CENTRALIZADOS</i>	47
<i>SISTEMAS SEMI-DISTRIBUIDOS</i>	49
<i>EL ARRAY DE ALTAVOCES</i>	50
IV CRITERIOS DE DISEÑO Y CONFIGURACIÓN	52
<i>REQUERIMIENTOS GENERALES</i>	52
<i>REQUERIMIENTOS ESPECÍFICOS</i>	53
<i>CRITERIOS DE INTELIGIBILIDAD</i>	54
<i>REALIMENTACIÓN ACÚSTICA</i>	58
V AMPLIFICACIÓN Y CONEXIONADO	59

DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL	63
VI MEDIDAS PREVIAS	63
<i>REVERBERACIÓN DEL RECINTO IN SITU</i>	63
<i>MATERIALES Y ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO</i>	67
VII HERRAMIENTAS DE DISEÑO INFORMÁTICO	81
VIII MODELADO DE RECINTO	91
<i>DISEÑO INICIAL</i>	94
<i>VALIDACIÓN DE MODELO. DIFERENCIA ENTRE REAL Y SIMULACIÓN. ABSORCIÓN Y TR.</i>	98
<i>POSIBLES CONFIGURACIONES DE SISTEMAS DE REFUERZO SONORO</i>	100
<i>OPCIONES DE LOCALIZACIÓN DE EMISORES</i>	101
<i>INCLUSIÓN DE MATERIAL FONOABSORBENTE</i>	104
<i>REPERCUSIÓN DEL NIVEL DE OCUPACIÓN</i>	107
<i>DISEÑOS FINALES PARA LA LOCALIZACIÓN DE EMISORES</i>	109
- <i>SISTEMA DISTRIBUIDO</i>	109
<i>SISTEMA DISTRIBUIDO. ELECCIÓN DE ALTAVOCES</i>	113
<i>SISTEMA DISTRIBUIDO. ECUALIZACIÓN Y FILTROS</i>	116
- <i>SISTEMA CENTRALIZADO: ARRAYS</i>	124
<i>SISTEMA CENTRALIZADO: ARRAYS. ELECCIÓN DE ALTAVOCES</i>	125
<i>SISTEMA CENTRALIZADO: ARRAYS. ECUALIZACIÓN Y FILTROS</i>	127
IX CÁLCULOS Y SIMULACIONES	131
<i>SIMULACIONES EN EASE PARA SISTEMA DISTRIBUIDO</i>	132
<i>EASE FOCUS PARA ARRAYS LINEALES</i>	134
<i>EASE GLL VIEWER PARA ARRAYS LINEALES</i>	135
<i>EASE 4.3 PARA ARRAYS LINEALES</i>	136
X RESULTADOS	139
- <i>SISTEMA DISTRIBUIDO</i>	139
- <i>SISTEMA DISTRIBUIDO: ARRAYS LINEALES</i>	145
<i>AURALIZACIONES</i>	150
<i>INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS. RENDIMIENTO DEL PROYECTO</i>	151
<i>MEJORAS</i>	153
XI PRESUPUESTO	159
BIBLIOGRAFÍA	161

Tabla de figuras e ilustraciones

FIGURA 1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LA LOCALIDAD DE TAUSTE Y FOTOGRAFÍA HISTÓRICA.....	17
FIGURA 2. PANORÁMICA Y ESCUDO DE LA VILLA DE TAUSTE	18
FIGURA 3. VISTA EXTERIOR DEL POLIDEPORTIVO MUNICIPAL DE TAUSTE.....	18
FIGURA 4. PISCINA CLIMATIZADA	19
FIGURA 5. VISTAS DE LA PISTA PRINCIPAL DEL POLIDEPORTIVO	19
FIGURA 6. ACTUAL SISTEMA DE MEGAFONÍA INSTALADO	21
FIGURA 7. VISTA DE INSTALACIONES ANEXAS EXTERIORES.....	22
FIGURA 8. EQUIPOS PORTÁTILES ALTERNATIVOS.....	23
FIGURA 9. PISTA INTERIOR Y VISTA DE CUBIERTA PRINCIPAL	24
FIGURA 10. PLANOS ORIGINALES DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POLIDEPORTIVO MUNICIPAL DE TAUSTE .	25
FIGURA 11. SUELO ANTIGUO	26
FIGURA 12. OBRAS DE REMODELACIÓN DE SUELO DE PISTA Y RESULTADO	26
FIGURA 13. ESTADO ACTUAL DE RECINTO PRINCIPAL DEL POLIDEPORTIVO.....	27
FIGURA 14. VISTA INTERIOR DEL POLIDEPORTIVO MUNICIPAL DE TAUSTE	28
FIGURA 15. VISTA DE “PISTA”	29
FIGURA 16. VISTA DE “GRADERÍO”	30
FIGURA 17. AUDITORIO	31
FIGURA 18. ESQUEMA DE RAYOS DEL SONIDO DIRECTO Y DOS REFLEXIONES R1 Y R2.	32
FIGURA 19. TIEMPOS DE RETARDO REPRESENTADOS EN ECOGRAMA.	32
FIGURA 20. REFLEXIONES EN UN RECINTO I.....	33
FIGURA 21 REFLEXIONES EN UN RECINTO II.....	33
FIGURA 22. CÁMARA REVERBERANTE NORMALIZADA (INSTITUTO TORRES QUEVEDO, MADRID).....	34
FIGURA 23. CAMPO DIRECTO Y CAMPO REVERBERANTE.....	35
FIGURA 24. SPL EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA	36
FIGURA 25. TIEMPO DE REVERBERACIÓN.....	37
FIGURA 26. TIEMPOS DE REVERBERACIÓN ÓPTIMOS EN A) ESTUDIOS DE VOZ, B) SALAS DE CONFERENCIAS, C) ESTUDIOS DE MÚSICA, D) SALAS DE CONCIERTOS Y E) IGLESIAS.....	38
FIGURA 27. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE UNA REFLEXIÓN CON LA DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍAS.....	39
FIGURA 28. MATERIALES RESONANTES.....	41
FIGURA 29. MATERIALES POROSOS	42
FIGURA 30. MATERIALES ABSORBENTES	43
FIGURA 31. ABSORBENTE O RESONADOR DE HELMHOLTZ	44
FIGURA 32. EJEMPLO DE MODIFICADORES EN MERCADO DE SAN ANTÓN (MADRID)	45
FIGURA 33. COLISEO ALFONSO PÉREZ (GETAFE) Y CIRCUITO DE VELOCIDAD DE ASSEN (HOLANDA).....	47
FIGURA 34. PABELLÓN DE C.B. GRAN CANARIA (LAS PALMAS DE GRAN CANARIA).....	48
FIGURA 35. SALA DE CINE	49
FIGURA 36. ARRAYS DE ALTAVOCES	50
FIGURA 37. ARRAYS DE ALTAVOCES EN EVENTO SIMILAR	51
FIGURA 38. AL CONS	55
FIGURA 39. STI	56
FIGURA 40. RASTI. EQUIPAMIENTO PARA MEDICIÓN IN SITU.....	57
FIGURA 41. REALIMENTACIÓN ACÚSTICA.....	58
FIGURA 42. BAJA IMPEDANCIA	60
FIGURA 43. AGRUPACIÓN ÓPTIMA EN BAJA IMPEDANCIA	60
FIGURA 44. LÍNEA DE ALTA IMPEDANCIA	61
FIGURA 45. PISTOLA ACÚSTICA.....	63

FIGURA 46. PROTECCIONES ACÚSTICAS	63
FIGURA 47. PUNTOS DE MEDIDA.....	64
FIGURA 48. POSICIÓN 5 Y 7 DE MICRÓFONO	64
FIGURA 49. CURVA DE TIEMPO DE REVERBERACIÓN MEDIDO IN SITU.....	65
FIGURA 50. TABLA DE VALORES DE TIEMPO DE REVERBERACIÓN	65
FIGURA 51. CURVA DE TIEMPO DE REVERBERACIÓN EN 500 HZ PARA POSICIÓN 2 DE MICRÓFONO	66
FIGURA 52. POSICIONES 3 Y 4 DE MICRÓFONO.....	66
FIGURA 53. TABLA DE MATERIALES UTILIZADOS.....	67
FIGURA 54. GRÁFICA DE MATERIALES UTILIZADOS	67
FIGURA 55. DETALLE FINO DE GRÁFICA DE MATERIALES UTILIZADOS	68
FIGURA 56. MODELO 3D DE POLIDEPORTIVO	91
FIGURA 57. INTERIOR DE MODELO 3D DE POLIDEPORTIVO	92
FIGURA 58. MODELO 3D EN SKETCHUP A EXPORTAR A EASE	93
FIGURA 59. MODELO 3D EN EASE IMPORTADO DE SKETCHUP	94
FIGURA 60. AJUSTE DE MATERIALES Y SU ABSORCIÓN	95
FIGURA 61. TR SEGÚN EYRING.....	96
FIGURA 62. TR SEGÚN SABINE	96
FIGURA 63. VALORES FINALES DE TIEMPO DE REVERBERACIÓN DEL RECINTO	97
FIGURA 64. VALIDACIÓN DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN DEL RECINTO	98
FIGURA 65. TABLA DE VALORES DE TIEMPO DE REVERBERACIÓN DEL RECINTO	99
FIGURA 66. VISTA DESDE <i>CLUSTER</i> CENTRAL.....	101
FIGURA 67. SITUACIÓN DE EMISORES DE SISTEMA DISTRIBUIDO.....	102
FIGURA 68. MAPA DE COBERTURA SPL_T DE SISTEMA DISTRIBUIDO.....	103
FIGURA 69. SOLAPAMIENTO DE ALTAVOCES DE SISTEMA DISTRIBUIDO	103
FIGURA 70. MATERIAL FONOABSORBENTE A INCLUIR EN MODELO EASE	104
FIGURA 71. IMÁGENES DE RECINTO CON MATERIAL FONOABSORBENTE	105
FIGURA 72. FICHA DE MATERIAL FONOABSORBENTE	106
FIGURA 73. MATERIAL ANÁLOGO A LA ABSORCIÓN QUE PRODUCE EL PÚBLICO EN PISTA.....	107
FIGURA 74. COMPARATIVA FINAL DE TIEMPOS DE REVERBERACIÓN	108
FIGURA 75. MODELO DISEÑADO PARA SISTEMA DISTRIBUIDO	109
FIGURA 76. TABLA DE EMISORES.....	110
FIGURA 77. VISTA DESDE EMISOR PORTERÍA	110
FIGURA 78. EMISOR DE PISTA.....	111
FIGURA 79. EMISOR DE GRADERÍO.....	111
FIGURA 80. TABLA DE EMISORES INSTALADOS EN PROYECTO.....	112
FIGURA 81. FACTOR $8T$	113
FIGURA 82. CARACTERÍSTICAS FACTOR $8T$	113
FIGURA 83. DIMENSIONES FACTOR $8T$	114
FIGURA 84. AMPLIFICADOR FACTOR $8T$	114
FIGURA 85. BIDRIVER PLUS T	115
FIGURA 86. DIMENSIONES BIDRIVER PLUS T	115
FIGURA 87. AMPLIFICADOR BIDRIVER PLUS T	115
FIGURA 88. MODELO DE SISTEMA DISTRIBUIDO.....	116
FIGURA 89. RECUBRIMIENTO INICIAL DE ZONA DE PISTA PARA EL SPL_T CON SISTEMA DISTRIBUIDO	116
FIGURA 90. RECUBRIMIENTO INICIAL DE ZONA DE GRADAS PARA EL SPL_T CON SISTEMA DISTRIBUIDO	117
FIGURA 91. ESPECTRO INICIAL. SPL_T EN CENTRO_GRADA CON SISTEMA DISTRIBUIDO.....	117
FIGURA 92. AJUSTES DE FACTOR $8T$ I.....	118
FIGURA 93. AJUSTES DE FACTOR $8T$ II TRAS LA INSERCIÓN DEL FILTRO	118
FIGURA 94. ESPECTRO FINAL. SPL_T EN CENTRO_GRADA CON SISTEMA DISTRIBUIDO	119

FIGURA 95. RECUBRIMIENTO FINAL DE ZONA DE GRADAS PARA EL SPL _T CON SISTEMA DISTRIBUIDO..	119
FIGURA 96. ECUALIZACIÓN DE FACTOR 8T	120
FIGURA 97. 3D MAPPING DE SPL _T PARA GRADAS CON SISTEMA DISTRIBUIDO	120
FIGURA 98. ESPECTRO INICIAL. SPL _T EN CENTRO CON SISTEMA DISTRIBUIDO	121
FIGURA 99. AJUSTES DE PLUS T I	121
FIGURA 100. AJUSTES DE BIDRIVER PLUS T II TRAS LA INSERCIÓN DEL FILTRO.....	122
FIGURA 101. ESPECTRO FINAL. SPL _T EN CENTRO CON SISTEMA DISTRIBUIDO.....	122
FIGURA 102. RECUBRIMIENTO FINAL DE ZONA DE PISTA PARA EL SPL _T CON SISTEMA DISTRIBUIDO	122
FIGURA 103. ECUALIZACIÓN DE BIDRIVER PLUS T	123
FIGURA 104. 3D MAPPING DE SPL _T PARA PISTA CON SISTEMA DISTRIBUIDO	123
FIGURA 105. OPCIÓN ALTERNATIVA DE ARRAYS.....	124
FIGURA 106. MODELO EVENT 208A.....	125
FIGURA 107. ARMARIOS CON PROCESADORES PARA ARRAYS LINEALES	125
FIGURA 108. CARACTERÍSTICAS Y DIMENSIONES EVENT 208A	126
FIGURA 109. SITUACIÓN DE ARRAYS LINEALES EN EL RECINTO	127
FIGURA 110. RECUBRIMIENTO INICIAL DE RECINTO PARA EL SPL _T CON SISTEMAS DE ARRAYS LINEALES	127
FIGURA 111. SPL _T INICIAL EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA. OYENTE “CENTRO” PARA SISTEMA DE ARRAYS LINEALES	128
FIGURA 112. AJUSTES DE ARRAYS LINEALES I.....	128
FIGURA 113. AJUSTES DE ARRAYS LINEALES I.....	129
FIGURA 114. SPL _T FINAL EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA. OYENTE “CENTRO” PARA SISTEMA DE ARRAYS LINEALES.....	129
FIGURA 115. RECUBRIMIENTO FINAL DE RECINTO PARA EL SPL _T CON SISTEMA DE ARRAYS LINEALES..	130
FIGURA 116. ECUALIZACIÓN DE SISTEMA DE ARRAYS LINEALES	130
FIGURA 117. 3D MAPPING DE SPL _T CON SISTEMA DE ARRAYS LINEALES	130
FIGURA 118. PROPUESTAS DE CONFIGURACIÓN.....	131
FIGURA 119. SITUACIÓN FINAL DE LOS ALTAVOCES PARA SISTEMA DISTRIBUIDO	132
FIGURA 120. RECUBRIMIENTO DE PISTA SEGÚN EL SPL _D	132
FIGURA 121. RECUBRIMIENTO DE PISTA SEGÚN EL SPL _T	133
FIGURA 122. SPL _T EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA PARA EL OYENTE “CENTRO” Y PROMEDIO.....	133
FIGURA 123. AJUSTE Y CONFIGURACIÓN DE ARRAY LINEAL EN EASE FOCUS V2.2	134
FIGURA 124. ASPECTO DE ARRAY LINEAL DISEÑADO Y ATENUACIÓN.....	135
FIGURA 125. SENSIBILIDAD DE ARRAY LINEAL DISEÑADO	135
FIGURA 126. COBERTURA HORIZONTAL Y VERTICAL DE ARRAY LINEAL DISEÑADO	135
FIGURA 127. SITUACIÓN DE ARRAYS LINEALES EN EL RECINTO	136
FIGURA 128. 3D MAPPING DE SPL _T CON SISTEMA CENTRALIZADO DE ARRAYS	136
FIGURA 129. RECUBRIMIENTO DE RECINTO PARA EL SPL _T CON SISTEMAS DE ARRAYS LINEALES	137
FIGURA 130. SPL _T EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA. OYENTE “CENTRO” PARA ARRAYS LINEALES	137
FIGURA 131. SPL _T EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA. OYENTE “CENTRO_GRADA” PARA ARRAYS LINEALES	137
FIGURA 132. NOMENCLATURA DE ALTAVOCES DEL RECINTO.....	139
FIGURA 133. NOMENCLATURA Y SITUACIÓN DE OYENTES DEL RECINTO	139
FIGURA 134. SPL _T (SIST. DISTRIBUIDO). RECUBRIMIENTO DE AUDIENCIAS Y NIVEL EN OYENTES	140
FIGURA 135. ALCONS% (SIST. DISTRIBUIDO). RECUBRIMIENTO DE AUDIENCIAS Y VALORACIÓN	141
FIGURA 136. STI (SIST. DISTRIBUIDO). RECUBRIMIENTO DE AUDIENCIAS Y VALORACIÓN	141
FIGURA 137. OYENTE SITUADO EN EL CENTRO DE LA PISTA	142
FIGURA 138. OYENTE SITUADO EN EL CENTRO DE LAS GRADAS	142
FIGURA 139. ECOGRAMA EN PUNTO CENTRAL DE PISTA.....	143

FIGURA 140. ECOGRAMA EN PUNTO CENTRAL DE GRADA	144
FIGURA 141. NOMENCLATURA DE ALTAVOCES DEL RECINTO.....	145
FIGURA 142. NOMENCLATURA Y SITUACIÓN DE OYENTES DEL RECINTO	145
FIGURA 143. SPL_T (ARRAY). RECUBRIMIENTO DE AUDIENCIAS Y NIVEL EN OYENTES	146
FIGURA 144. ALCONS% (ARRAY). RECUBRIMIENTO DE AUDIENCIAS Y VALORACIÓN	147
FIGURA 145. STI (ARRAY). RECUBRIMIENTO DE AUDIENCIAS Y VALORACIÓN	147
FIGURA 146. OYENTE SITUADO EN EL CENTRO DE LA PISTA	148
FIGURA 147. OYENTE SITUADO EN EL CENTRO DE LAS GRADAS	148
FIGURA 148. ECOGRAMA EN CENTRO DE LA PISTA.....	149
FIGURA 149. ECOGRAMA EN CENTRO DE LA GRADA	149
FIGURA 150. AURALIZACIONES (EJEMPLO PARA SISTEMA DISTRIBUIDO).....	150
FIGURA 151. CONFIGURACIÓN DE AURALIZACIONES.....	150
FIGURA 152. MODELO DE SISTEMA CENTRALIZADO, EN LAS DOS CONFIGURACIONES POSIBLES.....	153
FIGURA 153. ECUALIZADOR GRÁFICO.....	155
FIGURA 154. UNIDAD DE CD/USB	155
FIGURA 155. EJEMPLOS DE SISTEMAS DE MICROFONÍA INALÁMBRICA	156
FIGURA 156. LIMITADOR DE NIVELES SONOROS EMITIDOS	157
FIGURA 157. PRESUPUESTO PARA SISTEMA DISTRIBUIDO	160
FIGURA 158. PRESUPUESTO PARA SISTEMA DE ARRAYS LINEALES	160

Resumen

Diseño y simulación del comportamiento acústico del recinto bajo estudio con el sistema refuerzo sonoro instalado.

El objeto de este proyecto fin de carrera es el de diseñar y simular el comportamiento acústico de un pabellón polideportivo con la instalación de un sistema de refuerzo sonoro adecuado a sus características arquitectónicas (y a los eventos a realizar).

En estas simulaciones se utilizarán varias herramientas de diseño para poder comparar resultados y así obtener una mejor sonorización del recinto.

Se llevarán a cabo varios diseños de sistemas de refuerzo sonoro para este recinto deportivo con el conocido programa de simulación sonora EASE, que incorpora sistemas de varias vías, filtros, etc. Otro software de simulación sonora a usar será EASE Focus, más intuitivo y principalmente enfocado a fuentes sonoras del tipo "arrays lineales", en dos dimensiones.

En cuanto al método y las fases de trabajo, inicialmente, será necesario obtener información del estado actual del mercado del sector de instalaciones de sonorización y las características que los eventos a realizar requieren de estos sistemas de refuerzo sonoro.

Se deberá a su vez estudiar los diferentes tipos de sistemas existentes (altavoces, procesadores, amplificadores...) a disposición de los técnicos de sonido.

Una vez recogida esta información, se procederá a diseñar y simular los sistemas de refuerzo sonoro elegidos con las mencionadas herramientas de simulación sonora EASE y EASE Focus.

Abstract

Design and simulation of the acoustic behavior of the enclosure/complex under study with installed sound reinforcement.

The purpose of this final project is to design and simulate the acoustic behavior of a sports arena with the installation of an adequate systems sound radiation to its architectural features (and events to be organised).

In these simulations several design tools to compare results and get a better sound enclosure shall be used.

Be carried out several designs of speaker systems for this sports arena known program EASE with sound simulation and tools that incorporates several avenues systems, filters, etc. Another sound simulation software using EASE Focus is very used professionally, more intuitive and mainly focused on sound sources groupings (clusters) of type "linear array", in one or more dimensions.

It must in turn studying different types of systems (loudspeakers, processors, amplifiers ...) available to the sound technicians.

Once collected this information, proceed to design and simulate the sound reinforcement systems chosen with sound simulation tools mentioned EASE and EASE Focus.

As for the method and the phases of work initially be necessary to obtain information on the current state of the sector sound systems and features that make the events of these systems require sound reinforcement market.

Alcance

El objeto de este Proyecto Fin de Carrera es el de diseñar y simular el comportamiento acústico de un pabellón polideportivo con la instalación de un sistema de refuerzo sonoro adecuado a sus características arquitectónicas.

Concretamente se toma como recinto la pista interior del complejo polideportivo de Tauste.

Se propondrá la instalación de un sistema de mayor calidad y modernidad técnica, que supla al obsoleto sistema y sea adecuado para los eventos que en este recinto se van a desarrollar.

Para ello, se diseñará un modelo acústico del polideportivo, utilizando el programa de simulación acústica de salas EASE versión 4.3, a partir de los planos arquitectónicos y de los datos constructivos recabados.

Las mediciones acústicas realizadas in situ servirán para determinar el comportamiento acústico del recinto y se procederá mediante la comparación de resultados a la validación del modelo diseñado.

Con el modelo acústico validado, se propondrán las soluciones oportunas sobre el entorno del recinto y sobre el sistema de refuerzo sonoro, con el objeto de adecuar las características del campo sonoro. Se buscará conseguir una óptima transmisión del sonido en todos los actos, sea cual sea la naturaleza de los eventos que en este polideportivo municipal se realicen, para todos los puntos de las audiencias introducidas que serán valoradas.

Finalmente, se mostrarán los resultados obtenidos y las posibilidades de llevar a cabo cada una de las opciones propuestas.

PLAN DE DESARROLLO

El desarrollo de este proyecto se realiza en fases diferenciadas:

a) Recogida de información, toma de dimensiones y modelado de recinto de Polideportivo Municipal de Tauste.

En primer lugar, se diseña el modelo que se utiliza para la validación de la simulación, es decir, el polideportivo. Este modelo elaborado en 3D (en este caso con el software SketchUp - <http://www.sketchup.com/es->) es la base arquitectónica introducida en el programa EASE para ejecutar las simulaciones que estimemos oportunas. El modelado consiste en la programación, según las especificaciones de EASE, de los datos geométricos necesarios para definir el recinto.

b) Valoraciones del sistema de refuerzo sonoro - megafonía actual.

En este apartado se procederá a la revisión del estado y valoración de la validez del sistema de megafonía actualmente instalado en el polideportivo. Se verá la posible compatibilidad o no de la instalación existente con la propuesta que se vaya a realizar.

c) Realización de medidas acústicas in situ para la valoración inicial de la sala.

Paralelamente al modelado de la sala, se realiza una serie de medidas acústicas (Tiempo de Reverberación), que siguen las especificaciones de los estándares ISO actualmente en uso. Con las medidas que se obtienen se realiza la posterior comparación con los resultados de la simulación realizada con EASE.

d) Comparación de resultados de simulaciones y medidas acústicas para validar el modelo.

Una vez preparado y ajustado el modelo geométrico del polideportivo para la simulación acústica, se configura el escenario acústico (audiencias) que consideramos conveniente.

Con los resultados de las simulaciones del Tr del recinto, se procede a la validación de las mismas, comparando los resultados de la simulación con los valores teóricos óptimos y las medidas obtenidas, evaluando cualitativamente el comportamiento acústico del polideportivo.

e) Predicción de la acústica del recinto.

Mediante un análisis objetivo de los parámetros acústicos obtenidos tras la simulación inicial, se predice el comportamiento acústico del polideportivo, con el objetivo de tenerlo en cuenta a la hora de escoger la opción de sistema de refuerzo sonoro. Se valora la instalación de material fonoabsorbente que mejore la acústica del recinto.

f) Propuesta de sistema de refuerzo sonoro – megafonía para el recinto bajo estudio.

Se propondrá la opción (u opciones en este caso) de sistema de refuerzo sonoro que resulte más adecuada para el propósito del proyecto. No solo para el PFC que este texto representa sino también, ajustándose a la realidad: en el sentido de tener posibilidades de ser ejecutado, instalado y soportado, tanto en el sentido técnico como económico.

g) Interpretación de resultados. Conclusiones

Con los resultados de las simulaciones y las auralizaciones, se concluye con una valoración del comportamiento acústico del polideportivo, para cada una de las opciones propuestas.

h) Presupuesto

Se desglosan los diferentes elementos que componen la instalación del sistema de refuerzo sonoro. Desde el altavoz hasta los medios necesarios para la instalación.

ESTRUCTURA DEL PFC. CONTENIDO DE LA MEMORIA

A partir de la Introducción, las anteriores fases se plasman en esta memoria, dividiéndose en tres grandes bloques, además de la introducción:

I. Descripción del entorno:

Capítulo 1: Introducción: En este capítulo se hace una breve reseña a la historia de la localidad. Se presenta el recinto objeto de estudio en este PFC y se describen las diferentes áreas o espacios usados en el recinto y sus peculiaridades arquitectónicas.

II. Conceptos previos. Teoría Acústica:

Capítulo 2: Introducción a la Acústica Arquitectónica. Estudio de las peculiaridades de la propagación del sonido en el interior de un recinto y de la percepción humana del mismo.

Capítulo 3: Tipos de sistemas de refuerzo sonoro: Se resumen y ejemplifican los diferentes sistemas de refuerzo sonoro que, más a menudo, son instalados en recintos deportivos.

Capítulo 4: Criterios de diseño. Requerimientos generales y específicos

Capítulo 5: Amplificación y conexionado: Se explica el método de conexionado e instalación de megafonía en alta impedancia.

III. Descripción experimental:

Capítulo 6: Medidas previas. Análisis acústico de la reverberación del recinto realizada in situ y descripción de los principales materiales que conforman la arquitectura del polideportivo y los efectos que éstos y la geometría del recinto tienen sobre su acústica.

Capítulo 7: Herramientas de modelado informático. SketchUp y EASE.

Capítulo 8: Modelado de recinto: Se crea el recinto mediante modelado 3D en SketchUp para su posterior simulación acústica en EASE. Se asigna absorción a cada material y según los tiempos de reverberación se valida el modelo.

Elección de sistema de refuerzo sonoro, introducción y ajuste de emisores en modelo acústico.

Introducción/instalación de material fonoabsorbente en paneles de cubierta, simulación de público en recinto, etc. Repercusión del nivel de ocupación del polideportivo sobre sus condiciones acústicas.

Ecuación de los emisores de los diferentes sistemas.

Capítulo 9: Cálculo y simulaciones. Se calculan los parámetros acústicos objetivos necesarios para el correcto funcionamiento del sistema de refuerzo sonoro y del conjunto sistema de refuerzo sonoro + respuesta del recinto.

Capítulo 10: Resultados. Plasmar resultados según EASE. Ecogramas y comprobación de la necesidad de instalar retardos, auralización, interpretación de resultados, rendimiento del proyecto, valoración técnica de proyecto total.

Capítulo 11: Presupuesto. Costes, costes de instalación y montaje.

IV. Anexos:

Bibliografía

CONTENIDO DEL CD

El contenido del CD consta de los siguientes ficheros:

1. Resumen del proyecto en castellano: (resumen.pdf)
2. Resumen del proyecto en inglés: (abstract.pdf)
3. Memoria del PFC: (memoria.pdf)
4. Proyectos EASE
5. Auralizaciones
7. Hojas de catálogo del equipamiento propuesto

Descripción del entorno

I Introducción

Tauste es una localidad aragonesa situada en la provincia de Zaragoza. Localizada en pleno valle del Ebro y con unos 7000 habitantes, se caracteriza por la agricultura que sostiene la economía, por la tradición y la cultura de sus gentes.



Figura 1. Localización geográfica de la localidad de Tauste y fotografía histórica

Es una villa de tamaño medio, con municipios cercanos más pequeños y con menores recursos en cuanto a infraestructuras o instalaciones. Es por esto que cantidad de vecinos de otras localidades acuden a Tauste a estudiar, realizar entrenamientos en el polideportivo, disputar competiciones, etc.



Figura 2. Panorámica y escudo de la villa de Tauste

Uso actual de recinto bajo estudio

Es una instalación muy completa entre los servicios disponibles en Tauste. El complejo polideportivo dispone de una renovada pista de fútbol sala a la altura de la que tiene cualquier club de alta competición; y es adaptable para balonmano obviamente, baloncesto, voleibol, etc.



Figura 3. Vista exterior del polideportivo municipal de Tauste

También cuenta con tres pistas rápidas de tenis, frontón, pista de atletismo, piscina climatizada y rocódromo.



Figura 4. Piscina climatizada

Con estas instalaciones se consigue mover al público más fácilmente y apoyándose en el deporte se convierte en punto de encuentro. Ya sea para partidos de la liga de futbol sala como competiciones o la celebración del exitoso Open de Tenis Villa de Tauste.



Figura 5. Vistas de la pista principal del polideportivo

El sistema de megafonía está diseñado e instalado para emergencias y no tiene posibilidad de reproducir música u otras opciones para eventos (deportivos o de otro ámbito) en directo.

Además de ser el autor de este Proyecto Fin de Carrera y residir en esta localidad, en los últimos tiempos se ha hecho notable la falta de un recinto adecuado para la celebración de actos en los que la reproducción sonora es fundamental.

La comisión de festejos, ayuntamientos y otros grupos que se dedican a la animación del pueblo se encuentran con el problema de no disponer de un local adecuado donde albergar eventos importantes. Siendo este problema doble ya que el alquiler o contratación de una carpa o similares soluciones suponen un porcentaje importante de los presupuestos que se manejan. No se conocen con suficiente certeza las posibilidades de llevar a cabo este proyecto en los tiempos actuales pero desde luego se va a realizar con la mayor seriedad posible.

A partir de datos tomados mediante mediciones in situ, con todos los ajustes o configuraciones de las simulaciones siendo iguales, o todo lo similares que se ha conseguido, a la realidad. Los equipos usados se encuentran en el mercado y existen equipos análogos de otras casas comerciales; son equipos habituales en el mundo del sonido profesional.

Análisis de las instalaciones actuales de megafonía

Esta pista polideportiva cuenta con un simple sistema de megafonía de emergencia y no tiene posibilidad de reproducir música o la voz de un posible narrador - presentador de eventos que se encuentre en pista.



Figura 6. Actual sistema de megafonía instalado

La existencia de un sistema de refuerzo sonoro ayuda a mejorar los ambientes en recintos de este tipo, fomentando el interés del público por los eventos.

Los asistentes estarán mejor informados de las actividades o competiciones que puedan tener lugar en la pista principal. Además de la interacción de los deportistas (o protagonistas de otros eventos) con el público asistente, y viceversa.

En la parte exterior del complejo polideportivo, se dispone de varios emisores similares.



Figura 7. Vista de instalaciones anexas exteriores

En la actualidad y para las ocasiones que se requiere de un sistema de reproducción sonora para música o eventos en directo con narrador, se hace uso de un sistema de dos altavoces portátiles, propiedad del ayuntamiento municipal. Pero el inconveniente que se presenta es que resulta escaso para cierto volumen de público, además de poder resultar ininteligible en algunos puntos de las audiencias.



Figura 8. Equipos portátiles alternativos

La inteligibilidad será un tema a tratar más adelante ya que se trata de un recinto con mucho eco o reverberación debido a su geometría (el recinto tiene un gran volumen y todos los lados son paralelos) y materiales reflectantes/poco absorbentes del sonido, principalmente los de cubierta y suelo.

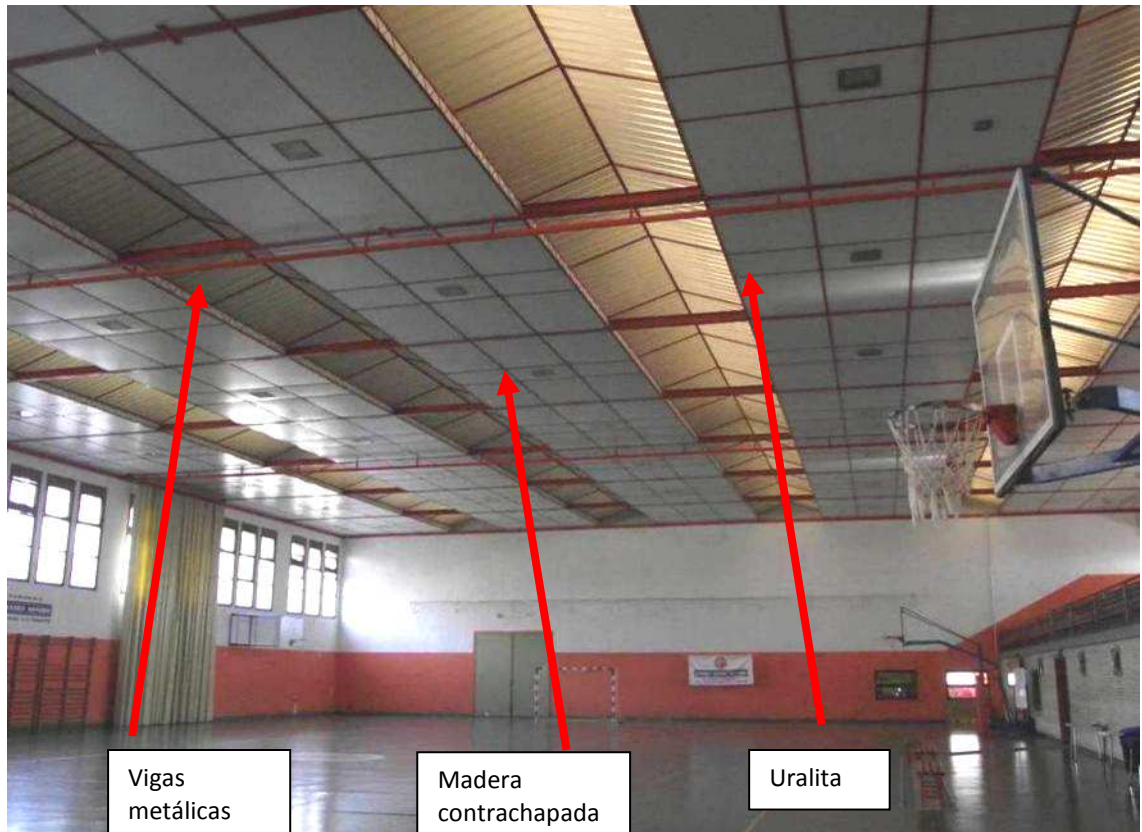


Figura 9. Pista interior y vista de cubierta principal

Por este motivo es conveniente realizar un estudio exhaustivo de diseño previo tratando de evitar sistemas o distribuciones de los mismos que provoquen una mala respuesta de la sala y por tanto una mala recepción de sonido en los oyentes, o incluso errores de deportistas en el caso de competiciones.

Se valoran varias configuraciones o presupuestos de sistemas de refuerzo sonoro, desgranando ventajas e inconvenientes de cada una de las propuestas, y concluyendo con la opción más recomendable, según los propósitos marcados.

Arquitectura del recinto

Los planos originales del polideportivo municipal han sido cedidos por el departamento de urbanismo del Ayuntamiento de la villa de Tauste para llevar a cabo este proyecto y de la misma forma, me comprometo a facilitar resultados del Proyecto Fin de Carrera descrito en esta memoria al mismo. Si finalmente llegará a ejecutarse el proyecto se colaborará conjuntamente para instalar el sistema de forma óptima y se podrán estudiar propuestas alternativas de configuración, potencia, presupuestos, etc.

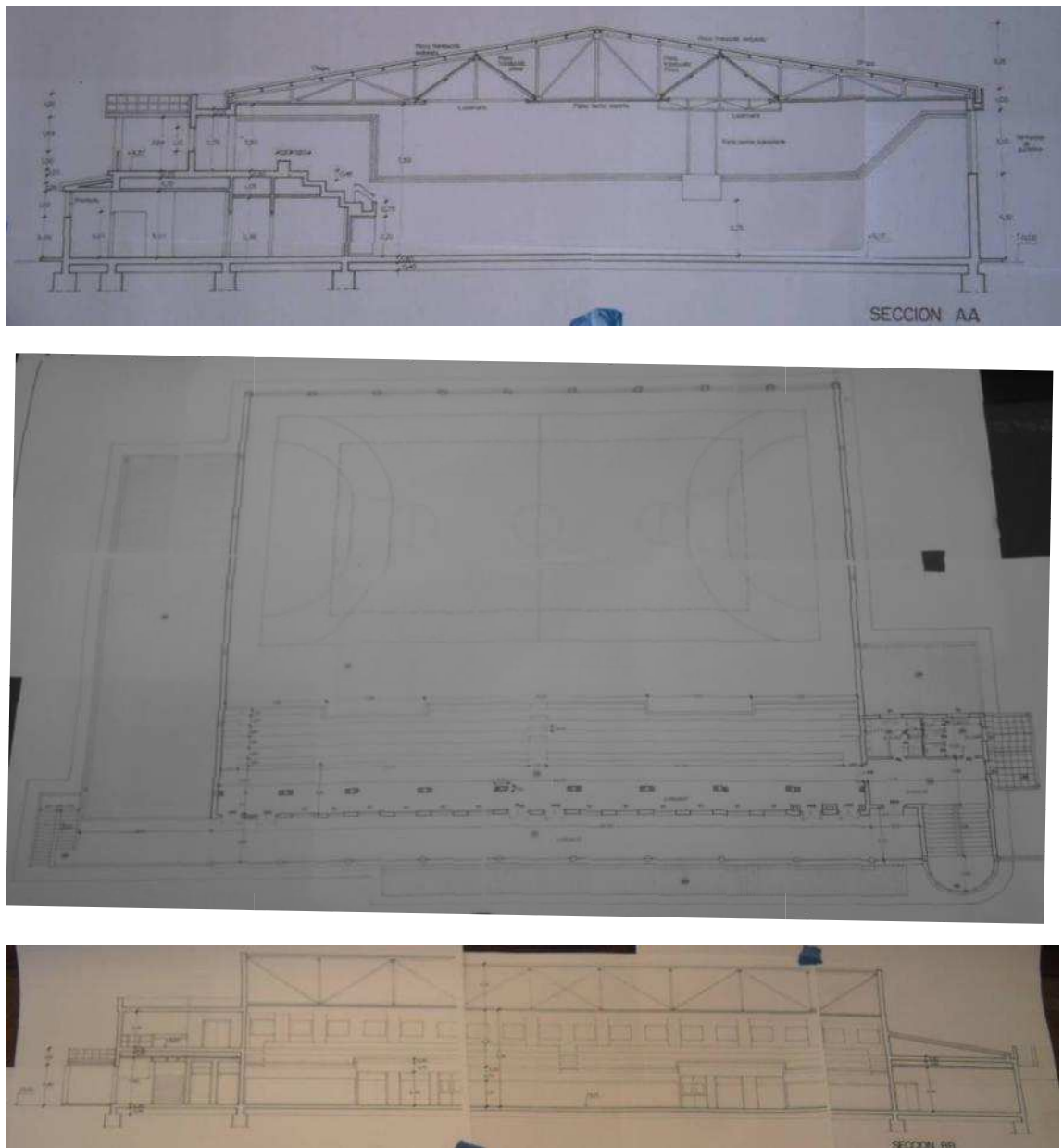


Figura 10. Planos originales de la construcción del polideportivo municipal de Tauste

En verano de 2012 se llevaron a cabo obras de remodelación en la pista interior. Actualmente tiene un acabado en parquet, y es la configuración que se mantendrá en todas las simulaciones, cálculos o resultados que en este proyecto se incluyen.

Estado anterior



Figura 11. Suelo antiguo

Ejecución de obras



Figura 12. Obras de remodelación de suelo de pista y resultado

Estado actual



Figura 13. Estado actual de recinto principal del polideportivo

Descripción del interior del recinto

En este apartado se van a describir las diversas áreas o sectores del polideportivo, centrándose en las zonas que serán útiles para el propósito de este proyecto.

Estas zonas útiles deben ser tanto las zonas de audiencia como las superficies que permitan pensar en la instalación de los diferentes diseños de sistemas de refuerzo sonoro. Hay varias limitaciones:

La cubierta está sustentada por un entramado de vigas metálicas y con una composición mixta de paneles y lucernarios. En cuanto a la cubierta se descarta instalar, por cuestión de cargas, un *cluster* central que pueda ser demasiado pesado.



Figura 14. Vista interior del polideportivo municipal de Tauste

En cuanto a los paramentos verticales, hay mucha superficie pero uno de los laterales largos tiene a la audiencia y el otro cuenta con una serie de ventanales a cierta altura, por lo que hay espacio, aunque se deben tener en cuenta estas limitaciones. También hay una importante área ocupada por las cortinas de sectorización, a evitar.

En cuanto a las superficies útiles, se refiere también a la contabilización de las posibles zonas de audiencia en las que dar cobertura de sonido, y consecuentemente con necesidad de instalación y servicio del sistema de refuerzo sonoro que se diseñe.

Principalmente se encuentra la pista interior. Con el tamaño de un campo de fútbol sala más los amplios espacios perimetrales, se convierte en la más importante área de audiencia a cubrir en cuestión de superficie.

A partir de ahora: *“Pista”*



Figura 15. Vista de “pista”

Son un total de **1313,625 m²**

Por otro lado se encontraría el graderío, la parte del público sentado en un concierto o el total del público asistente en cualquier otro acto tipo deportivo, comercial, etc.

A partir de ahora: “Graderío”



Figura 16. Vista de “graderío”

Son un total de $45,21 \text{ m}^2 + 90,42 \text{ m}^2 + 45,21 \text{ m}^2 = \mathbf{180,84 \text{ m}^2}$

II Conceptos previos. Teoría acústica

Introducción a la acústica arquitectónica

La acústica arquitectónica es la parte de la arquitectura (y los materiales empleados) que tiene en cuenta el comportamiento acústico de éstos y la sensación que se produce en el interior del recinto. Se diferencian dos áreas específicas:

- **Aislamiento acústico:** Sonido no deseado que debe ser atenuado. Aquellos sonidos generados en el interior de un local, que son percibidos desde el exterior, o la transmisión al interior de ruidos ajenos al local a través de los diferentes cerramientos.
- **Tratamiento acústico:** Los recintos en los que es importante una comunicación acústica necesitan de una distribución homogénea del sonido que preserve la calidad y la inteligibilidad de la señal. El tratamiento o acondicionamiento acústico evita problemáticas como ecos o reverberación excesiva.

