

Antoni Carrión Isbert

Diseño acústico de espacios arquitectónicos

Empresas patrocinadoras:

CRISTALERÍA ESPAÑOLA, SA. División Aislamiento. Isover – Edificio Ederra-Centro Azca, Paseo de la Castellana 77, 28046 Madrid

DICESVA, SL – Villar 20, 08041 Barcelona

EARPRO, SA / JBL PROFESSIONAL 7 SHURE – Pol. Ind. I, Juan de la Cierva 23 Nave 2, 08960 Sant Just Desvern (Barcelona)

FIGUERAS INTERNATIONAL SEATING, SA – Ctra. de Parets a Bigues km 7,7, 08186 Lliçà de Munt (Barcelona)

KNAUF GmbH Sucursal en España – Caleruega 79, 28033 Madrid

KINGLAND, SL. Hüppe Form – Mandri 19, 08022 Barcelona

MACCO, SL. Illbruck – Sardenya 311, 08025 Barcelona

NOTSON, SL. Realizaciones acústicas – Gran Via de les Corts Catalanes 658, 08010 Barcelona

ROLAND ELECTRONICS DE ESPAÑA, SA – Bolivia 239, 08020 Barcelona

Primera edición: julio de 1998

La presente obra fue galardonada en el quinto concurso "Ajut a l'elaboració de material docent" convocado por la UPC.

Con la colaboración del Servei de Publicacions de la UPC

Diseño de la cubierta: Manuel Andreu

Diseño y montaje de interiores: Edicions UPC y Alemany, sccl

© Antoni Carrión, 1998

© Edicions UPC, 1998

Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL

Jordi Girona Salgado 31, 08034 Barcelona

Tel. 93 401 68 83 Fax. 93 401 58 85

<http://www.upc.es/edicions/index.html>

e-mail: edicions@sg.upc.es

Producción: Talleres Gráficos Hostench, SA
c/ Córcega 231-233, 08036 Barcelona

Depósito legal: B-28.015-98

ISBN: 84-8301-252-9

Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de los titulares del copyright, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos, así como la exportación e importación de ejemplares para su distribución y venta fuera del ámbito de la Unión Europea.

*A la meva esposa Margi i als meus
fills Gerard, Albert i Marc*

Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento al señor Josep Maria Serra-Muñoz, de Edicions UPC, por el interés mostrado y la confianza depositada en mi persona ya desde un primer momento, cuando el libro era sólo un proyecto. Asimismo, dar las gracias a la Universidad Politécnica de Cataluña por la concesión de una ayuda para la elaboración de material docente. También merecen especial mención las siguientes empresas patrocinadoras, cuya aportación ha facilitado la edición del libro a gusto del autor:

- CRISTALERIA ESPAÑOLA, S.A.
- EARPRO, S.A.
- DICESVA, S.L.
- FIGUERAS International Seating, S.A.
- KINGLAND, S.L.
- KNAUF GmbH Sucursal en España
- J.R.MACCO, S.L.
- NOTSON, S.L.
- ROLAND Electronics de España, S.A.

9

Igualmente deseo dejar constancia de mi más profunda admiración y veneración por el profesor Alfredo Bonavida, quien con su ilimitada capacidad y su inagotable vitalidad me introdujo en el apasionante mundo de la acústica.

Por último, destacar la inestimable ayuda de mis más directos colaboradores, sin los cuales el libro nunca hubiese podido ver la luz: Bernat Romaní (colaborador y asesor), M^a Carme Vilaginés (soporte informático), Víctor Polo (parte gráfica) y Pedro Cerdá (asesor y consejero).

Índice

Prólogo	19
Introducción	23
1 Principios básicos del sonido	
1.1 Definición del sonido	27
1.2 Generación y propagación del sonido	27
1.3 Frecuencia del sonido (f)	28
1.4 Espectro frecuencial	29
1.5 Clasificación de los sonidos	29
1.5.1 Sonidos deterministas	29
1.5.2 Sonidos aleatorios	31
1.6 Banda de frecuencias	32
1.7 Velocidad de propagación del sonido (c)	32
1.8 Longitud de onda del sonido (λ)	33
1.9 Nivel de presión sonora (SPL)	34
1.10 Percepción del sonido en función de la frecuencia	36
1.10.1 Relación entre niveles de presión sonora (SPL) y frecuencia (f)	36
1.10.2 Enmascaramiento del sonido	38
1.11 Medición del sonido: el sonómetro	39
1.11.1 Medidas globales. Escala lineal y red de ponderación A	40
1.11.2 Filtros para análisis frecuencial	41
1.11.3 El sonómetro integrador	41
1.12 Criterios de evaluación del ruido de fondo en un recinto. Curvas NC	42
1.13 El sistema de fonación humana	43
1.13.1 Características del mensaje oral	45
1.13.2 Directividad de la voz humana	45
1.14 Propagación del sonido en el espacio libre	47
1.15 Propagación del sonido en un recinto cerrado	49
1.15.1 Sonido reflejado	49
1.15.2 Estudio de las primeras reflexiones. Acústica geométrica	51

1.15.3	Percepción subjetiva de primeras reflexiones. Ecos	53
1.15.4	Eco flotante	56
1.15.5	Modos propios de una sala. Acústica ondulatoria	56
1.15.6	Balance energético sonoro	59
1.15.7	Campo directo y campo reverberante. Nivel total de presión sonora	61
1.15.8	Tiempo de reverberación RT	63
1.15.9	Cálculo de la inteligibilidad de la palabra: %ALCons y STI/RASTI	67
1.15.10	Relación entre el tiempo de reverberación y la inteligibilidad de la palabra	69
2	Materiales y elementos utilizados en el acondicionamiento acústico de recintos	
2.1	Introducción	71
2.2	Absorción del sonido	71
2.2.1	Absorción de los materiales utilizados en la construcción de las paredes y techo de un recinto	73
2.2.2	Absorción del aire	73
2.2.3	Absorción de las superficies vibrantes	74
2.2.4	Materiales absorbentes	75
2.2.5	Elementos absorbentes selectivos (resonadores)	88
2.2.6	Absorción del público y de las sillas	108
2.2.7	Incidencia rasante. Efecto “seat dip”	113
2.3	Reflexión del sonido	114
2.3.1	Estudio de reflectores. Efecto de difracción del sonido	115
2.4	Difusión del sonido	123
2.4.1	Difusores policilíndricos	125
2.4.2	Difusores de Schroeder	126
12		
3	Diseño acústico de espacios de uso comunitario, de uso deportivo y de salas de conferencias/aulas	
3.1	Introducción	137
3.2	Objetivos acústicos	137
3.2.1	Ruido de fondo (curvas NC)	138
3.2.2	Tiempo de reverberación (RT)	139
3.2.3	Ecos y focalizaciones del sonido	141
3.2.4	Efecto tambor	142
3.2.5	Sistema de megafonía	142
3.3	Criterios generales de diseño	145
3.3.1	Procedimiento para la obtención del tiempo de reverberación RT_{mid} deseado	145
3.3.2	Criterios para prevenir o eliminar ecos y focalizaciones del sonido	147
3.3.3	Criterios para la eliminación o atenuación del efecto tambor	148
3.3.4	Criterios de ubicación de los altavoces del sistema de megafonía	149
3.4	Ejemplos prácticos de diseño acústico	150