La primera parte ya se considera tratada, el edificio está ejecutado y no existen quejas ni posibles receptores de los ruidos exteriores que se pudieran generar en el interior. No se tiene previsto tratar acústicamente las superficies interiores pero si es así, se realiza el diseño teniendo en cuenta la respuesta del local, la nueva absorción acústica que presenta,



Figura 17. Auditorio

Es fundamental una fase de diseño teniendo en cuenta el comportamiento acústico de las diferentes superficies a la hora de construir edificios o recintos para el propósito acústico: auditorios, salones de actos, bibliotecas, aulas, salas de cine, etc.

Acústica y psicoacústica

En un recinto cerrado como el pabellón de deportes bajo estudio donde emite una fuente sonora puntual (o varias), el campo sonoro dentro del mismo estará formado por dos partes:

- El **sonido directo D** que va desde la fuente al oyente, siendo el mismo que en condiciones de campo libre.
- Los **sonidos reflejados R1, R2, . . . Rn**, que van desde la fuente al receptor tras una o varias reflexiones en las superficies que conforman el recinto.

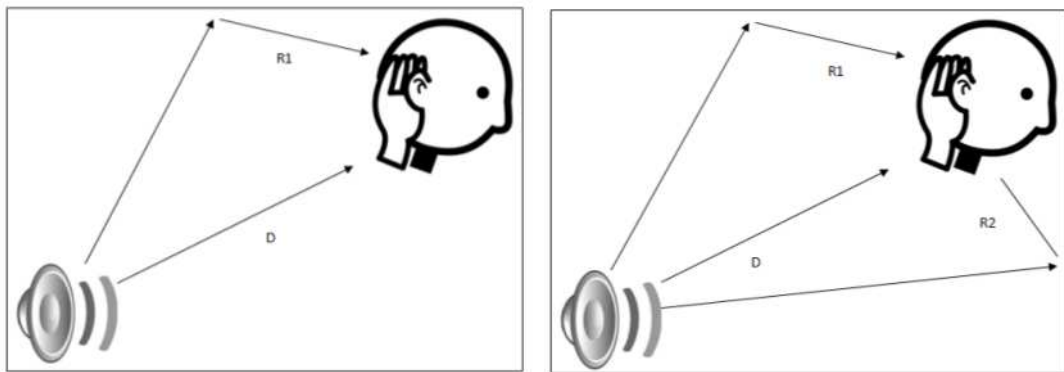


Figura 18. Esquema de rayos del sonido directo y dos reflexiones R1 y R2.

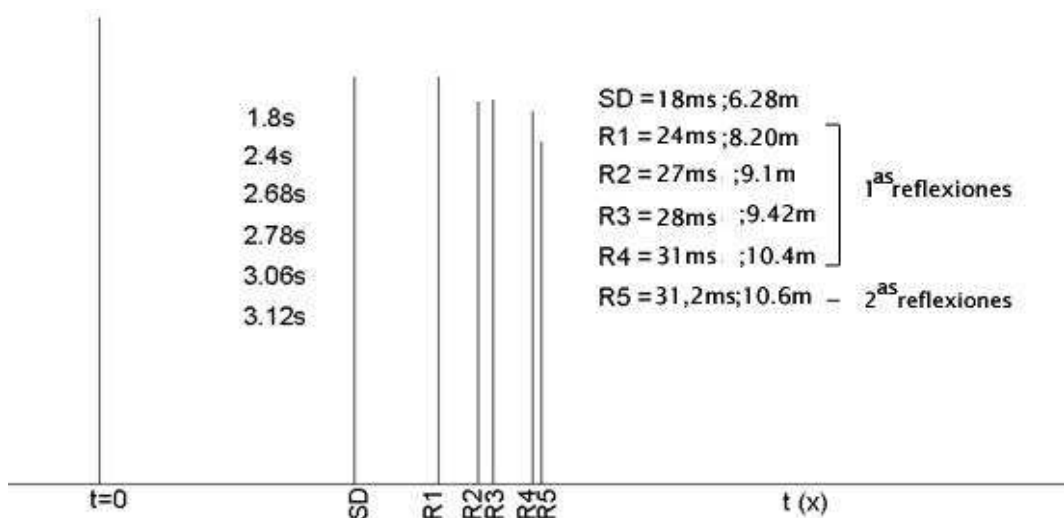


Figura 19. Tiempos de retardo representados en ecograma.

Las fuentes sonoras emiten sonido dentro de un recinto cerrado y éste incide sobre las superficies límite del mismo, reflejando una parte de la energía y absorbiendo otra, aumentando estas reflexiones el nivel de presión sonora en el recinto.

La cantidad de energía en cada punto del recinto dependerá de la potencia de las fuentes sonoras y de la absorción, encontrando una situación en la que predominará más el sonido directo o el reverberante.

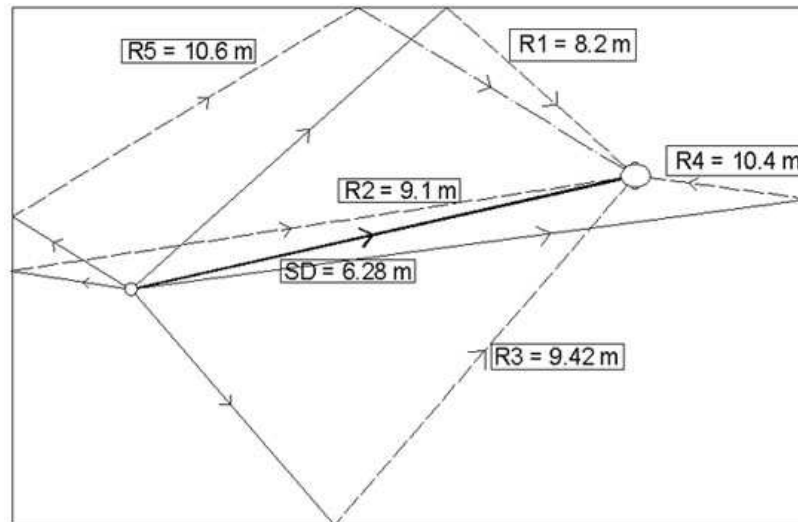


Figura 20. Reflexiones en un recinto I

Cada reflexión será afectada por el coeficiente de absorción de la superficie, disminuyendo así su nivel. También habrá decrecimiento en el nivel por la distancia recorrida.

Se hablará de onda directa o de sonido directo cuando provenga directamente desde el altavoz. Esta situación está denominada como **CAMPO DIRECTO**.

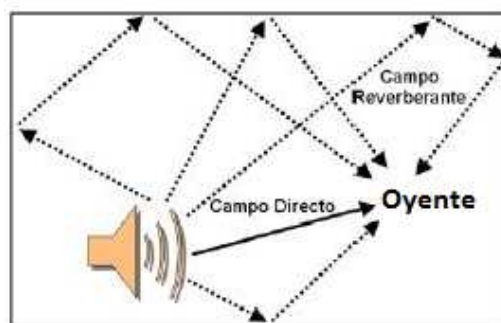


Figura 21 Reflexiones en un recinto II

En las situaciones reales no se dan campos totalmente difusos. Se provocaría un campo acústico, en el caso límite, totalmente difuso, en el cual todos los puntos del local tienen el mismo nivel de presión sonora.

Lo que sí se tienen son recintos con un grado de absorción suficientemente bajo como para dar lugar a campos casi difusos (cámara reverberante). En esta situación, una amplia zona del local presenta un nivel de presión sonora prácticamente constante.



Figura 22. Cámara reverberante normalizada (Instituto Torres Quevedo, Madrid)

Esta situación se corresponde con **CAMPO REVERBERANTE**, y se considera que en él, el nivel de presión sonora no varía.

Por supuesto, en ningún caso, el nivel de presión sonora en el campo reverberante puede sobrepasar el valor del nivel de presión directa, a la salida del altavoz.

Zonas acústicas en un local. Campo directo y campo reverberante

El campo sonoro se divide en dos áreas/zonas: el campo directo y el campo reverberante.

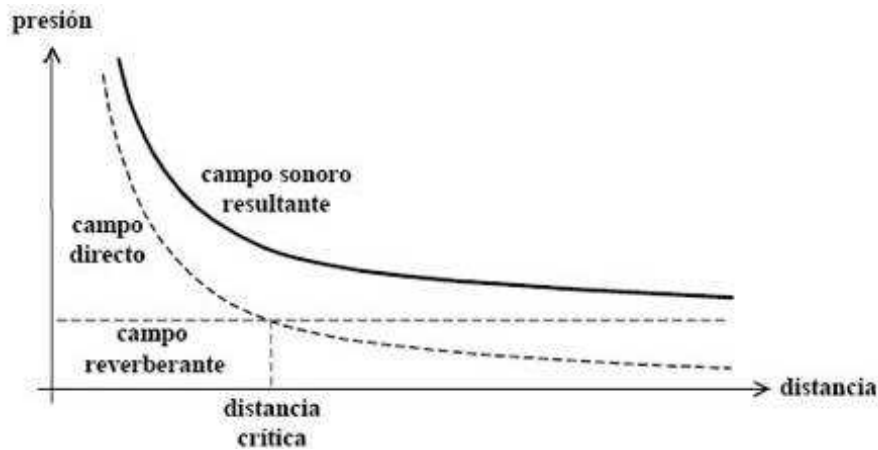


Figura 23. Campo directo y campo reverberante

El campo sonoro se determina a partir tanto de la potencia de la fuente como de las propiedades reflectantes de las superficies del recinto.

- Si la **absorción es grande**, el campo sonoro está dominado por su **componente directa** (como ocurre en el caso ideal de una cámara anecoica).
- Si la absorción es moderada, entonces en las proximidades de la fuente predomina el campo directo y, a mayor distancia, predomina el campo reverberante. Hay una distancia crítica diferente para cada recinto, más allá de la cual predomina el campo reverberante, y por debajo de la cual predomina el campo directo.
- Si la **absorción es baja** y el **tiempo de reverberación alto**, salvo posiciones muy cercanas a la fuente sonora, **predomina el campo reverberante** en todos los puntos del recinto (como ocurre en el caso ideal de una cámara reverberante).

En un recinto con refuerzo sonoro, coexisten un campo reverberante y un campo directo, que es superior a aquel.

Habrá una zona del local donde se produce la transición entre los dos niveles (o campos) de presión. Esa zona es la considerada entre el altavoz y la zona de campo reverberante y en ella no aparecen los efectos de las reflexiones del sonido en las paredes del local.

Las reflexiones ocupan todo el recinto pero en esa zona de transición lo que ocurre es que su influencia es despreciable frente a la onda esférica que sale del altavoz, y por tanto no son capaces de modificar el comportamiento esférico del campo sonoro directo.

La zona de transición es una zona en la que el sonido radiado por el altavoz cumple la ley de divergencia esférica a pesar de la existencia de superficies reflectantes.

En la Figura 24 aparece la representación de la variación del nivel de presión sonora provocado por un altavoz, en función de la distancia.

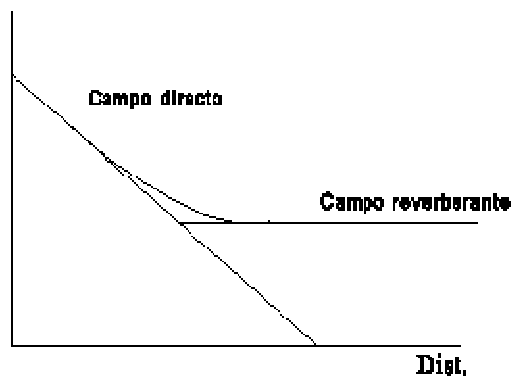


Figura 24. SPL en función de la distancia

- La asíntota del campo directo sólo depende del nivel de presión a la salida del altavoz, su pendiente siempre será -6dB/dd (dd =duplicar distancia) y su punto de partida es $r=0$.
- La asíntota del campo reverberante, siempre será paralela al eje de distancias y su altura dependerá del valor del campo reverberante.

Tiempo de reverberación “Tr”

La existencia de cerramientos en un recinto origina sonidos reflejados y da lugar al surgimiento de un "campo sonoro reverberante" en el interior. Este fenómeno se llama reverberación.

El sonido reverberante persiste un cierto tiempo en el local, aún después de que la fuente deja de emitir sonido. Existe un parámetro para medir el tiempo de reverberación (T_r), que es definido como el tiempo que tarda un sonido en atenuar su nivel sonoro 60 dB.

Se conocen varias formas de realizar el cálculo del tiempo de reverberación: las fórmulas de Sabine, Eyring, y otros métodos menos conocidos o usados. En el caso de este proyecto fin de carrera se trabaja siempre con cálculos según Eyring.

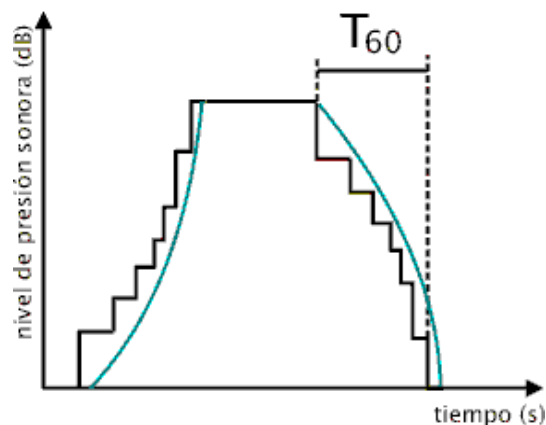


Figura 25. Tiempo de reverberación

Uno de los parámetros de los que depende el tiempo de reverberación, es el coeficiente de absorción sonora media del recinto α_m , que depende estrechamente de los materiales y, por tanto puede modificar el tiempo de reverberación del recinto.

Debido a que la absorción de los diferentes materiales también es selectiva en función de la frecuencia, el espectro resultante del sonido reverberante no coincide con el espectro original del sonido directo.

Hay ciertos valores de tiempo de reverberación que son conocidos, aceptados y buscados para ciertas aplicaciones concretas (principalmente en locales donde se precisa una buena inteligibilidad de la palabra) como cines, auditorios, iglesias, etc. Estos tiempos óptimos de reverberación fueron experimentalmente obtenidos según el volumen del local y su uso.

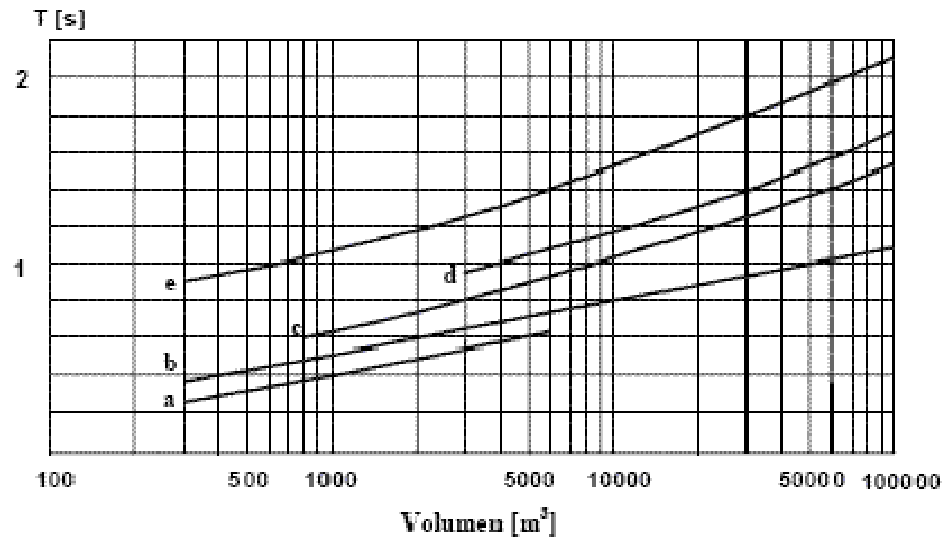


Figura 26. Tiempos de reverberación óptimos en a) estudios de voz, b) salas de conferencias, c) estudios de música, d) salas de conciertos y e) iglesias.

Coeficiente de absorción sonora “ α ”

La absorción acústica es un fenómeno que afecta a la propagación del sonido. Cuando una onda sonora llega una superficie, la mayor parte de su energía se refleja, pero parte de la energía es absorbida por el nuevo medio.

Todos los medios absorben un porcentaje de energía que propagan, ninguno es totalmente opaco.

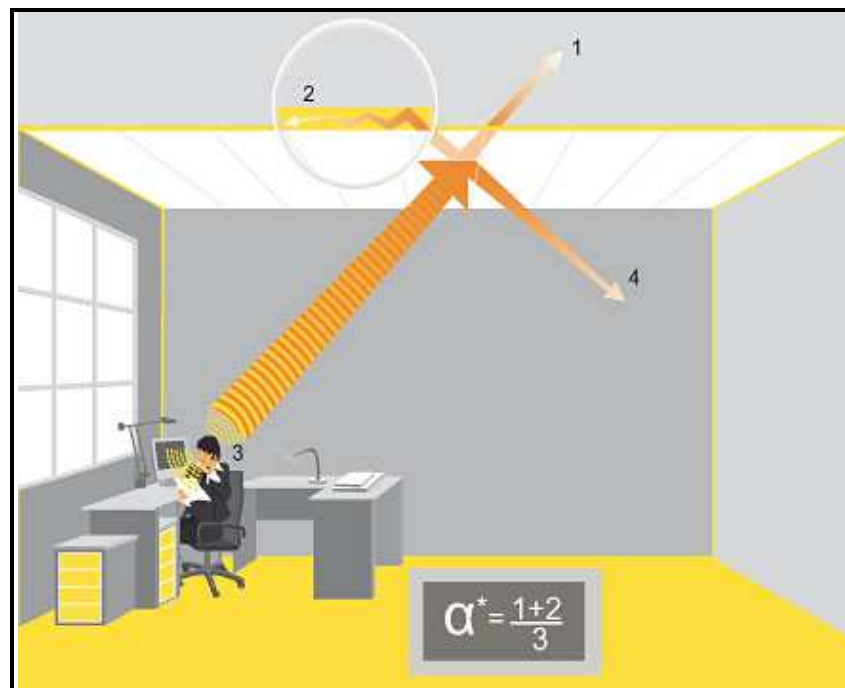


Figura 27. Representación gráfica de una reflexión con la distribución de energías

La absorción acústica es importante para el uso de una sala o recinto. Una absorción acústica adecuada permite que el espacio sea apropiado para su uso: controla el nivel sonoro y mejora el entendimiento de la palabra.

La absorción acústica está condicionada por la geometría del recinto y el tipo de materiales instalados.

La capacidad de absorción del sonido de un material es la relación entre la energía absorbida por el material y la energía reflejada por él. Es un valor que varía entre 0 (toda la energía se refleja) y 1 (toda la energía es absorbida).

El cálculo del coeficiente de absorción de un recinto a partir de diversos materiales sería:

$$A_{\text{total}} = A_{\text{superficies}} + A_{\text{objetos}} + A_{\text{aire}}$$

$$A_{\text{superficies}} = \alpha_{\text{media}} \cdot S_{\text{total}}$$

$$\alpha_{\text{media}} = \frac{\alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots + \alpha_n \cdot S_n}{S_{\text{total}}}$$

Los espacios con materiales de mala calidad o con una absorción acústica inapropiada producen un fenómeno de eco. El eco se genera mediante la reflexión del sonido repetidas veces sobre las superficies y los objetos situados dentro del recinto.

Este fenómeno del eco puede desencadenar problemas de mala comprensión en la escucha y desorientación.

Tipos de materiales

Materiales resonantes: Materiales que presentan la mínima absorción a una frecuencia determinada, la propia frecuencia del material.

Ejemplos de materiales como Vidrios, metales, plásticos, piedra, etc.



Figura 28. Materiales resonantes

Materiales porosos: Materiales que absorben más sonido a medida que aumenta la frecuencia. Es decir, absorben con mayor eficacia las altas frecuencias (los agudos). El material poroso más difundido es la lana de roca, en forma de mantas y se fabrica en diferentes densidades.

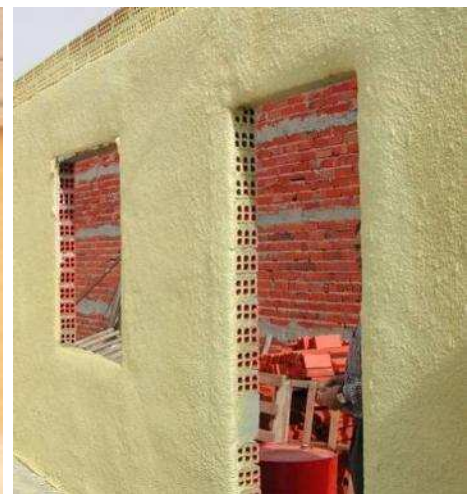
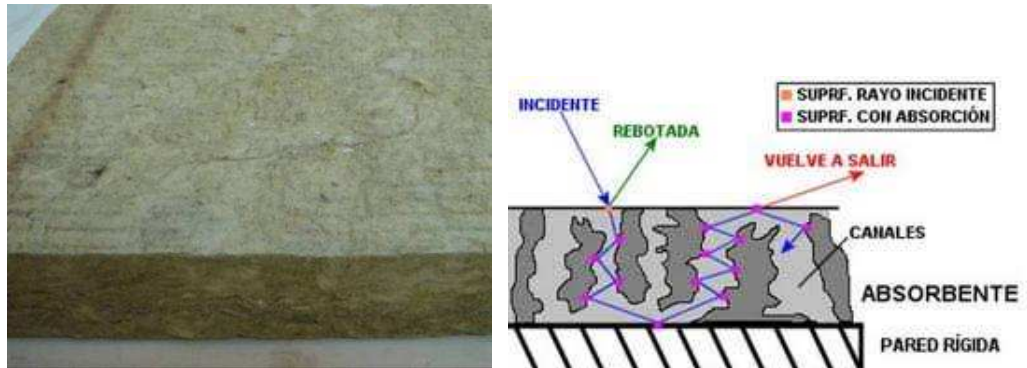


Figura 29. Materiales porosos

Absorbentes en forma de panel o membrana: Materiales que absorben con mayor eficacia las bajas frecuencias (los graves), que las altas.

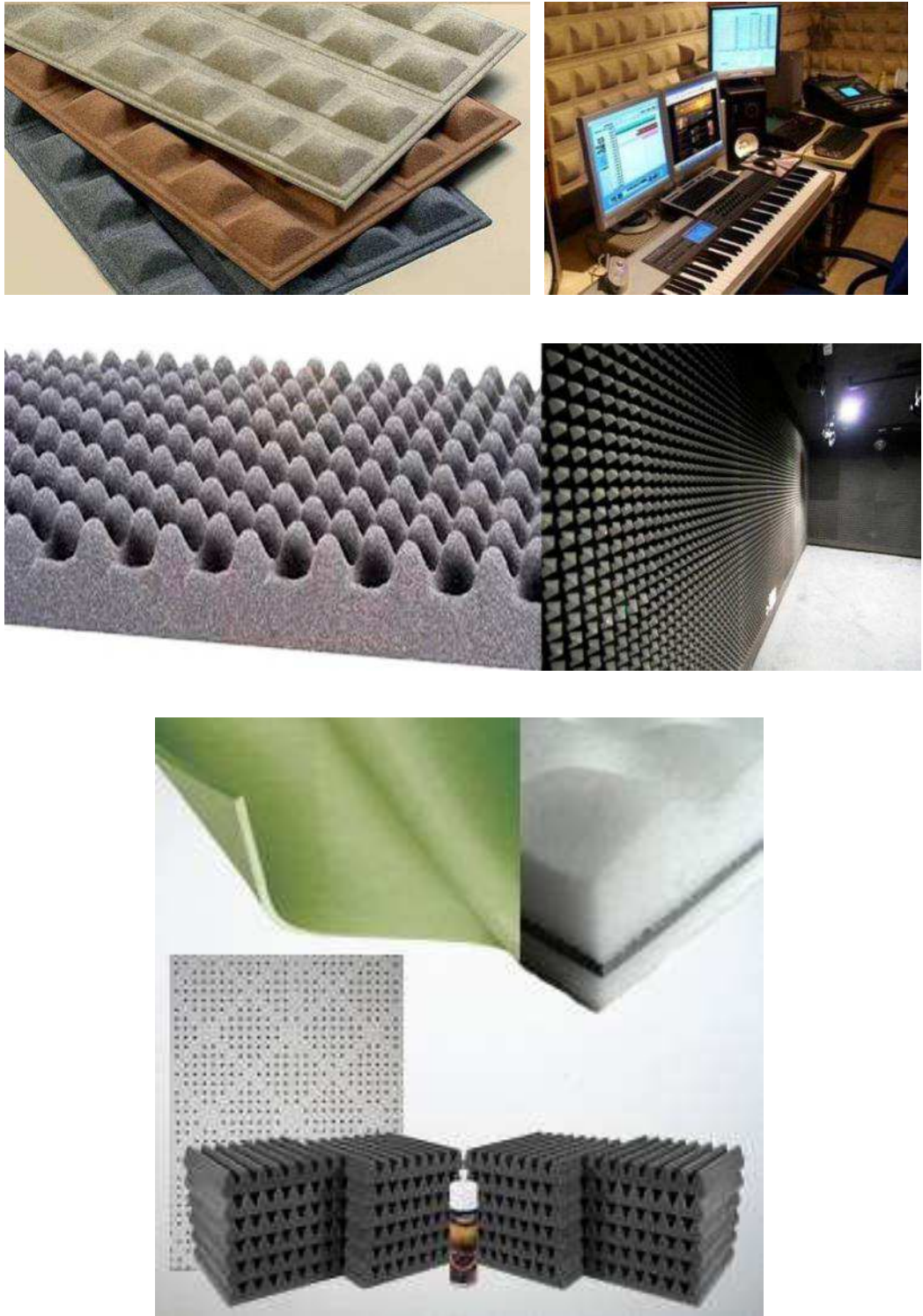


Figura 30. Materiales absorbentes

Absorbente Helmholtz: Es un tipo de absorbente creado artificialmente que eliminan específicamente unas determinadas frecuencia.

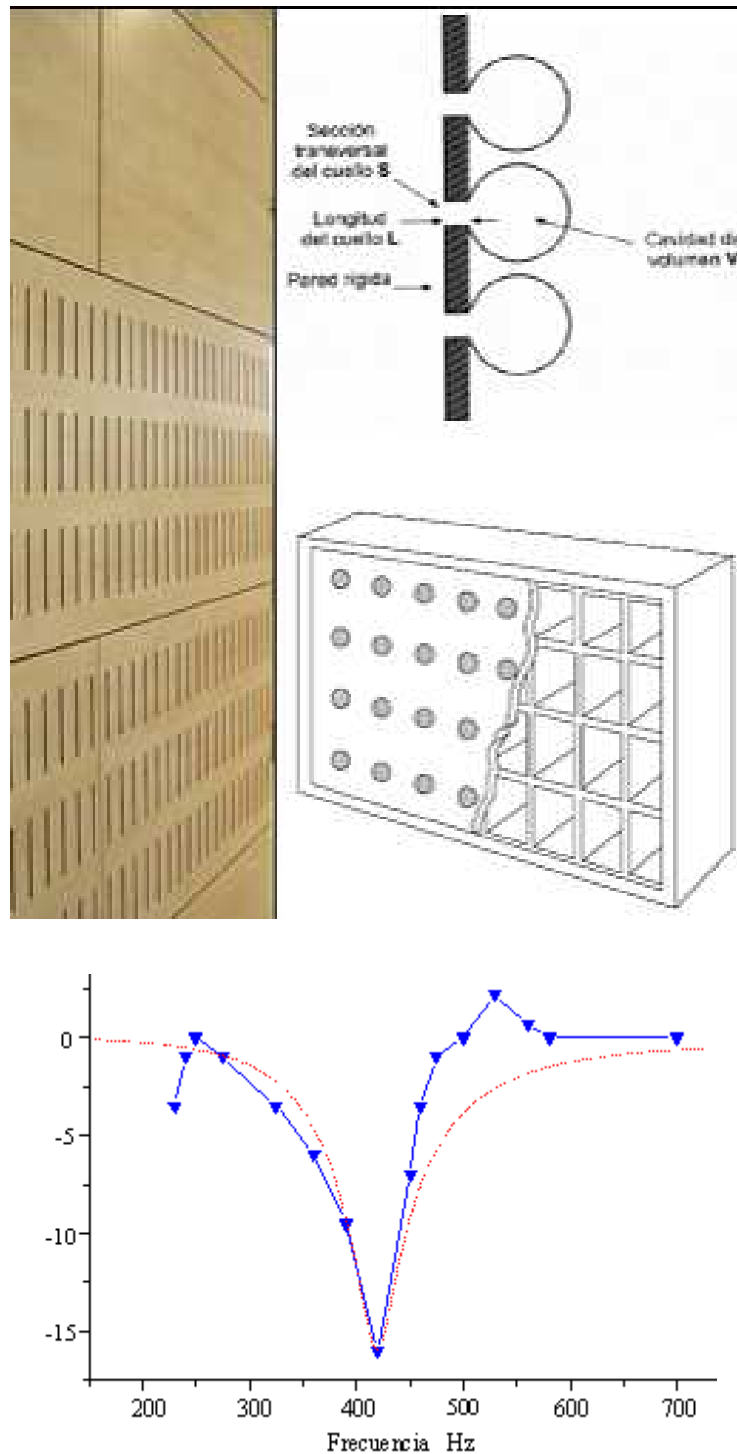


Figura 31. Absorbente o resonador de Helmholtz

Modificadores: Son elementos, normalmente de material absorbente, que se introducen para disminuir la energía acústica y provocar que el nivel del campo reverberante sea menor (o mayor si se trata de difusores).



Figura 32. Ejemplo de modificadores en Mercado de San Antón (Madrid)

III Tipos de sistemas de refuerzo sonoro

Sistemas distribuidos

Son sistemas de sonido ideados para grandes audiencias y con la opción de instalar los altavoces cerca del público. Estos sistemas sitúan los altavoces con un espaciamiento regular a lo largo de todo el área de cobertura, quedando distribuidos de manera uniforme.

Esta distribución tiene la ventaja de proporcionar una buena cobertura de sonido y una buena inteligibilidad, desperdiciando poca energía

El inconveniente es que se renuncia a la localización del sonido, ya que el oyente asociará la procedencia al altavoz que más cercano se encuentre. Se instalan en espacios en los que la localización auditiva no es el factor más importante.



Figura 33. Coliseo Alfonso Pérez (Getafe) y circuito de velocidad de Assen (Holanda)

En general, ofrecen un servicio informativo de seguimiento (en los casos de la figura 33) de eventos de gran escala en los que el interés del evento no tiene una localización única o fija.

Sistemas centralizados

Consisten en uno o varios puntos de emisión de sonido situados estratégicamente en el recinto. Desde estos puntos la sala queda sonorizada por completo.

Este sistema se utiliza tanto para el refuerzo sonoro de voz como para aplicaciones musicales.

La ventaja fundamental es la concentración del sonido en un solo punto:

El sistema perfecto de sonido sería aquel que, con el mínimo número de altavoces, consigue los objetivos de diseño propuestos.

Una única fuente no interfiere con ninguna otra y el sonido resultante vendrá dado exclusivamente por la calidad del altavoz y su comportamiento en el recinto.

Hasta ahora se ha hablado del caso ideal. En la práctica, el principal inconveniente de los sistemas centralizados es que, las ondas generadas por todas las unidades de cada clúster no se suman de forma coherente, creándose interferencias destructivas, degradando la calidad sonora general y desperdiciando energía acústica. Además de la altura de los recintos, dimensiones, pesos y otras cuestiones que no son de índole puramente acústicas.

El objetivo es crear un sistema capaz de generar un frente de onda coherente y homogéneo.



Figura 34. Pabellón de C.B. Gran Canaria (Las Palmas de Gran Canaria)

Sistemas semi-distribuidos

Se trata de sistemas centralizados adaptados. Por la geometría o las dimensiones de algunos recintos y la existencia de áreas de “sombra acústica”, no es posible recubrir toda el área de audiencia desde un único punto y se requiere de un sistema de refuerzo adicional.

Los altavoces suplementarios se pueden retardar para continuar con el efecto precedencia, así como adecuar la llegada del sonido conjunto al proveniente del foco sonoro principal.

Es el ejemplo tipo de una sala de cine, en la que se pretende sincronizar el sonido del sistema centralizado de pantalla con el que se emite desde las paredes laterales (con cierto retardo) mediante el sistema distribuido.



Figura 35. Sala de cine

El resultado que se consigue en salas de cine es óptimo ya que la energía está controlada, la audiencia totalmente sonorizada y con la inteligibilidad y retardos adecuados para un correcto seguimiento del evento, películas en este caso.

El array de altavoces

Son agrupaciones de 2 o más cajas acústicas en línea. Están diseñados con dos objetivos principales:

- Generar adecuados niveles de presión acústica en el área de audiencia y de la manera más homogénea posible
- Ampliar la zona de cobertura del sistema de refuerzo sonoro.

Mejoran el control sobre el patrón de directividad horizontal y amplían el ángulo de cobertura vertical respecto de otros sistemas. Al agrupar cajas acústicas para intentar conseguir los dos fines descritos anteriormente, hay que prestar especial atención a la orientación de éstas.

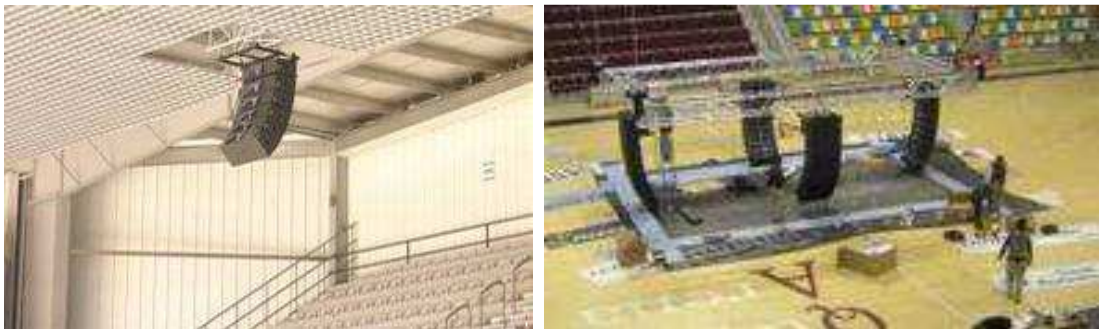


Figura 36. Arrays de altavoces

La utilización de arrays lineales de altavoces se ha convertido en una de las soluciones más comunes para sonorizar estadios, pabellones y otros recintos de similares dimensiones. Esta configuración de altavoces permite controlar el patrón de directividad vertical, así generar unos niveles de presión sonora directos muy elevados y con espectros homogéneos (planos).

La disposición en array amplía el ángulo de cobertura longitudinal por apilar altavoces en sentido vertical. En función de la separación entre sí que tengan estos altavoces, se podrán disminuir o, incluso, eliminar lóbulos perjudiciales del diagrama de directividad.

El resultado de esta agrupación es el equivalente a una fuente puntual omnidireccional situada en el punto de origen.

Hay dos características acústicas que debe tener un sistema de refuerzo sonoro de este tipo:

- La primera, es la capacidad de controlar la directividad vertical, para dirigir la energía acústica a las audiencias, evitando que llegue donde puede causar problemas (como los techos de los teatros) o vecinos al aire libre.
- La segunda característica es que las diferentes fuentes sonoras individuales se sumen de forma coherente o eficaz, actuando el conjunto como una única fuente sonora y obteniendo una distribución de sonido uniforme.

La disposición de los altavoces en array lineal es una de las soluciones más utilizadas debido a que mejora la uniformidad de la cobertura horizontal, y genera ángulos de recubrimiento vertical más estrechos. Con ello, se consigue que la distancia de tiro que alcanza el altavoz sea más larga, y que el sonido incida exclusivamente sobre el área de audiencia seleccionada.

Con las técnicas* y el equipo apropiado se pueden solucionar bastantes problemas en una sonorización; como problemas tonales, ajuste de filtros de cruce, o retardos.

*Una de las técnicas referida es el software EASE Focus, que es una excelente herramienta para el diseño, configuración previa y simulación de este tipo de sistemas de refuerzo sonoro. Es sencillo e intuitivo. Permite introducir el recinto todas las audiencias que se precisen y las fuentes de ruido que están actualmente en el mercado, en formato GLL (Generic Loudspeaker Library).

Efectúa simulación solo en cuanto al campo directo producido, obviando materiales, absorción y, por tanto, el campo reverberante y total que resultaría. Es idóneo para recintos al aire libre o para primeras aproximaciones en recintos interiores.



Figura 37. Arrays de altavoces en evento similar

IV Criterios de diseño y configuración

Requerimientos generales

Los sistemas de refuerzo sonoro deben cumplir estos requisitos:

- Aportar nivel, inteligibilidad y claridad al sonido.
- Tener una señal con un amplio rango dinámico.
- Aportar equilibrio acústico a las diferentes partes de un espectáculo (palabra, música vocal e instrumental).
- Proporcionar una correcta relación entre la percepción acústica y visual.
- Solucionar o disimular, los posibles inconvenientes acústicos debidos a la arquitectura.
- Superar inconvenientes acústicos debidos a la audiencia (ruido de fondo, absorción...).
- Modificar los parámetros acústicos del recinto.
- Permitir la realización de efectos de sonido.
- Modificar tanto la voz humana como los sonidos instrumentales de forma electrónica.

Los seis primeros requerimientos son comunes en todas instalaciones de refuerzo sonoro pero los últimos dependen del uso al que se destine el recinto.

Son las bases de todo proyecto sobre refuerzo sonoro. Para llegar a una solución correcta, no solo son importantes los medios técnicos, sino que también tiene gran influencia la acústica del recinto en el que se vaya a instalar.

Para el caso de los recintos deportivos, los sistemas de refuerzo sonoro tienen la función principal de transmitir información sobre los eventos, anuncios o información útil para los deportistas y espectadores. La sonorización no sirve para retransmitir el evento únicamente, sino también para aportar seguridad tanto al público como los participantes en caso de emergencia. Y en otros casos para animar a los espectadores.

Esta es la razón por la que estos sistemas adquieren una importancia añadida. Su uso está ligado a la seguridad del propio recinto (mediante el servicio de megafonía de emergencia), y en segundo plano a la animación y disfrute de los espectadores.

Requerimientos específicos

En todo sistema de refuerzo sonoro que forma parte de una instalación deportiva, hay que tener en cuenta una serie de condicionantes:

- La calidad dependerá de las características del sistema, es decir, de que sea un sistema solo de megafonía o un sistema mixto megafonía - refuerzo sonoro (voz / música).
- Habrá que tener en cuenta algunas consideraciones acústicas y electroacústicas:
 - o SPL superior a los niveles de ruido de fondo: SNR de al menos 10 dB;
 - o Respuesta en frecuencia suficiente para la voz (200 Hz -6 kHz);
 - o Inteligibilidad suficiente en caso de emergencia (RASTI > 0.6 y Alcons 7%);
 - o Posibilidad de distribución del sonido en zonas.
 - o $D/R(1 \text{ kHz}) > -5 \text{ dB}$; $D/R(125 \text{ Hz}) > -13 \text{ dB}$
- Correcta ecualización del sistema en su nivel de presión total.
- Incluir líneas de retardo y/o evitar ecos. En un sistema de refuerzo sonoro la localización auditiva estará orientada a la fuente. Aplicación de la Curva Doak & Bolt del 90%.

Además en este recinto se tendrá que tener en cuenta la inclinación de las gradas, la ocupación parcial o total de las mismas y las características de techo y suelo de la pista principal.

Criterios de inteligibilidad

La inteligibilidad es una característica vital en sistemas de refuerzo sonoro, por motivos artísticos y de seguridad.

La inteligibilidad no es sinónimo de calidad ni de fidelidad.

Los criterios de inteligibilidad nos permiten elegir y validar el SPL (Sound Pressure Level o Nivel de Presión Sonora en castellano) a conseguir en una instalación de refuerzo sonoro.

Se lleva a cabo un análisis de las características de la señal reproducida para evaluar su inteligibilidad, reverberación u otras características. Se comparan con valores previamente establecidos según pruebas y estudios realizados.

Existen criterios de inteligibilidad subjetivos (compara con ANSI y encuestas realizadas) y objetivos (evalúa las características físicas de la señal).

Entre los criterios de inteligibilidad usuales se encuentran ALcons, STI y RASTI.

En los casos de locales no conocidos, o a priori, con acústicas complejas, estos criterios permiten evaluar la viabilidad de un sistema de refuerzo sonoro, ya que no siempre es posible realizarlo con éxito.

Los motivos principales de evaluar estos criterios son artísticos y de seguridad.

Al cons%

Método de evaluación de la inteligibilidad ideado por Peutz en 1971 en el que se contabiliza la pérdida de articulación de consonantes.

Es el porcentaje de consonantes no entendidas correctamente por la audiencia en un recinto y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Alcons\% = \frac{\text{Nº de consonantes no entendidas}}{\text{Nº de consonantes emitidas}} \times 100$$

Como criterio de valoración se establece la siguiente tabla:

Al cons%	valoración
0 % - 3 %	Excelente
3 % - 7 %	Bueno
7 % - 15 %	Regular
15 % - 33 %	Pobre
33 % - 100 %	Inaceptable

Figura 38. Al cons

- El efecto de la reverberación hace que aumente la pérdida de articulación de consonantes.
- El efecto del ruido de fondo también hace que aumente la pérdida de articulación generando, como es lógico, una peor inteligibilidad en la sala.

El índice Alcons% se obtiene en frecuencias medias. EASE realiza un promedio de las octavas de 500 Hz, 1kHz y 2 kHz.

STI

Speech Transmission Index. El índice de transmisión del habla (STI o RASTI) es un parámetro objetivo de la propia señal vocal, en cuanto a la degradación que puede sufrir la señal de intensidad acústica. Es el criterio de valoración de inteligibilidad más extendido en los sectores profesionales de la sonorización e ingeniería de audio (ANSI 1997).

Los anteriores parámetros valorativos de la inteligibilidad dependían más de la arquitectura y absorción del recinto que de la señal emitida. Se fundamenta en factores externos a la señal emitida y transmitida al medio.

Existen criterios de valoración que califican el STI según:

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

Figura 39. STI

RASTI

Rapid Speech Transmission Index o STI rápido. Simplifica en número de índices de modulación considerados en el STI y solo considera dos frecuencias portadoras.

El cálculo del RASTI en EASE se hace mediante la función de *Mapping*, a través de *Alcons%*, por la fórmula modificada de Farrel Becker:

$$\text{RASTI} = 0,9482 - 0,1845 \ln \text{Alcons\%}$$

Se consiguen valores del RASTI a partir del Alcons% bastante aproximados a la realidad para recintos con ruido y pocos ecos.

Para llevar a cabo esta prueba se emite una señal pregrabada que tenga las características de modulación concretas: señal de banda ancha, de espectro parecido al de la voz y modulada por una señal de muy baja frecuencia para simular la modulación del habla humana.

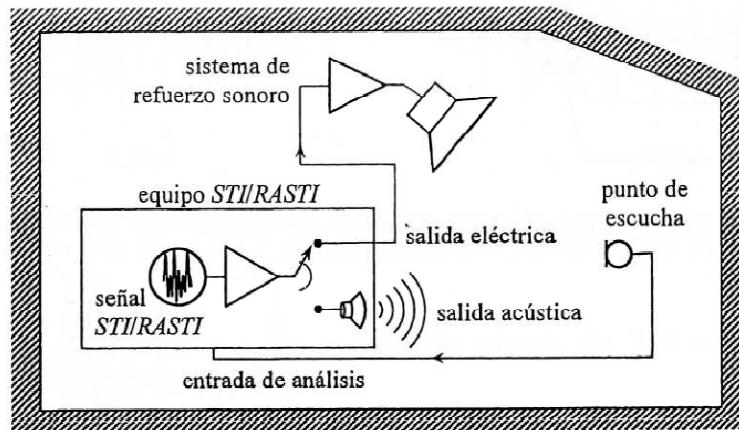


Figura 40. RASTI. Equipamiento para medición in situ

Existe un método alternativo, muy utilizado, para medir o estimar los índices de modulación m . este método extrae los coeficientes de modulación de la respuesta al impulso de la sala, que puede incluir también el efecto del sistema de refuerzo sonoro. Para ello se usa la fórmula de Schroeder:

$$m(F) = \frac{[\int_0^{\infty} h(t) \exp(-j2\pi Ft) dt]}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt}$$

Mediante la función Probe y a partir de la respuesta temporal, EASE calcula el RASTI mediante la fórmula de Schroeder.

Realimentación acústica

La realimentación acústica tiene lugar cuando se encuentran funcionando con relativa cercanía emisores y receptores electroacústicos.

En el caso de que se vaya a dotar al sistema de refuerzo sonoro de la opción de sistema de microfónica, se deben tener una serie de precauciones, que eviten la realimentación acústica o acoplamiento del micrófono.

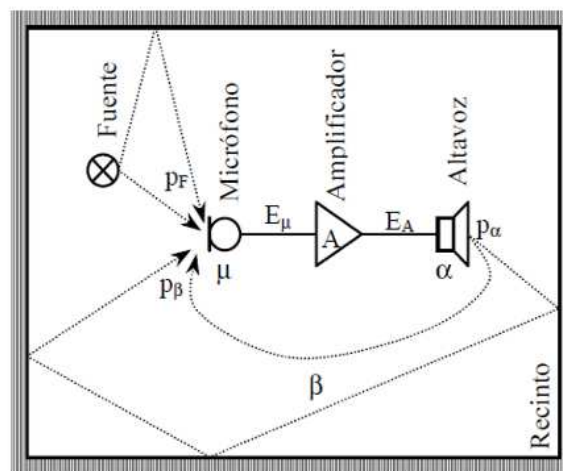


Figura 41. Realimentación acústica

La condición para llegar / evitar la oscilación según los niveles en el micrófono es aumentar la energía del micrófono respecto de la que puede llegar de los altavoces, ya sea modificando el propio micrófono (su posición o variando el patrón de directividad) o modificando el nivel del sistema de refuerzo sonoro (altavoz / altavoces más cercanos al micrófono) y recinto (absorción de la sala).

Se debe cumplir un margen de seguridad o la “regla de los 6 dB” para evitar la oscilación.

Equipamiento preparado para variar o controlar los niveles y directividades tanto en emisores y como en receptores.

V Amplificación y conexionado

En diseños de refuerzo sonoro de grandes espacios son necesarios numerosos altavoces, implicando gran cantidad de conexiones.

Se debe indicar si la conexión es monocanal o estereofónica, teniendo en cuenta el envío de cada uno de los canales del amplificador a los altavoces. Sea cual sea la configuración o el sistema, se diseña de forma que los emisores o altavoces sean pares para igualar el envío de señal por los dos canales.

Se permitirá llevar a cabo selecciones de grupos de altavoces según zonas y eventos.

Estas conexiones con elevado número de altavoces se hacen con las llamadas líneas de alta impedancia, dotadas de elementos de megafonía industrial:

Altavoces y accesorios:

- Cajas acústicas
- Arrays lineales
- Micrófono
- Micrófono inalámbrico

Equipos de procesado y otros sistemas:

- Amplificadores (100 V y baja impedancia)
- Ecuilibradores
- Mesas de mezcla
- Limitadores
- Selector de zona de altavoces

Tipos de amplificación

BAJA IMPEDANCIA

Es la amplificación común. El amplificador necesita “ver” una impedancia (normalmente 8 Ω) y se juega con las configuraciones y número de altavoces para conseguir adaptar impedancias.

- Impedancia conectada menor que la especificada -> el amplificador se puede romper por sobrecalentamiento.
- Impedancia conectada mayor -> se desaprovecha potencia del amplificador.
- La potencia nominal del amplificador está determinada por la tensión eléctrica máxima disponible a su salida.
- Pérdidas de potencia en la línea para largas distancias de conexionado.



Figura 42. Baja impedancia

Agrupación óptima de altavoces

La impedancia que “ve” el amplificador debe superar la mínima recomendada por el fabricante. Se hacen agrupaciones en serie-paralelo.

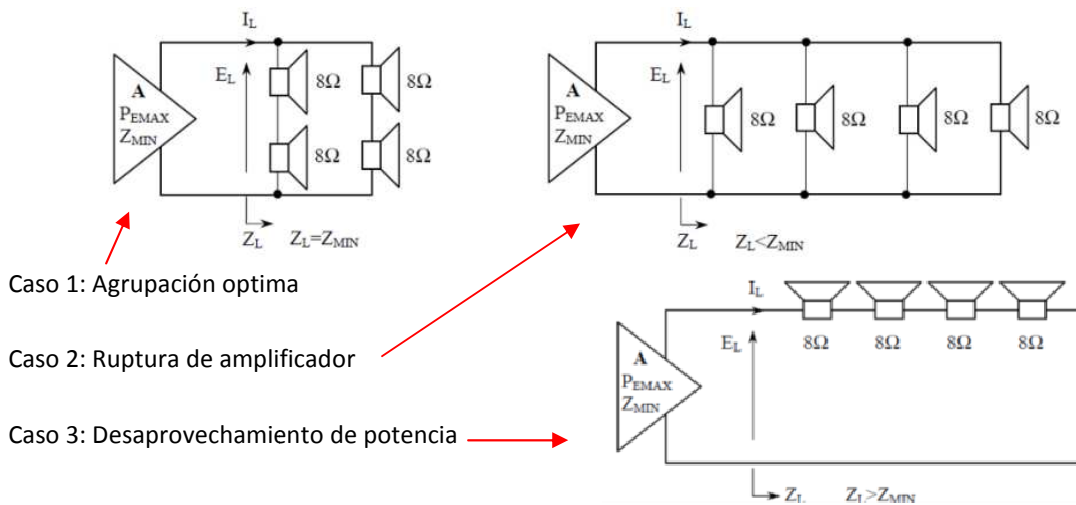


Figura 43. Agrupación óptima en baja impedancia

ALTA IMPEDANCIA (tensión constante)

Es la forma de amplificación que se suele usar en megafonía. Así, se permiten conectar muchos altavoces en paralelo a un amplificador, con la precaución de no sobrecargar el equipo.

- El amplificador entrega una tensión fija (normalmente 100 V) independientemente de su potencia y lleva un transformador elevador a su salida.
- Los altavoces son especiales, llevan transformador reductor y tienen, en conjunto, una impedancia mayor que 8Ω .
- El número de altavoces que pueden conectarse está determinada por la potencia nominal del amplificador.

Distribución de sonido en alta impedancia

La salida de tensión en los amplificadores es de 100 o 70 V. Se llaman líneas de “alta tensión”, “alta impedancia” o “tensión constante” para megafonía.

- Se aumenta la impedancia de carga, Z_L , frente a la resistencia de pérdidas r .
- Se aumenta la tensión de salida del amplificador para mantener la potencia suministrada
- Conexión “Bridge-mono” y “Paralelo”.

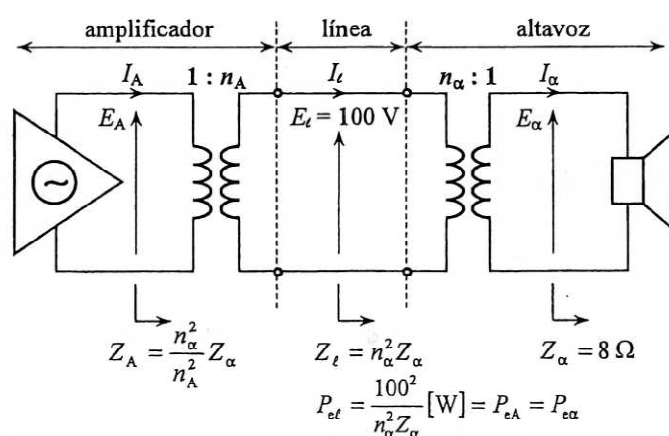


Figura 44. Línea de alta impedancia

Descripción experimental

VI Medidas previas

Reverberación del recinto in situ

Se han llevado a cabo ensayos del tiempo de reverberación del recinto que se está estudiando en este PFC. Estos ensayos se han efectuado según la norma UNE-EN ISO 3362 y con el método de ruido impulsivo.

La fuente de ruido ha sido una pistola acústica modelo **ME 38 Pocket Kal..380/9 mm R Knall**.



Figura 45. Pistola acústica

Se han utilizado protecciones acústicas modelo **Peltor Bull's Eye Shotgunner** durante la realización del ensayo. (EN 352-1)



Figura 46. Protecciones acústicas

Esta es el croquis explicativo de las posiciones de fuente y micrófono (sonómetro) elegidas para el ensayo de reverberación del recinto:

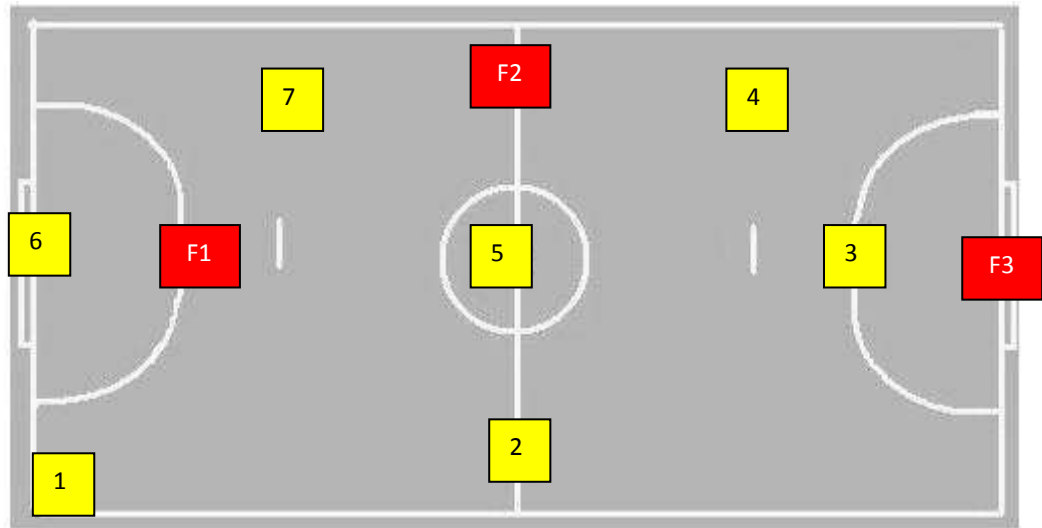


Figura 47. Puntos de medida

El sonómetro utilizado es un Bruel & Kjaer mod. 2260, con micrófono de media pulgada también de Bruel & Kjaer mod. 4190.



Figura 48. Posición 5 y 7 de micrófono

A continuación se muestra la tabla de valores promedio del tiempo de reverberación resultante. Gráfica extraída del software de evaluación de acústica de edificios, Qualifier, de Bruel & Kjaer.

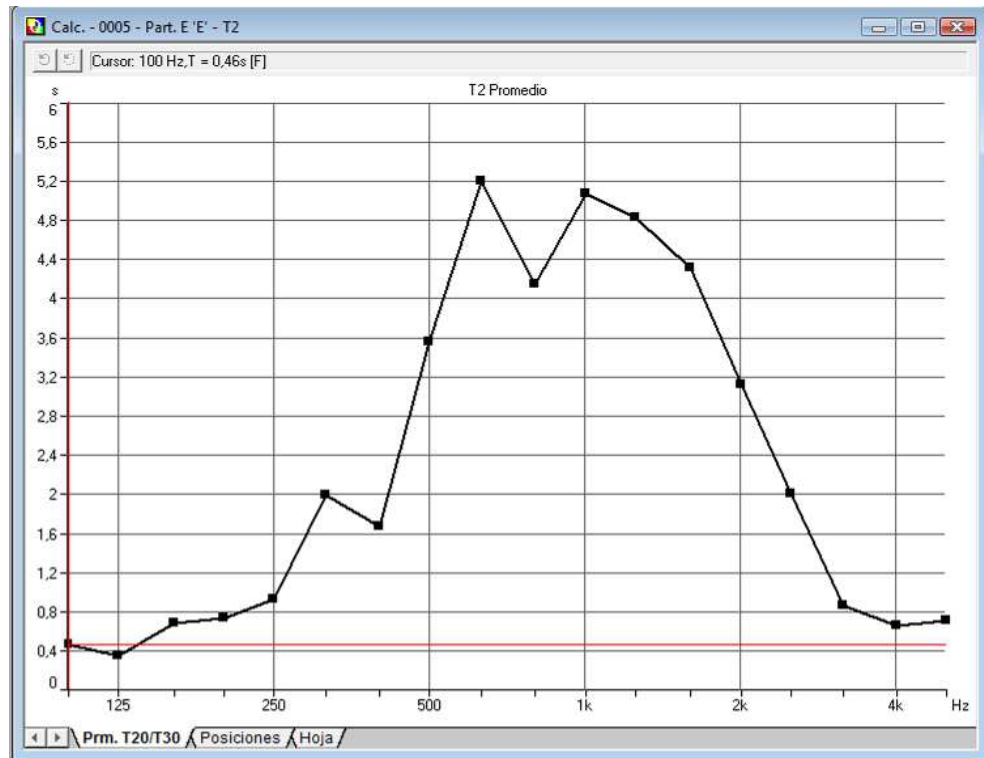


Figura 49. Curva de tiempo de reverberación medido in situ

Frecuencia (Hz)	T (s)	Frecuencia (Hz)	T (s)
100	0,5	800	4,1
125	0,4	1000	4,9
160	0,7	1250	4,8
200	0,8	1600	4,4
250	1,0	2000	3,2
315	2,0	2500	2,0
400	1,7	3150	0,9
500	3,6	4000	0,7
630	5,2	5000	0,8

Figura 50. Tabla de valores de tiempo de reverberación

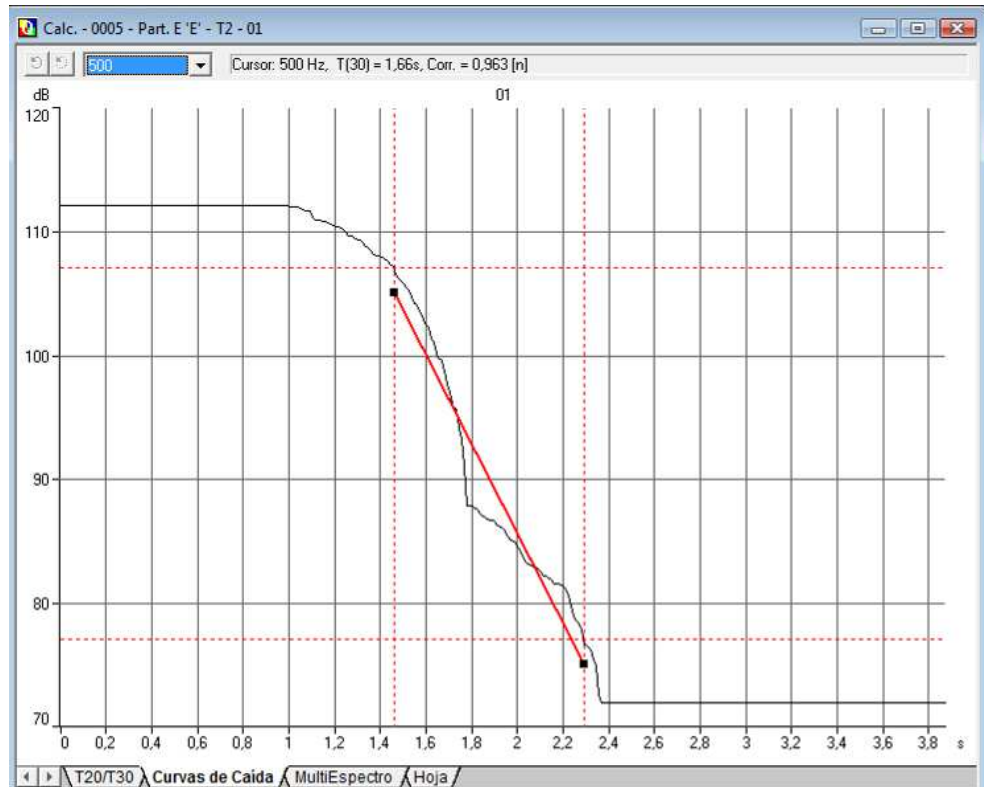


Figura 51. Curva de Tiempo de Reverberación en 500 Hz para posición 2 de micrófono



Figura 52. Posiciones 3 y 4 de micrófono

Materiales y acondicionamiento acústico

A continuación se muestra una tabla resumen de todos los materiales que se han encontrado en el recinto a simular, y por tanto han sido incluidos en el modelado en EASE del recinto.

Material	Material EASE	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
PARQT CON	parqtcon.mat	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07	0,07
MARBLE	marble.mat	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
WINDGLASS	windglass.mat	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,09	0,09
STEEL	steel.mat	0,05	0,10	0,10	0,10	0,07	0,02	0,01
DOOR SOLID	doorsolid.mat	0,15	0,11	0,10	0,10	0,07	0,07	0,06
CONCRETE R	concreter.mat	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,07	0,08
FLEXBOARD	flexboard.mat	0,18	0,11	0,09	0,07	0,03	0,03	0,03
ABSORBER = 30%	30%.mat	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
CLAYBRICK	claybrick.mat	0,16	0,13	0,15	0,11	0,13	0,14	0,15
CARPT PAD	carptpad.mat	0,08	0,24	0,57	0,69	0,71	0,73	0,75

Figura 53. Tabla de materiales utilizados

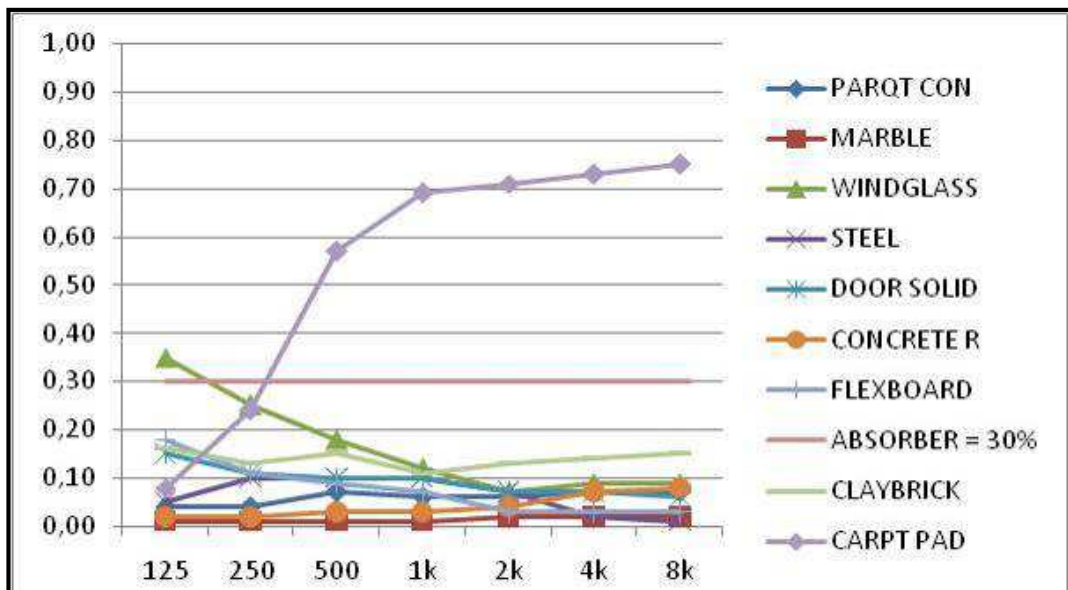


Figura 54. Gráfica de materiales utilizados

En la gráfica de la Figura 54, la escala es estandarizada, de 0 a 1, en los valores del coeficiente de absorción.

En la gráfica de la Figura 55, se muestran los mismos materiales, exceptuando los más absorbentes, con la escala más ajustada en valores bajos, como son los valores en la mayoría de los materiales existentes en el recinto.

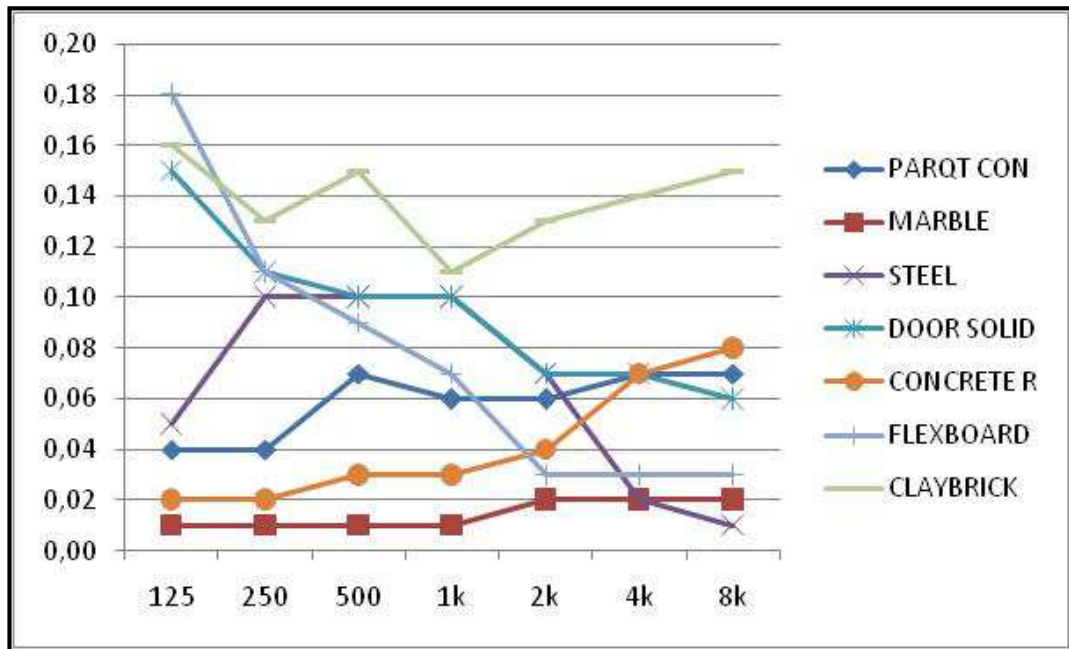


Figura 55. Detalle fino de gráfica de materiales utilizados

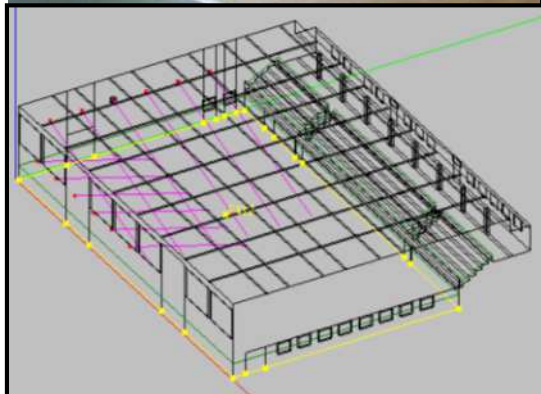
Posteriormente se pasa a enumerar y mostrar cada uno de los materiales especificados, con su correspondiente ficha, incluyendo descripción, tabla de coeficientes de absorción por bandas de octava y fotografía realizada in situ.

Pista – suelo

El suelo está compuesto en su mayoría de una tarima flotante de parquet. El perímetro de la pista está compuesto del mismo material aunque varía su color y aspecto.

Coeficiente de absorción asignado al suelo de la pista:

Frecuencia	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
α	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07	0,07



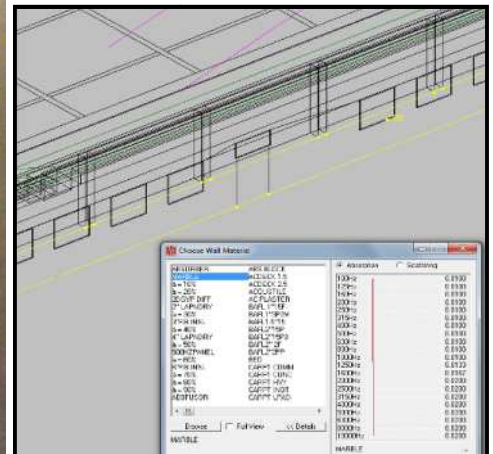
Material asignado en la simulación con EASE: PARQT CON -> *parqtcon.mat*

Pasillo graderío – suelo

El suelo de la parte alta del graderío está compuesto de mármol. Es la zona de tránsito de los espectadores que se acomodan para asistir a las actuaciones de la pista central o de la pista exterior.

Coefficiente de absorción asignado al suelo del graderío:

Frecuencia	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
α	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02



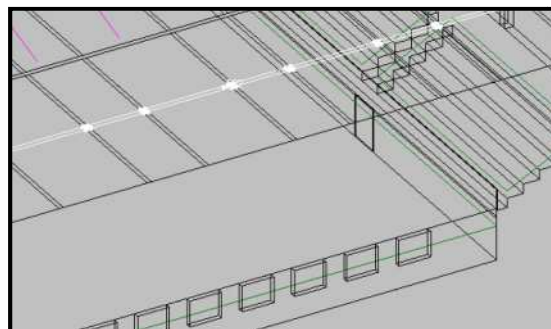
Material asignado en la simulación con EASE: MARBLE -> ***marble.mat***

Cubierta – vigas metálicas

La cubierta tiene una composición mixta de paneles contrachapados de madera y uralita, todo ella sustentado con un entramado de vigas de acero.

Coefficiente de absorción asignado al entramado metálico de cubierta:

Frecuencia	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
α	0,05	0,10	0,10	0,10	0,07	0,02	0,10



Material asignado en la simulación con EASE:STEEL -> **steel.mat**

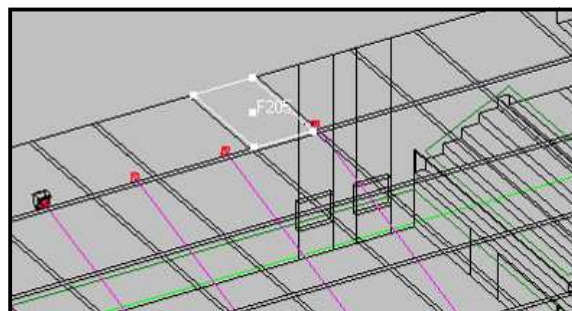
Cubierta - uralita

La cubierta tiene una composición mixta de paneles contrachapados de madera y uralita, todo ella sustentado con un entramado de vigas de acero.

La uralita forma hileras con tejados a dos aguas.

Coeficiente de absorción asignado a las planchas de uralita de la cubierta:

Frecuencia	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
α	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30



Material asignado en la simulación con EASE: ABSORBER=30% -> **30%.mat**

Cubierta – paneles contrachapados

La cubierta tiene una composición mixta de paneles contrachapados de madera y uralita, todo ella sustentado con un entramado de vigas de acero. Los paneles son paralelos al suelo.

Coefficiente de absorción asignado a los paneles contrachapados de madera:

Frecuencia	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
α	0,18	0,11	0,09	0,07	0,03	0,03	0,03



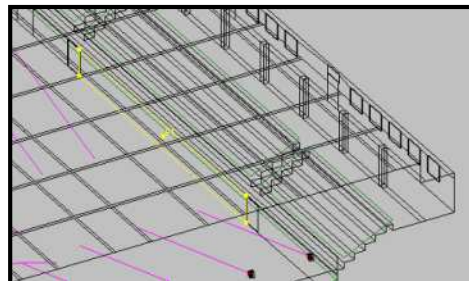
Material asignado en la simulación con EASE: FLEXBOARD -> *flexboard.mat*

Paramentos interiores 1

Los paramentos interiores del lateral largo situado bajo el graderío está compuesto de ladrillo caravista. Cuenta con pequeñas ventanas circulares (despreciables a efectos de absorción acústica) y puertas de madera.

Coefficiente de absorción asignado a los ladrillos:

Frecuencia	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
α	0,16	0,13	0,15	0,11	0,13	0,14	0,15



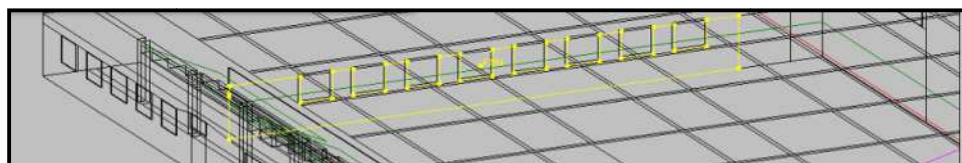
Material asignado en la simulación con EASE: CLAYBRICK -> *claybrick.mat*

Paramentos interiores 2

Los paramentos interiores están compuestos de pared de ladrillo y enlucido rugoso de yeso con una fina capa de pintura. Al igual ocurre con los techos de la zona de graderío.

Coeficiente de absorción asignado a los paramentos enlucidos con yeso:

Frecuencia	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
α	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,07	0,08



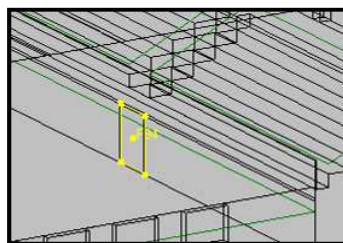
Material asignado en la simulación con EASE: CONCRETE R -> *concreter.mat*

Puertas – accesos 1

Las puertas y accesos (de entrada y a otras dependencias como el bulder) son de madera contrachapada.

Coeficiente de absorción asignado puertas, recubrimiento de pilares, ventanas y asientos:

Frecuencia	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
α	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07	0,07



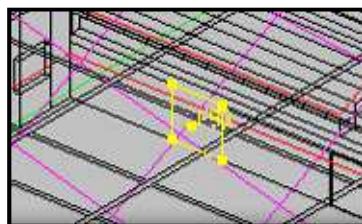
Material asignado en la simulación con EASE: DOOR SOLID -> ***doorsolid.mat***

Puertas – accesos 2

La puerta que da acceso a la sauna es metálica y se considera, por su nula absorción y su reflexión total de sonido, de acero.

Coefficiente de absorción asignado a puerta de la sauna:

Frecuencia	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
α	0,05	0,10	0,10	0,10	0,07	0,02	0,10



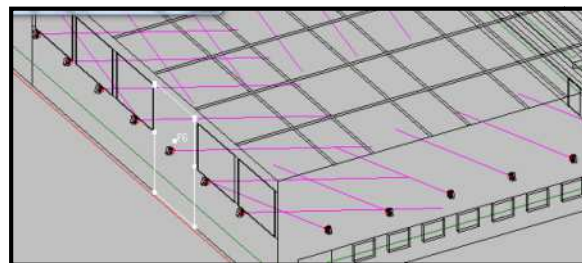
Material asignado en la simulación con EASE: STEEL -> ***steel.mat***

Cortinas de sectorización

Las cortinas de sectorización que hay para dividir la pista y permitir la práctica de diversos deportes simultáneamente son de tela. Una tela con elevada masa, que resiste balonazos sin apenas deformarse y con aspecto impermeable.

Coefficiente de absorción asignado a las cortinas de sectorización:

Frecuencia	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
α	0,08	0,24	0,57	0,69	0,71	0,73	0,75



Material asignado en la simulación con EASE: CARPT PAD -> *carptpad.mat*

Ventanas

Las ventanas existentes, tanto las que dan al exterior como las que conectan la pista central con otros recintos (tal que el tatami) son de madera y con vidrios simples.

Coefficiente de absorción asignado a los vidrios de las ventanas:

Frecuencia	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
α	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,09	0,09



Material asignado en la simulación con EASE: WIND GLASS -> *windglass.mat*

VII Herramientas de diseño informático



Los profesionales de la arquitectura, la construcción y otros sectores relacionados eligen SketchUp Pro por ser la herramienta más intuitiva entre las de su clase. Es fácil de usar, lo que permite dedicar una menor parte de tiempo al aprendizaje del software y al propio modelado.

Arquitectura y diseño

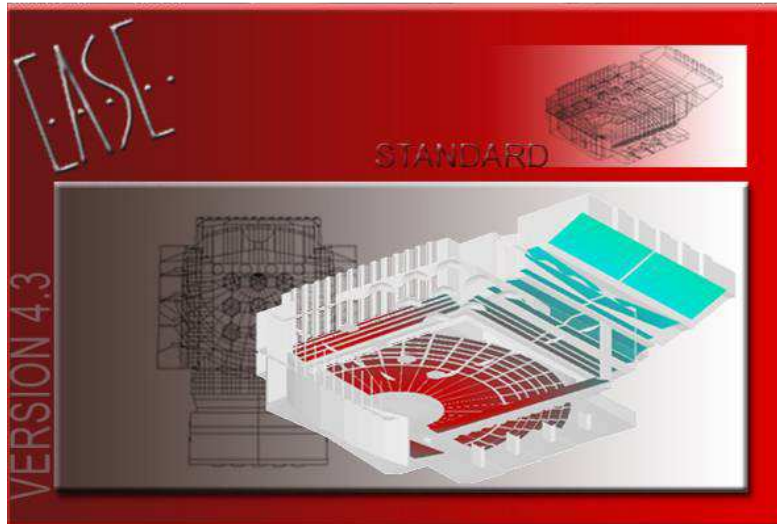
SketchUp se creó pensando en los arquitectos y otros diseñadores. La idea era inventar una herramienta rápida e intuitiva que se pudiera utilizar para estudiar y presentar las ideas en 3D.



SketchUp para la ingeniería

SketchUp es un software para crear y presentar modelos profesionales en 3D. Las empresas de ingeniería utilizan SketchUp para compartir información en 3D de forma rápida y eficaz, favoreciendo la colaboración, incrementando la eficacia y resolviendo problemas de diseño.





El software EASE (Simulador acústico mejorado para Ingenieros) ofrece a los diseñadores de sistemas de refuerzo sonoro para recintos un conjunto de herramientas a partir de detalles, del modelado y de la simulación realista de la acústica.

Se usa como evaluación de datos profesionales y de verificación de los sistemas de sonido a instalar. También sirve de herramienta de presentación a clientes.

La facilidad en el diseño junto con los módulos de representación gráfica y auralización, ayuda a eliminar costosos errores y reducir el tiempo de instalación. EASE ayuda a los diseñadores mediante la visualización gráfica, con predicciones exactas de la acústica en el mundo real.

La realización de modelos en EASE es una manera ideal de explorar las opciones y evaluar lo que funciona y lo que no funciona, antes de que la sede virtual se convierta en un lugar de trabajo y los cambios son mucho tiempo y es caro.

Las principales ventajas de la simulación con el software EASE:

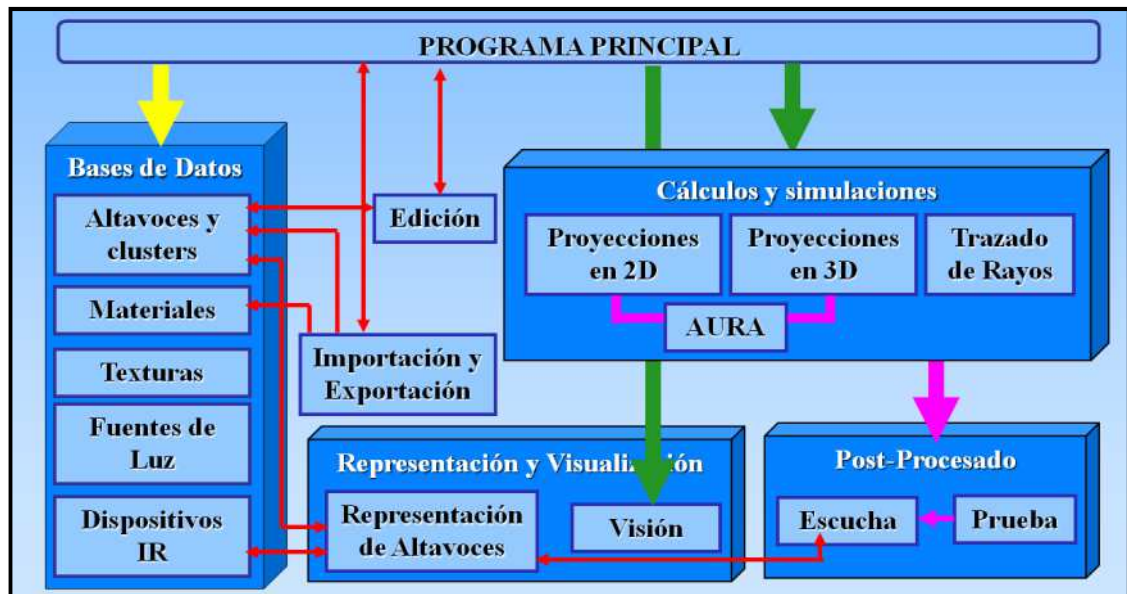
- Seguridad en el cumplimiento de los requisitos de SPL, retardos, inteligibilidad y otras exigencias con el mínimo esfuerzo.
- Tomar conciencia de obstáculos que permanecerían ocultos sin simulación.
- Analizar y resolver problemas acústicos antes de que surjan.
- Ahorrar tiempo y dinero evitando múltiples interacciones in situ.
- Hacer uso de la base de datos altavoz más grande y de más alta calidad para encontrar la solución óptima.



Resumen de las funciones

- La integración con los programas de CAD de terceros
- Base de datos de materiales acústicos
- Parámetros estándar de las habitaciones
- Cálculos de tiempo de reverberación
- Optimizar RT
- Mayor base de datos de fuentes de sonido
- Añada sus propios altavoces
- Módulos SpeakerBase y SpeakerLab
- Control del sistema de sonido virtual
- Grupos de altavoces
- Mapping estándar
- Herramientas estadísticas
- Estudios de patrones de reflexión con seguimiento de rayos
- Habitación RT
- Mapping estándar con reflexiones
- Análisis de la reflexión a fondo
- Sonda acústica
- Auralización
- Orejas
- Módulo de simulación de dispositivos IR
- El intercambio de datos con otros paquetes AFMG

Se muestra un diagrama de bloques de las posibilidades que ofrece el software de simulación acústica EASE, pasos a seguir en partes de este proyecto fin de carrera.

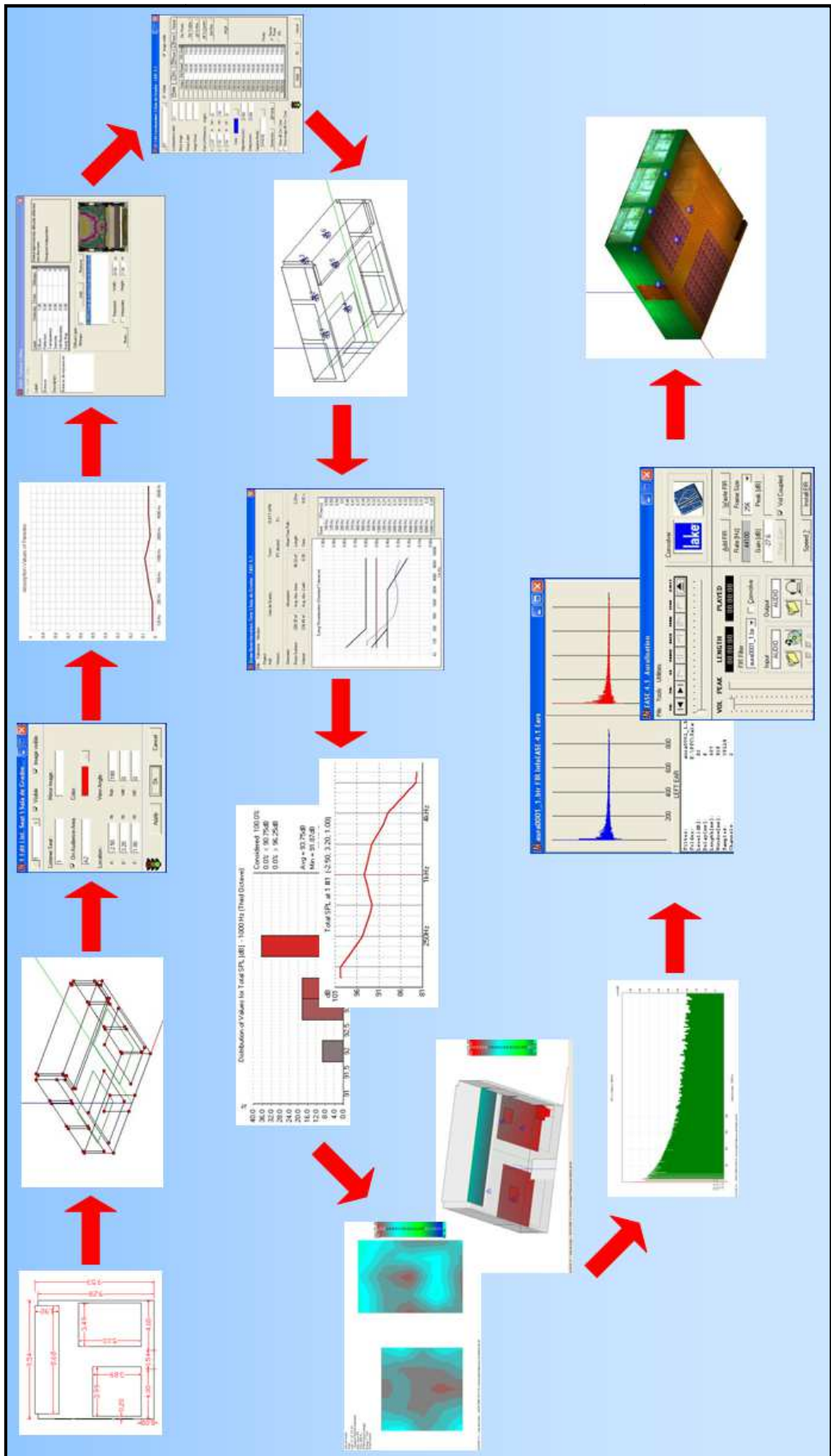


Las opciones de inclusión de datos son muy amplias ya que las bases de datos de materiales y fuentes sonoras son muy extensas. Concretamente, ilimitada ya que ofrece la opción de modificar los materiales existentes, incluso incluir nuevos altavoces, etc.

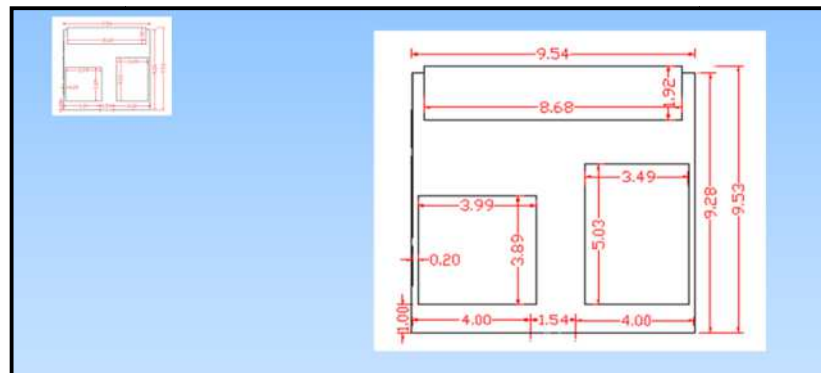
De la misma forma tiene diversas formas de representar las simulaciones y obtener resultados: mapeados de nivel, inteligibilidad, auralizaciones, trazado de rayos, etc.