3.4.1	Bar-restaurante de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Vallés, Sant Cugat (Barcelona, España)	151
3.4.2	Polideportivo del Campus Norte de la Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona (España)	155
3.4.3	Sala de actos del edificio docente de la Dirección General de Deportes de la Generalitat de Cataluña, Esplugues de Llobregat (Barcelona, España) .	157
3.5	Ejemplos prácticos de diseño de sistemas de megafonía	161
3.5.1	Pabellón Polideportivo de Zurbano (Vitoria, España)	161
3.5.2	Catedral de Vitoria (España)	165
4	Diseño acústico de teatros	
4.1	Introducción	169
4.2	Teatros al aire libre	169
4.2.1	Teatros clásicos griegos	170
4.2.2	Teatros clásicos romanos	172
4.3	Teatros en recintos cerrados	173
4.3.1	Teatros del Renacimiento	174
4.3.2	Teatros del Barroco	176
4.3.3	Teatros de proscenio	177
4.3.4	Teatros con escenario integrado	178
4.3.5	Teatros circulares	180
4.4	Objetivos acústicos asociados a teatros. Parámetros básicos	181
4.4.1	Tiempo de reverberación (RT)	181
4.4.2	Invariancia del tiempo de reverberación con la escenografía	182
4.4.3	Parámetros asociados a las primeras reflexiones	183
4.4.4	Parámetros asociados a la inteligibilidad de la palabra	185
4.4.5	Sonoridad (S)	186
4.4.6	Condiciones y situación óptima del actor (teatros de proscenio)	186
4.5	Posibles anomalías asociadas a teatros	187
4.5.1	Coloración de la voz y falsa localización de la fuente sonora	187
4.5.2	Ecos y focalizaciones del sonido	187
4.5.3	Curvas NC	190
4.6	Resumen de los valores recomendados de los parámetros acústicos asociados a teatros	190
4.7	Criterios generales de diseño	191
4.7.1	Relación entre volumen, número de asientos y tiempo de reverberación medio	191
4.7.2	Visuales	192
4.7.3	Anfiteatros y balcones	194
4.7.4	Procedimientos para la obtención del tiempo de reverberación RT_{mid} deseado	195
4.7.5	Criterios para la generación de primeras reflexiones	197
4.7.6	Perfil teórico óptimo	203
4.7.7	Distancia máxima recomendada	206

4.7.8	Criterios para conseguir una sonoridad óptima	207
4.7.9	Criterios para prevenir o eliminar la coloración de la voz o una falsa localización de la fuente sonora	208
4.7.10	Criterios para prevenir o eliminar ecos y focalizaciones del sonido	208
4.8	Resumen de los criterios generales de diseño de teatros	210
4.8.1	Parámetros acústicos básicos	211
4.8.2	Volumen de la sala y número de asientos	211
4.8.3	Visuales	212
4.8.4	Anfiteatros y balcones	212
4.8.5	Materiales recomendados	212
4.8.6	Generación de primeras reflexiones	212
4.8.7	Perfil teórico óptimo	213
4.8.8	Distancia máxima recomendada	213
4.8.9	Sonoridad	214
4.8.10	Condiciones acústicas óptimas para el actor	214
4.8.11	Prevención o eliminación de la coloración de la voz, de una falsa localización de la fuente sonora y de ecos y focalizaciones del sonido	214
4.9	Ejemplo práctico de diseño. Teatro de la Casa de la Cultura, Tres Cantos (Madrid, España)	215
4.9.1	Descripción del espacio	215
4.9.2	Objetivos acústicos	216
4.9.3	Materiales utilizados como acabados del recinto	216
4.9.4	Resumen de los resultados de las medidas realizadas y valoración acústica de la sala	217
5	Diseño acústico de salas de conciertos	
5.1	Introducción	223
5.2	Objetivos acústicos asociados a salas de conciertos.	
	Parámetros básicos	224
5.2.1	Grado de reverberación	224
5.2.2	Sonoridad (G)	228
5.2.3	“Initial-Time-Delay Gap” (t_I)	228
5.2.4	Relaciones energéticas (ELR): C_t , C_{t_0} , C_x	229
5.2.5	Claridad musical (C_{80})	230
5.2.6	Curva de energía reflejada acumulada (RECC)	232
5.2.7	Textura	233
5.2.8	Espacialidad del sonido: amplitud aparente de la fuente sonora (ASW)	233
5.2.9	Espacialidad del sonido: sensación de sonido envolvente (LEV)	236
5.2.10	Objetivos acústicos relacionados con el escenario y la orquesta	238
5.3	Posibles anomalías asociadas a salas de conciertos	240
5.3.1	Efectos anómalos sobre la calidad tonal	240
5.3.2	Desplazamiento de la fuente sonora (falsa localización)	240
5.3.3	Ecos y focalizaciones del sonido	240

5.3.4	Galería de los susurros	241
5.3.5	Curvas NC	242
5.4	Resumen de los valores recomendados de los parámetros acústicos asociados a salas de conciertos	242
5.5	Criterios generales de diseño	243
5.5.1	Criterios para la elección del volumen y del número de asientos	244
5.5.2	Criterios para la generación de primeras reflexiones. Formas típicas de salas de conciertos	249
5.5.3	Visuales	268
5.5.4	Incidencia rasante. Efecto “seat dip”	268
5.5.5	Anfiteatros y balcones	269
5.5.6	Materiales recomendados en el diseño de la sala. Relación con la calidez acústica y el brillo	270
5.5.7	Criterios para conseguir una sonoridad óptima. Máxima distancia recomendada	271
5.5.8	Criterios para conseguir una amplitud aparente de la fuente sonora óptima	273
5.5.9	Criterios para conseguir un sonido envolvente óptimo	275
5.5.10	Criterios para prevenir o eliminar la coloración tonal	276
5.5.11	Criterios para prevenir o eliminar ecos y focalizaciones del sonido	277
5.5.12	Criterios de diseño del escenario	281
5.5.13	Criterios de diseño de la concha acústica	287
5.6	Métodos de valoración acústica de salas de conciertos	293
5.6.1	Valoración objetiva	293
5.6.2	Valoración subjetiva	296
5.7	Resumen de los criterios generales de diseño	297
5.7.1	Parámetros acústicos básicos	298
5.7.2	Volumen de la sala y número de asientos. Relación con el tiempo de reverberación	298
5.7.3	Formas de la sala	299
5.7.4	Visuales	300
5.7.5	Anfiteatros y balcones	300
5.7.6	Materiales recomendados	300
5.7.7	Sonoridad	301
5.7.8	Máxima distancia recomendada	301
5.7.9	Prevención o eliminación de coloraciones tonales, ecos y focalizaciones del sonido	301
5.7.10	Mejora de la impresión espacial del sonido	302
5.7.11	Escenario	302
5.8	Ejemplo práctico de diseño. Auditorio de Tenerife, Santa Cruz de Tenerife (España)	303
5.8.1	Descripción del espacio	303
5.8.2	Objetivos acústicos	303
5.8.3	Materiales utilizados como acabados del recinto	305

5.8.4 Resumen de los resultados de la simulación acústica realizada y valoración acústica de la sala	306
--	-----

6 Acústica variable para espacios multifuncionales	
6.1 Introducción	313
6.2 Acústica variable mediante elementos físicos variables	314
6.2.1 Variación del volumen	315
6.2.2 Sillas móviles	320
6.2.3 Variación de la absorción adicional	322
6.2.4 Ventajas e inconvenientes de la variación de absorción respecto a la variación de volumen	327
6.2.5 Ejemplo práctico de diseño. Teatro Orchard (Gran Bretaña)	327
6.3 Acústica variable mediante sistemas electrónicos	329
6.3.1 Resonancia Asistida (AR)	330
6.3.2 Reverberación de canal múltiple (MCR) o Sistema de Amplificación del Campo Sonoro	332
6.3.3 Sistema de Control Acústico (ACS)	332
6.4 Ventajas e inconvenientes de la utilización de sistemas electrónicos frente al uso de elementos físicos variables	332
6.4.1 Ventajas	332
6.4.2 Inconvenientes	333
6.5 Comentario final	333
7 Diagnosis, simulación acústica de recintos y sistemas de creación de sonido virtual	
7.1 Diagnosis acústica de recintos	335
7.1.1 Introducción	335
7.1.2 Protocolo de medida correspondiente a recintos destinados a la palabra	335
7.1.3 Protocolo de medida correspondiente a recintos destinados a la música	337
7.1.4 Ejemplos prácticos de diagnosis acústica	340
7.1.5 Diagnosis acústica del Teatro Municipal de Girona (España)	342
7.1.6 Diagnosis acústica del Palau de la Música Catalana, Barcelona (España)	348
7.2 Simulación acústica de recintos	359
7.2.1 Introducción	359
7.2.2 Descripción del programa de simulación acústica AURA	359
7.2.3 Parámetros calculados por el programa AURA	364
7.2.4 Otras opciones del programa	376
7.3 Sistemas de creación de sonido virtual	381
7.3.1 Introducción	381
7.3.2 Concepto de “auralización”	381
7.3.3 Estructura de los sistemas de auralización	382
7.3.4 Sistema de auralización basado en la unidad de reverberación digital Roland R-880	384

Apéndice 1:	
Estudio y diseño de difusores unidimensionales QRD	387
Apéndice 2:	
Formulación de los parámetros acústicos	401
Apéndice 3:	
Ficha técnica de 66 salas de conciertos de relevancia mundial	417
Bibliografía	423
Referencias	425
Índice alfabético	429

Prólogo

El campo de la acústica, como muchos otros campos de la ciencia, es extremadamente amplio. No en vano engloba disciplinas tan diversas como la acústica ambiental, la acústica musical, la psicoacústica y la acústica arquitectónica, entre otras.

Este libro se centra exclusivamente en la acústica arquitectónica y, más concretamente, en el diseño o acondicionamiento acústico de recintos. Dicho de una manera simple, el acondicionamiento acústico consiste en la definición de las formas y revestimientos de las superficies interiores de un recinto con objeto de conseguir las condiciones acústicas más adecuadas para el tipo de actividad a la que se haya previsto destinarlo.

A menudo, el acondicionamiento acústico se confunde con el aislamiento acústico. Esta temática, si bien complementaria a la anterior, es conceptualmente distinta, ya que se refiere al conjunto de acciones encaminadas a la obtención de una correcta atenuación en la transmisión de ruido y vibraciones entre los diferentes espacios que integran un recinto.

El libro está destinado a arquitectos, a estudiantes de arquitectura, a los diferentes colectivos que intervienen directa o indirectamente en el diseño o remodelación de cualquier tipo de recinto y, en general, a todas aquellas personas interesadas en el campo de la acústica arquitectónica.

El objetivo básico del libro consiste en proporcionar unos criterios para el diseño acústico de un amplio conjunto de espacios tipo, a fin de cubrir la inmensa mayoría de casos prácticos que se puedan presentar.

El libro está exento de formulación matemática compleja, ya que, desde mi punto de vista, no se trata de convertir a los lectores en expertos en la materia, sino más bien de proporcionarles unos conocimientos que les permitan dialogar con los especialistas usando una terminología común. En el caso de los arquitectos, es mi deseo que, a partir de dichos conocimientos, sean capaces de calibrar en cada momento y en su justa medida las repercusiones a nivel acústico que se puedan derivar de sus planteamientos en la fase de diseño.

El libro es fruto de la experiencia que he ido acumulando a lo largo de mis más de veinte años de ejercicio de la profesión, tanto en mi faceta de profesor e investigador universitario, como en la de ingeniero del área de proyectos de sonido del Comité Organizador Olímpico Barcelona 92 y, más recientemente y en paralelo con la primera, como director de la empresa de consultoría Audioscan, ingeniería del sonido.

Para su elaboración me ha sido de gran utilidad el extenso material preparado con motivo de la impartición, en 1.996, del curso de especialización titulado “Acondicionamiento Acústico de Espacios Arquitectónicos”, dentro de los programas de formación continuada organizados por la Fundación Politécnica de Cataluña.

En cuanto al contenido del libro, ha sido mi intención respetar al máximo los criterios de aquellos expertos avalados por una dilatada trayectoria profesional y considerados internacionalmente como autoridades en la materia, y tan sólo me he decidido a exponer aquellos sistemas originales propios que han sido merecedores de un reconocimiento público en cuanto a su valor científico.

El libro está estructurado en siete capítulos y tres apéndices. De todos ellos, solamente el capítulo 7 y el apéndice 2 están reservados a especialistas.

En el capítulo 1 se exponen los principios básicos relativos a la generación y propagación del sonido y se describe de forma simplificada el comportamiento del mismo tanto en espacios abiertos como cerrados.

El capítulo 2 está dedicado a describir los materiales y elementos más comúnmente utilizados en el acondicionamiento acústico de recintos, como son los absorbentes, los reflectores y los difusores del sonido. En el apartado de absorbentes no se han incluido tablas exhaustivas de coeficientes de absorción de materiales, pues se trata de una información que se halla en la práctica totalidad de libros dedicados a acústica.

En los capítulos 3 a 6 se estudian los diferentes espacios tipo incluidos en el libro. En cada uno de ellos se exponen los objetivos acústicos que se deben cumplir, se presenta un conjunto de criterios genéricos de diseño y se dan ejemplos prácticos de diseño. El hecho de que existan conceptos comunes a diferentes espacios tipo ha obligado a un cierto grado de repetición a fin de que cada capítulo tenga la máxima independencia posible respecto al resto.

El capítulo 3 está destinado a los espacios de uso comunitario, de uso deportivo y a las salas de conferencias/aulas. Éste es el único capítulo donde se trata la temática de los sistemas de megafonía, aunque de forma muy resumida. Los capítulos 4 y 5 están dedicados, respectivamente, al estudio de teatros y salas de conciertos, por tratarse de espacios de mayor complejidad y por ser representativos de espacios destinados a la palabra y a la música. En el capítulo 6 se trata de la acústica variable aplicada a espacios multifuncionales.

Finalmente, en el capítulo 7 se expone la metodología necesaria para establecer la diagnosis acústica de un recinto, se presenta un programa de simulación acústica y se describen algunos de los sistemas actuales de creación de sonido virtual. Asimismo, se presentan dos ejemplos prácticos de diagnosis acústica de recintos.

Por lo que a los apéndices se refiere, el apéndice 1 está destinado al diseño de difusores unidimensionales de residuo cuadrático, como ampliación de lo expuesto en el capítulo 2 sobre difusores del sonido. En el apéndice 2 se incluye toda la formulación matemática de los parámetros definidos en los diferentes capítulos. En el apéndice 3 se presenta una tabla con información relativa a 66 salas de conciertos de prestigio internacional, extraída del libro de L. Beranek titulado *Concert & Opera Halls: How They Sound*, publicado en 1.996.