Curiosamente, los módulos que parecen tener menos peso en el diagrama anterior son los más importantes en el diseño y los que deben ser más precisos para que los resultados obtenidos en la fase final sean fiables.

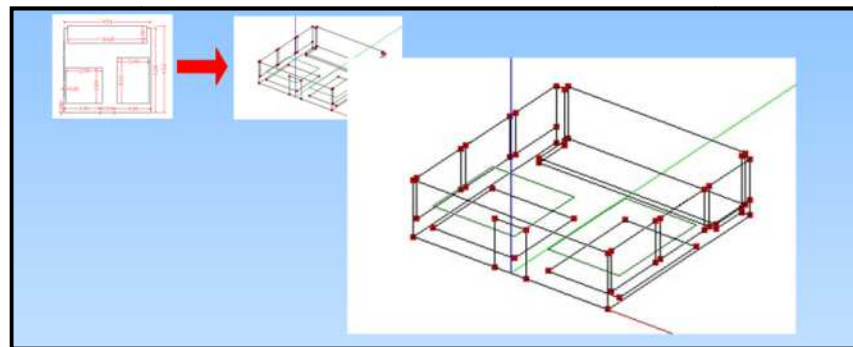
Se explican los pasos que se dan desde la importación del modelo editado con el software SketchUp y su edición (materiales, posición y orientación de fuentes sonoras, elección de niveles y ecualización, etc), hasta su validación (comparación con los datos tomados del recinto real), y comprobación de requisitos u objetivos propuestos para un correcto funcionamiento del sistema de refuerzo sonoro.



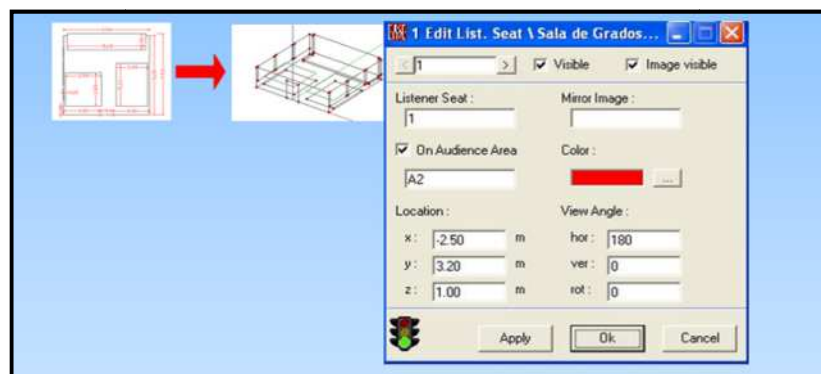
1 Importación de modelo arquitectónico



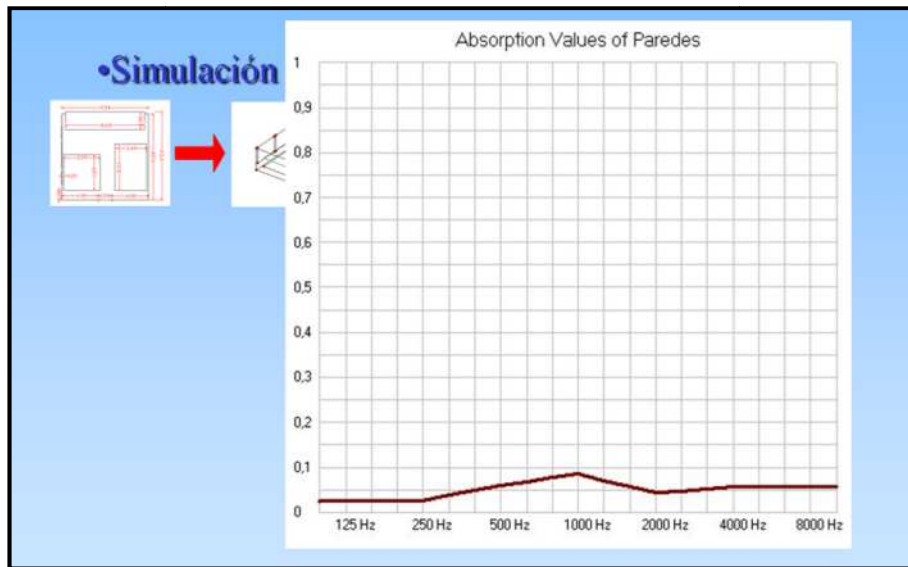
2 Comprobación de huecos



3 Situación de audiencias



4 Elección de absorción de paramentos

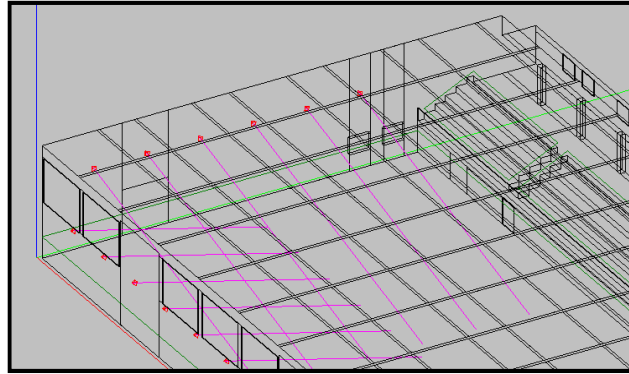


5 Elección y situaciones de altavoces

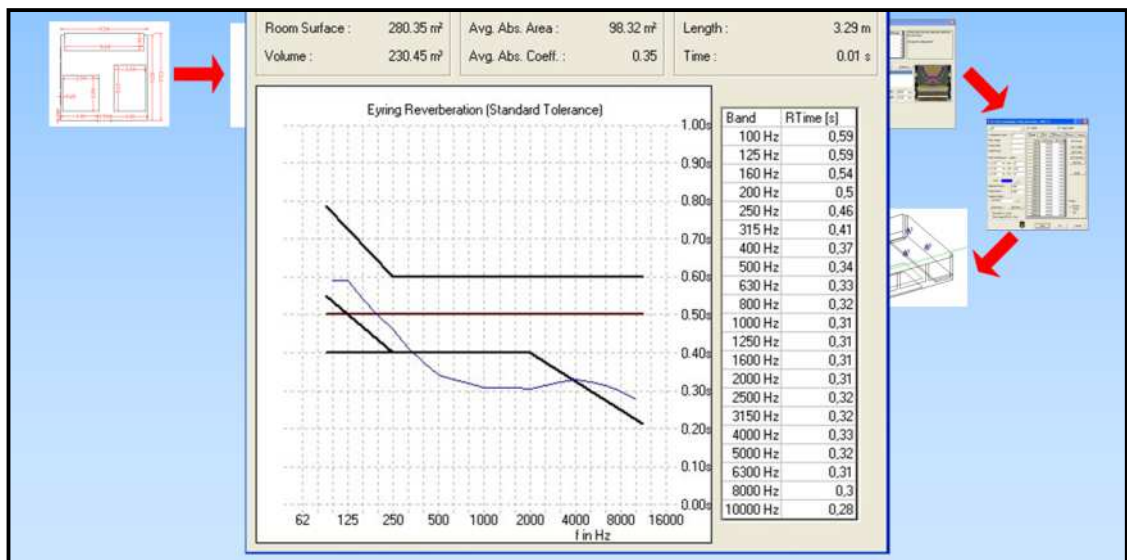
The figure displays the "S1 Edit Loudspeaker" dialog box in EASE 4.1. The dialog box includes fields for Loudspeaker Label (S1), Minor Image, Group Label, Image Group, Point of Reference (Angles), x, y, z coordinates, Color, Alignment (µsec), Delay (msec), Speaker Model (SPHERE), Cluster Info, and D/I Setup. A table shows the frequency response of the speaker, and there are buttons for "Apply", "Ok", and "Cancel".

Frequ.	Ele. Power	SPL (1m)
100 Hz	100.00	110.0
125 Hz	100.00	110.0
160 Hz	100.00	110.0
200 Hz	100.00	110.0
250 Hz	100.00	110.0
315 Hz	100.00	110.0
400 Hz	100.00	110.0
500 Hz	100.00	110.0
630 Hz	100.00	110.0
800 Hz	100.00	110.0
1000 Hz	100.00	110.0
1250 Hz	100.00	110.0
1600 Hz	100.00	110.0
2000 Hz	100.00	110.0
2500 Hz	100.00	110.0
3150 Hz	100.00	110.0
4000 Hz	100.00	110.0
5000 Hz	100.00	110.0
6300 Hz	100.00	110.0
8000 Hz	100.00	110.0
10000 Hz	100.00	110.0

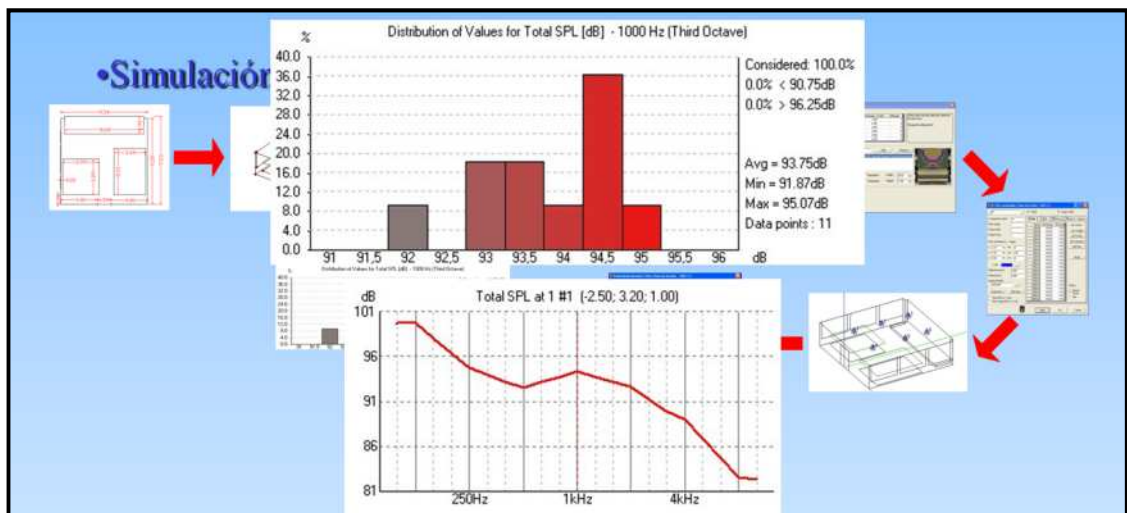
Below the dialog box, a 3D model of a room is shown with several speakers placed in different positions, indicated by red arrows. The speakers are numbered 1 through 6. The room layout is also shown in a 2D top-down view.



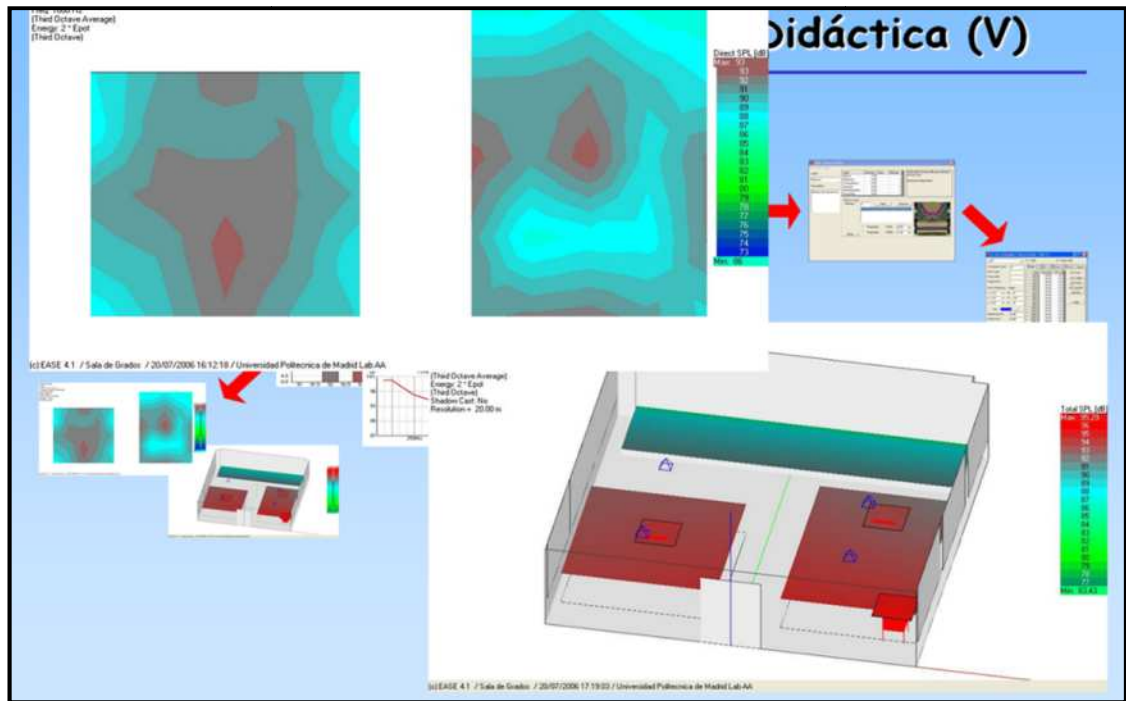
6 Control de la reverberación



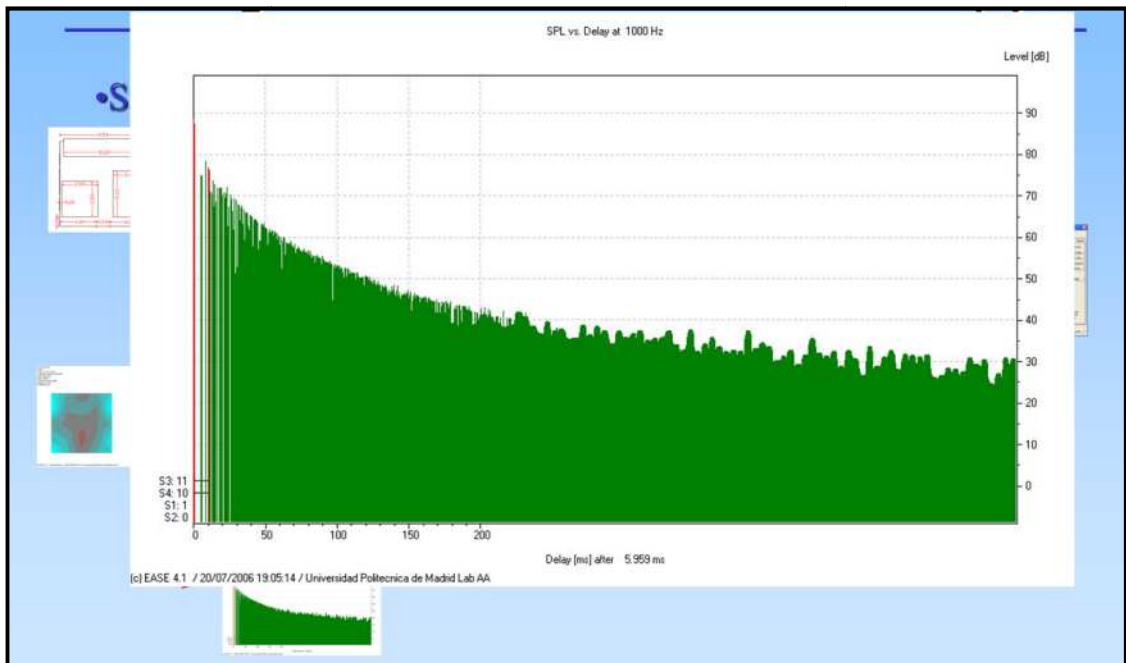
7 Ecuación del nivel de presión sonora



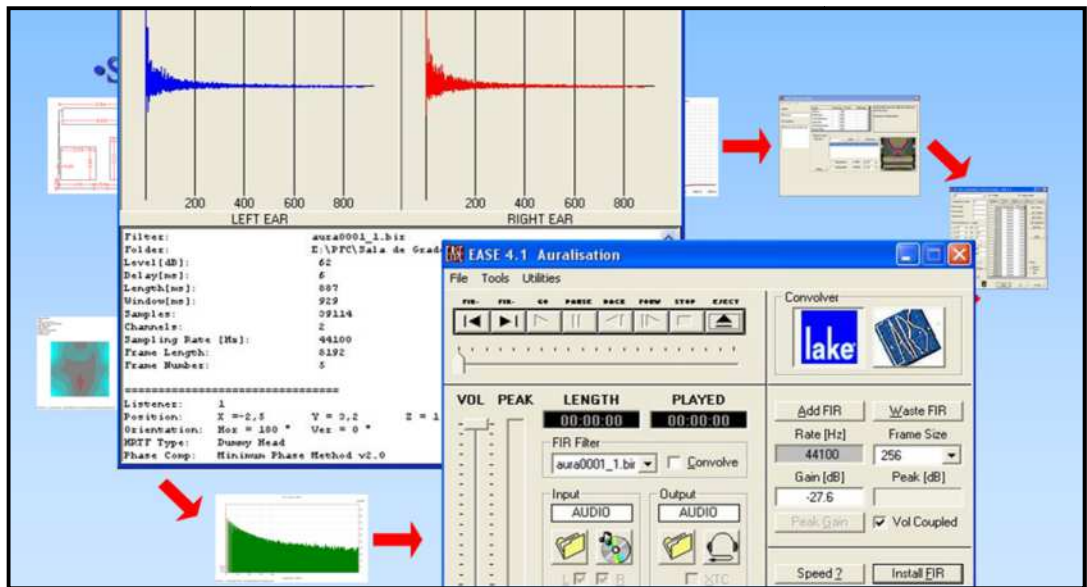
8 Verificación de cobertura de recinto



9 Ecograma

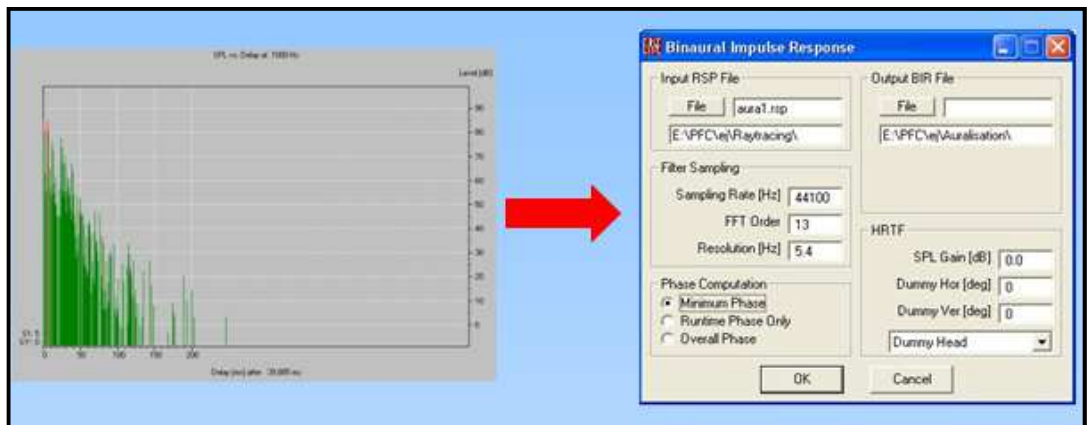


10 Ajuste de retardos

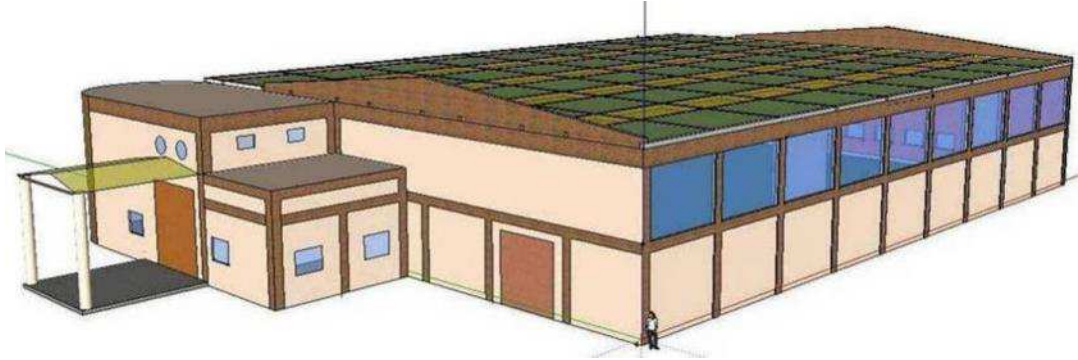


11 Auralización

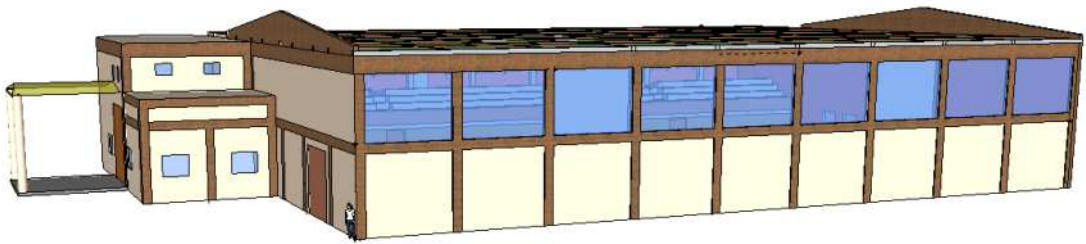
Proceso de convertir los datos acústicos y electroacústicos en una señal de audio.



VIII Modelado de recinto



Se lleva a cabo un modelado escala 1:1 del recinto polideportivo de Tauste. Se muestran las vistas exteriores del modelo 3D.



Independientemente del exterior, del aspecto o de detalles, no se debe ser extremadamente fino; no hay que perder de vista el propósito final y tener en cuenta la influencia casi nula de ciertos detalles.

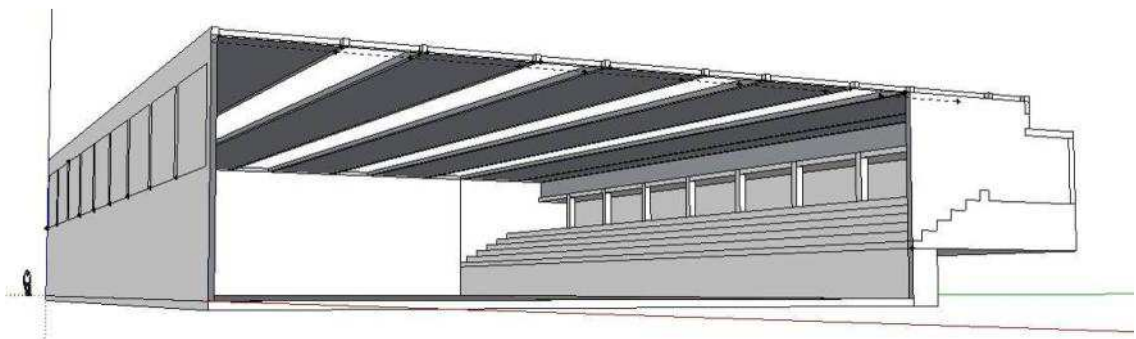


Figura 56. Modelo 3D de polideportivo

La carga computacional que exigen ciertos detalles no está justificada para el mínimo cambio que supone en los resultados finales.

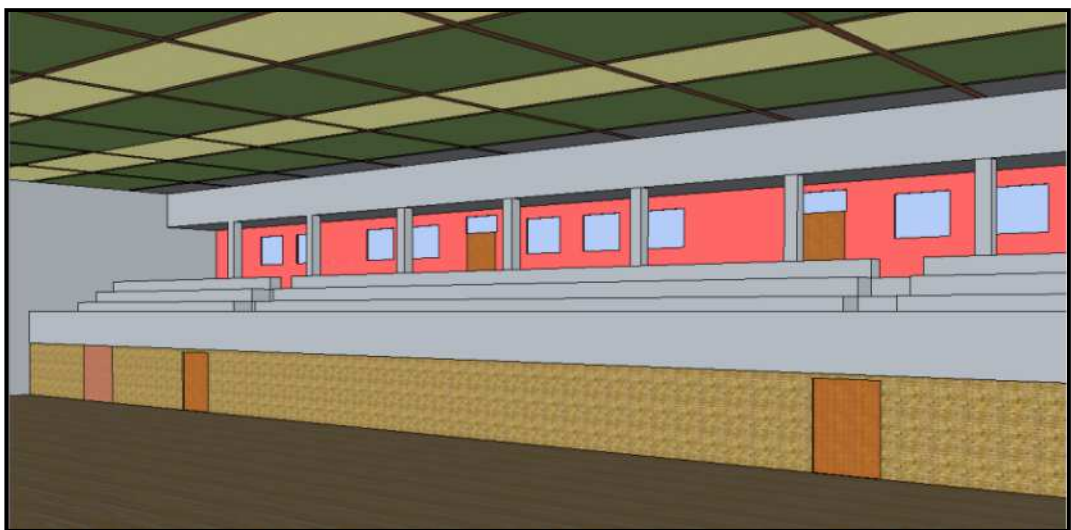
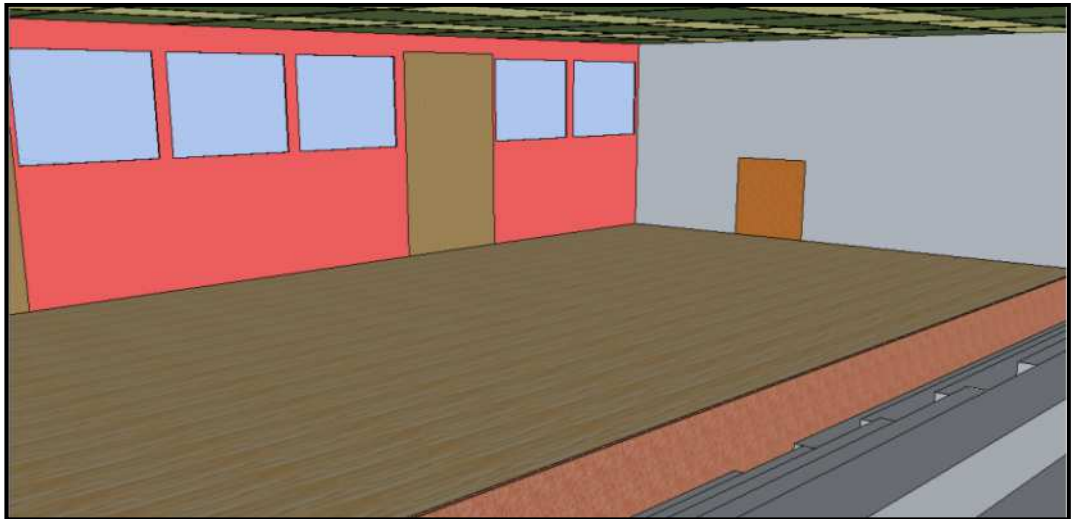
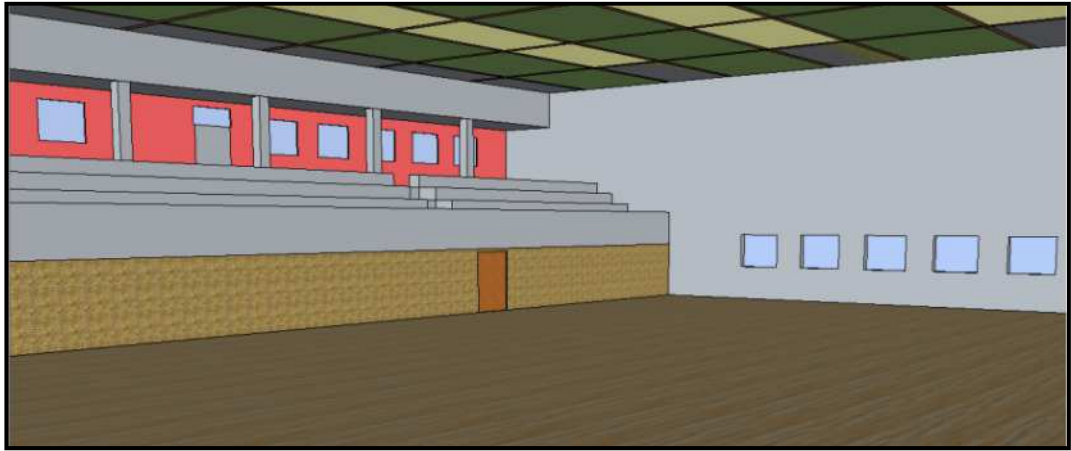


Figura 57. Interior de modelo 3D de polideportivo

Exportación SketchUp -> EASE

Se debe simplificar el modelo realizado en SketchUp, eliminando las capas externas, que no influyen en el cálculo acústico pero si complican el cálculo al software EASE.

Se prescinde de las capas más externas dejando la sola capa interna, con la cual choca la onda sonora, y es la que influirá en el sonido resultante. Y no manteniendo detalles finos, que no influyen en los resultados.

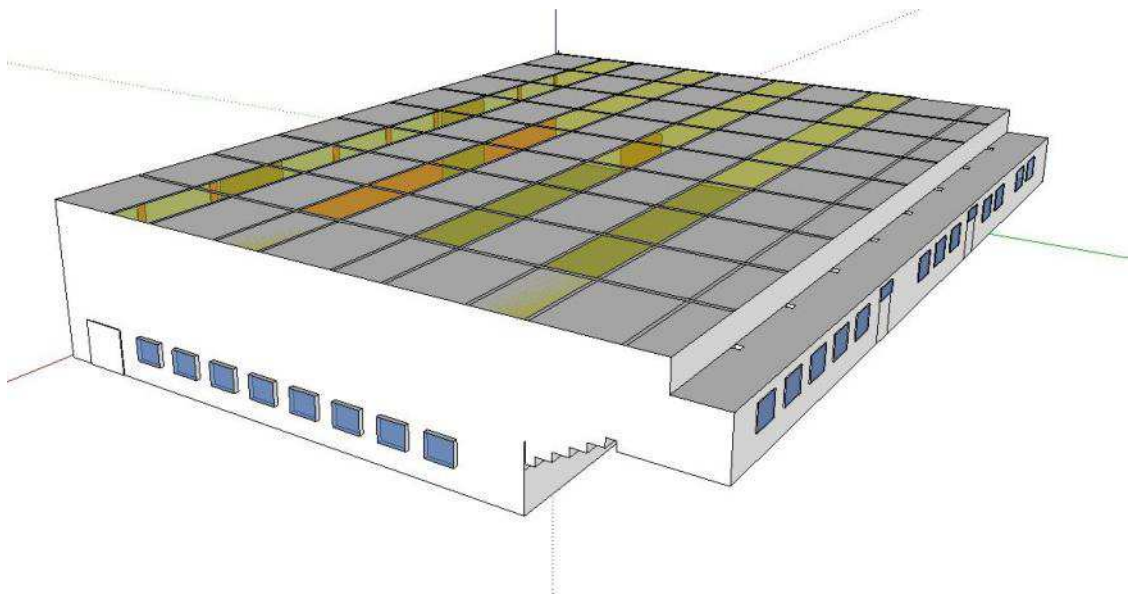


Figura 58. Modelo 3D en SketchUp a exportar a EASE

Estos materiales tienen unos coeficientes de absorción asignados que sí están fijados teniendo en cuenta el espesor y otras características de los paramentos, valorados in situ.

Diseño inicial

Se comprueban las dimensiones del modelo, para mantener tamaños y proporciones del recinto real. El chequeo de huecos es correcto.

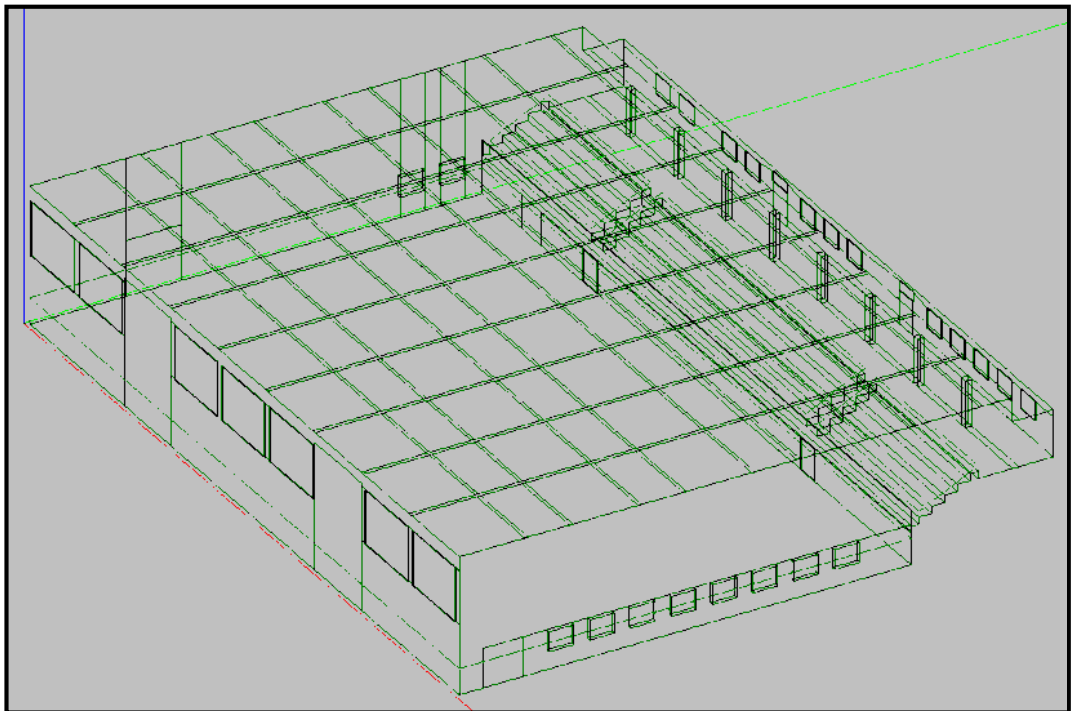
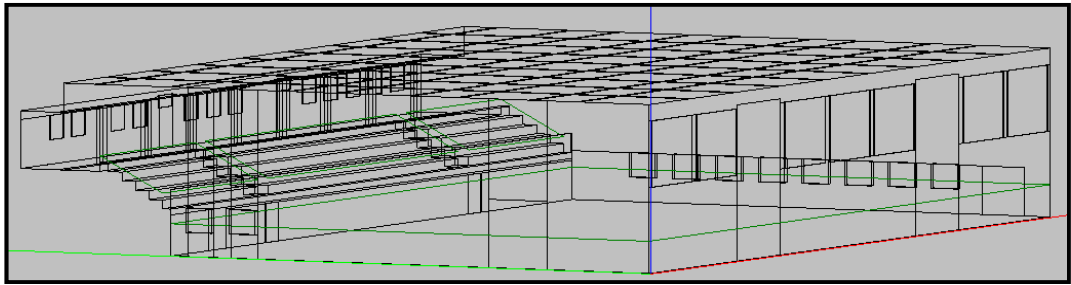
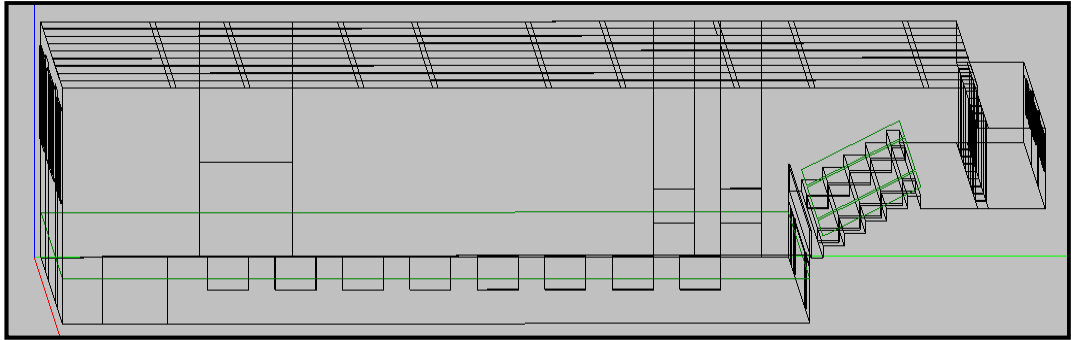


Figura 59. Modelo 3D en EASE importado de SketchUp

Material es en EASE

Por defecto, los materiales tienen asignado un coeficiente de absorción sonora elevado.

Se procede a incluir, renombrar y ajustar los coeficientes de absorción sonora “ α ” de todos los materiales que forman el modelo según las fichas mostradas en el capítulo de medidas previas.

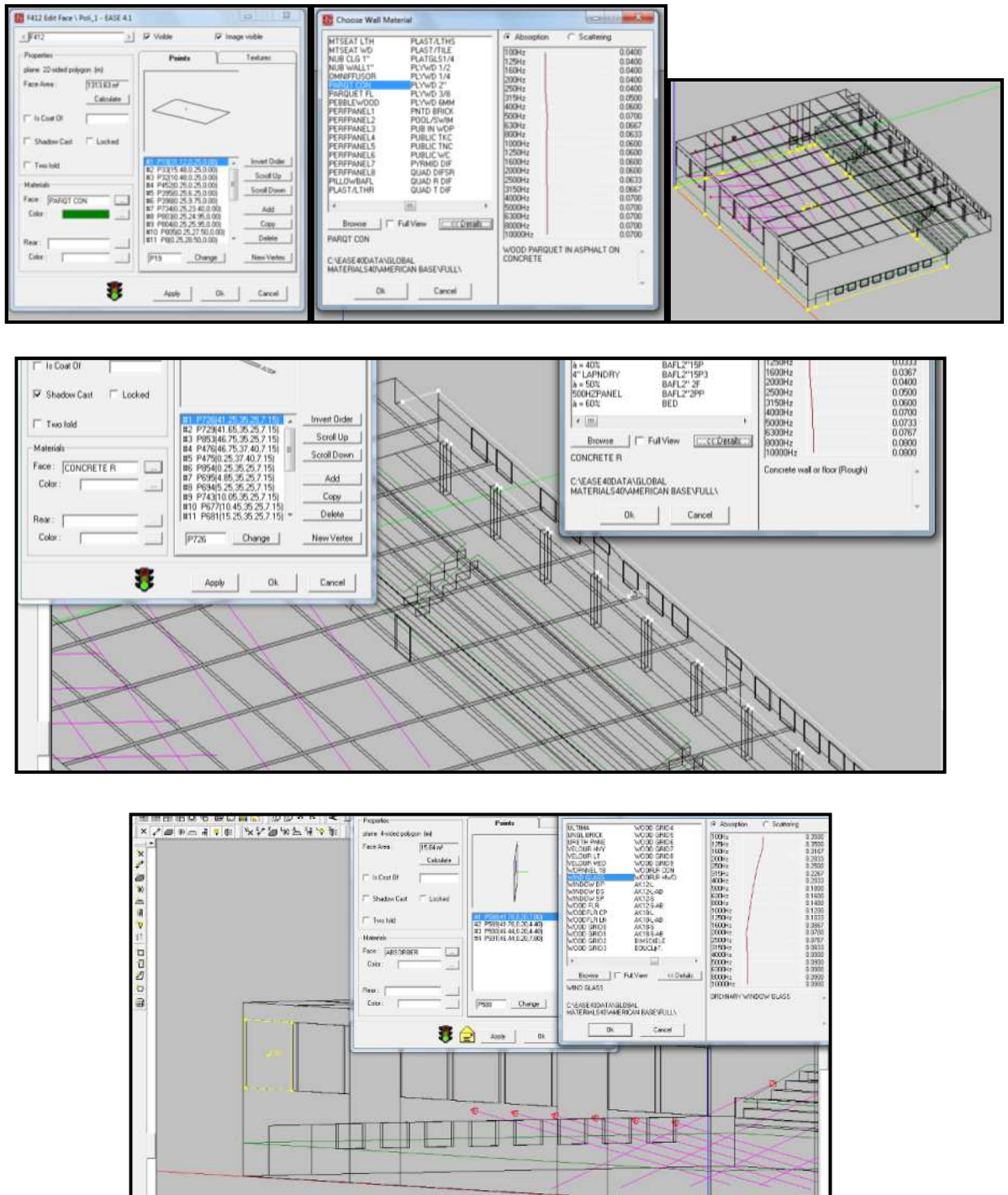


Figura 60. Ajuste de materiales y su absorción

Tiempo de reverberación en EASE

Tiempo de reverberación inicial

Esta es la tabla de tiempos de reverberación asignada al recinto al comienzo de la edición del modelo. Es la consecuencia directa de tener asignados valores altos de coeficientes de absorción sonora en los materiales.

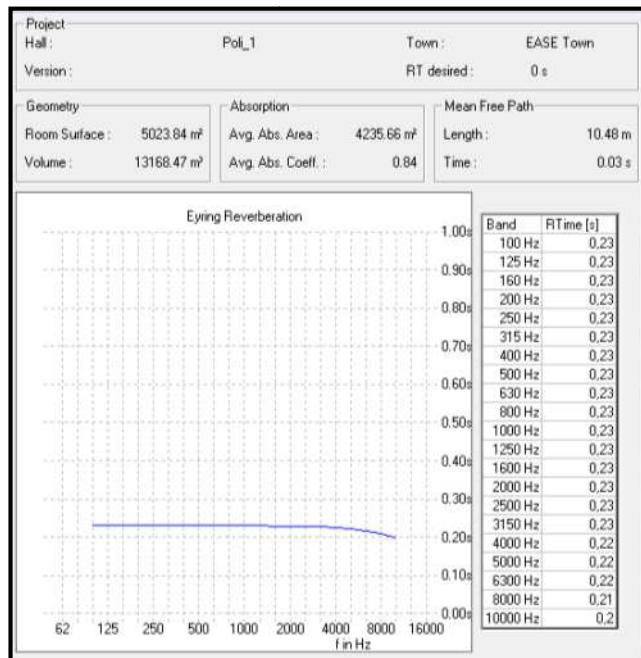


Figura 61. TR según Eyring

La fórmula de Sabine produce buenos resultados para materiales de baja absorción, mientras que a medida que los materiales son más difusores y están distribuidos más uniformemente, la fórmulas de Eyring proporciona mejores resultados.

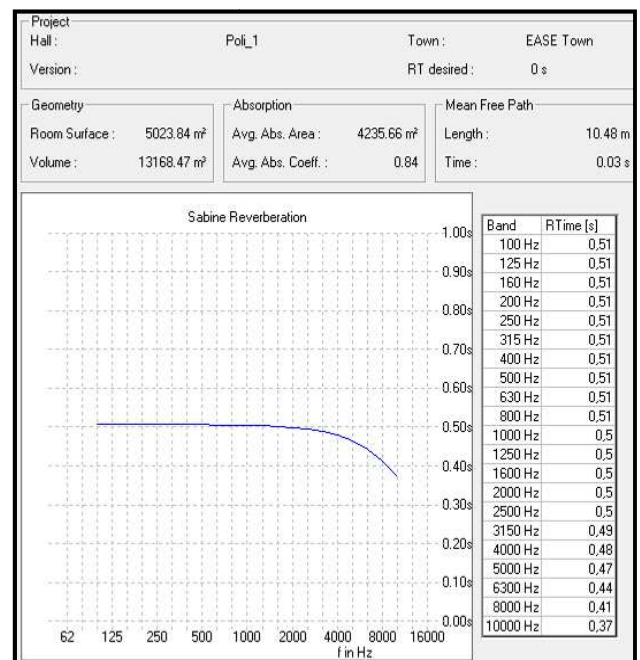


Figura 62. TR según Sabine

Ajuste del tiempo de reverberación

Ajustando los coeficientes de absorción de todos los materiales, por banda de frecuencia según los valores anteriormente presentados, se consigue aproximar la respuesta acústica del modelo (en cuanto a los valores de reverberación) a la que tiene el recinto in situ.