En cuanto a la bibliografía, he optado por dar exclusivamente una bibliografía básica, y por tanto muy limitada, partiendo de la base de que el lector puede hallar una bibliografía mucho más extensa simplemente consultando los libros referidos.

Espero que este libro sirva para aumentar el grado de sensibilización hacia la acústica, a la vez que sea útil para concienciar a los diferentes colectivos sobre la importancia y trascendencia que el diseño acústico tiene en la calidad final de una sala. Sólo así será posible que la acústica adquiera el protagonismo que se merece en el contexto de un proyecto de obra civil ya desde sus primeras etapas de gestación.

Antoni Carrión
Junio de 1998

Introducción

Imaginemos por un momento la siguiente escena: entre bastidores, en un nuevo auditorio, momentos antes del concierto inaugural. Personajes: el director de la orquesta, el arquitecto y el gerente de la sala. Lógicamente, cada uno estará con la mirada puesta en un aspecto distinto: el gerente, pendiente de si todas las localidades van siendo ocupadas; el arquitecto, preocupado de si la obra por él realizada contará con el beneplácito del público; el director, sumido en un grado de máxima concentración con objeto de lograr el acoplamiento perfecto entre todos los músicos integrantes de la orquesta.

Pero entre todos estos deseos subyace una pregunta todavía sin respuesta: ¿cómo sonará el nuevo recinto?

De la respuesta a dicha pregunta dependerá en buen grado la calidad de la interpretación musical, el éxito del arquitecto y, por ende, el de la sala en cuestión.

¿Cómo sonará el auditorio?, ¿de qué depende la respuesta a dicha pregunta?

Cualquier amante de la música conoce la respuesta: depende de la acústica.

La acústica es una de las ciencias clásicas más jóvenes. La primera referencia escrita donde se conjugan criterios acústicos y arquitectónicos corresponde al romano Vitruvio en el siglo I antes de Jesucristo. En su opinión, la geometría de los teatros griegos (en forma de abanico) y de los romanos (la clásica “arena”) estaba basada en una definición previa de la acústica más adecuada en cada caso.

Sin embargo, hasta finales del siglo XIX, la acústica era considerada una ciencia inexacta y, en consecuencia, no resulta extraño que continuamente aparecieran explicaciones esotéricas a través de las cuales se pretendían aclarar los “misterios” de esta materia.

Sirva como ejemplo la vieja creencia, totalmente errónea, de que la acústica de una sala de conciertos mejora con el tiempo, como si se tratase de un buen vino.

En todas las épocas se han construido salas con mejor o peor acústica, y lo cierto es que, en la mayoría de casos, sólo aquéllas consideradas como excelentes han resistido el transcurso de los años. Tal vez se podría afirmar que es la reputación de la sala la que puede ir en aumento con el tiempo, en función del prestigio y calidad de los artistas que en ella intervienen.

En cualquier caso, conviene tener presente que los éxitos en el diseño, desde un punto de vista acústico, eran fruto de una combinación de intuición y experiencia, si bien el princi-

pal ingrediente era la suerte: suerte en la definición de las formas y suerte en la elección de los materiales constructivos.

A pesar del desconocimiento reinante, es bien cierto que ya los primeros compositores escribían su música pensando en el recinto donde había de ser interpretada, e incluso la adecuaban para que el resultado final fuese óptimo. Es el caso, por ejemplo, de la Pasión según San Mateo, de J.S. Bach, escrita especialmente para la Thomaskirche, de Leipzig, donde él había sido cantor. Así las cosas, cabría preguntarse hasta qué punto también los arquitectos diseñaban conscientemente sus edificios de acuerdo con las necesidades específicas acústico-musicales, con objeto de lograr una perfecta conjunción entre forma y función. La evolución de la arquitectura de las iglesias protestantes constituye un buen ejemplo del efecto de las exigencias acústicas sobre el volumen de la sala. Cuando el sermón se convirtió en un elemento primordial del servicio, el volumen de las iglesias de nueva construcción fue reducido, obteniéndose así una mejor comprensión de la palabra como consecuencia de la disminución de la reverberación.

A finales del siglo XIX, y concretamente en 1.877, el físico inglés lord Rayleigh publicó un tratado con el título de *Theory of Sound*, que contenía los fundamentos teóricos de esta ciencia y que aún hoy en día sirve de referencia. Con todo, las explicaciones allí vertidas sobre acústica de salas se limitaban a generalidades del siguiente tipo:

“En relación con la acústica de edificios públicos, hay varios puntos que permanecen oscuros. ... A fin de evitar la reverberación, a menudo se hace necesario colocar moquetas o cortinas para absorber el sonido. En algunos casos, la presencia de la audiencia es ya suficiente para conseguir el efecto deseado.”

No es, pues, de extrañar que los arquitectos de la época se mostrasen abiertamente quejoso por la falta de criterios claros a los que recurrir a la hora de definir las formas de una sala para obtener una acústica óptima. Éste es el caso de Charles Garnier, arquitecto de la Ópera de París, que en 1.880 hacía las siguientes manifestaciones:

“Es lamentable que la acústica y yo nunca hayamos llegado a entendernos. Me produce gran dolor no dominar esta extraña ciencia, pero después de una labor de quince años, apenas he progresado en relación al primer día. ... He leído libros y he hablado con expertos; en ninguna parte he encontrado una luz que me guíe; al contrario, únicamente afirmaciones contrapuestas.”

No deja de ser curioso que en una época caracterizada por descubrimientos revolucionarios en campos como el de la física atómica, el progreso de la acústica, que pretende explicar un fenómeno tan cotidiano como es el comportamiento del sonido en un recinto, fuese tan lento. Con toda seguridad, el motivo principal de tal paradójica situación no era otro que la falta de equipamiento electrónico con el que poder hacer mediciones objetivas. En efecto, el único sistema del que se disponía era el oído humano, pero su rápida adaptación a cualquier tipo de recinto con independencia de su comportamiento acústico imposibilitaba su empleo como instrumento de medida.

Los ruegos de Garnier y otros prestigiosos arquitectos fueron atendidos al otro lado del Atlántico cuando, en 1.895, Wallace Clement Sabine empezó su trabajo pionero encaminado a la aplicación de la acústica en la arquitectura.

W.C. Sabine, profesor asociado del departamento de Física de la Universidad de Harvard, se había dedicado inicialmente a los campos de la óptica y la electricidad. Su cambio de

rumbo científico se produjo cuando el rector de la Universidad le solicitó que se ocupase de buscar una solución para la pésima acústica del recién construido Fogg Art Museum. A pesar de la precariedad de medios de que disponía, fue capaz de encontrarla con extrema diligencia; la consecuencia fue inmediata: recibió el encargo de realizar el estudio acústico del nuevo Boston Music Hall. En un principio Sabine dudó, pero acabó aceptando. Ante todo se dedicó a revisar los datos experimentales que había recopilado en su anterior experiencia. La noche del 29 de octubre de 1.898, y de forma repentina, encontró una justificación analítica a los resultados recopilados, gritando a su madre, la única persona que se encontraba en su casa: “¡Mamá, es una hipérbola!”. Acababa de descubrir que la reverberación de un recinto era inversamente proporcional a la cantidad de absorción del mismo. Había nacido la célebre ecuación de reverberación de Sabine, utilizada universalmente hasta nuestros días como parámetro primordial para la caracterización acústica de una sala.