El tiempo de reverberación aumenta ya que los valores reales de absorción son más bajos que los pre asignados. Prestaremos atención de aquí en adelante solo a los datos calculados según la fórmula de Eyring.

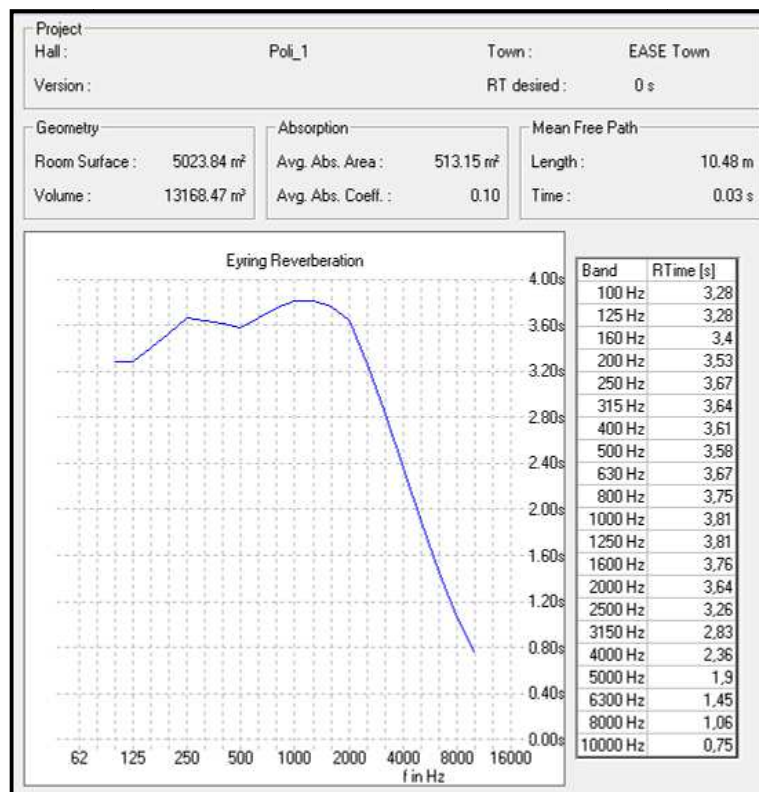


Figura 63. Valores finales de tiempo de reverberación del recinto

Se puede ver como la respuesta resulta ligeramente coloreada en alguna de las bandas. Esto nos hace intuir la necesidad de ecualización del equipo, aportando menor energía en esas bandas que son más fácilmente excitadas.

Validación de modelo. Diferencia entre real y simulación. Absorción y Tr.

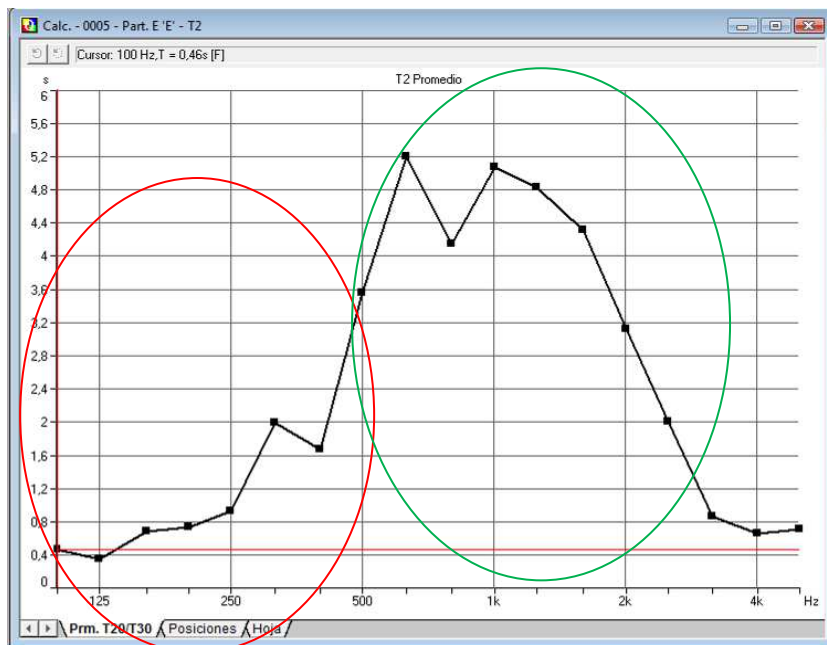
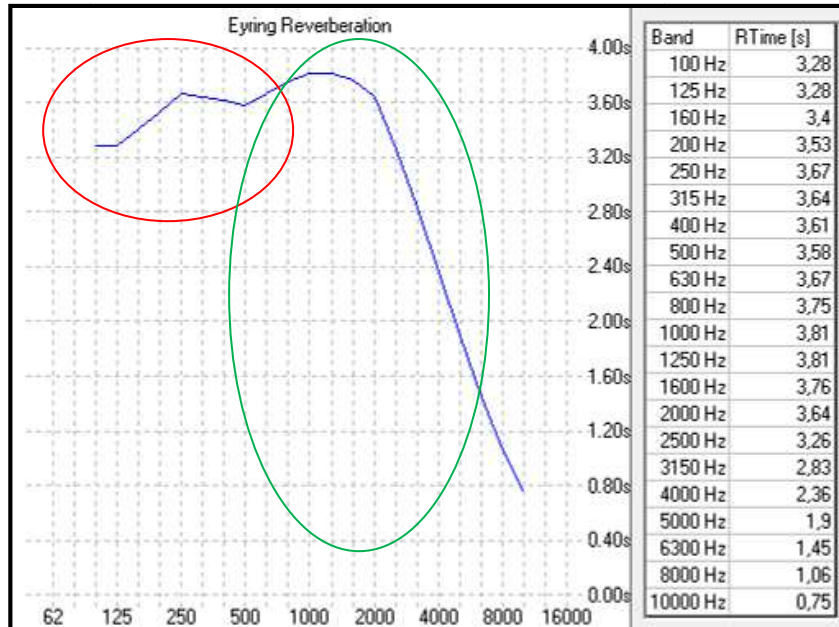


Figura 64. Validación del tiempo de reverberación del recinto

Las diferencias (principalmente en bajas frecuencias) están dadas por la aparición de máximos y mínimos y la imposibilidad de operar al mismo tiempo el sonómetro y la pistola acústica desde una posición alejada.

Frecuencia (Hz)	T (s) Real	T (s) EASE Eyring	T (s) Diferencia
100	0,5	3,3	2,8
125	0,4	3,3	2,9
160	0,7	3,4	2,7
200	0,8	3,5	2,7
250	1,0	3,7	2,7
315	2,0	3,7	1,7
400	1,7	3,6	1,9
500	3,6	3,6	0,0
630	5,2	3,9	1,3
800	4,1	3,7	0,4
1000	4,9	3,7	1,2
1250	4,8	3,8	1,0
1600	4,4	3,8	0,6
2000	3,2	3,7	0,5
2500	2,0	3,2	1,2
3150	0,9	2,8	1,9
4000	0,7	2,4	1,7
5000	0,8	1,9	1,1

Figura 65. Tabla de valores de tiempo de reverberación del recinto

En posiciones cercanas entre fuente y micrófono para ruido impulsivo, el sonido es directo y decrece rápidamente por mucha reverberación que exista en el recinto.

Se valida el tiempo de reverberación obtenido en EASE como modelo para simulación.

Posibles configuraciones de sistemas de refuerzo sonoro

Independientemente del tipo de sistema de refuerzo sonoro a instalar entre las opciones presentadas, se debe elegir una disposición razonada de los altavoces y resto de equipamiento para la obtención de una escucha de calidad y uniforme en todos los oyentes, sea señal musical o de habla. Entre las opciones vistas, existe la opción de instalar un sistema centralizado (*cluster* central o arrays) o en cambio, diseñar un sistema distribuido para todas las audiencias a cubrir.

Sistema centralizado

Un sistema centralizado ofrece una inteligibilidad y respuesta en frecuencia muy buenas. En cambio resulta más complicado conseguir coberturas uniformes en todas las audiencias debido a las diferentes distancias a los oyentes.

En este caso el sistema centralizado pensado es una pareja de arrays lineales, no un solo *cluster* central.

Los arrays, que se pueden incluir como sistemas centralizados por sus características y comportamiento, corrigen ciertos defectos mentados para estos sistemas centralizados tipo *cluster*: aumentan la cobertura de las audiencias y mejoran el control de la directividad.

Sistema distribuido

Este tipo de sistemas parten de la premisa de que cada altavoz cubre un área de audiencia, sin emitir excesivos niveles ya que el oyente no suele encontrarse alejado.

Son altavoces que suelen colocarse en techo o pared y no suelen instalarse en modo estereofónico.

No conviene percibir la señal de más de 1,5 altavoces en cada punto de escucha a evaluar.

Se van a proponer dos diseños finales, una configuración precisa con altavoces y elementos reales (disponibles en el mercado) para cada uno de los sistemas de refuerzo sonoro.

Opciones de localización de emisores

Como se ha introducido, entre los posibles sistemas de refuerzo sonoro, existe la opción de diseñar e instalar un sistema de refuerzo sonoro centralizado, estando clara la posición que se le daría al *cluster*, siendo la central sobre la audiencia y debiendo ajustar la altura del grupo, las potencias, las coberturas, la inclinación de los diferentes emisores, etc.

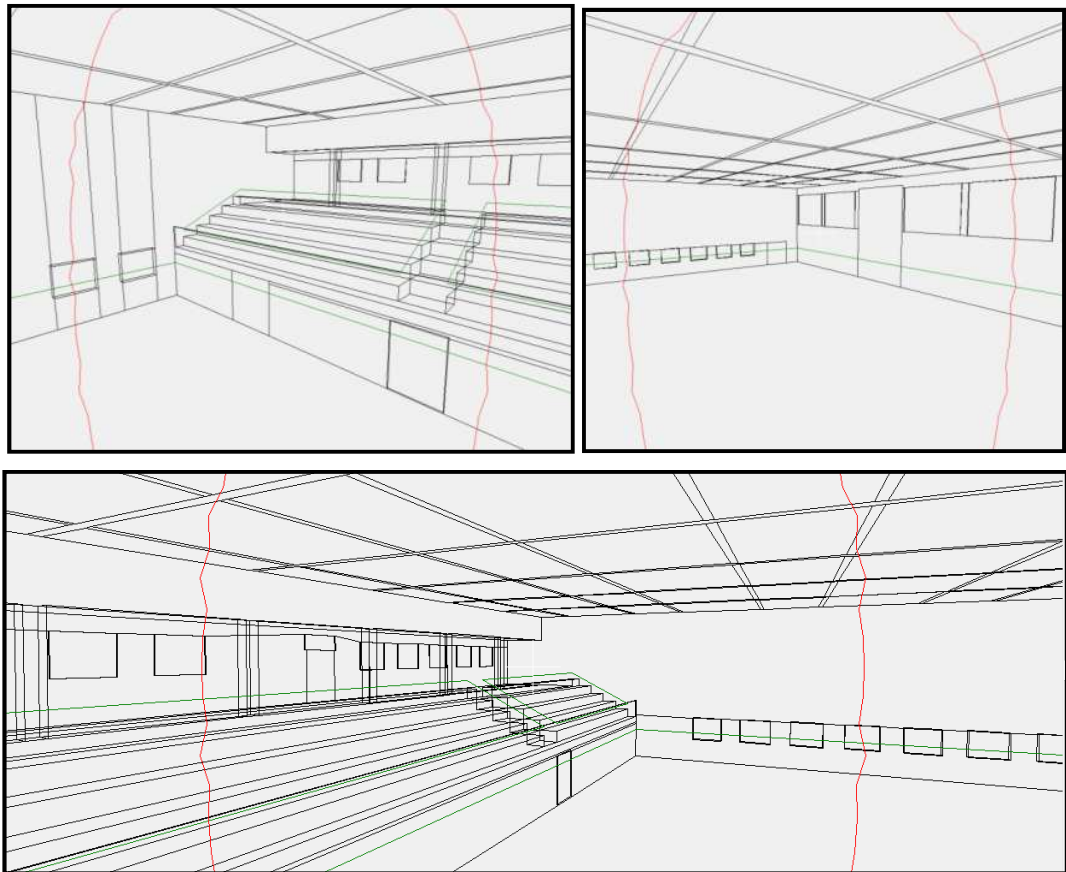


Figura 66. Vista desde *cluster* central

En el caso que ocupa se descarta por la poca altura del recinto para este propósito. Además no se tiene certeza de las posibilidades de éxito, en caso de colgar un equipo de este peso sobre la estructura de la edificación original, sin ningún sistema de arriostamiento o refuerzo constructivo adicional para esta nueva carga.

En todo caso, habría que pensar en la opción de un sistema centralizado tipo array, que quede instalado en uno de los laterales del recinto ya que en la posición central no es viable, como se ha explicado.

Por el contrario, si se opta por un sistema distribuido hay que tener en cuenta las posibilidades físicas de anclaje (ventanas, espaldaderas, cortinas de sectorización o puertas distribuidas por los paramentos verticales) y variar la separación, altura, inclinación y potencia de los altavoces. En un primer diseño se valora la colocación de los altavoces en los paramentos verticales, de forma perimetral. Los altavoces son cajas acústicas de la casa DAS Audio, que funcionan con tensión de línea: el modelo Factor 8T.

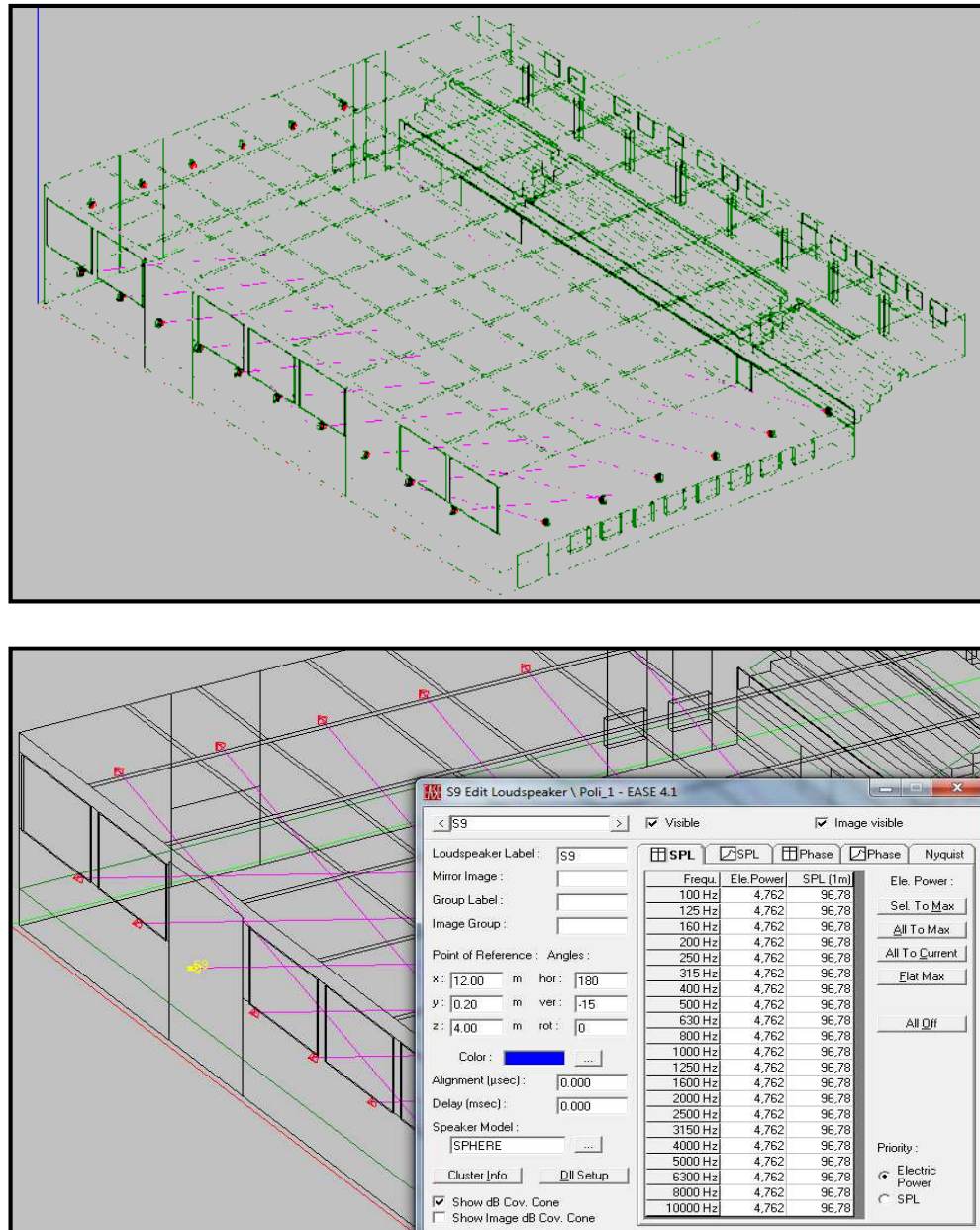


Figura 67. Situación de emisores de sistema distribuido

Tras simular los mapas de nivel de presión sonora directa y total, el sistema se comporta de forma correcta. Pero sí que hay problemas de reverberación y por tanto de inteligibilidad en los puntos más centrales de la pista, encontrando la recepción o el solapamiento de hasta 10 altavoces para una posición dada:

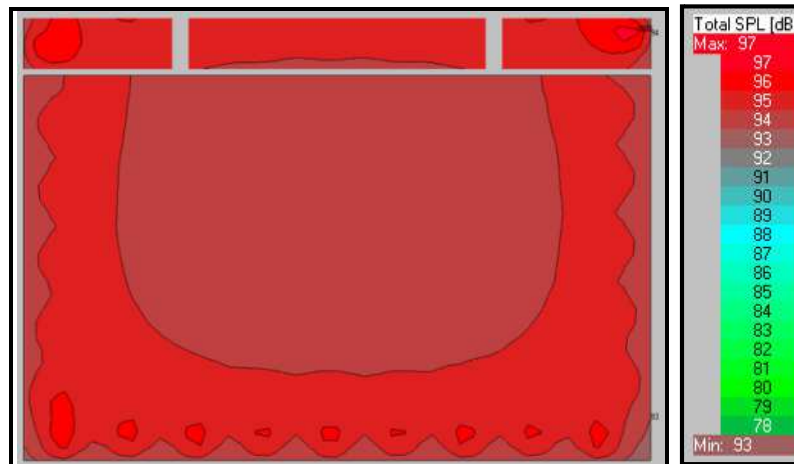


Figura 68. Mapa de cobertura SPL_t de sistema distribuido

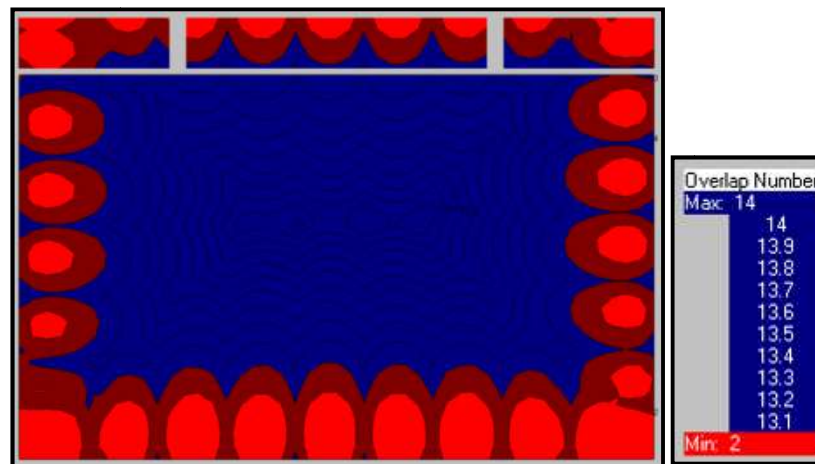


Figura 69. Solapamiento de altavoces de sistema distribuido

Viendo este inconveniente se tiene que optar por elegir altavoces de mayor alcance (de tiro largo) y tratar de reducir el número de altavoces del sistema, para evitar ecos o retardos indeseados., en el caso de llevar a cabo la instalación de un sistema distribuido.

Aun contando con las mejoras que aporten el ajuste y la equalización del sistema, el recinto tiene un comportamiento acústico poco favorable y se ve la necesidad de incluir absorción en el recinto para conseguir un óptimo funcionamiento del sistema de refuerzo sonoro.

En el software EASE se mejora la acústica del recinto instalando material fonoabsorbente en el techo de la pista, en las placas de madera contrachapada.

También se mejora la absorción de las áreas donde se situarán las audiencias, ajustando la absorción de los elementos hasta los coeficientes típicos de audiencia o públicos.

La mejora en la absorción se consigue con la instalación de material fonoabsorbente, ya sea en forma de baffles, rodillos o placas de material fonoabsorbente a instalar en el techo. Se pueden colgar a la estructura o adherir a las superficies de madera contrachapada existentes en la cubierta de la pista central.

Inclusión de material fonoabsorbente

Se decide instalar (o simular la instalación del mismo) material absorbente en las placas de madera contrachapada del techo o cubierta interior.

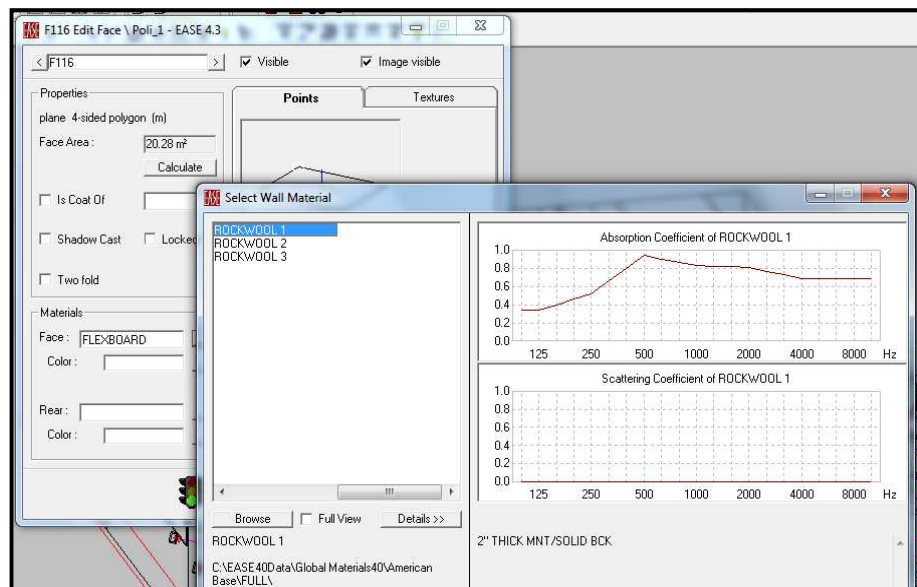


Figura 70. Material fonoabsorbente a incluir en modelo EASE

En un principio solo se instala (o cambia el coeficiente de absorción) de la mitad de las placas de cubierta, al tresbolillo como si se dibujara un tablero de ajedrez. Finalmente se mejora la absorción con la instalación de este material en todas las placas de madera contrachapada, por necesidad acústica y acabado estético.

Una solución similar tuve la oportunidad de contemplar y preguntar a personal de un recinto deportivo en Alcorisa, Teruel.

En este caso, además la forma semicircular de la cubierta ayuda a que se puedan dar fenómenos de reverberación o de concentración de energía sonora como ondas estacionarias, zonas de inteligibilidad escasa, etc.



Figura 71. Imágenes de recinto con material fonoabsorbente

TECSOUND® FT es un complejo insonorizante formado por un fieltro poroso y la lámina sintética **TECSOUND®** con base polimérica sin asfalto, ambos conformados de manera que proporcionan un elevado aislamiento acústico en los diversos elementos constructivos: paredes, techos, cubiertas, etc...



Normativa
CTE-DB-HR Protección frente al ruido.

Propiedades

- Elevado aislamiento acústico, combinado con todo tipo de sistemas constructivos.
- Facilidad de manipulación y aplicación.
- Facilidad de ejecución de las juntas.
- Excelente resistencia al envejecimiento.
- Imputrescible.
- Resistente al frío y al calor.

Aplicaciones

- Insonorización de cerramientos horizontales (techos) y verticales, en los que deba alcanzarse un excelente aislamiento acústico contra la transmisión de ruido aéreo.
- Aislamiento a ruido aéreo en paramentos verticales.
- Aislamiento a ruido aéreo en techos.
- Reducción del nivel de ruidos de impacto en todo tipo de forjados.

Sus principales aplicaciones abarcan obra nueva y rehabilitación, industrias, cines, teatros, complejos deportivos, discotecas, bares, restaurantes, hoteles, centros comerciales,...

Para más información, ver el manual de acústica.

Datos técnicos

Ensayo	Valor
Densidad (lámina TECSOUND®)	2,0 g/cm ³
Plegabilidad (UEAtc)	No rompe al doblar a -20 °C
Resistencia a la tracción (UNE 104-281/6.6)	> 30 N/cm ² (lámina TECSOUND®)
Coef. Conductividad térmica	0,037 W/m °C (Fieltro)
Propiedades acústicas	Ver manual de acústica

Presentación y almacenamiento

Se presenta en tres tipos de densidad superficial de masa:

Producto	Gramaje (Kg/m ²)	Espesor (mm)	Presentación	Nº Unidades por palet
Tecsound® FT 40	4,1	12	Rollos de 3,00 m x 1,20 m	8 rollos (57,6 m ²)
Tecsound® FT 55	5,6	12,5	Rollos de 5,50 m x 1,20 m	8 rollos (52,8 m ²)
Tecsound® FT 75	7,6	14	Rollos de 5,50 m x 1,20 m	8 rollos (52,8 m ²)

Debe almacenarse en un lugar seco y protegido de la intemperie, sin exponer a temperaturas superiores a 35 °C. El periodo máximo recomendado de almacenamiento es de un año.

Figura 72. Ficha de material fonoabsorbente

Repercusión del nivel de ocupación

Se ve que es notable la mejora conseguida con la instalación del material fonoabsorbente y que puede ser suficiente en el caso de haber público en el recinto, lo cual atenúa la reverberación que se pueda dar y aun se ajusta más a la realidad.

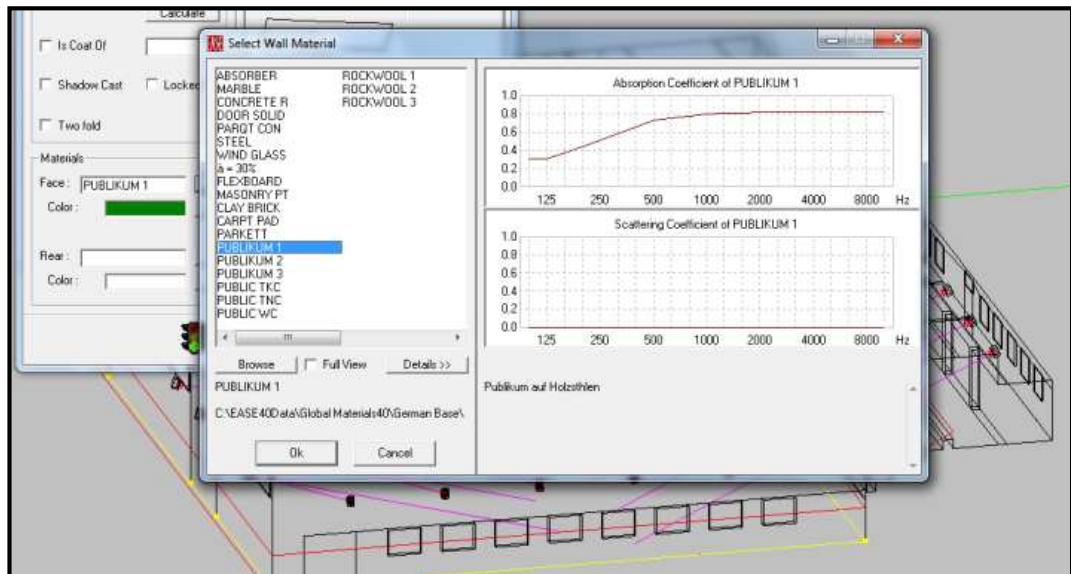


Figura 73. Material análogo a la absorción que produce el público en pista

Si además se simula el caso de un evento con público en la pista principal o gradas, la audiencia tendrá un nivel de presión sonora total e inteligibilidad más adecuados. Esto es gracias a la absorción que introducen, reduciendo la reverberación que se da en la pista debido a la escasa absorción de los materiales, el paralelismo entre suelo y cubierta y por el volumen del propio recinto.

Entonces se ajusta también los espacios o áreas donde se espera público.

Según la base de datos de EASE, se elige:

Material asientos debido a absorción de público: **PUBLIKUM1.mat**

Frecuencia (Hz)	T (s) Real	T (s) EASE Eyring	T (s) EASE Final
100	0,5	3,3	2,2
125	0,4	3,3	2,2
160	0,7	3,4	2,0
200	0,8	3,5	1,8
250	1,0	3,7	1,6
315	2,0	3,7	1,4
400	1,7	3,6	1,3
500	3,6	3,6	1,2
630	5,2	3,9	1,2
800	4,1	3,7	1,1
1000	4,9	3,7	1,1
1250	4,8	3,8	1,1
1600	4,4	3,8	1,1
2000	3,2	3,7	1,0
2500	2,0	3,2	1,1
3150	0,9	2,8	1,0
4000	0,7	2,4	1,0
5000	0,8	1,9	0,9

Figura 74. Comparativa final de tiempos de reverberación

Hay divergencia en los datos para las bandas de más baja y alta frecuencias entre lo medido y el modelo de EASE como se ha explicado. Sin embargo el resultado que se consigue tras las mejoras introducidas se asemejan mucho a lo estimado y además da un resultado, en cuestión de tiempo de reverberación, óptimo para los objetivos propuestos..

Diseños finales para la localización de emisores

- Sistema distribuido

Tratando de evitar las problemáticas de otros sistemas y configuraciones se eligen unos altavoces con mayor alcance y potencia para la opción de sistema distribuido. Así se mejoran los efectos de solapamiento de fuentes y problemas de precedencias y calidad acústica.

Según estos nuevos propósitos, los altavoces elegidos también de la casa comercial DAS Audio, son altavoces de dos vías y tensión de línea: los modelos Factor 8T y Bidriver Plus T.

Son usados en sistemas distribuidos debido a su largo alcance y alta sensibilidad en posiciones más elevadas. Se verifica si se amplía la cobertura de cada uno de los altavoces y se puede reducir el número total.

Se busca reducir el número de altavoces con la intención de mejorar la inteligibilidad en el centro del recinto, reducir la reverberación y también, lógicamente, con objetivos económicos.

Este sería el diseño efectuado para un sistema distribuido, manteniendo altavoces orientados al graderío (Factor 8T) y dos líneas de altavoces de tiro largo (Bidriver Plus T) más dos refuerzos laterales para dar cobertura a la zona de pista:

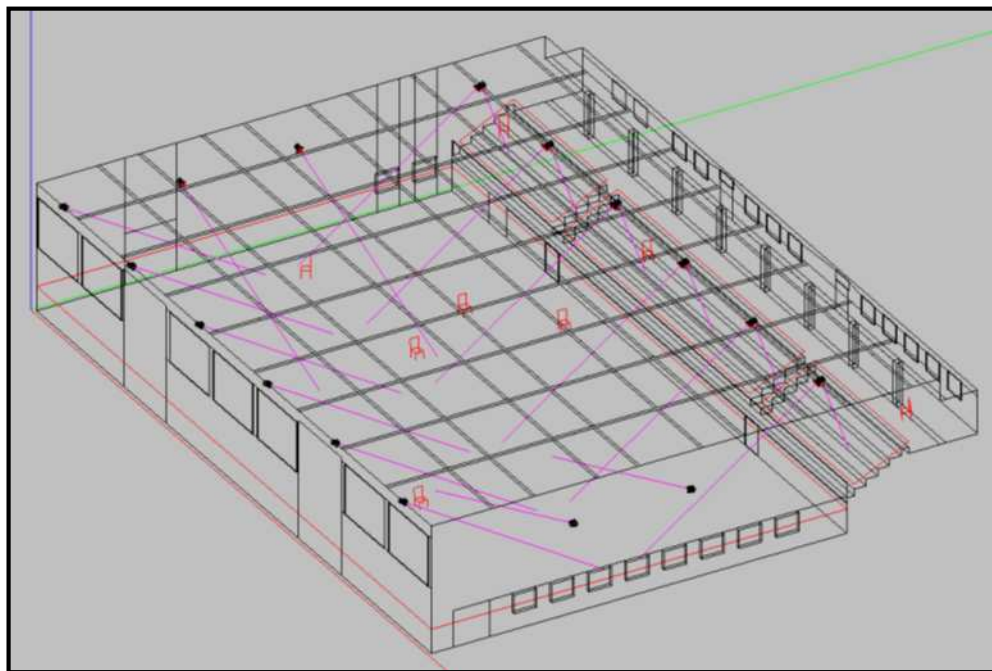


Figura 75. Modelo diseñado para sistema distribuido

Se define la posición que se le da al conjunto de altavoces que formaría el sistema distribuido de refuerzo sonoro en el caso del pabellón de deportes Manín Larraz, de Tauste.

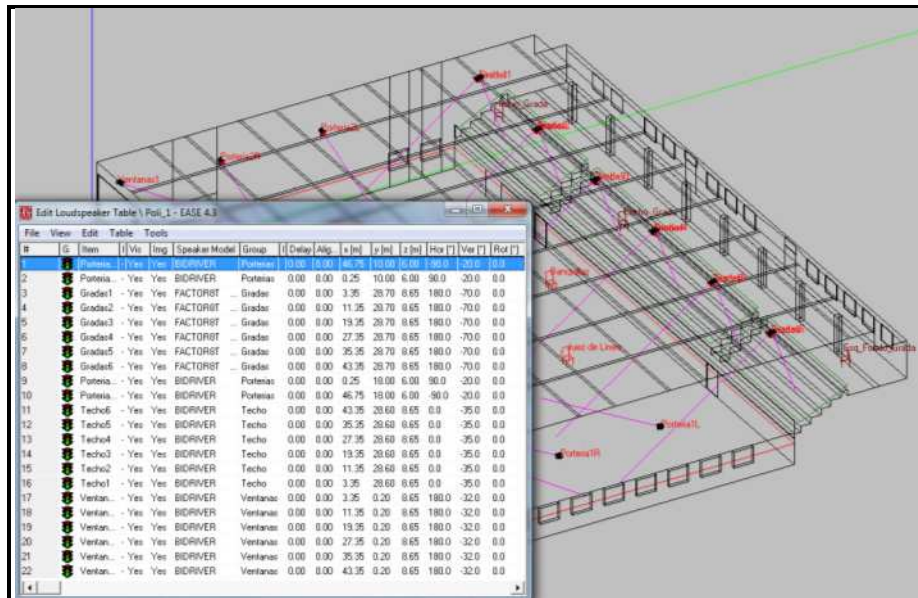


Figura 76. Tabla de emisores

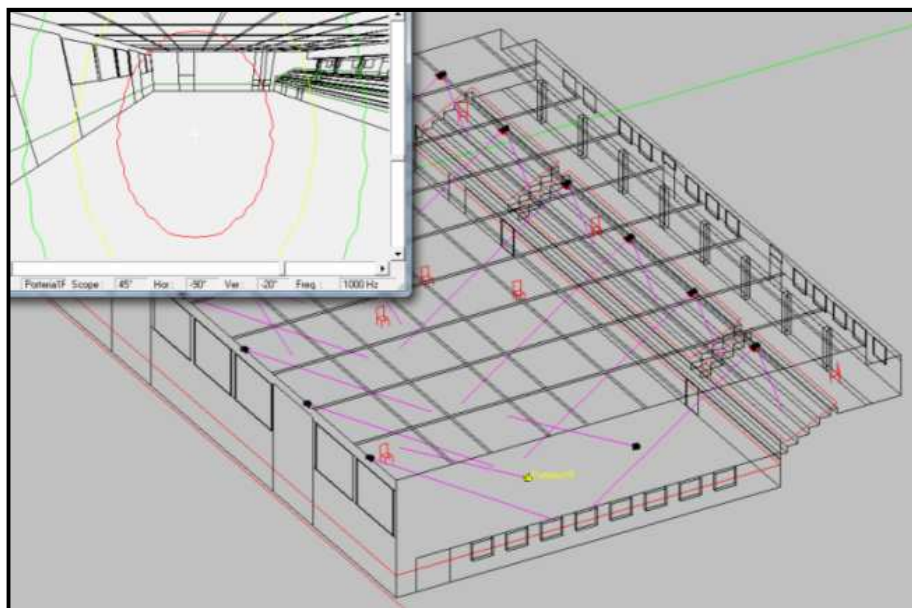


Figura 77. Vista desde emisor portería

En primer lugar, se distingue entre la zona de pista y la zona de graderío. Para el sistema de refuerzo sonoro distribuido, la zona de pista estará sonorizada por emisores de pared, colgados y dispuestos en los paramentos verticales (fondos de porterías, laterales largos).

Son el modelo DAS Bidriver Plus T, habiendo seis y dos unidades en los laterales largos y cortos, respectivamente.

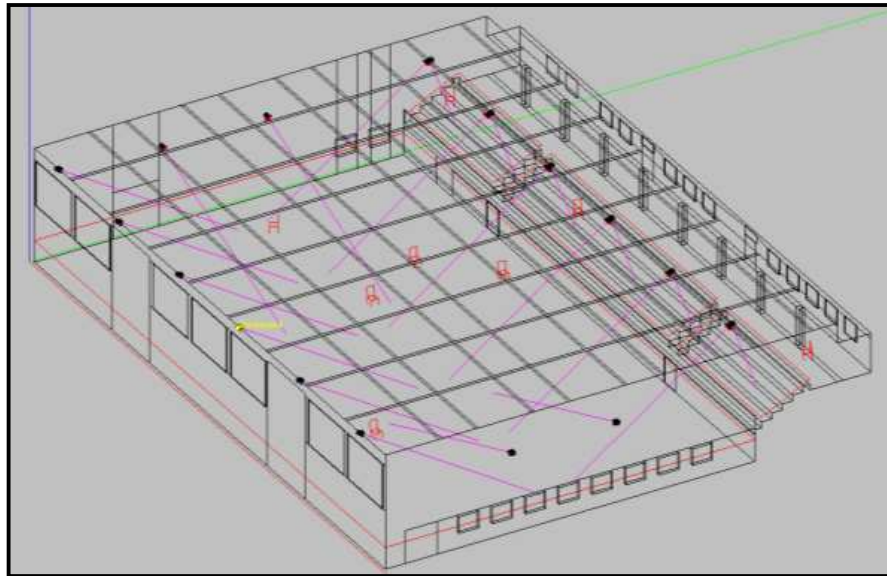


Figura 78. Emisor de pista

Para dar cobertura a la zona de graderío se prevén cajas acústicas del modelo DAS Factor 8T, con ajustes y configuración propias y diferentes a los modelos de pista. Serán seis unidades situadas en el mismo punto que los de pista (en el lateral largo) pero con orientación a las audiencias de gradas en lugar de estar emitiendo hacia la pista. Aunque se tenga la posibilidad de funcionar en estéreo por la conexión al amplificador, emitirán una señal monocal.

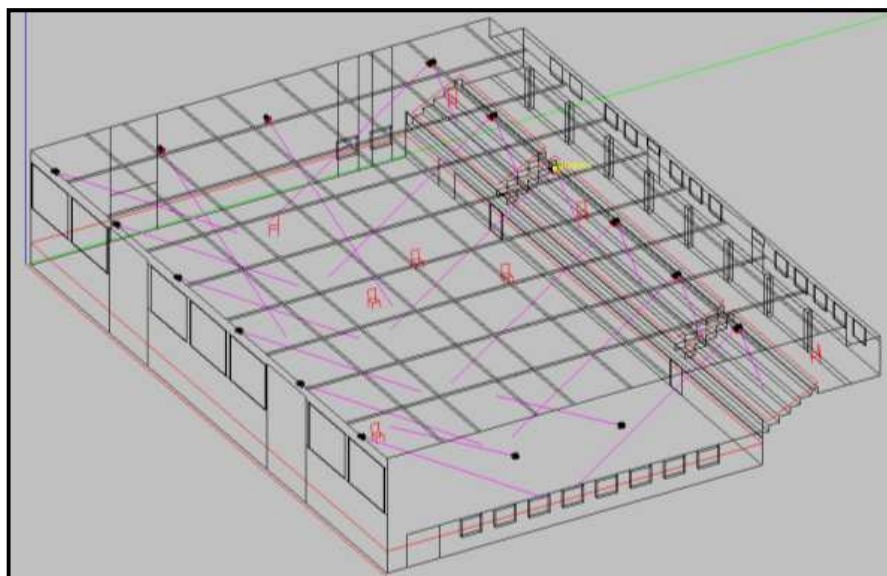


Figura 79. Emisor de graderío

Esta tabla muestra la posición y nomenclatura de cada uno de los emisores a instalar:

#	G	Item	I	Vis	Img	Speaker Model	Group	I	Delay	Alig...	x [m]	y [m]	z [m]	Hor [°]	Ver [°]	Rot [°]
1		Porteria...	-	Yes	Yes	BIDRIVER	Porterias		0.00	0.00	46.75	10.00	6.00	-90.0	-20.0	0.0
2		Porteria...	-	Yes	Yes	BIDRIVER	Porterias		0.00	0.00	0.25	10.00	6.00	90.0	-20.0	0.0
3		Gradas1	-	Yes	Yes	FACTOR8T ...	Gradas		0.00	0.00	3.35	28.70	8.65	180.0	-70.0	0.0
4		Gradas2	-	Yes	Yes	FACTOR8T ...	Gradas		0.00	0.00	11.35	28.70	8.65	180.0	-70.0	0.0
5		Gradas3	-	Yes	Yes	FACTOR8T ...	Gradas		0.00	0.00	19.35	28.70	8.65	180.0	-70.0	0.0
6		Gradas4	-	Yes	Yes	FACTOR8T ...	Gradas		0.00	0.00	27.35	28.70	8.65	180.0	-70.0	0.0
7		Gradas5	-	Yes	Yes	FACTOR8T ...	Gradas		0.00	0.00	35.35	28.70	8.65	180.0	-70.0	0.0
8		Gradas6	-	Yes	Yes	FACTOR8T ...	Gradas		0.00	0.00	43.35	28.70	8.65	180.0	-70.0	0.0
9		Porteria...	-	Yes	Yes	BIDRIVER	Porterias		0.00	0.00	0.25	18.00	6.00	90.0	-20.0	0.0
10		Porteria...	-	Yes	Yes	BIDRIVER	Porterias		0.00	0.00	46.75	18.00	6.00	-90.0	-20.0	0.0
11		Techo6	-	Yes	Yes	BIDRIVER	Techo		0.00	0.00	43.35	28.60	8.65	0.0	-35.0	0.0
12		Techo5	-	Yes	Yes	BIDRIVER	Techo		0.00	0.00	35.35	28.60	8.65	0.0	-35.0	0.0
13		Techo4	-	Yes	Yes	BIDRIVER	Techo		0.00	0.00	27.35	28.60	8.65	0.0	-35.0	0.0
14		Techo3	-	Yes	Yes	BIDRIVER	Techo		0.00	0.00	19.35	28.60	8.65	0.0	-35.0	0.0
15		Techo2	-	Yes	Yes	BIDRIVER	Techo		0.00	0.00	11.35	28.60	8.65	0.0	-35.0	0.0
16		Techo1	-	Yes	Yes	BIDRIVER	Techo		0.00	0.00	3.35	28.60	8.65	0.0	-35.0	0.0
17		Ventan...	-	Yes	Yes	BIDRIVER	Ventanas		0.00	0.00	3.35	0.20	8.65	180.0	-32.0	0.0
18		Ventan...	-	Yes	Yes	BIDRIVER	Ventanas		0.00	0.00	11.35	0.20	8.65	180.0	-32.0	0.0
19		Ventan...	-	Yes	Yes	BIDRIVER	Ventanas		0.00	0.00	19.35	0.20	8.65	180.0	-32.0	0.0
20		Ventan...	-	Yes	Yes	BIDRIVER	Ventanas		0.00	0.00	27.35	0.20	8.65	180.0	-32.0	0.0
21		Ventan...	-	Yes	Yes	BIDRIVER	Ventanas		0.00	0.00	35.35	0.20	8.65	180.0	-32.0	0.0
22		Ventan...	-	Yes	Yes	BIDRIVER	Ventanas		0.00	0.00	43.35	0.20	8.65	180.0	-32.0	0.0

Figura 80. Tabla de emisores instalados en proyecto

Se disponen cada 8,00 metros en los encuentros entre la cubierta y los paramentos verticales, a una altura de 8,65 metros sobre el suelo para los altavoces del lateral de la pista. En el caso de los emisores de los fondos de las porterías se disponen también cada 8,00 metros, pero a una altura de 6,00 metros sobre el suelo, con el propósito sonorizar las zonas más centrales. Así se consigue, además de ampliar la cobertura sonora, que no sean fácilmente alcanzables por el público en conciertos o elementos deportivos en el caso de competiciones.