La acústica se consolidó como una nueva ciencia a partir de los años 30, con posterioridad a la prematura muerte de Sabine, en 1.919, fundamentalmente por el desarrollo de la tecnología de micrófonos, amplificadores a válvulas y altavoces, y su utilización como herramienta habitual en trabajos de campo. Posteriormente, con la evolución de los equipos electrónicos de medición, ha sido posible relacionar una serie de parámetros subjetivos tales como: inteligibilidad de la palabra, claridad musical, reverberación, envolvente espacial del sonido o intimidad acústica con otros parámetros objetivos obtenidos directamente a partir de mediciones efectuadas “in situ”.

En las últimas décadas, y en el campo de la simulación acústica, se han venido utilizando mayoritariamente dos sistemas completamente diferentes, aunque complementarios: las maquetas y los programas informáticos.

Las maquetas son modelos del recinto construidos a escala que permiten estudiar el comportamiento de las ondas sonoras en su interior. A partir de una serie de medidas efectuadas sobre las mismas, y siguiendo un proceso de extrapolación, es posible obtener unos resultados orientativos en cuanto al comportamiento acústico del local. Con objeto de optimizar la simulación, los factores de escala más comúnmente utilizados han sido 1:8 y 1:10. Sin embargo, el espacio requerido para su ubicación, el coste y el tiempo de construcción, y en especial la aparición de paquetes de software específicamente diseñados para aplicaciones en los campos de la acústica y la sonorización, han hecho que su utilización actual quede prácticamente circunscrita a proyectos de gran prestigio y envergadura.

El advenimiento de los programas de simulación acústica, al inicio de la década de los 80, supuso un salto cualitativo importante en la mejora de las previsiones efectuadas en relación con los resultados finales, con el recinto construido. Dichas previsiones consistían en un cálculo estimativo de los parámetros acústicos más representativos del recinto, y supusieron un notable avance en cuanto a tiempo y dinero respecto al empleo exclusivo de maquetas.

Como complemento a ambos sistemas aparecen, ya en la década de los 90, los denominados sistemas de creación de sonido virtual, que permiten llevar a cabo lo que se ha convenido en llamar “auralización”. La “auralización” es el proceso a través del cual es posible realizar una escucha, en cualquier punto de un recinto, de un mensaje oral o un pasaje musical, con la particularidad de que ello se lleva a cabo de forma virtual (antes de que dicho recinto se haya construido o remodelado). La mencionada escucha se puede efectuar mediante altavoces o, preferentemente, por medio de auriculares.

En la actualidad, la existencia de programas de simulación más potentes y perfeccionados y de sistemas de creación de sonido virtual más evolucionados ha representado un avance significativo en la modelización acústica de recintos, tanto en la fase de diseño como en la fase de análisis.

En la fase de diseño, constituyen una herramienta extremadamente útil, al facilitar la toma de decisiones en cuanto a formas y revestimientos interiores óptimos del recinto.

En la fase de análisis, permiten predecir con un elevado grado de fiabilidad cuál será el comportamiento acústico de una sala, a partir del conocimiento de las formas y de los materiales propuestos como acabados interiores de la misma.

Del diseño acústico de un conjunto representativo de espacios tipo, así como del estado actual de los programas de simulación acústica y de los sistemas de creación de sonido virtual, se tratará a lo largo de los siete capítulos de que consta este libro.

1

Principios básicos del sonido

1.1 Definición del sonido

El sonido se puede definir de formas muy diversas. De todas ellas, las más habituales son las siguientes:

- Vibración mecánica que se propaga a través de un medio material elástico y denso (habitualmente el aire), y que es capaz de producir una sensación auditiva. De dicha definición se desprende que, a diferencia de la luz, el sonido no se propaga a través del vacío y, además, se asocia con el concepto de estímulo físico.
- Sensación auditiva producida por una vibración de carácter mecánico que se propaga a través de un medio elástico y denso.

27

1.2 Generación y propagación del sonido

El elemento generador del sonido se denomina fuente sonora (tambor, cuerda de un violín, cuerdas vocales, etc.). La generación del sonido tiene lugar cuando dicha fuente entra en vibración. Dicha vibración es transmitida a las partículas de aire adyacentes a la misma que, a su vez, la transmiten a nuevas partículas contiguas.

Las partículas no se desplazan con la perturbación, sino que simplemente oscilan alrededor de su posición de equilibrio. La manera en que la perturbación se traslada de un lugar a otro se denomina propagación de la onda sonora.

Si se considera como fuente sonora, por ejemplo, un tambor, un golpe sobre su membrana provoca una oscilación. Cuando la membrana se desplaza hacia fuera, las partículas de aire próximas a su superficie se acumulan creándose una zona de compresión, mientras que en el caso contrario, dichas partículas se separan, lo cual da lugar a una zona de enrarecimiento o dilatación (figura 1.1).

La oscilación de las partículas tiene lugar en la misma dirección que la de propagación de la onda. En este caso se habla de ondas sonoras longitudinales, en contraposición a las

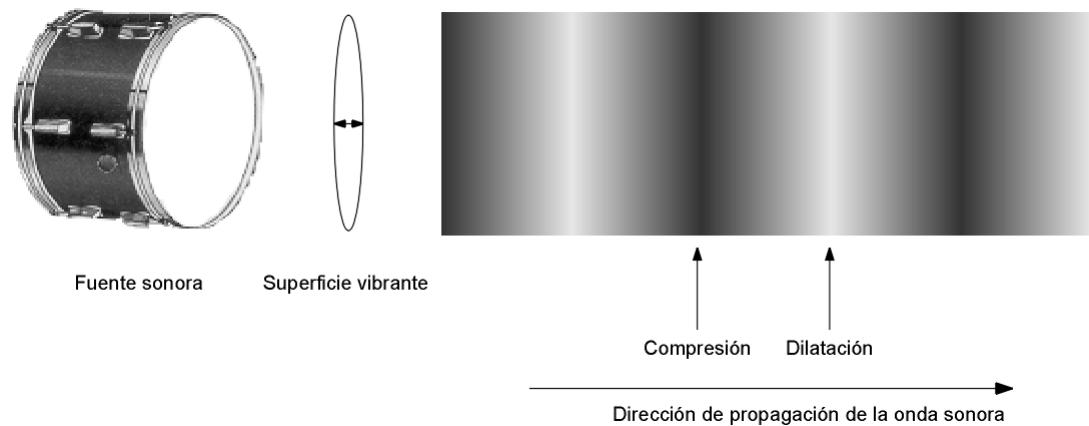


Fig. 1.1 Zonas de compresión y dilatación de las partículas de aire en la propagación de una onda sonora

ondas electromagnéticas que son transversales (oscilación de la señal generadora perpendicular a la dirección de propagación de la onda).

La manera más habitual de expresar cuantitativamente la magnitud de un campo sonoro es mediante la presión sonora, o fuerza que ejercen las partículas de aire por unidad de superficie.

En la figura 1.2 se observa la evolución de la presión P_T , en función del tiempo, en un punto situado a una distancia cualquiera de la fuente sonora. Dicha presión se obtiene como suma de la presión atmosférica estática P_0 y la presión asociada a la onda sonora p .

Se observan incrementos y disminuciones periódicas de presión sonora alrededor de su valor de equilibrio, correspondiente a la presión atmosférica estática P_0 . Dichas variaciones van asociadas a los procesos de compresión y dilatación comentados anteriormente. El valor máximo de la oscilación respecto a P_0 recibe el nombre de amplitud de la presión asociada a la onda sonora, y se representa por la letra P .

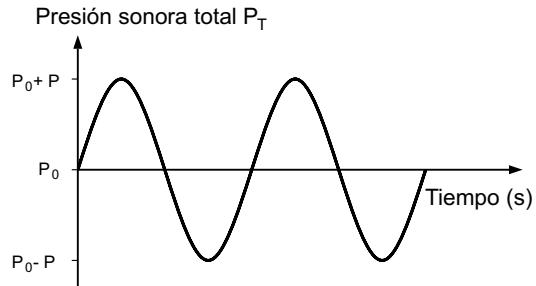


Fig. 1.2 Evolución de la presión sonora total P_T en función del tiempo en un punto cualquiera del espacio

1.3 Frecuencia del sonido (f)

El número de oscilaciones por segundo de la presión sonora p se denomina frecuencia (f) del sonido y se mide en hertzios (Hz) o ciclos por segundo (c/s).

Lógicamente, la frecuencia del sonido coincide con la frecuencia de la vibración mecánica que lo ha generado (en el ejemplo anterior, la frecuencia de oscilación de la membrana del tambor).

En la figura 1.3 se observan dos ejemplos de presión sonora p asociada a oscilaciones de diferente frecuencia.

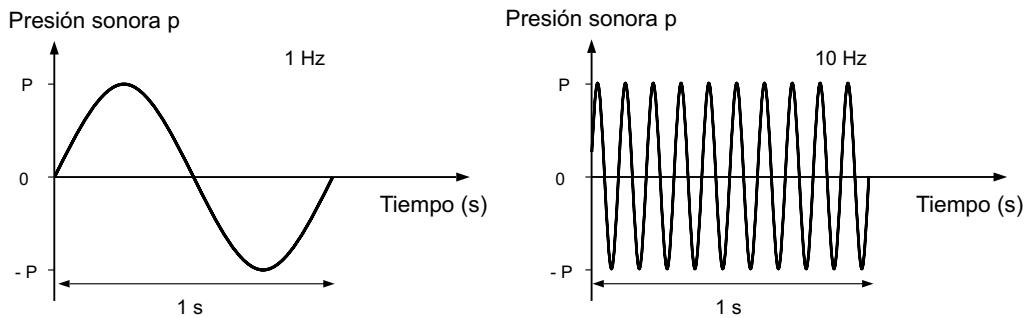


Fig. 1.3 Ejemplos de oscilaciones de frecuencias 1 y 10 Hz

1.4 Espectro frecuencial

La gran mayoría de los sonidos que percibimos no constan únicamente de una sola frecuencia, sino que están constituidos por múltiples frecuencias superpuestas. Incluso cada uno de los sonidos generados por un instrumento musical están formados por más de una frecuencia.

Se puede conocer qué frecuencias componen un sonido observando el denominado espectro frecuencial (o simplemente espectro) del mismo, entendiendo por tal la representación gráfica de las frecuencias que lo integran junto con su correspondiente nivel de presión sonora.

29

1.5 Clasificación de los sonidos

Los sonidos se dividen en deterministas y aleatorios. Los primeros se pueden representar siempre mediante una expresión matemática que indica la forma en que varía la correspondiente presión sonora en función del tiempo. Los segundos, en cambio, van asociados a vibraciones irregulares que nunca se repiten exactamente y que, por tanto, solamente se pueden describir mediante parámetros estadísticos.

A continuación se definen los sonidos más representativos pertenecientes a cada grupo.

1.5.1 Sonidos deterministas

1.5.1.1 Sonido periódico simple (tono puro)

Es el tipo más simple de sonido existente en la naturaleza. Se compone de una única frecuencia (f_0) constante, por lo que su espectro está constituido por una sola raya (figura 1.4). El sonido producido por un diapasón es de este tipo.

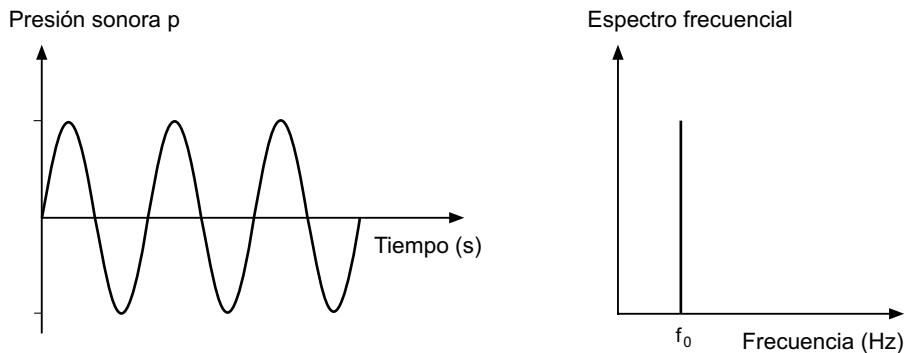


Fig. 1.4 Tono puro y su espectro frecuencial

1.5.1.2 Sonido periódico complejo

Sonido caracterizado por una frecuencia origen, denominada fundamental o primer armónico, y un conjunto finito (y a veces infinito) de frecuencias múltiplos de ésta, denominados armónicos. Por regla general, la frecuencia fundamental es la que lleva asociada más potencia sonora. La mayoría de instrumentos musicales producen este tipo de sonidos.

En la figura 1.5 se representa un sonido de este tipo formado por una frecuencia fundamental o primer armónico (f_0) y su tercer armónico ($3f_0$).

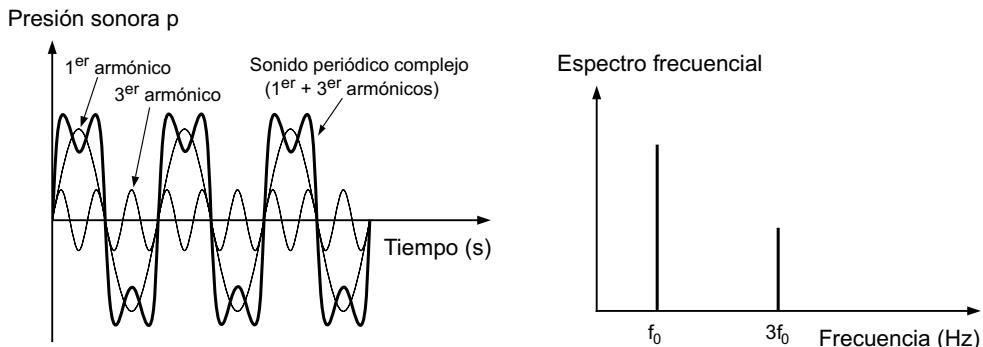


Fig. 1.5 Sonido periódico complejo y su espectro frecuencial

1.5.1.3 Sonido transitorio

Sonido resultante de la brusca liberación de energía bajo la forma, por ejemplo, de explosiones o impactos. Es de aparición repentina y tiene una duración breve. A diferencia de los sonidos periódicos comentados anteriormente, contiene un gran número de componentes frecuen-

ciales que no guardan una relación armónica entre sí, sino que forman un espectro continuo. Una palmada constituye un ejemplo de este tipo de sonidos.