Este sistema va a ser un sistema de refuerzo sonoro monocanal. No tiene mucho fundamento proponer la instalación de un sistema estereofónico ya que nunca va a estar el oyente o la audiencia equidistante de dos altavoces (canal L y R).

Por tanto, sí se harán grupos de altavoces (para permitir la sonorización por zonas) pero todos los grupos o amplificadores serán alimentados con la misma señal.

Sistema distribuido. Elección de altavoces

Das Audio Factor 8T



Altavoces escogidos para la zona de graderío.

Está diseñado para ser instalado (según la posición de la figura 81) en las vigas metálicas de las cubierta y orientar seis unidades hacia las 3 audiencias existentes en el graderío.



Figura 81. Factor 8T

Transformer RMS Power Handling:	60 W
RMS (Average) Power Handling^R:	100 W
Program Power Handling^P:	200 W
Peak Power Handling^K:	>400 W
Frequency Response^F:	55 Hz - 22 kHz
Total System Impedance^I:	82/163/335/670/1340/2680 Ω
Loudspeaker Nominal Impedance^I:	8 Ω
On-axis Sensitivity 1W / 1 m^S:	91 dB SPL
Nominal -6 dB Beamwidths^B:	145° Horizontal
(average, 500 Hz to 8 kHz)	135° Vertical
Speech Coverage Angles^C:	155° Horizontal x 150° Vertical
Enclosure Material:	Mineral loaded polypropylene
Color:	Black or white
Transducers/Replacement Parts:	Bass: G-8/GM G-8
	HF: TWT-8/GM TWT-8
Connector:	Spring loaded push terminals
Dimensions (H x W x D):	44 x 27 x 23 cm (17.5 x 10.5 x 9 in)
Weight:	8.1 kg (18 lbs)
Shipping Weight:	9.2 kg (20 lbs)
Accessories (optional):	AX-8 wall/ceiling mount

Figura 82. Características Factor 8T

Con este altavoz de reducido tamaño se da servicio a las audiencias de la zona de gradas:

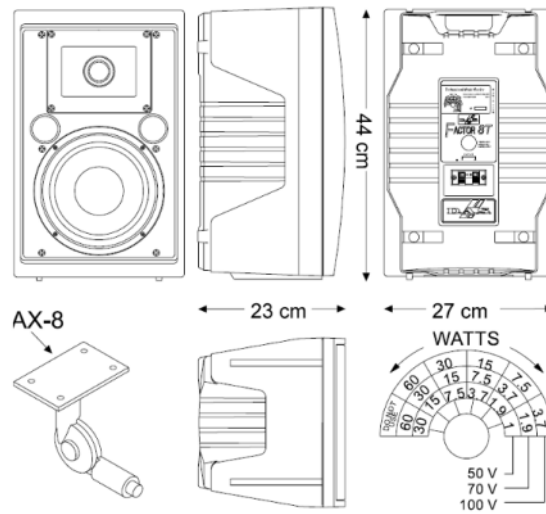


Figura 83. Dimensiones Factor 8T

Se muestra el amplificador indicado para este tipo de altavoces:



Figura 84. Amplificador Factor 8T

Das Audio Bidriver Plus T

Este altavoz de 300 W y dos vías es ideal para la reproducción de señal de voz y musical, sin necesidad de refuerzo en graves. Es un altavoz de medios y agudos diseñado para proporcionar altos niveles sonoros y excelente control de la directividad.

Se instalarán en la parte alta de los laterales más largos de la pista, teniendo sonorizada con dos líneas enfrentadas (de seis unidades cada una), toda la pista sonorizada. Otras dos unidades se instalarán en los laterales más cortos de la pista.

AES RMS (Average) Power Handling²:	300 W
Programme Power Handling²:	600 W
Peak Power Handling²:	1200 W
Nominal Impedance:	8 Ω
On-axis Sensitivity 1 W / 1m:	104 dB SPL
Nominal Frequency Range:	160 Hz - 12 kHz
-6 dB Beamwidths:	61° Horizontal
(average, 1.25 to 8 kHz)	54° Vertical
MF and HF Voice Coil Diameter:	102 mm (4 in)
Dimensions (H x W x D):	350 x 445 x 400 mm (13.8 x 17.5 x 15.8 in)
Weight:	17 kg (37.4 lbs)



Figura 85. Bidriver Plus T

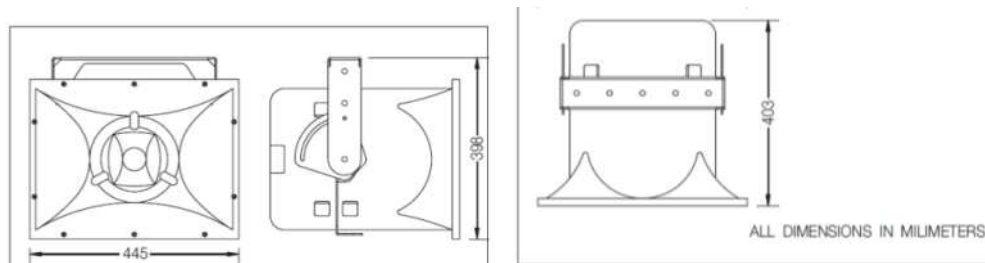


Figura 86. Dimensiones Bidriver Plus T

Con este altavoz de largo alcance se pueden cubrir amplias áreas de audiencias o grandes distancias, preservando la definición y claridad del mensaje en el caso de ser una señal de voz.



Figura 87. Amplificador Bidriver Plus T

Sistema distribuido. Ecuación y filtros

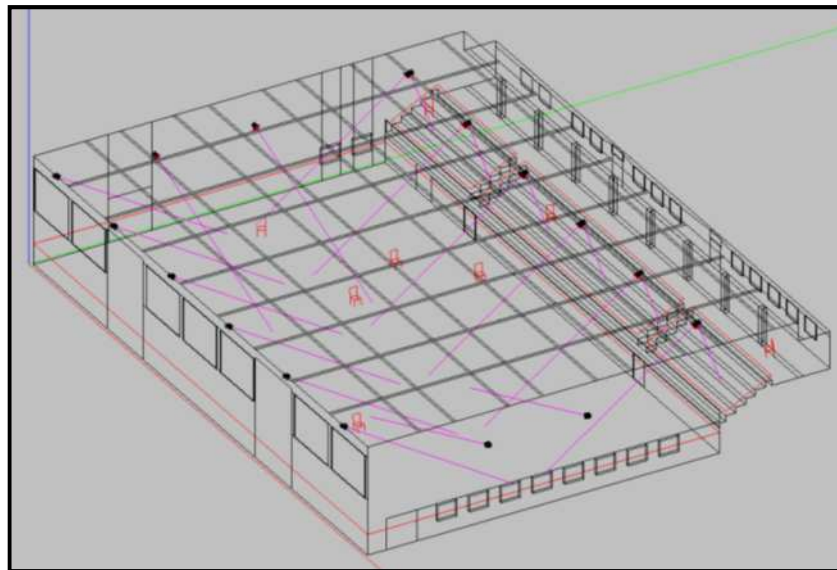


Figura 88. Modelo de sistema distribuido

Una vez elegida la posición de los altavoces del sistema de refuerzo sonoro, se debe asegurar el nivel y calidad de la transmisión sonora a emitir. Tanto para la opción estándar con sistema distribuido como la opción complementaria de los arrays lineales, que a continuación se estudia y presenta.

Se debe conseguir un nivel de presión sonora uniforme en las diferentes audiencias, ajustando la potencia de los altavoces/amplificadores.

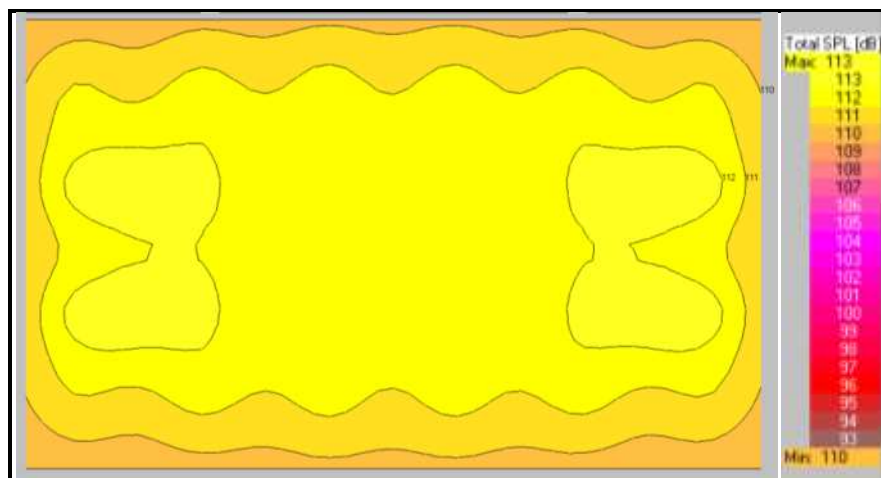


Figura 89. Recubrimiento inicial de zona de pista para el SPL_r con sistema distribuido

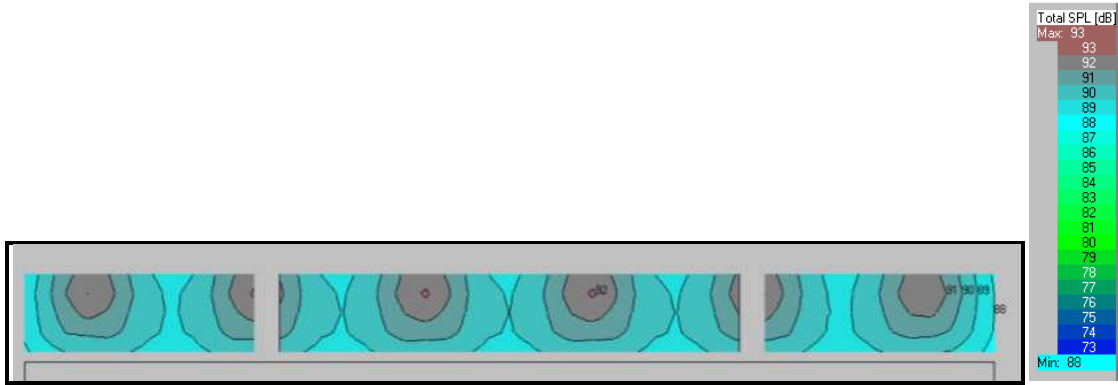


Figura 90. Recubrimiento inicial de zona de gradas para el SPL_t con sistema distribuido

En este punto se va ecualizar la curva de cada uno de los emisores con la intención de obtener la reproducción de una señal con calidad, inteligibilidad y fidelidad con el sonido original. En primer lugar se lleva a cabo una ecualización en cada una de las zonas en caso del sistema distribuido; por un lado la audiencia A1 (pista) y por otro las audiencias A2, A3 y A4 (gradas). La ecualización elegida es una curva plana ya que el recinto tiene una acústica muy reverberante pero se puede ajustar con la ayuda de un instrumento de medida o la propia experiencia del técnico con cualquier curva que se precise.

Factor 8T

Se obtiene el correspondiente espectro inicial de frecuencias para SPL_t .

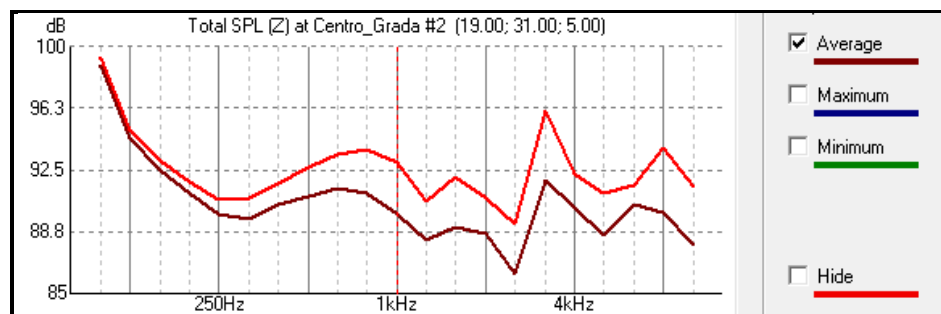


Figura 91. Espectro inicial. SPL_t en Centro_Grada con sistema distribuido

Partiendo de la curva máxima de potencia de cada altavoz:

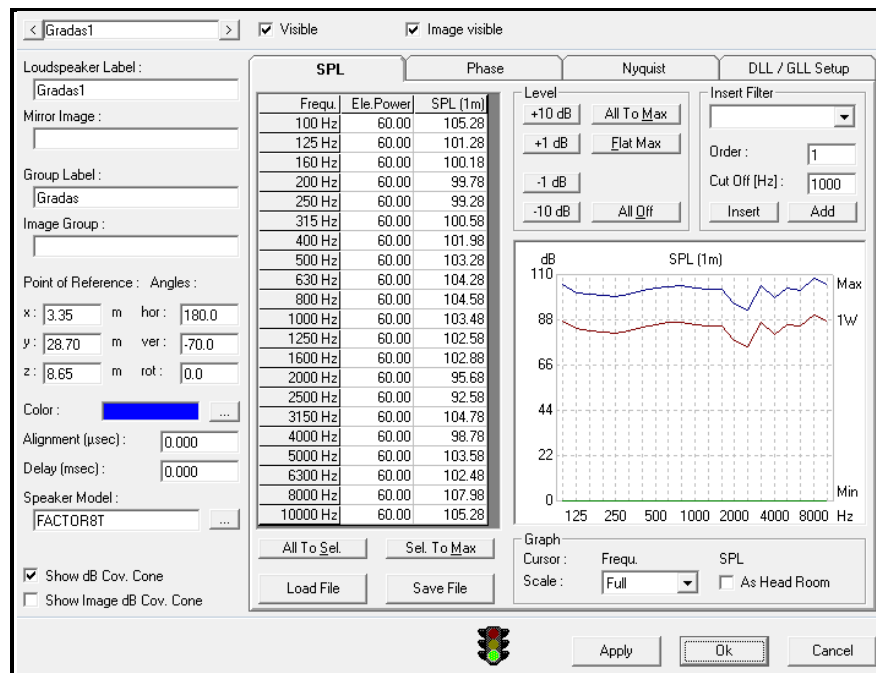


Figura 92. Ajustes de Factor 8T I

Cuando se tienen recubiertas las audiencias de forma homogénea y con un nivel sonoro suficiente sobre el nivel de ruido de fondo, se debe ajustar más finamente, en cada una de las bandas de frecuencia (tercios de octava) mediante la **ecualización**. La ecualización se lleva a cabo mediante la inserción de filtros de tercio de octava con cierta atenuación, en cada uno de los altavoces.

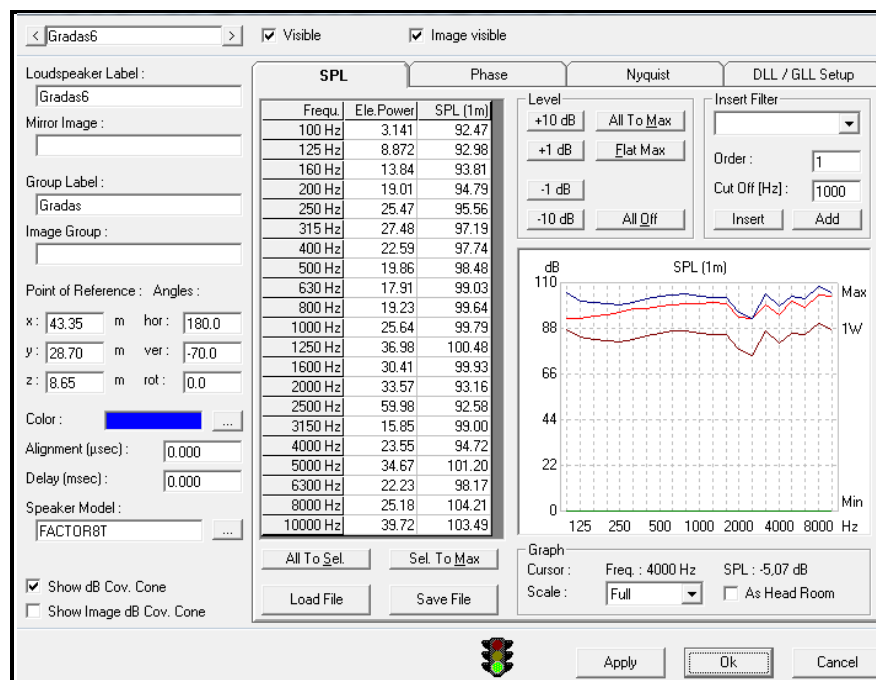


Figura 93. Ajustes de Factor 8T II tras la inserción del filtro

Se ecualiza el sistema de refuerzo sonoro centralizado, compuesto por una pareja de arrays lineales que sonoriza la totalidad de las audiencias, con la intención de obtener la reproducción de una señal con calidad, inteligibilidad y fidelidad con el sonido original.

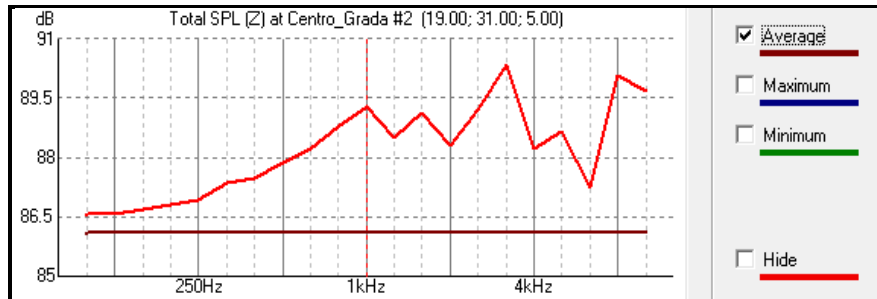


Figura 94. Espectro final. SPL_t en Centro_Grada con sistema distribuido

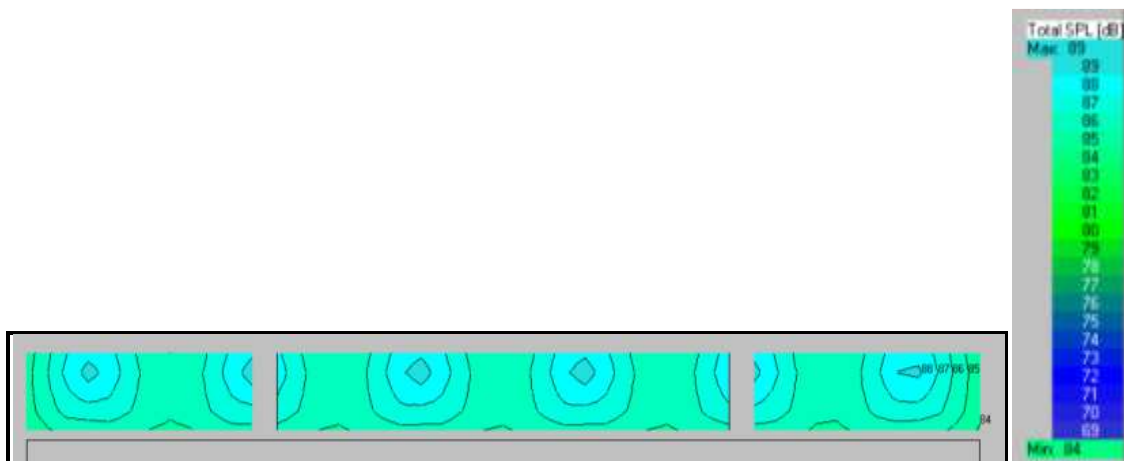


Figura 95. Recubrimiento final de zona de gradas para el SPL_t con sistema distribuido

Ante el elevado nivel resultante, una opción podría ser elegir otro emisor o altavoz menos potente. Pero este margen nos permitirá más opciones en los ajustes de nivel, ecualizaciones y sobre todo, el sistema trabajará de una forma más desahogada.

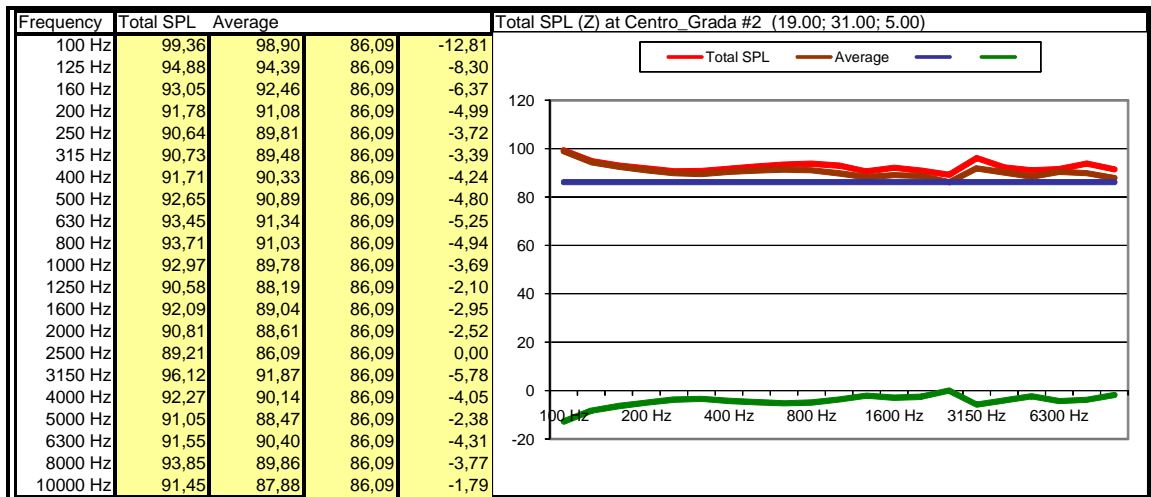


Figura 96. Ecuación de Factor 8T

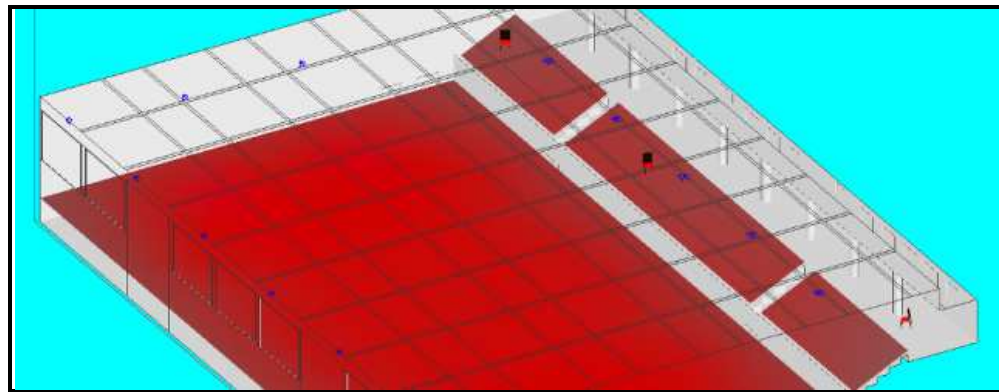


Figura 97. 3D Mapping de SPL_t para gradas con sistema distribuido

Bidriver Plus T

Se obtiene el correspondiente espectro de frecuencias para SPL_t.

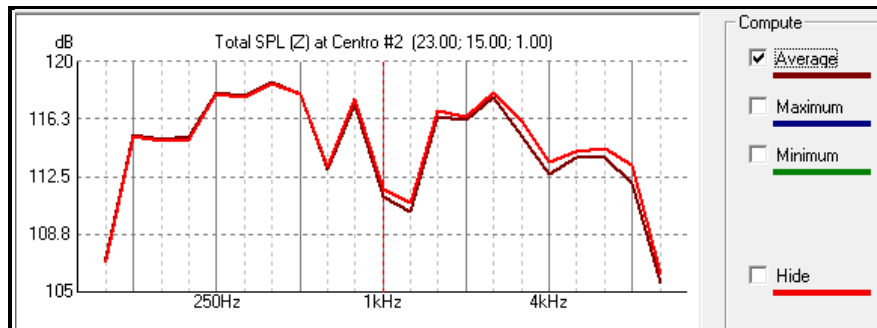


Figura 98. Espectro inicial. SPL_t en Centro con sistema distribuido

Partiendo de la curva máxima de potencia de cada altavoz, se tiene este espectro inicial:

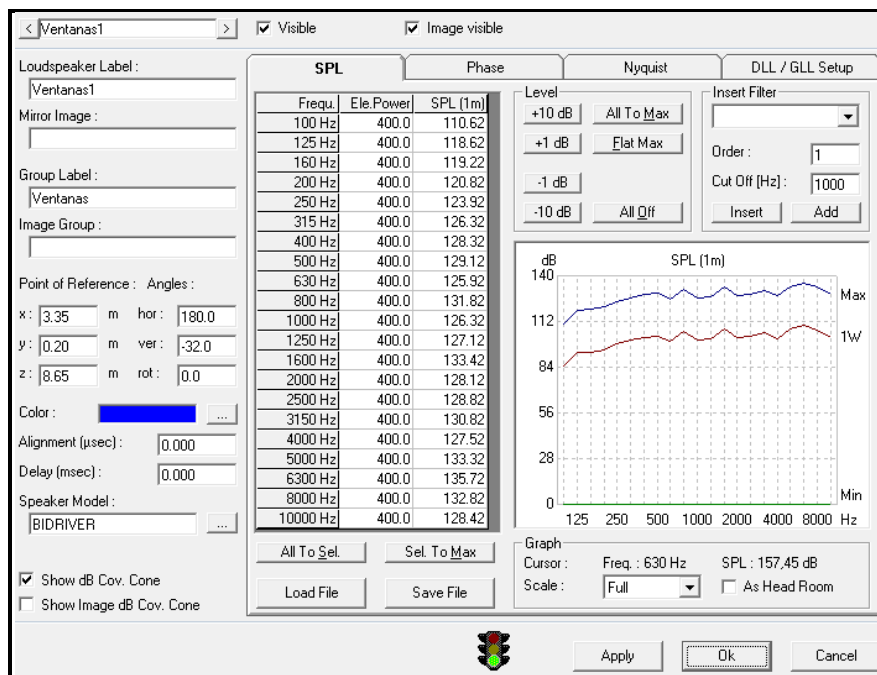


Figura 99. Ajustes de Plus T I

Al igual que con el altavoz de gradas Factor 8T, se ajustarán los parámetros necesarios de los emisores Bidriver Plus T para el cumplimiento de los requisitos de este recinto deportivo.

Se obtiene el siguiente espectro ecualizado para el punto central de la pista.

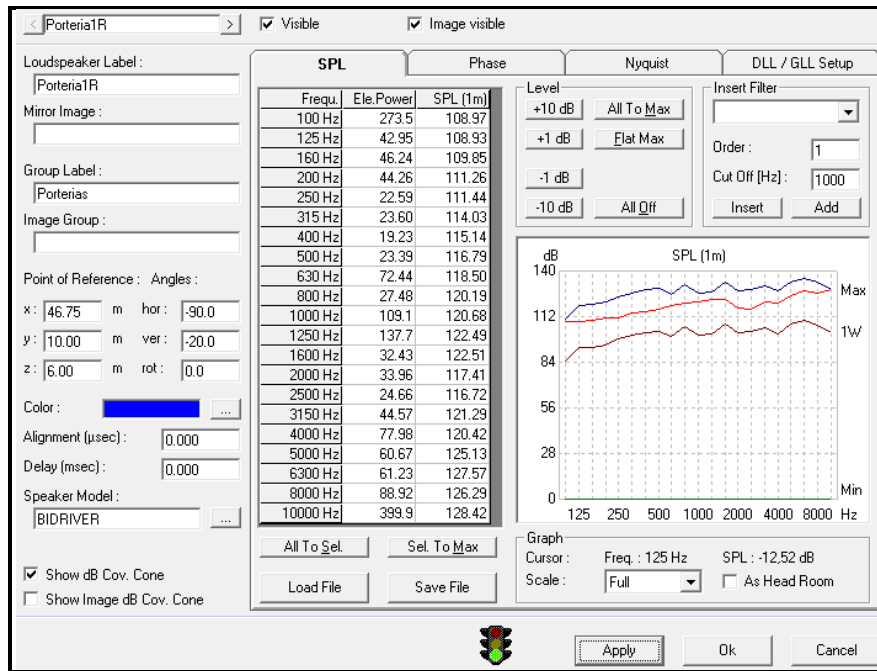


Figura 100. Ajustes de Bidriver Plus T II tras la inserción del filtro

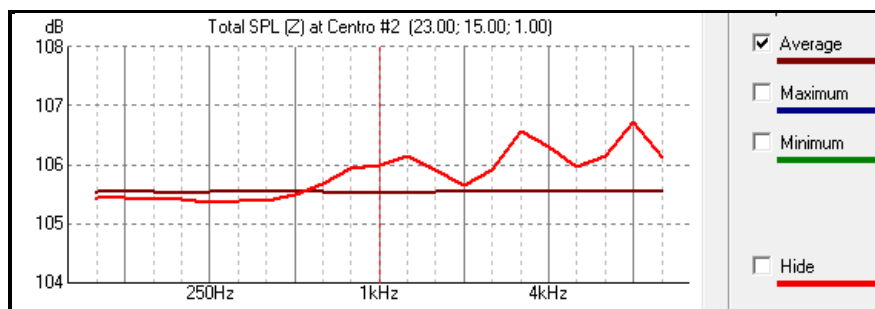


Figura 101. Espectro final. SPL_t en Centro con sistema distribuido

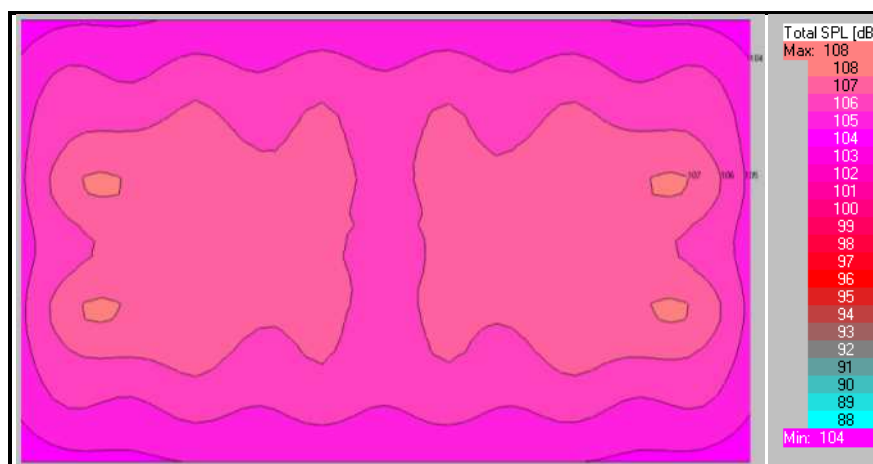


Figura 102. Recubrimiento final de zona de pista para el SPL_t con sistema distribuido

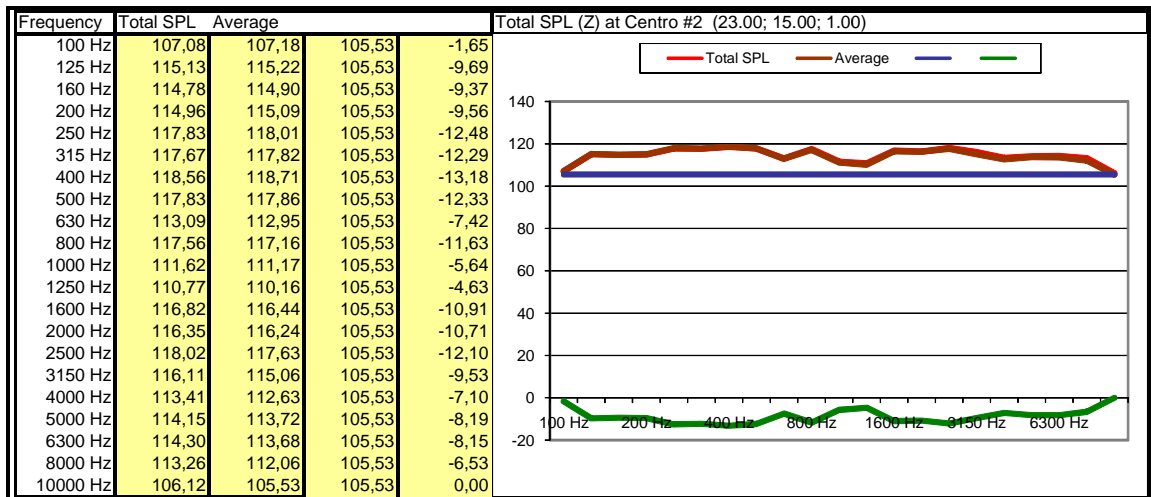


Figura 103. Ecuación de Bidriver Plus T

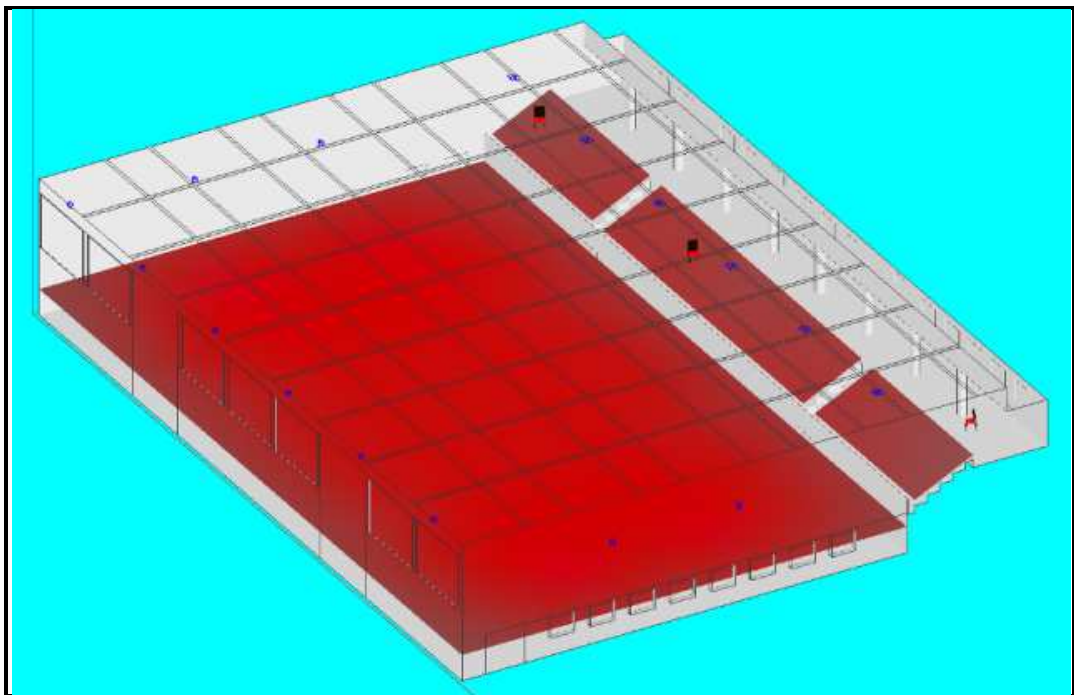


Figura 104. 3D Mapping de SPL_t para pista con sistema distribuido

- *Sistema centralizado: arrays*

Como mínimo, se instalará el sistema distribuido, que cubre la práctica totalidad de opciones o eventos que se acostumbra a celebrar. La opción alternativa que sigue se propone para tener estudiada la posibilidad de sonorizar eventos de tipo musical (o mayor envergadura) en este mismo recinto.

En el caso de diseño de un sistema centralizado con arrays lineales, la posición para los emisores sería elegida en el lateral más corto por ser la configuración más lógica y eficiente. De esta forma se cubren totalmente las audiencias y no se desaprovecha apenas potencia acústica de los emisores.

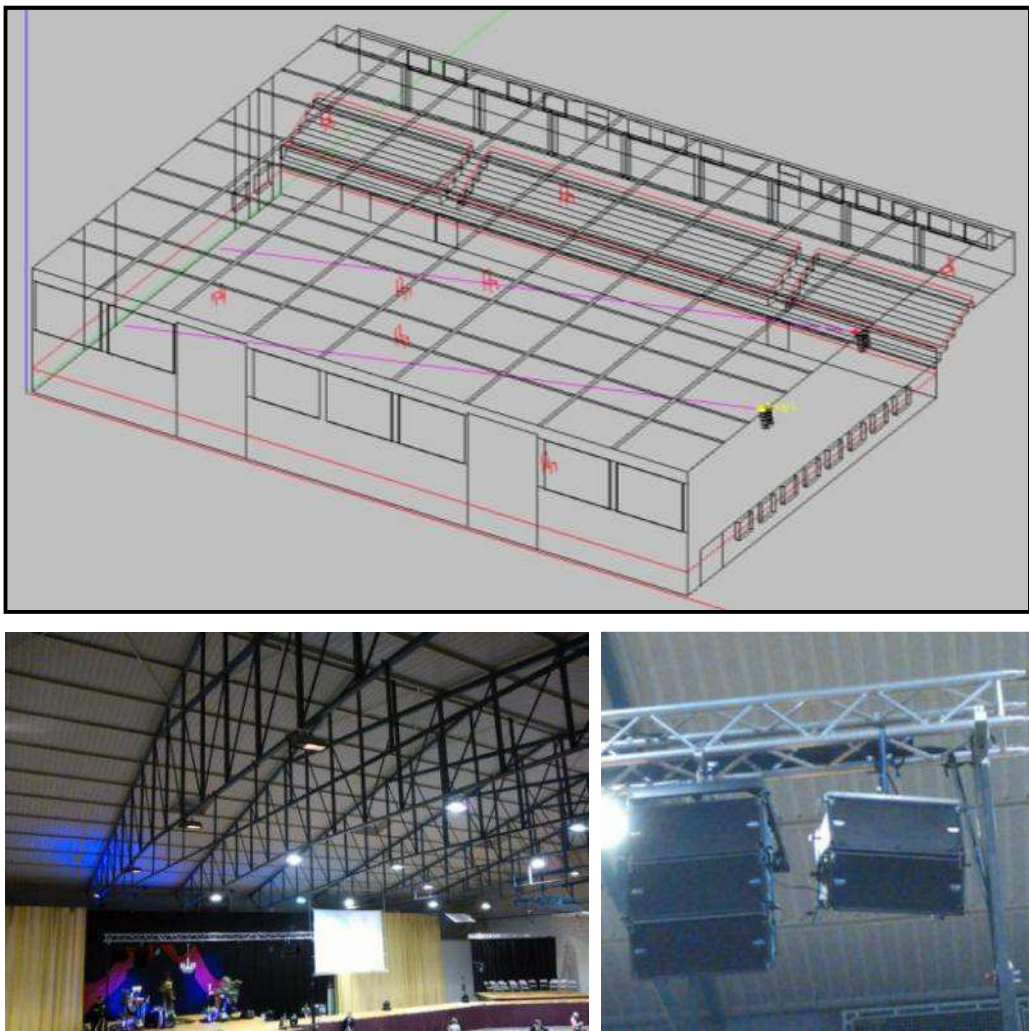


Figura 105. Opción alternativa de arrays

Sistema centralizado: arrays. Elección de altavoces

Das Audio event 208A (Line array series)

Altavoz triamplificado para módulos de line array compactos.

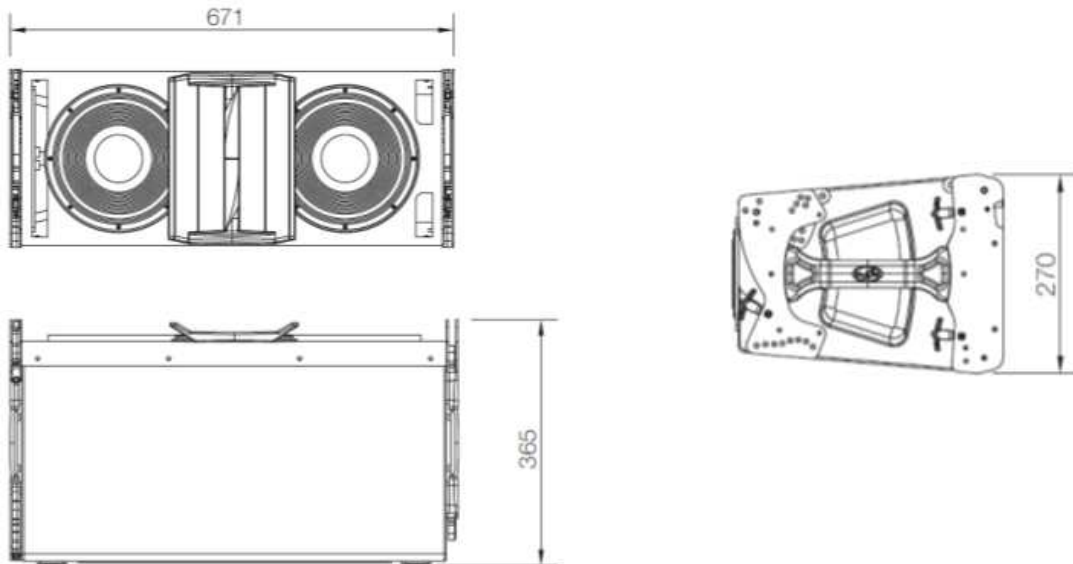
Este módulo se va a utilizar para el sistema complementario para reproducción musical que se va a proponer. Serán dos arrays lineales con 4 módulos como los descritos cada uno y situados en uno de los laterales cortos, dando servicio a toda la pista e incluso audiencias del graderío.