En la figura 1.6 se representa un sonido transitorio denominado pulso rectangular, así como su espectro frecuencial.

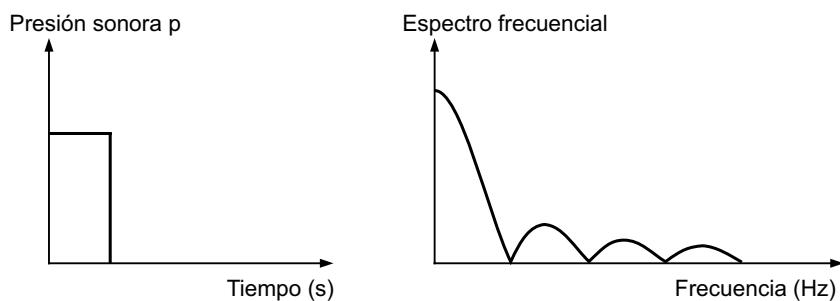


Fig. 1.6 Pulso rectangular y su espectro frecuencial

1.5.2 Sonidos aleatorios

31

Los sonidos aleatorios están formados por muchas frecuencias de valor impredecible. Habitualmente reciben el nombre de ruidos (ruido = sonido no deseado).

En este caso, en lugar de utilizar el espectro frecuencial, se hace uso de la llamada densidad espectral de potencia, es decir, de la potencia sonora por unidad de frecuencia.

Un sonido aleatorio característico es el ruido blanco. Se define como aquel ruido que presenta una densidad espectral de potencia constante. Un ejemplo de este tipo de ruido es el generado por una cascada de agua.

En la figura 1.7 se aprecia la evolución temporal de un sonido aleatorio y su correspondiente densidad espectral de potencia.

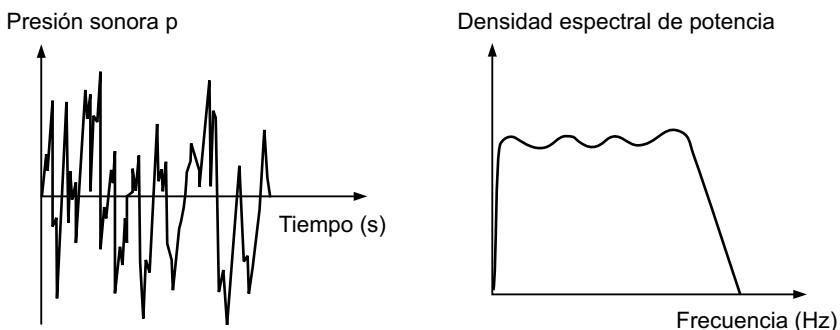


Fig. 1.7 Sonido aleatorio y correspondiente densidad espectral de potencia

1.6 Banda de frecuencias

Las notas inferior y superior de un piano de 88 teclas tienen unas frecuencias fundamentales de 27,5 Hz y 4.400 Hz, respectivamente. La primera corresponde a un sonido muy grave, mientras que la segunda va asociada a uno muy agudo. Por consiguiente, un sonido grave está caracterizado por una frecuencia baja, en tanto que uno agudo lo está por una frecuencia alta. El conjunto de frecuencias situado entre ambos extremos se denomina banda o margen de frecuencias del piano. Dicha definición es válida para cualquier fuente sonora.

En la figura 1.8 se muestran las bandas de frecuencias asociadas a diversos instrumentos musicales y a la voz humana.

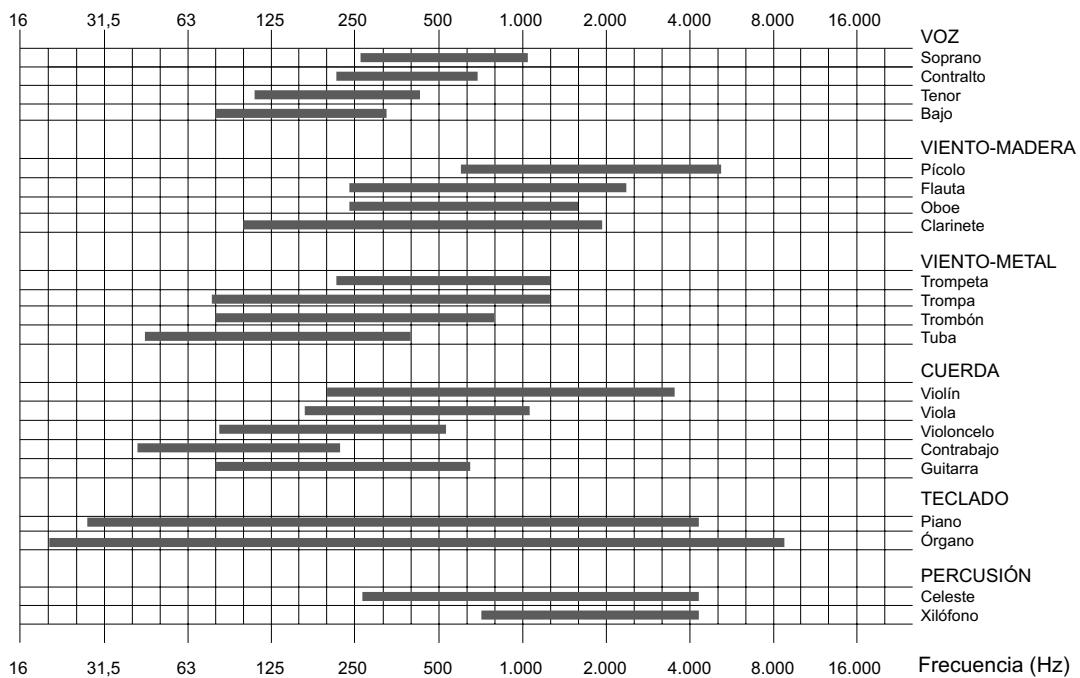


Fig. 1.8 Bandas de frecuencias de instrumentos musicales y de la voz

En el caso de la audición humana, la banda de frecuencias audibles para una persona joven y sana se extiende, aproximadamente, de 20 Hz a 20.000 Hz (o bien 20 kHz). Las frecuencias inferiores a 20 Hz se llaman subsónicas y las superiores a 20 kHz ultrasónicas, dando lugar a los infrasonidos y ultrasonidos, respectivamente.

1.7 Velocidad de propagación del sonido (c)

La velocidad de propagación del sonido (c) es función de la elasticidad y densidad del medio de propagación. Debido a que, en el aire, ambas magnitudes dependen de la presión atmosférica,

rica estática P_0 y de la temperatura, resulta que, considerando las condiciones normales de 1 atmósfera de presión y 22 °C de temperatura, la velocidad de propagación del sonido es de, aproximadamente, 345 m/s.

Si bien el aire constituye el medio habitual de propagación de las ondas sonoras, conviene tener presente que el sonido puede propagarse a través de cualquier otro medio elástico y denso. Cuanto más denso y menos elástico sea el medio, mayor será la velocidad del sonido a su través. Por ejemplo, la velocidad de propagación del sonido generado por un tren a través de los raíles es mucho mayor que a través del aire, por lo que la vibración del raíl se percibirá mucho antes que el sonido aéreo debido a dicho tren.