Figura 106. Modelo Event 208A



Figura 107. Armarios con procesadores para arrays lineales



Low Frequency Power Amplifier	360 W _{peak} - 180 W _{continuous}
Mid Frequency Power Amplifier	360 W _{peak} - 180 W _{continuous}
High Frequency Power Amplifier	360 W _{peak} - 180 W _{continuous}
Input Type	Balanced Differential Line
Input Impedance	Line: 20 kohms
Sensitivity	Line: 6.2 V (+18 dBu)
On-axis Frequency Range (-10 dB)	75 Hz - 20 kHz
Maximum Peak SPL at 1 meter	132 dB
Nominal -6 dB Beamwidths	90° Horizontal - Splay Dependent Vertical
Enclosure Material	Birch Plywood
Finish	Black/ISO-Flex Paint
Transducers/Replacement Parts	LF: 1 x 8CM4/GM 8CM4 MF: 1 x 8CM4/GM 8CM4 HF: 1 x M-75/GM 75
Connectors	INPUT: Female XLR LOOP THRU: Male XLR AC INPUT: powerCON FCA AC OUTPUT: powerCON FCB
AC Power Requirements	115 V, 2.6A, 50 Hz/60 Hz 230 V, 1.3A, 50 Hz/60 Hz
Dimensions (H x W x D)	27 x 67 x 36.6 cm - 10.6 x 26.4 x 14.4 in
Weight	30 kg (66 lb)
Accessories (optional)	AX-event 208 / Pick-Up AX-event 208 / AXS-event 208 / PL-event208S / FUN-4-event208

Figura 108. Características y dimensiones Event 208A

Sistema centralizado: arrays. Ecualización y filtros

Una vez elegida la posición de los altavoces del sistema de refuerzo sonoro, se debe asegurar el nivel y calidad de la transmisión sonora a emitir.

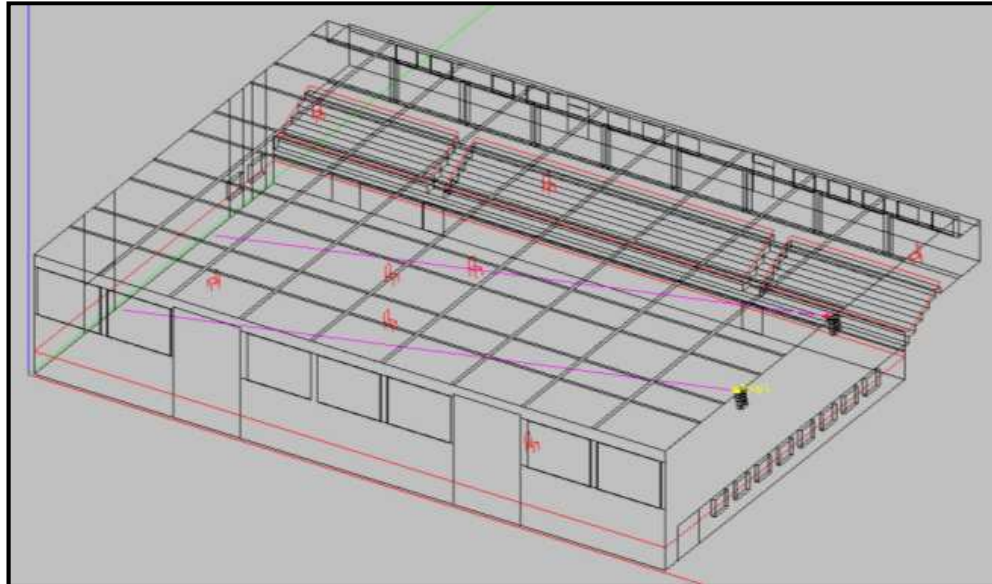


Figura 109. Situación de arrays lineales en el recinto

Se debe conseguir un nivel de presión sonora uniforme en las diferentes audiencias, ajustando la potencia de los altavoces/amplificadores.

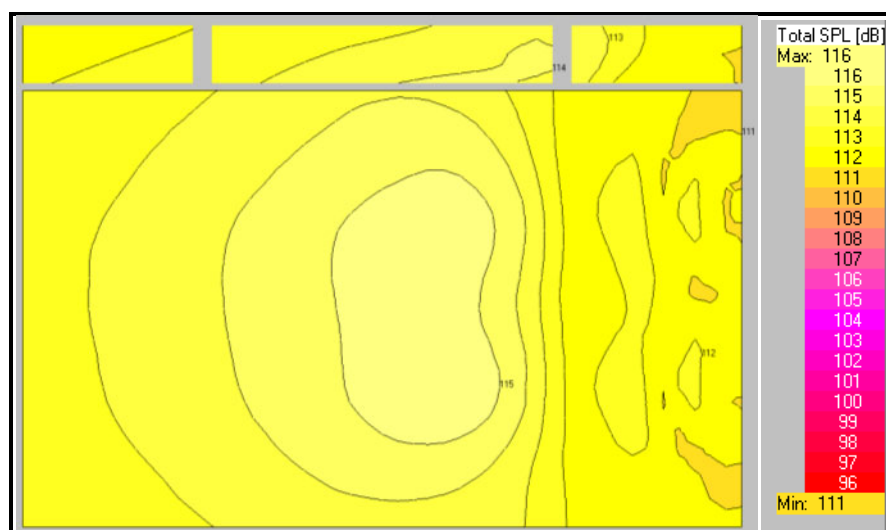


Figura 110. Recubrimiento inicial de recinto para el SPL_t con sistemas de arrays lineales

Se obtiene el correspondiente espectro de frecuencias para SPL_t.

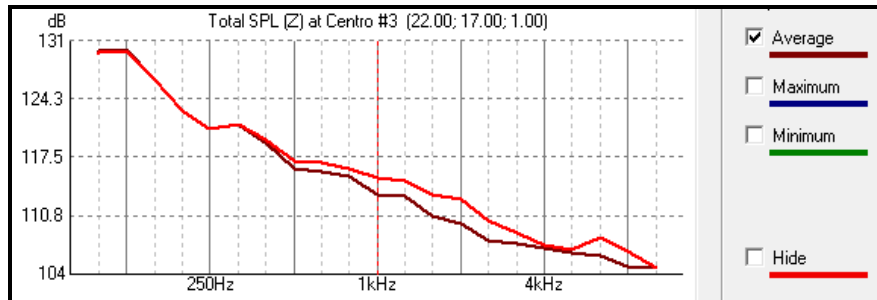


Figura 111. SPL_t inicial en función de la frecuencia. Oyente “Centro” para sistema de arrays lineales

Partiendo de la curva máxima de potencia de cada array, se tiene este espectro inicial:

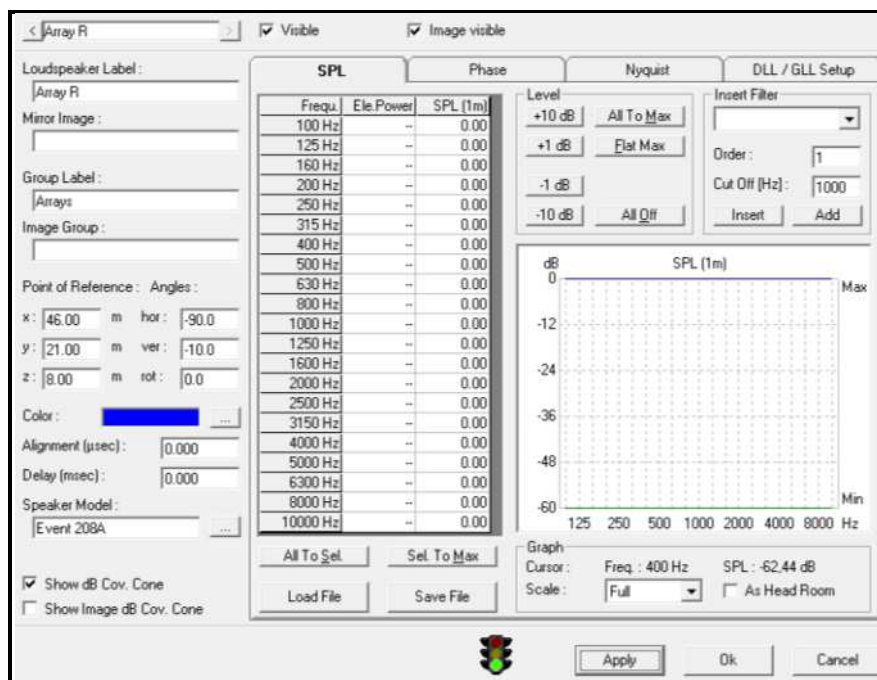


Figura 112. Ajustes de arrays lineales I

Una vez se tienen recubiertas las audiencias de forma homogénea y con un nivel suficiente sobre el nivel de ruido de fondo, se debe ajustar más finamente, en cada una de las bandas de frecuencia (tercios de octava) mediante la **ecualización**.

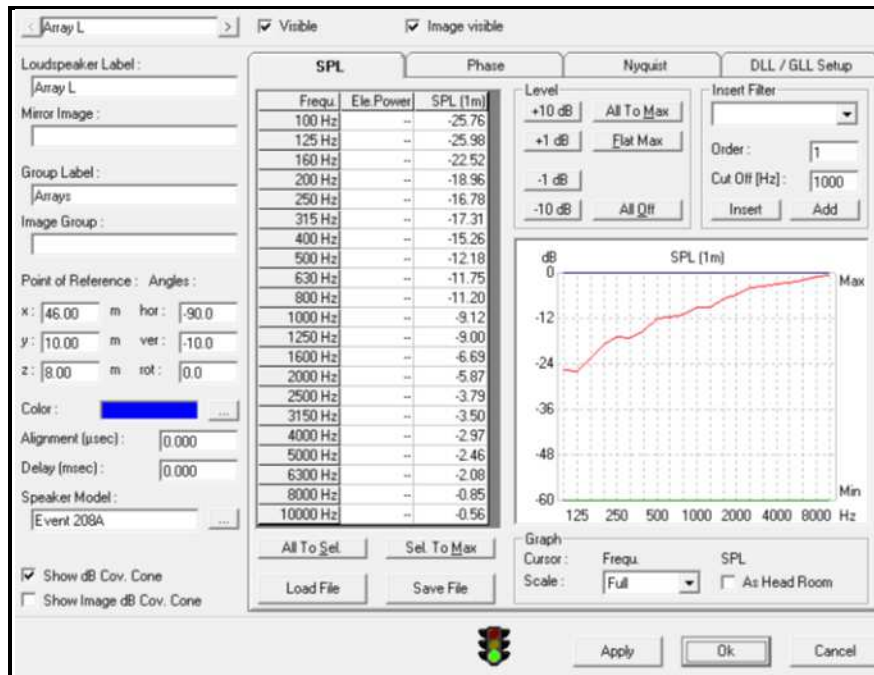


Figura 113. Ajustes de arrays lineales I

Se ecualiza el sistema de refuerzo sonoro centralizado, compuesto por una pareja de arrays lineales que sonoriza la totalidad de las audiencias, con la intención de obtener la reproducción de una señal con calidad, inteligibilidad y fidelidad con el sonido original.

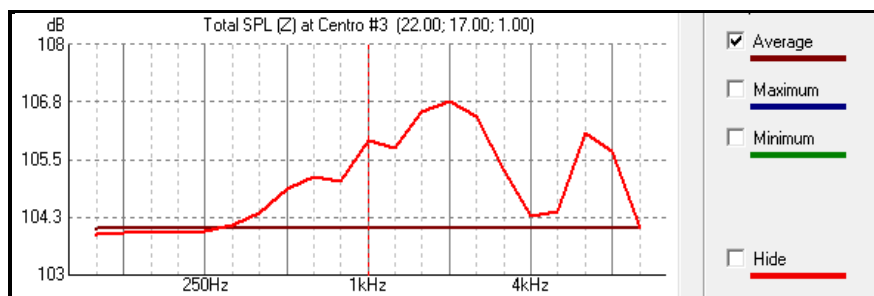


Figura 114. SPL_t final en función de la frecuencia. Oyente “Centro” para sistema de arrays lineales

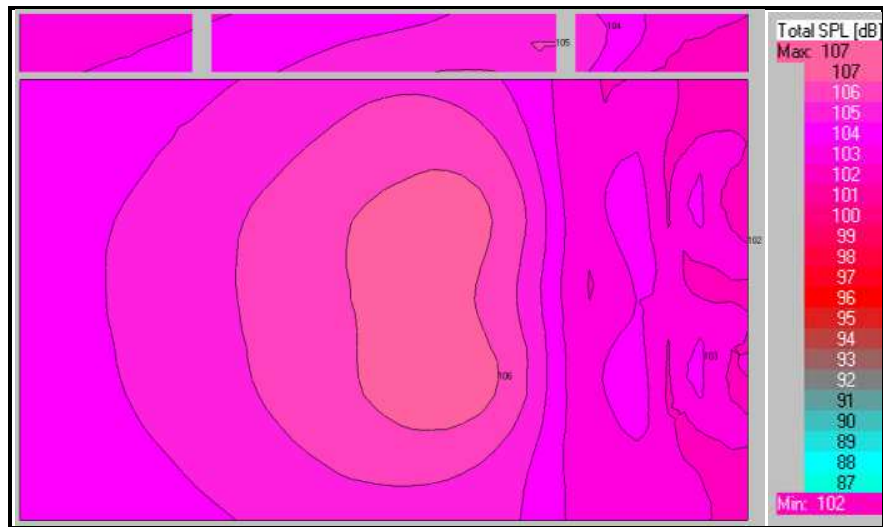


Figura 115. Recubrimiento final de recinto para el SPL_L con sistema de arrays lineales

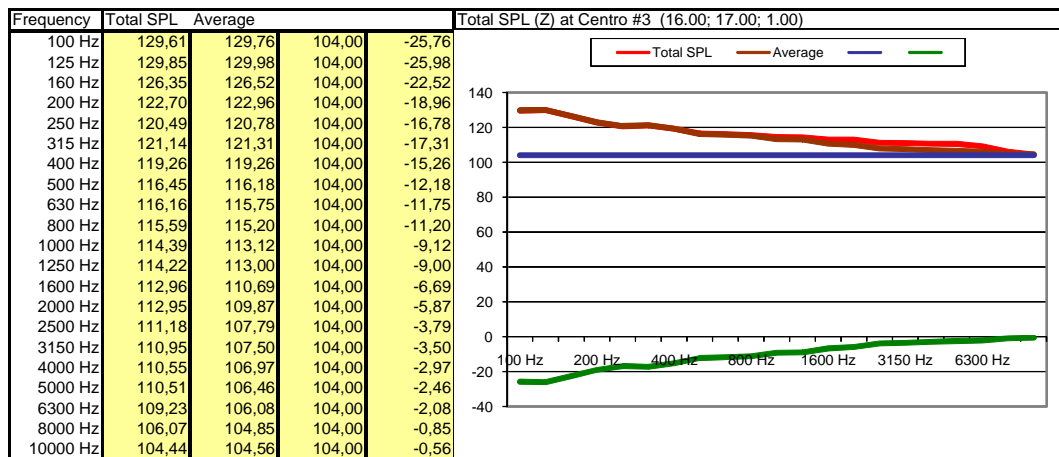


Figura 116. Ecuación de sistema de arrays lineales

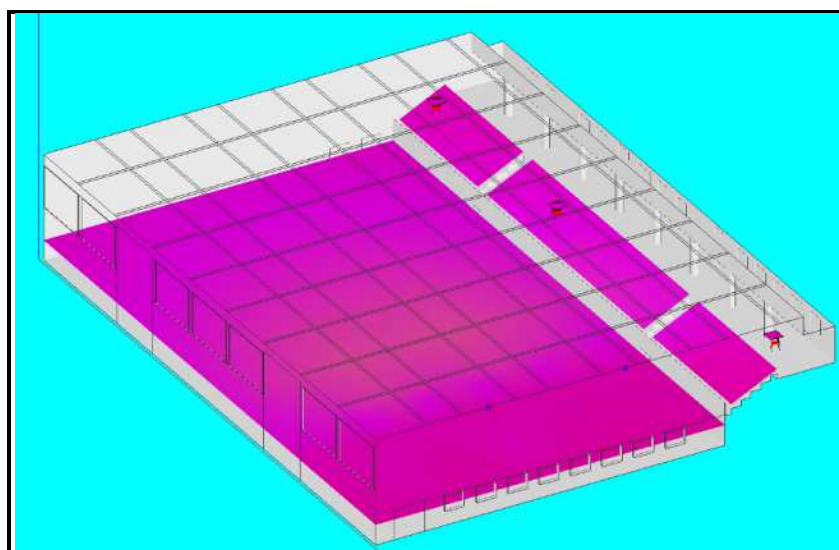


Figura 117. 3D Mapping de SPL_L con sistema de arrays lineales

IX Cálculos y simulaciones

Según los usos y aplicaciones que se le pueden dar a un sistema de refuerzo sonoro (en función de los eventos que en el pabellón de deportes Manín Larraz tienen lugar habitualmente) se va a hacer un resumen y diferenciación de las propuestas diseñadas y estudiadas hasta ahora:

Cluster central: descartado

Sistema distribuido corto alcance: descartado

Sistema distribuido largo alcance: OK para voz y música ambiente

Arrays lineales*: Opción que se diseña para concierto o evento musical importante

*Se estudia como alternativa a instalar en cualquier momento gracias a alquiler externo o posesión de los grupos que puedan actuar.

Con las opciones óptimas para el proyecto, se indica el reparto de altavoces por grupos. Estos grupos se configuran en función de las áreas de audiencia de la siguiente forma y nomenclatura:

MODO	Altavoces	Zonas sonorizadas	Audiencias EASE
Distribuido. Gradas + Pista	DAS Factor8T	Gradas	A2, A3 y A4
	DAS Bidriver Plus T	Pista	A1
Centralizado. Arrays lineales	2 arrays de 4 módulos DAS Event 208A	Gradas y pista	A1, A2, A3 y A4

Figura 118. Propuestas de configuración

Simulaciones en EASE para sistema distribuido

Simulaciones del sistema de refuerzo sonoro distribuido diseñado. Se busca cumplir los requisitos de recubrimiento uniforme, ecualización, inteligibilidad necesarios para este tipo de sistemas y teniendo en cuenta el tipo de recinto a sonorizar. Se muestra la distribución final de los emisores y una simulación del recubrimiento sonoro que se consigue:

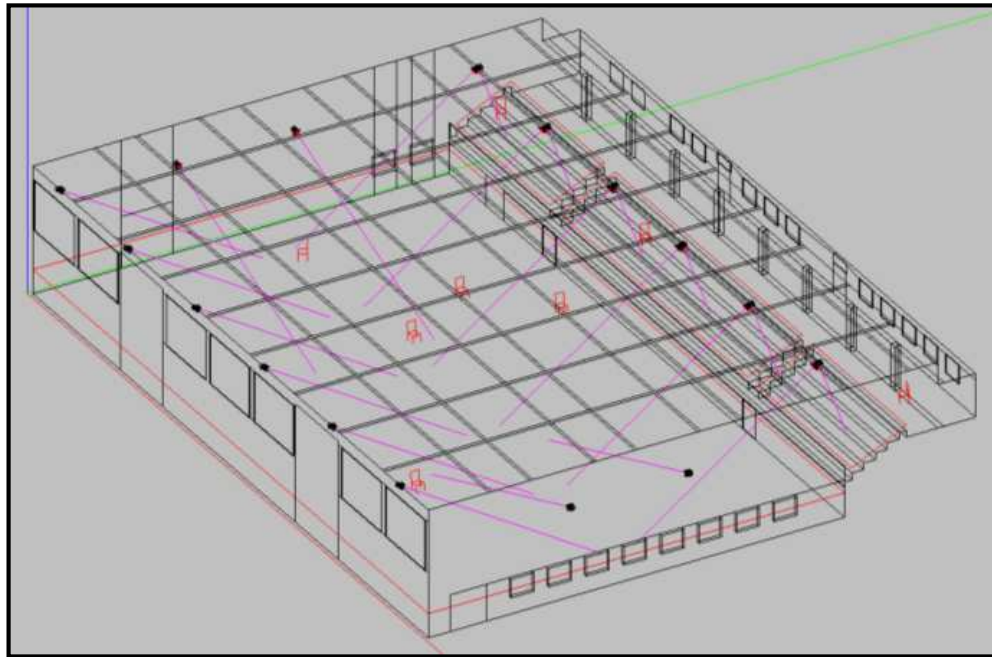


Figura 119. Situación final de los altavoces para sistema distribuido

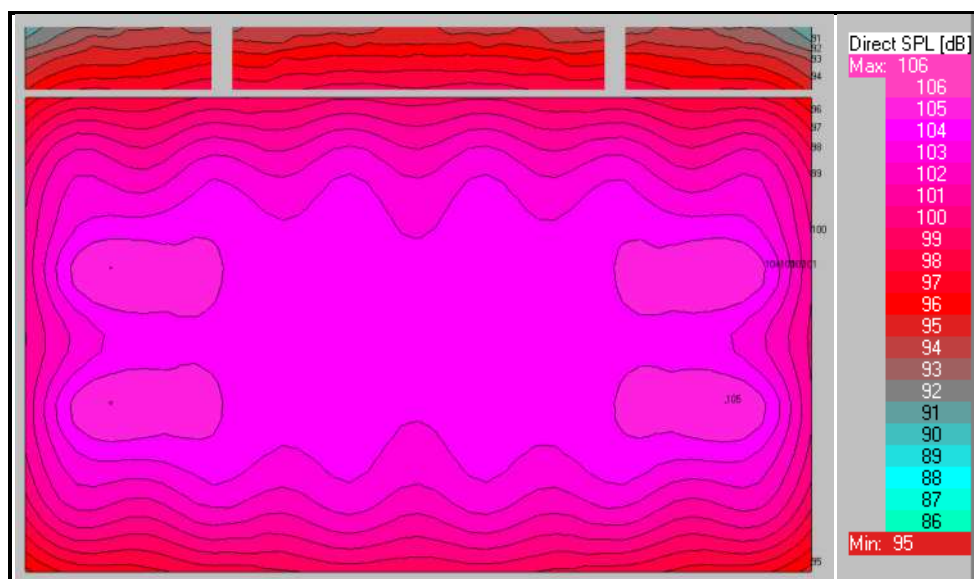


Figura 120. Recubrimiento de pista según el SPL_d

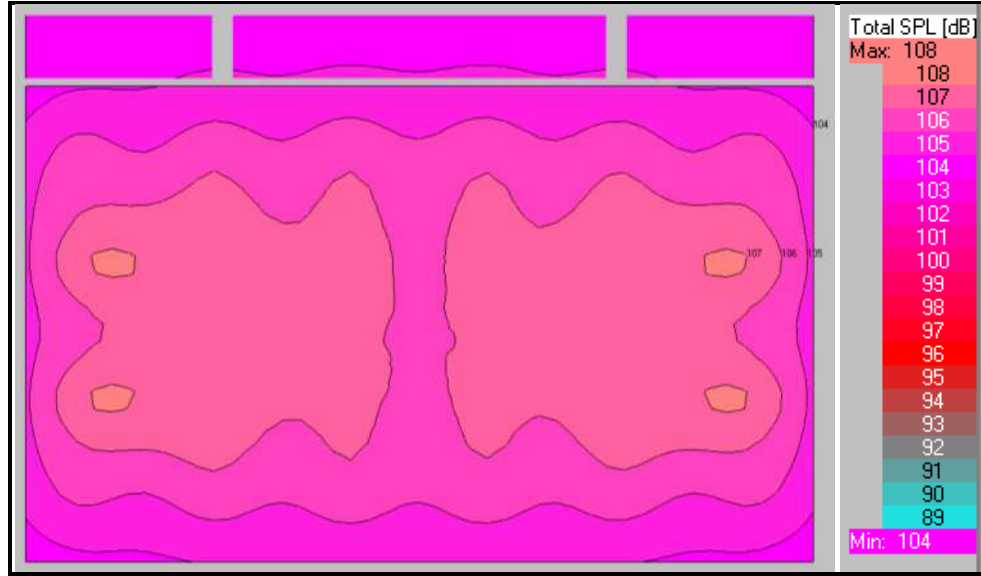


Figura 121. Recubrimiento de pista según el SPL_t

Se llega a reducir notablemente el número de altavoces con respecto a diseños o propuestas iniciales. Se consigue un recubrimiento suficiente en cuanto a potencia y muy homogéneo en cuanto al reparto espacial. Se cubren más de 1300 m² con 18 altavoces de tamaño medio.

Para el reparto espectral se aplica la ecualización vista anteriormente, la cual permite mantener una curva de frecuencia plana en los niveles deseados, gracias al margen de potencia disponible con los emisores elegidos: Factor 8T para gradas y Bidriver Plus T para la pista.

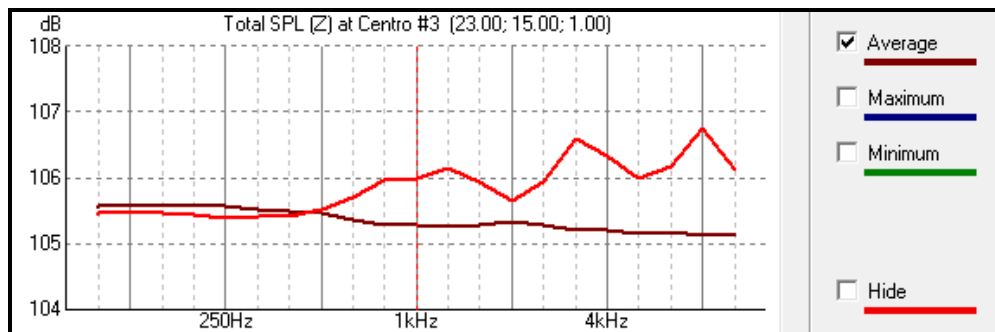


Figura 122. SPL_t en función de la frecuencia para el oyente “Centro” y promedio

EASE Focus para arrays lineales

Para el diseño, configuración y obtención de una primera aproximación de los resultados del array lineal se cuenta con el software EASE Focus (versión 2.2). Permite agrupar varios emisores o módulos para conformar un único emisor, que en este caso será el array lineal a partir de los módulos o altavoces de los principales fabricantes, en formato GLL.

Trabaja sin tener en cuenta las reflexiones ni absorción de las superficies límite, más que solo tiene en cuenta el nivel directo, del sistema simulado, sobre las audiencias introducidas.

Es una herramienta de configuración inicial del array pero no para obtener un cálculo preciso. Nos da una idea de la orientación necesaria, el alcance de sistema, el peso total, etc.

Para el propósito de cálculo final y ajustado, más siendo un recinto cerrado se debe usar EASE.

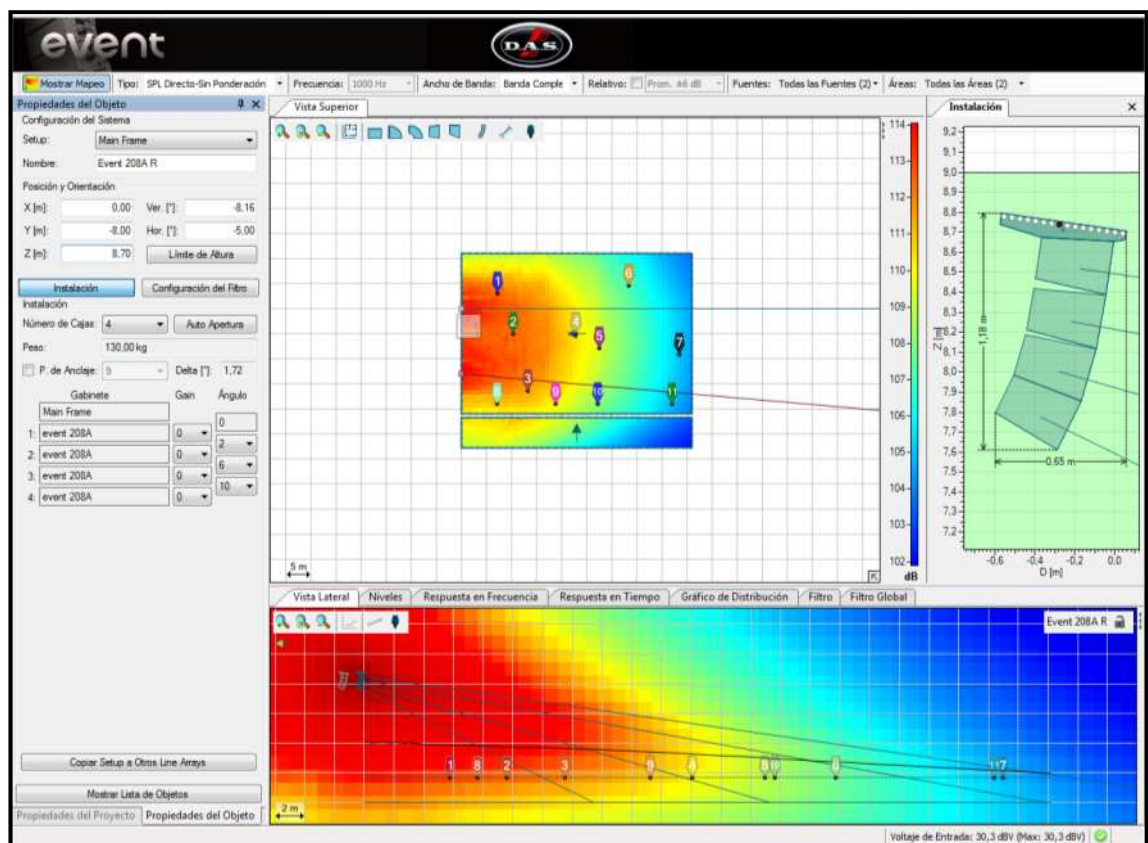


Figura 123. Ajuste y configuración de array lineal en EASE FOCUS v2.2

EASE GLL Viewer para arrays lineales

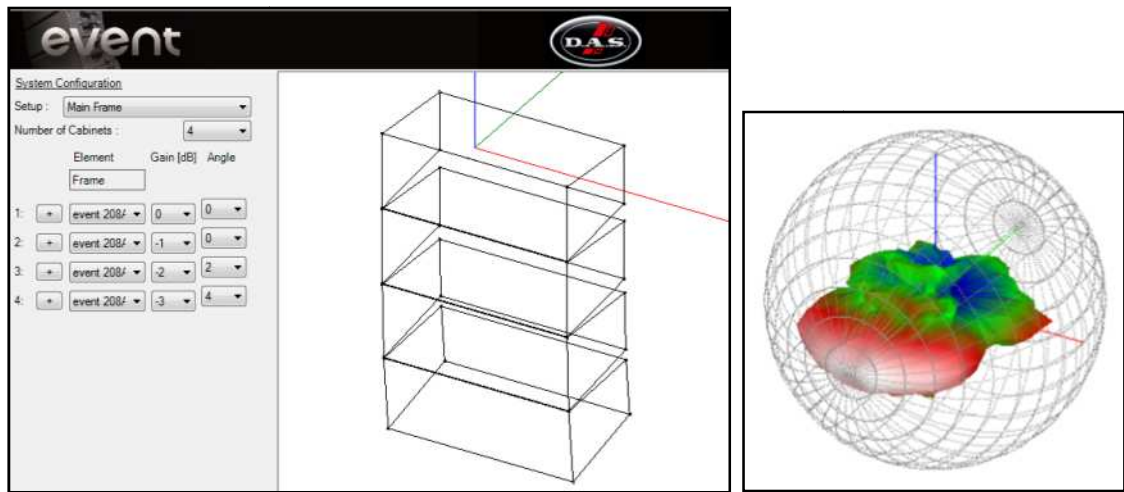


Figura 124. Aspecto de array lineal diseñado y atenuación

Funciona con archivos GLL (Generic Loudspeaker Library), que permiten incorporar las actualizaciones de los altavoces de los fabricantes a las bases de datos de los programas de simulación. Una vez se tiene el ajuste según los datos reales de fabricante, se prueba el array lineal incluyéndolo en el proyecto editado en EASE.

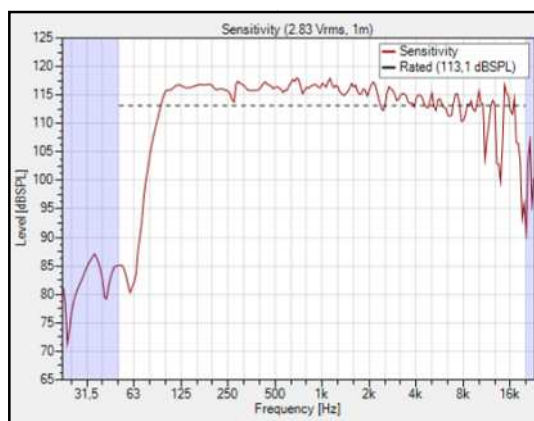


Figura 125. Sensibilidad de array lineal diseñado

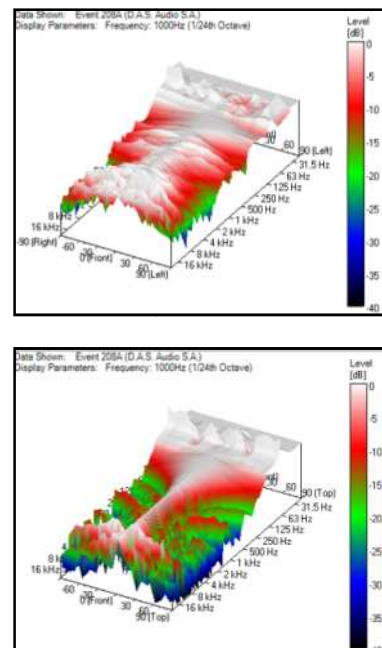


Figura 126. Cobertura horizontal y vertical de array lineal diseñado

EASE 4.3 para arrays lineales

Arrays lineales*: Opción que se precisa para concierto o evento musical importante

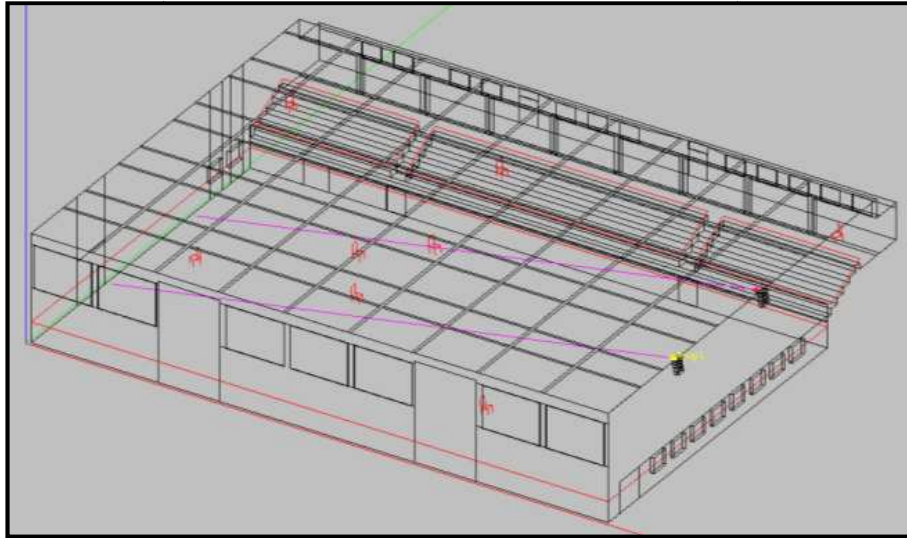


Figura 127. Situación de arrays lineales en el recinto

Es una de las configuraciones más usadas en la actualidad, por su facilidad de montaje y altas prestaciones que pone en disposición del usuario o técnico. De la misma forma, cuenta con un amplio abanico de ajustes y posibilidades para el óptimo rendimiento del sistema.

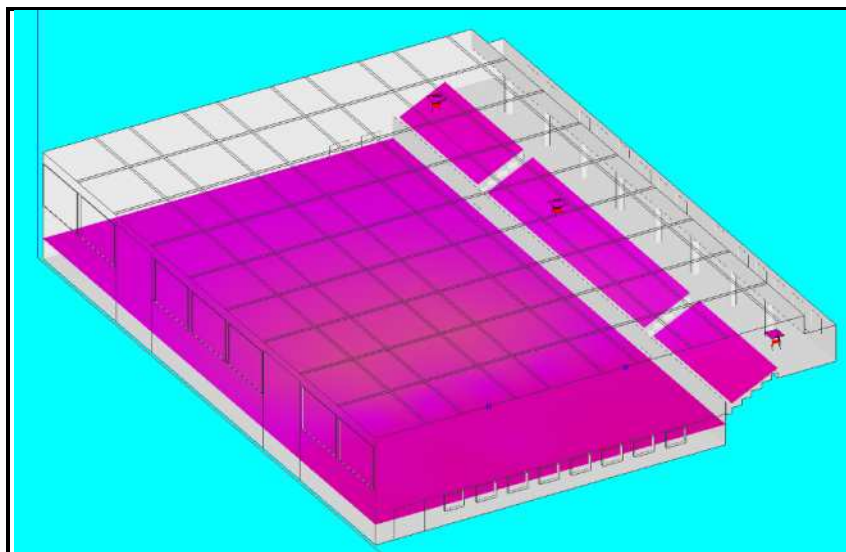


Figura 128. 3D Mapping de SPL_t con sistema centralizado de arrays

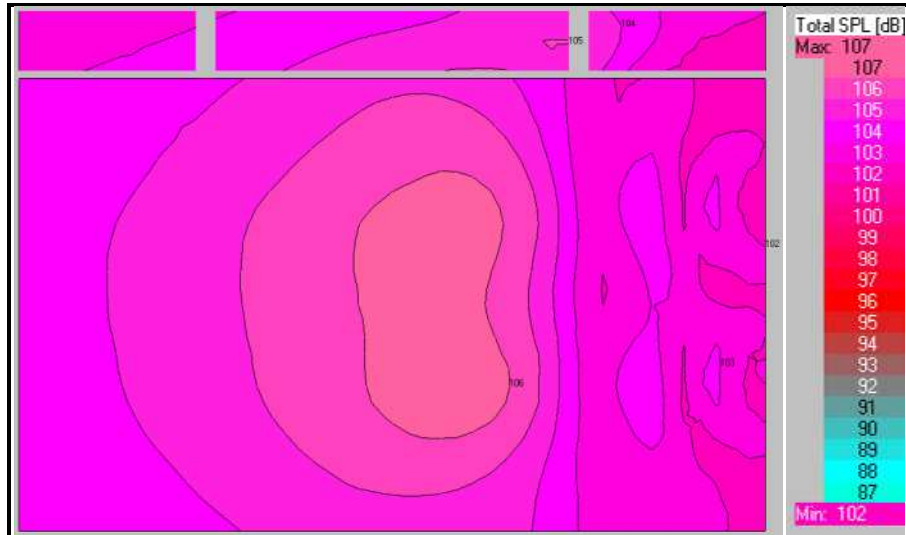


Figura 129. Recubrimiento de recinto para el SPL con sistemas de arrays lineales

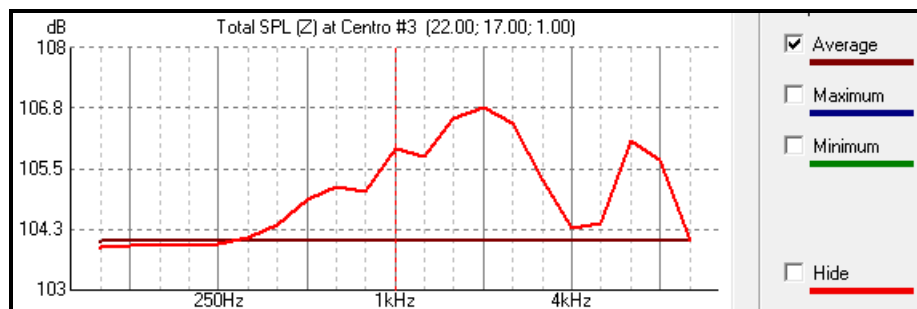


Figura 130. SPL en función de la frecuencia. Oyente “Centro” para arrays lineales

Puede dar la sensación de que la zona de gradas no queda sonorizada (al menos directamente) pero es solo una impresión ya que el ángulo de cobertura es amplio; lo cual hace pensar que el sonido directo llega adecuadamente a esos puntos de la audiencia. Así lo demuestran los mapas de cobertura en este punto:

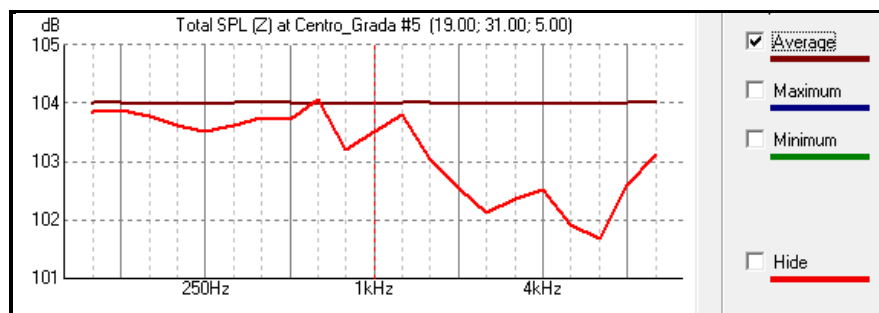


Figura 131. SPL en función de la frecuencia. Oyente “Centro_Grada” para arrays lineales

X Resultados

- *Sistema distribuido*

Se muestra de nuevo la denominación y posición tanto de altavoces como de oyentes en el recinto:

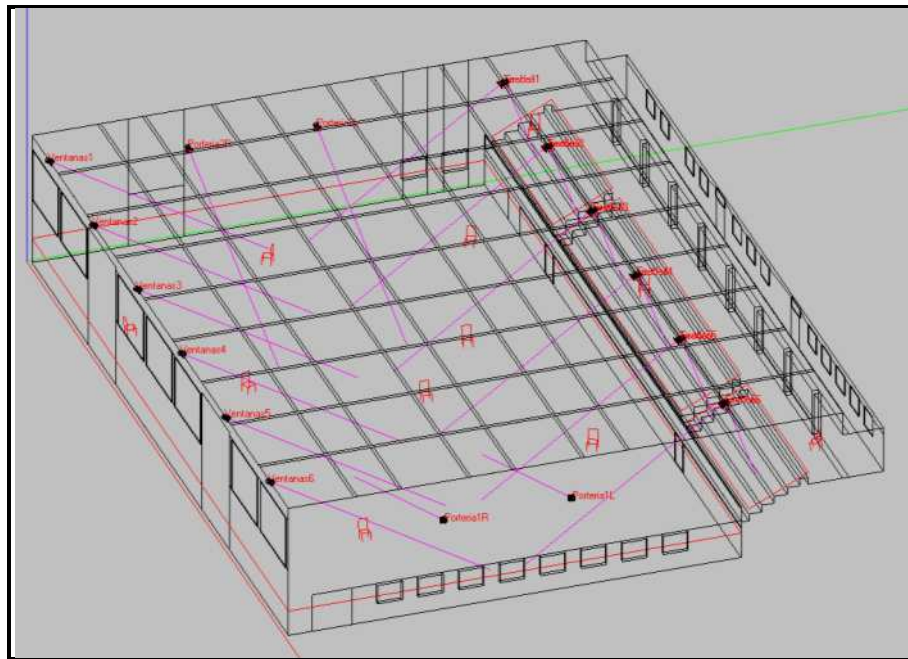


Figura 132. Nomenclatura de altavoces del recinto

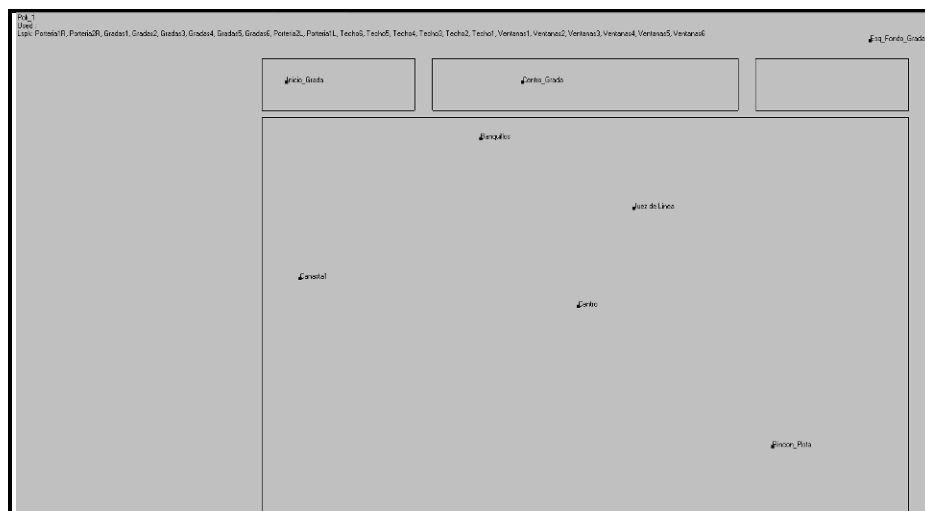
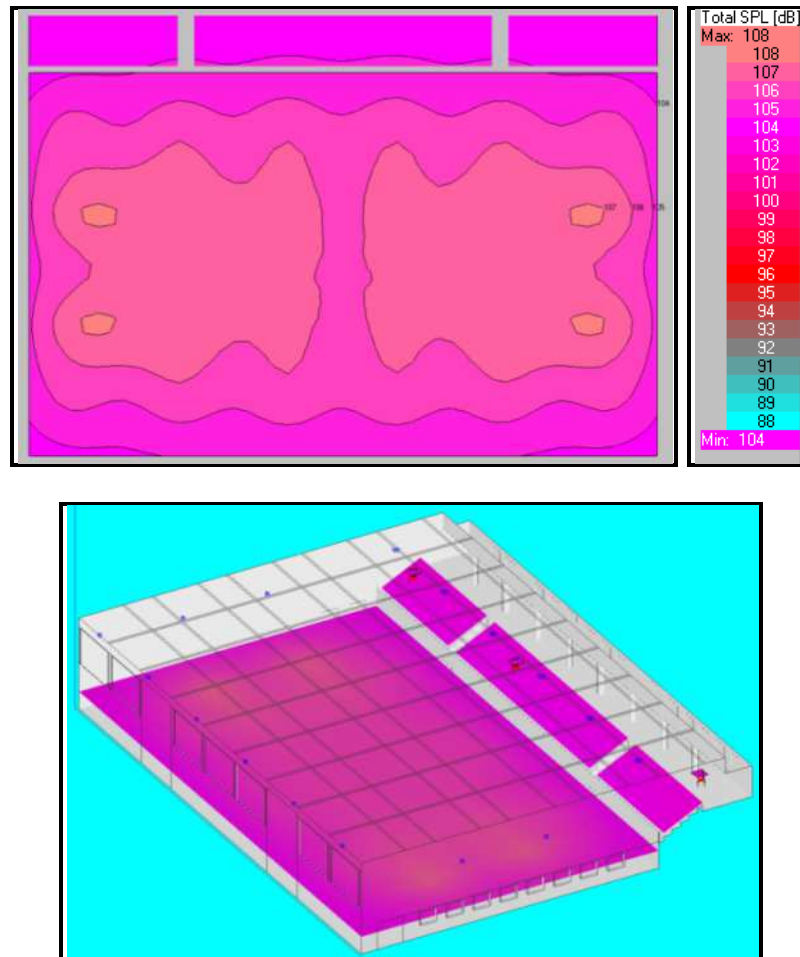


Figura 133. Nomenclatura y situación de oyentes del recinto

SPL_t (Nivel total)

La distribución del nivel sonoro que se consigue es muy uniforme, con variaciones menores de 6dB en todas las audiencias. Se muestra la simulación en EASE para nivel sonoro total:



En la figura 134 se extraen los datos de nivel sonoro total para los oyentes introducidos:

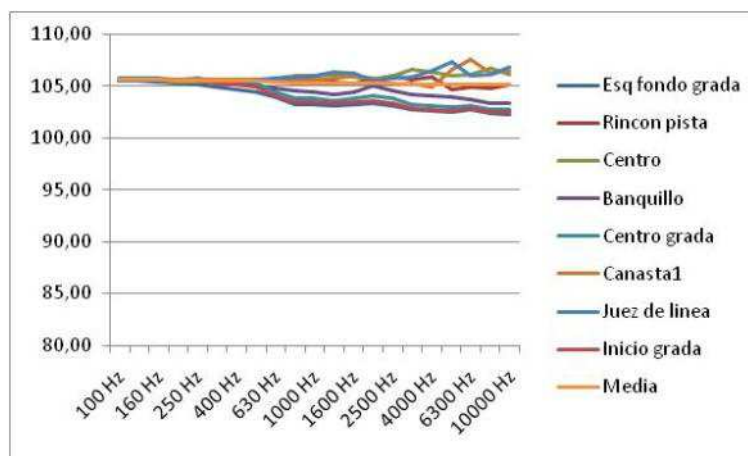


Figura 134. SPL_t (sist. distribuido). Recubrimiento de audiencias y nivel en oyentes

Alcons% (Pérdidas por articulación)

Valores de Alcons% evaluados en el recinto bajo estudio. Se muestra el valor obtenido en las simulaciones para cada uno de los oyentes:

Esq fondo grada	7,5
Rincon pista	5,2
Centro	4,2
Banquillo	6,7
Centro Grada	7,9
Canasta1	4,9
Juez de línea	5,2
Inicio Grada	7,5

Figura 135. Alcons% (sist. distribuido). Recubrimiento de audiencias y valoración

STI (Sound Transmission Index)

Valores de STI que se extraen de los oyentes introducidos en el modelo del polideportivo, para EASE:

Esq fondo grada	0,6
Rincon pista	0,6
Centro	0,7
Banquillo	0,6
Centro Grada	0,6
Canasta1	0,7
Juez de línea	0,6
Inicio Grada	0,6

Figura 136. STI (sist. distribuido). Recubrimiento de audiencias y valoración

Las representaciones gráficas de los niveles sonoros son muy vistosas y dan una idea general y rápida del comportamiento espacial del sistema en el recinto. Se deben valorar varios puntos para llevar a cabo un buen diseño y ajuste del sistema.

Se colocan oyentes en lugares estratégicos o conflictivos con la intención de verificar el comportamiento de esos puntos más desfavorables del recinto. Se ha concentrado la información de niveles sonoros por un lado y de los parámetros de calidad acústica por otro para cada los oyentes testigo más importantes del recinto simulado:

Según oyente centro de pista

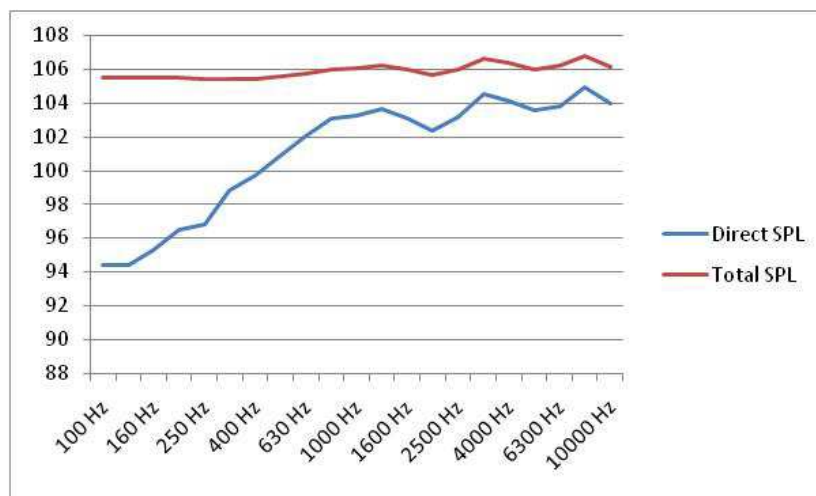


Figura 137. Oyente situado en el centro de la pista

Según oyente centro de grada

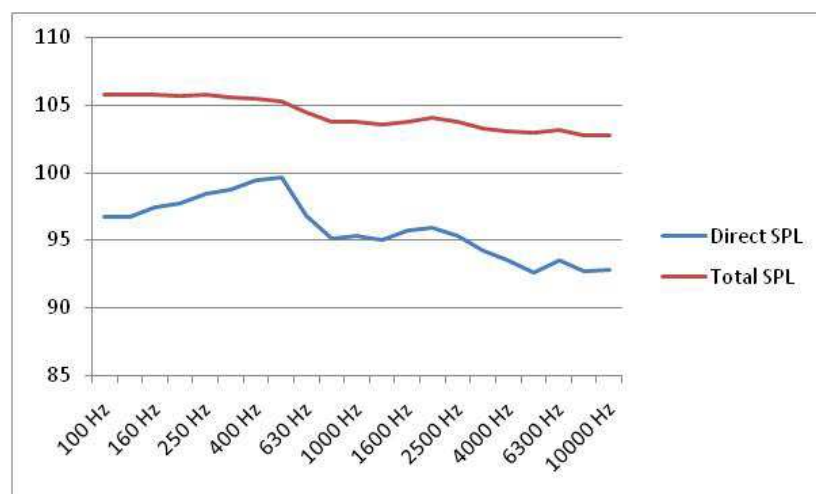


Figura 138. Oyente situado en el centro de las gradas

Reflectogramas - ecogramas

Posteriormente, se comprueba que no habrá problema por los retardos mediante la representación de los ecogramas de varios puntos elegidos, validando su comportamiento.

Se va a utilizar la herramienta *Probe* para evaluar los retardos, más bien si existe necesidad de implantar retardos en el sistema de refuerzo sonoro para alguna esta configuración.

Se obtienen pantallas de resultados en los puntos “centro” y centro_gradas” con información sobre el nivel y el retardo del primer frente de onda de cada uno de los altavoces (los más próximos al punto a evaluar).

Centro

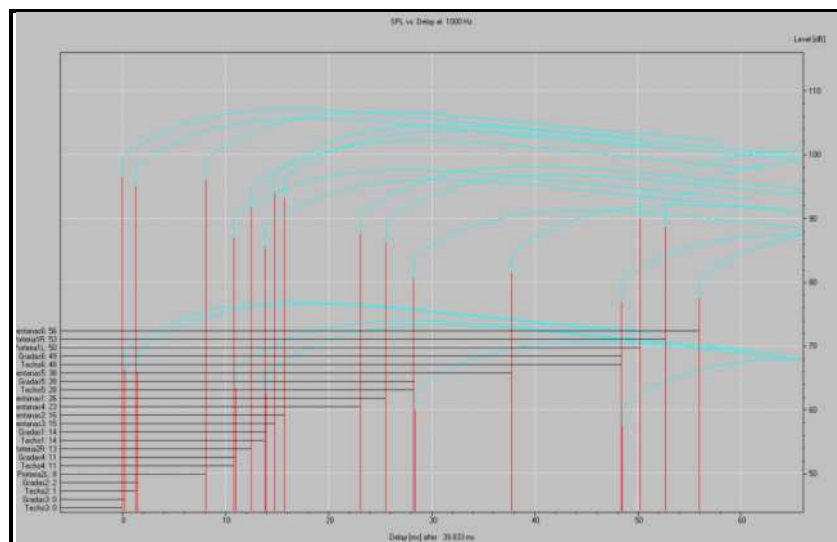


Figura 139. Ecograma en punto central de pista

Con la opción de mostrado de las “colas de precedencia” podemos comprobar la necesidad de instalar retardos o dar por válido el sistema de refuerzo sonoro en este aspecto. La percepción sonora viene condicionada por el altavoz que cubra a los demás (o al más próximo en tiempo) con su cola de precedencia. Si un pulso “asoma o emerge” por encima de la cola de precedencia de un altavoz anterior (cuyo frente de onda ha llegado antes al oyente), la precedencia pasa a ser del altavoz que genera dicho pulso.

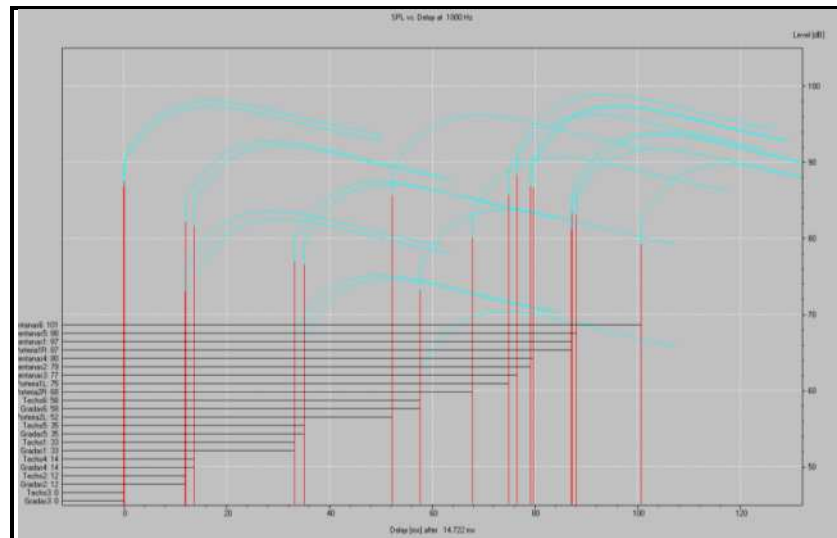
Centro gradas

Figura 140. Ecograma en punto central de grada

Tampoco es adecuado que en los ecogramas de EASE haya huecos entre las colas de precedencia, lo cual significaría una sensación de vacío de sonido y automático eco.

- *Sistema distribuido: arrays lineales*

Se muestra de nuevo la denominación y posición de altavoces y oyentes en el recinto:

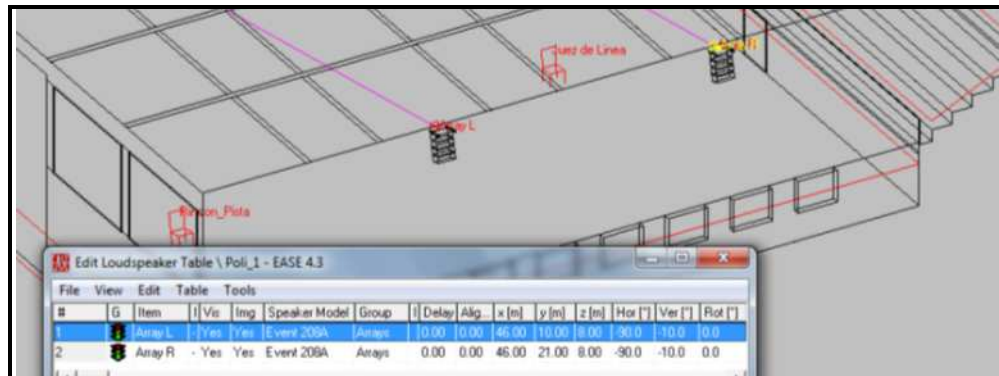
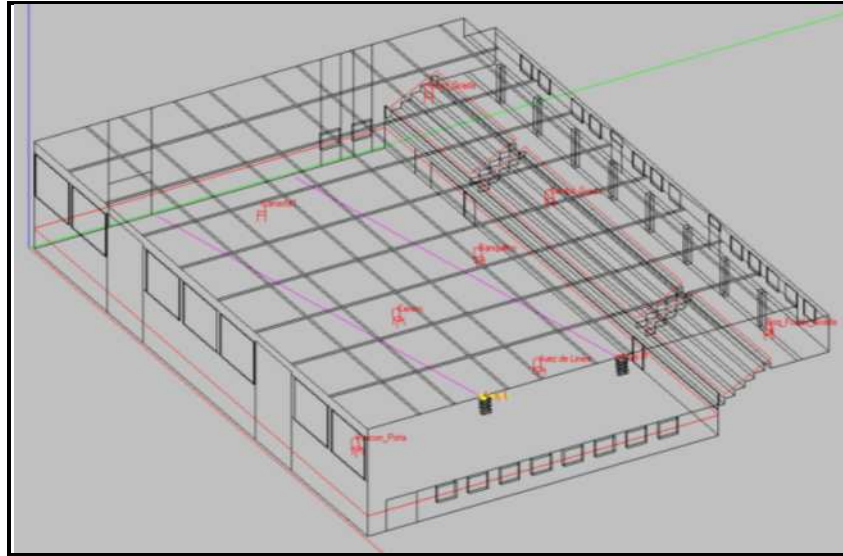


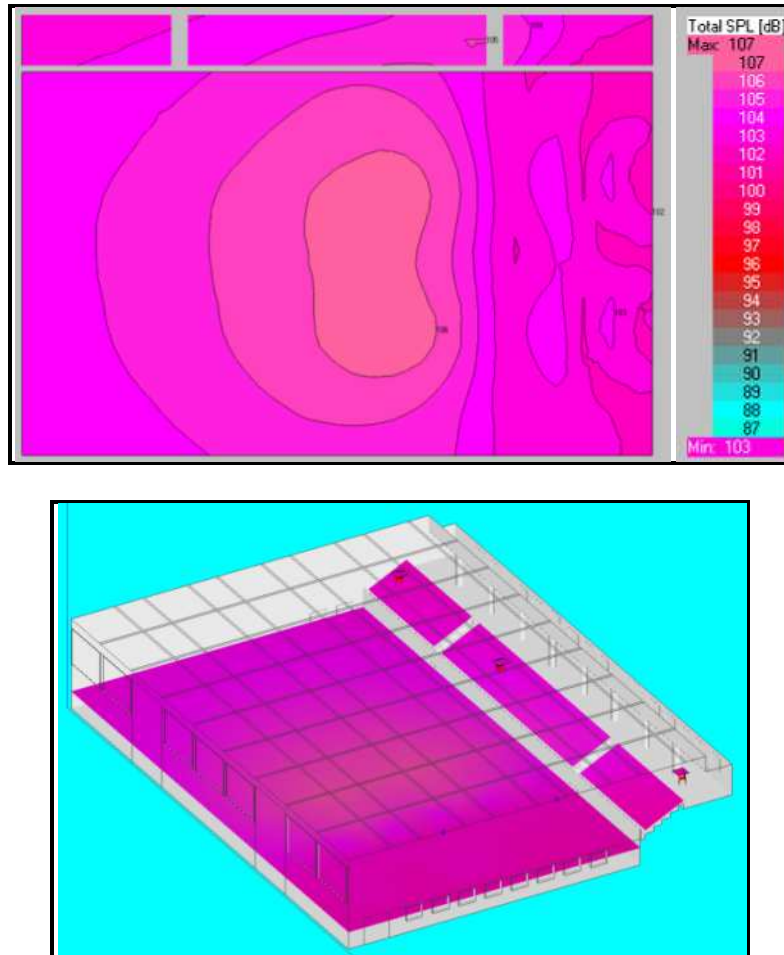
Figura 141. Nomenclatura de altavoces del recinto



Figura 142. Nomenclatura y situación de oyentes del recinto

SPL_t

La distribución del nivel sonoro que se consigue es muy uniforme, con variaciones menores de 6dB en todas las audiencias. Se muestra la simulación en EASE para nivel sonoro total:



En la figura 143 se extraen los datos de nivel sonoro total para los oyentes introducidos:

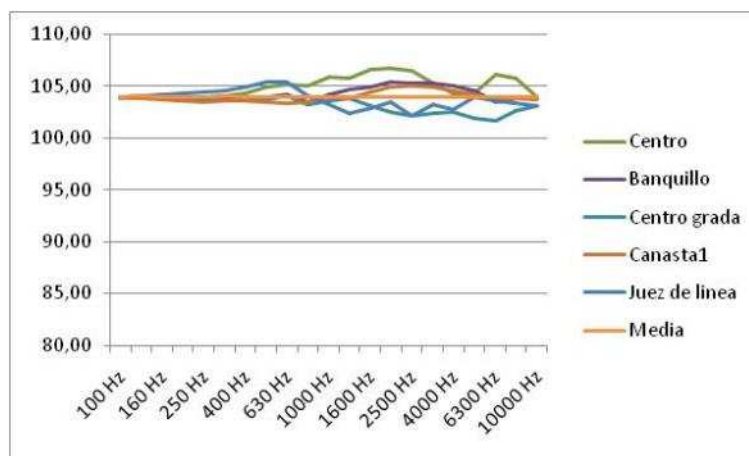


Figura 143. SPL_t (array). Recubrimiento de audiencias y nivel en oyentes

Alcons%

Valores de Alcons% evaluados en el recinto bajo estudio. Se muestra el valor obtenido en las simulaciones para cada uno de los oyentes:

Esq fondo grada	7,1
Rincon pista	6,1
Centro	4,7
Banquillo	5,3
Centro Grada	6,7
Canasta1	5,8
Juez de línea	5,8
Inicio Grada	7,7

Figura 144. Alcons% (array). Recubrimiento de audiencias y valoración

STI

Valores de STI que se extraen de los oyentes introducidos en el modelo del polideportivo, para EASE:

Esq fondo grada	0,6
Rincon pista	0,6
Centro	0,7
Banquillo	0,6
Centro Grada	0,6
Canasta1	0,6
Juez de línea	0,6
Inicio Grada	0,6

Figura 145. STI (array). Recubrimiento de audiencias y valoración

Se ha concentrado la información de niveles sonoros por un lado y de los parámetros de calidad acústica por otro para cada los oyentes testigo más importantes del recinto simulado:

Según oyentes Centro de pista

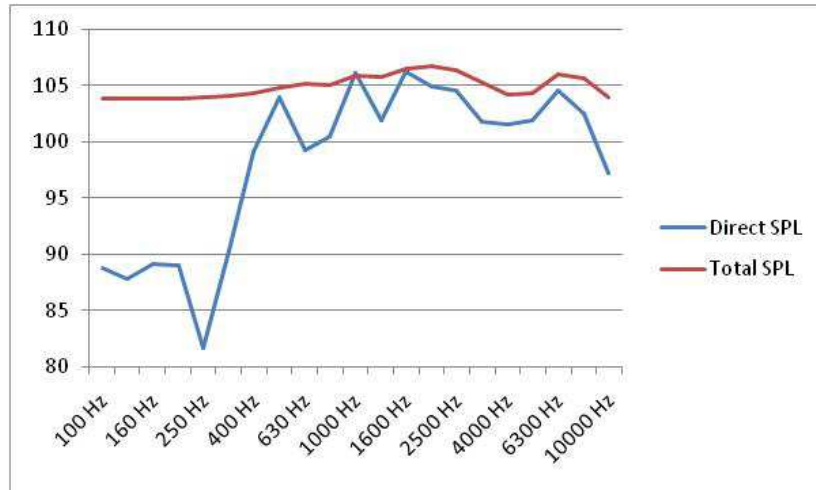


Figura 146. Oyente situado en el centro de la pista

Según oyentes Centro de grada

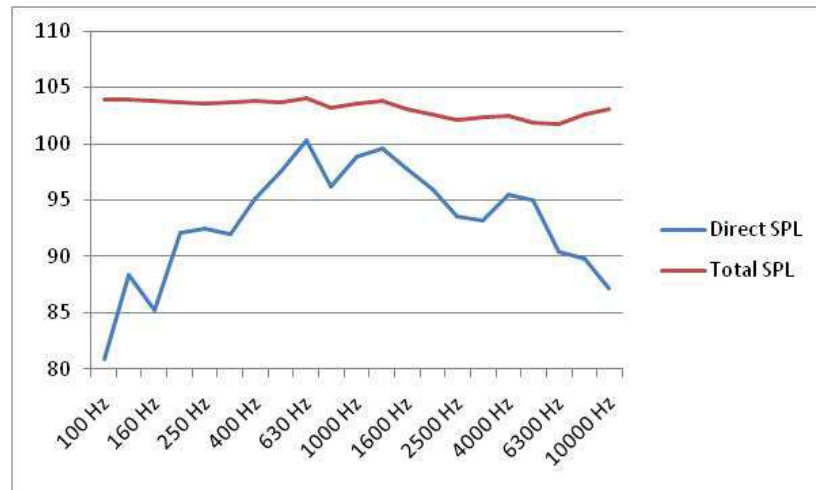


Figura 147. Oyente situado en el centro de las gradas

Reflectogramas - ecogramas

Aun siendo un sistema con solo dos focos sonoros, se comprueba que no habrá problema por los retardos con la representación de los ecogramas en los puntos elegidos también para la opción de sistema distribuido. Se obtienen pantallas de resultados en los puntos especificados con información sobre el nivel y el retardo del primer frente de onda de cada uno de los altavoces (o conjunto de ellos en este caso).

Centro

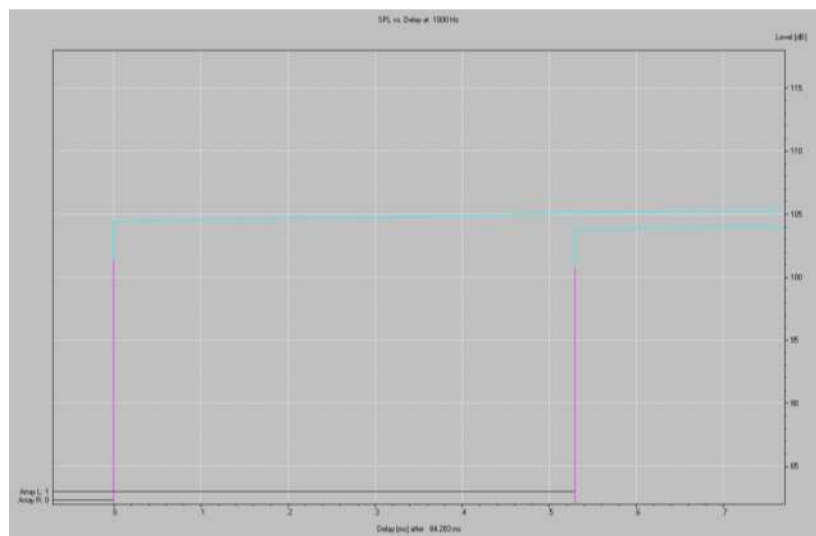


Figura 148. Ecograma en centro de la pista

Centro gradas

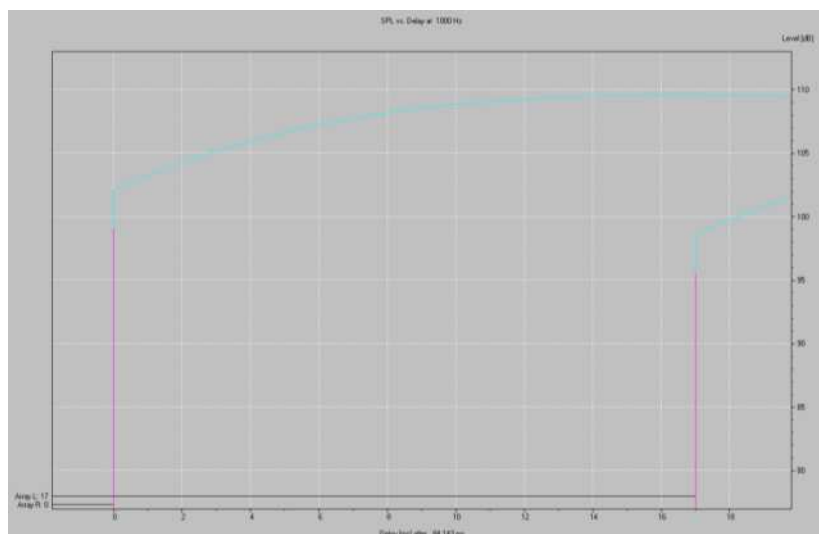


Figura 149. Ecograma en centro de la grada

Auralizaciones

Se han generado archivos con la respuesta temporal que se produciría en cada uno de los puntos de oyentes, para las dos propuestas diseñadas.

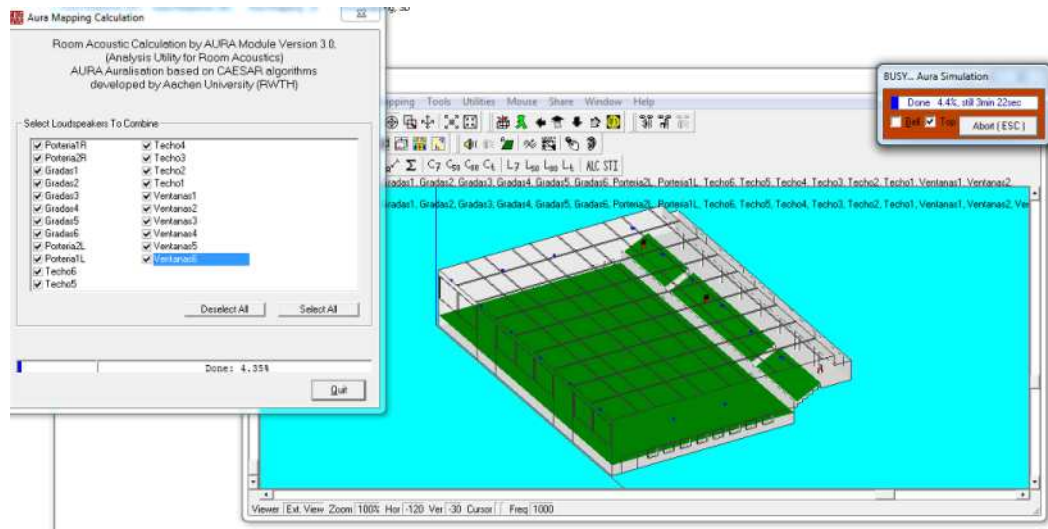


Figura 150. Auralizaciones (ejemplo para sistema distribuido)

Estas auralizaciones, mediante la convolución con una señal musical, muestran y permiten hacerse a la idea del sonido en ese punto evaluado, con el sistema de refuerzo que se diseña.

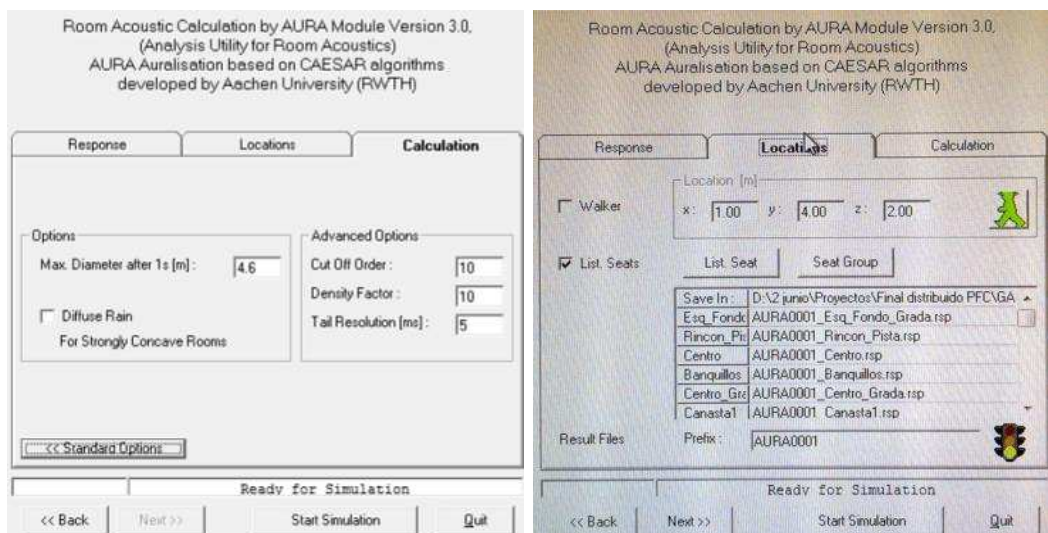


Figura 151. Configuración de auralizaciones

Se incluyen varias canciones, probablemente, por todos escuchadas en alguna ocasión (archivos en CD de proyecto).

Interpretación de resultados. Rendimiento del proyecto

Para diseñar y definir un sistema de refuerzo sonoro adecuado, se ha seguido el siguiente proceso:

La situación inicial era la de mejorar la sonorización del pabellón de deportes de la localidad de Tauste, tratando de mantener una línea de megafonía e hilo musical como instalación mínima y ver las posibilidades de un sistema mixto con sistema megafonía y música en directo, o la necesidad de diseñar otras soluciones.

Pero antes de colocar altavoces en el modelo del recinto, había que ajustar o reducir el tiempo de reverberación debido al aumento en el coeficiente de absorción de los materiales. Incluso se hace un reajuste posterior instalando material fonoabsorbente en las placas de madera contrachapada del techo, en forma de recubrimiento.

Tras esto, se pueden ubicar los altavoces en el recinto para ajustar el diseño.

El último reto será la eliminación de ecos o coloración de la señal en el recinto. Se consigue mediante la ecualización de los diferentes altavoces o grupos de ellos. Se ajusta una curva plana tanto en las gradas como en la pista.

Teniendo en cuenta la estructura de la edificación, debíamos valorar la opción de un emisor central o cluster, siempre que no implicara la desestabilización de la cubierta (poco resistente frente al peso de altavoces) y que tampoco supusiera la modificación de esta para evitar encarecimientos en el presupuesto. **Opción descartada.**

Entonces, se estudió un sistema de sonorización que cumpliera las expectativas de incremento de nivel sonoro total para voz o megafonía y ver las posibilidades de servir como refuerzo una actuación musical. Se propone un sistema distribuido con cajas acústicas por los paramentos verticales, a media altura de la pista pero que resulta ser poco efectivos en puntos alejados de los altavoces, presupuesto elevado y sobre todo, aun con la inversión efectuada, no llegaría a las expectativas óptimas que debería tener un sistema para reproducción de música en la pista principal. En la grada se colocan a la espalda de las audiencias y tienen un comportamiento correcto.

Así, se opta por altavoces de mayor alcance para la zona de pista, más orientados para megafonía y largas distancias. Se sitúan dos líneas longitudinales de seis unidades y dos refuerzos con otros dos altavoces en cada uno de los laterales cortos (o porterías). En las gradas se mantienen las seis cajas acústicas, en esta configuración, enfrentadas al público. Así se consigue un recubrimiento óptimo y según los requisitos especificados, para megafonía y reproducción de hilo musical.

En la evaluación final del sistema sonoro diseñado se cumplen los siguientes objetivos:

- Niveles suficientes y recubrimientos uniformes en todas las áreas de audiencia
- Respuesta en frecuencia plana para el nivel sonoro total
- Cada oyente escucha el sonido del altavoz que le corresponde, sin sumarse muchas contribuciones ni existiendo retardos.
- Las pérdidas de articulación Alcons% están mayoritariamente en torno al 7%.
- El RASTI presenta un valor en la zona de audiencia de 0,6.

En conclusión, hemos conseguido mejorar la sonorización del recinto de forma notable con un sistema distribuido de 22 altavoces.

Se plantea, además, la solución para tener una mejor sonorización de música o de eventos de mayor envergadura; solución que pasa por instalar equipo alternativo, consistente en dos arrays lineales, de tres módulos cada uno.

El resultado de la instalación de los arrays lineales para eventos musicales tiene un comportamiento excelente, haciendo uso de pocos medios y una configuración sencilla.

Mejoras

Para sonorizar un evento más importante o espectáculo musical, el sistema distribuido estudiado se queda corto en cuanto a prestaciones. En este caso, cumple el propósito principal del proyecto y del uso que se le va a dar al pabellón generalmente pero no tiene posibilidad de dar servicio durante un evento musical más exigente en cuanto a calidad de sonido.

Si hubiera necesidad de sonorizar un evento musical de magnitud importante, se puede instalar un equipo o sistema de refuerzo sonoro alternativo, como por ejemplo de alquiler. Para este propósito, la opción de sonorizar eventos musicales está condicionada a la utilización de un sistema centralizado, consistente en una pareja de line arrays (alternativa estudiada en esta memoria y valorada en presupuesto también).

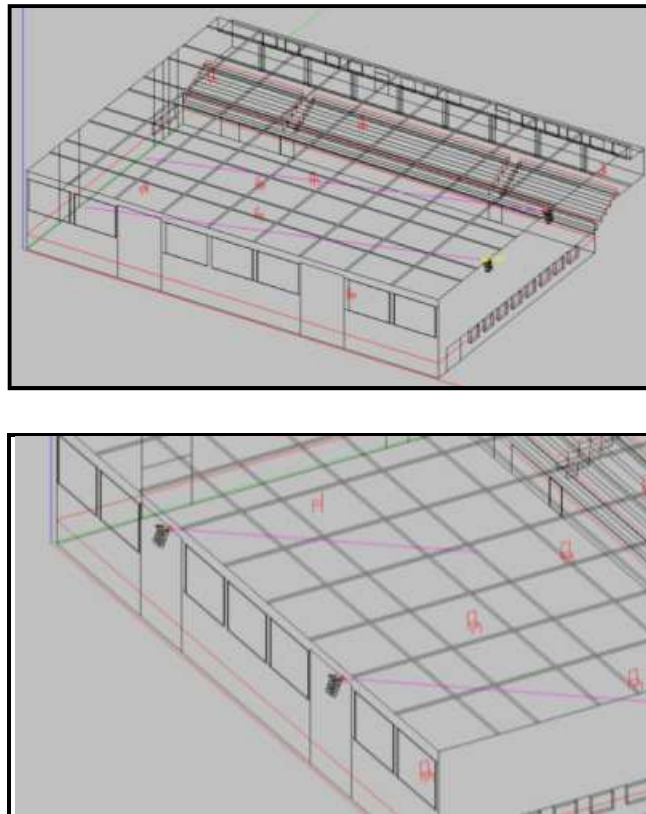


Figura 152. Modelo de sistema centralizado, en las dos configuraciones posibles

Se puede utilizar un equipamiento análogo tanto para ser instalado en configuración frontal o lateral, del que sería suficiente una colocación acertada según cálculos efectuados y una correcta ecualización.

En la evaluación final del sistema de refuerzo sonoro centralizado diseñado (opción alternativa para eventos de mayor importancia) se cumplen los siguientes objetivos:

- Niveles suficientes y recubrimientos uniformes en todas las áreas de audiencia
- Respuesta en frecuencia plana para el nivel sonoro total
- Cada oyente escucha el sonido del altavoz que le corresponde, sin sumarse muchas contribuciones ni existiendo retardos.
- Las pérdidas de articulación Alcons% están mayoritariamente en torno al 8%.
- El RASTI presenta un valor en la zona de audiencia de 0,6.

El **ecualizador gráfico** será vital para una buena calidad del sistema de refuerzo sonoro. Los cálculos o ajustes han tenido lugar contando con un ecualizador por bandas de tercio de octava, como el de la figura 153:



Figura 153. Ecualizador gráfico

La **unidad de CD/USB** es muy importante para poder sonorizar cualquier evento o canción según sea necesario. Hoy en día la mayor parte de estas unidades tienen entrada para unidades externas de memoria:



Figura 154. Unidad de CD/USB

Uno de los equipamientos usualmente utilizado y que se propone como mejora, es la inclusión de **micrófono inalámbrico** para incluir esa señal en el sistema de refuerzo sonoro.



Figura 155. Ejemplos de sistemas de microfonía inalámbrica

De esta forma se puede narrar desde propia pista cualquier evento o dar avisos rápidos de emergencias. Y en el ámbito más amable dejar hablar a los competidores, incluso público asistente si se da la ocasión.

Otro de los equipamientos que se presenta como mejora, fundamentado en las nuevas normativas de contaminación acústica, es la instalación de un **limitador acústico**.



Figura 156. Limitador de niveles sonoros emitidos

Conviene tener en cuenta la necesidad de estos equipos en todo tipo de actos con elevados niveles sonoros ya que se deben respetar tanto los límites de ruido en emisión (por seguridad) y en recepción (por convivencia), ya sea en recintos al aire libre mediante una sonorización eficiente o sostenible o en interiores mediante los medios de aislamiento necesarios.

XI Presupuesto

El proyecto bajo estudio tiene un coste aproximado que se desglosa. Puede variar en función de las ofertas existentes en el mercado y de la instalación.

Para el sistema de refuerzo sonoro distribuido se utilizan un total de 22 altavoces, 6 DAS Factor 8T y 16 unidades de DAS Bidriver Plus T, con sus correspondientes soportes y anclajes de seguridad. El precio por cada unidad de estos altavoces es de 232€ y 1291€, respectivamente (I.V.A. no incluido).

Los soportes y refuerzos adaptados tienen un precio aproximado de 1500€. También se ofrece como opción medios de protección para estos altavoces, ya que van a estar expuestos a posibles golpes.

En cuanto a los materiales fonoabsorbentes propuestos para el recubrimiento del techo, tienen un precio de (montaje y medios de elevación no incluidos):

Recubrimiento contrachapado: $120\text{m}^2 \times 15\text{€/m}^2 = 1800\text{€}$

El resto de equipamiento sonoro utilizado tiene el siguiente coste:

• Amplificadores DAS CSA 300-T	442€
• Amplificadores DAS CSA 600-T	807€
• Mesa de mezclas	449€
• Ecuilizador gráfico	2195€
• Limitador acústico	2200 €
• Micrófono	499€
• Reproductor de CD	185€

Todos estos equipos deben estar conectados entre sí, por lo que se ha utilizado un total aproximado de 550 metros de cable (2€ el metro de cable).

Respecto a la instalación del equipamiento, se ha de recurrir al menos a 2 trabajadores que realizarán la obra de instalación necesaria, contando con los medios de elevación necesarios.

Unidades	Concepto	Precio/ud	Subtotal
6	altavoz Factor 8T	232,00	1392,00
16	altavoz Bidriver Plus T	1.291,00	20.656,00
22	soportes	70,00	1.540,00
550	cableado	2,00	1.100,00
2	amplificador CSA 300-T	442,00	884,00
4	amplificador CSA 600-T	807,00	3.228,00
1	ecualizador	2.195,00	2.195,00
1	Unidad CD/USB	185,00	185,00
2	limitador	2.200,00	4.400,00
1	mesa de mezclas	449,00	449,00
2	microfono	499,00	998,00
22	montaje altavoces	100,00	2.200,00
1	puesta a punto	0,00	0,00
120	material absorbente	15,00	1.800,00
120	medios pegado	20,00	2.400,00
120	montaje material absorbente	5,00	600,00
1	medios de elevación	990,00	990,00
22	protección altavoces (opc)	50,00	1.100,00
TOTAL			44.725,00

Figura 157. Presupuesto para sistema distribuido

Unidades	Concepto	Precio/ud	Subtotal
8	Modulos Event 210A	2.048,00	16384,00
2	Modulos Event 218A	2.750,00	5.500,00
2	soportes	470,00	940,00
100	cableado	2,00	200,00
2	amplificador	2.199,00	4.398,00
1	ecualizador	2.195,00	2.195,00
1	limitador	2.200,00	2.200,00
0	mesa de mezclas	--	0,00
0	microfono	--	0,00
2	montaje altavoces	100,00	200,00
1	puesta a punto	0,00	0,00
2	polipasto o grua arrays	1.000,00	2.000,00
2	protección altavoces (opc)	100,00	200,00
TOTAL			34.217,00

Figura 158. Presupuesto para sistema de arrays lineales

*21% I.V.A. y transporte a obra no incluidos

Bibliografía

Referencias bibliográficas:

- Sánchez Bote, J.L., Sistemas refuerzo sonoro, E.T.S.I.T. Madrid, 2013.
- Sánchez Bote, J.L., Sistemas refuerzo sonoro y megafonía, E.U.I.T.T. Madrid, 1999.
- Luis I. Ortiz Berenguer, Libro de Refuerzo Sonoro, E.U.I.T.T. Madrid
- Recuero López, M., Acústica arquitectónica aplicada, Ediciones Paraninfo S.A., Madrid, 1999

- Apuntes de Ingeniería Técnica de Telecomunicación, en la especialidad de Sonido e imagen. Asignaturas especializadas en acústica, sonorización e instalaciones de sonorización.

- Páginas web de EASE
 - o <http://ease.afmg.eu/>
 - o www.auralisation.de
 - o www.easefocus.es