1.8 Longitud de onda del sonido (λ)

Una vez definidos los conceptos fundamentales de frecuencia y velocidad de propagación del sonido, es preciso definir otro concepto básico que guarda una estrecha relación con ambos: la longitud de onda del sonido (λ).

Se define como la distancia entre dos puntos consecutivos del campo sonoro que se hallan en el mismo estado de vibración en cualquier instante de tiempo. Por ejemplo, si en un instante dado se seleccionan dos puntos consecutivos del espacio donde los valores de presión son máximos, la longitud de onda es precisamente la distancia entre ambos puntos (figura 1.9).

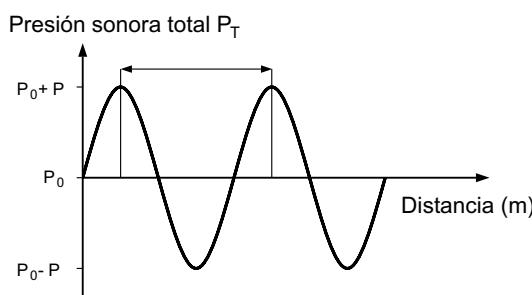


Fig. 1.9 Longitud de onda (λ) del sonido

La relación entre las tres magnitudes: frecuencia (f), velocidad de propagación (c) y longitud de onda (λ), viene dada por la siguiente expresión:

$$\lambda = c/f$$

Según se observa, para cada frecuencia, la longitud de onda depende del medio de propagación, ya que es proporcional a la velocidad, y ésta varía para cada medio.

Por otro lado, se puede ver que la longitud de onda y la frecuencia son inversamente proporcionales, es decir, cuanto mayor es f menor es λ , y viceversa.

Por ejemplo, en el aire, las longitudes de onda correspondientes a la banda de frecuencias audibles se hallan situadas entre 17,25 m ($f = 20$ Hz) y 1,72 cm ($f = 20$ kHz).

En la figura 1.10 se presenta un nomograma que relaciona λ con f , suponiendo que el medio de propagación es el aire.

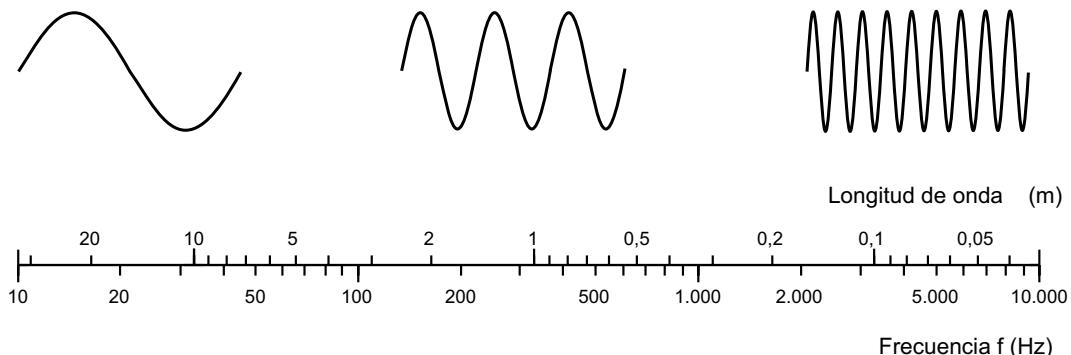


Fig. 1.10 Relación entre longitud de onda (λ) y frecuencia (f) en el aire

1.9 Nivel de presión sonora (SPL)

34

Según se ha mencionado en el apartado 1.2, la presión sonora constituye la manera más habitual de expresar la magnitud de un campo sonoro. La unidad de medida es el Newton/metro² (N/m²) o Pascal (Pa).

En principio, el valor a considerar es la diferencia entre el valor fluctuante de la presión sonora total P_T y su valor de equilibrio P_0 . Debido a la variación de dicha magnitud con el tiempo, se utiliza como valor representativo su promedio temporal, que recibe el nombre de valor eficaz o r.m.s. (“root-mean-square”).

Ahora bien, la utilización de dicho valor eficaz da lugar a una serie de problemas cuyo origen se halla en el comportamiento del oído humano y que a continuación se exponen:

- La gama de presiones a las que responde el oído, desde el valor umbral de audición hasta el que causa dolor, es extraordinariamente amplia. En concreto, la presión eficaz sonora más débil que puede ser detectada por una persona, a la frecuencia de 1 kHz, es de 2×10^{-5} Pa, mientras que el umbral de dolor tiene lugar para una presión eficaz del orden de 100 Pa (milésima parte de la presión atmosférica estática $P_0 \approx 10^5$ Pa, equivalente a 1 atmósfera). En consecuencia, la escala de presiones audibles cubre una gama dinámica de, aproximadamente, 1 a 5.000.000. Es obvio, pues, que la aplicación directa de una escala lineal conduciría al uso de números inmanejables.
- Nuestro sistema auditivo no responde linealmente a los estímulos que recibe, sino que más bien lo hace de forma logarítmica. Por ejemplo, si la presión de un tono puro de 1 kHz se dobla, la sonoridad, o sensación subjetiva producida por el mismo, no llegará a ser el doble. De hecho, para obtener una sonoridad doble, es necesario multiplicar la presión sonora por un factor de 3,16.

Por los dos motivos expuestos, resulta razonable y conveniente hacer uso de una escala logarítmica para representar la presión sonora. Dicha escala se expresa en valores relativos a un valor de referencia. Se trata de la presión eficaz correspondiente al umbral de audición, a 1 kHz (2×10^{-5} Pa). En tal caso, se habla de nivel de presión sonora SPL o L_p . La unidad utilizada es el decibelio (dB). En el apéndice 2 se da la correspondiente expresión matemática.

La utilización del umbral de audición como referencia tiene como objetivo que todos los sonidos audibles sean representados por valores SPL positivos.

El uso de dB reduce la dinámica de presiones sonoras de $1:5 \times 10^6$ a niveles de presión sonora de 0 a 135 dB, donde 0 dB representa una presión igual al umbral de audición (no significa, por tanto, ausencia de sonido) y 135 dB el umbral aproximado de dolor. De esta manera, las cifras manejadas son mucho más simples y, además, se dan las siguientes relaciones entre cambios de nivel sonoro y su efecto subjetivo:

- 1 dB: mínimo cambio de nivel sonoro perceptible
- 5 dB: cambio de nivel claramente percibido
- 10 dB: incremento asociado a una sonoridad doble

En la tabla 1.1 se muestran los niveles de presión sonora correspondientes a una serie de sonidos y ruidos típicos, junto con la valoración subjetiva asociada.

FUENTE SONORA	NIVEL DE PRESIÓN SONORA SPL (dB)	VALORACIÓN SUBJETIVA DEL NIVEL
Despegue avión (a 60 m)	120	Muy elevado
Edificio en construcción	110	
Martillo neumático	100	
Camión pesado (a 15 m)	90	Elevado
Calle (ciudad)	80	
Interior automóvil	70	
Conversación normal (a 1 m)	60	Moderado
Oficina, aula	50	
Sala de estar	40	
Dormitorio (noche)	30	Bajo
Estudio de radiodifusión	20	

Tabla 1.1 Niveles de presión sonora correspondientes a sonidos y ruidos típicos, y valoración subjetiva asociada

En la figura 1.11 se representan los niveles medios de presión sonora a 1 m de distancia producidos por una persona hablando con diferentes intensidades de voz.

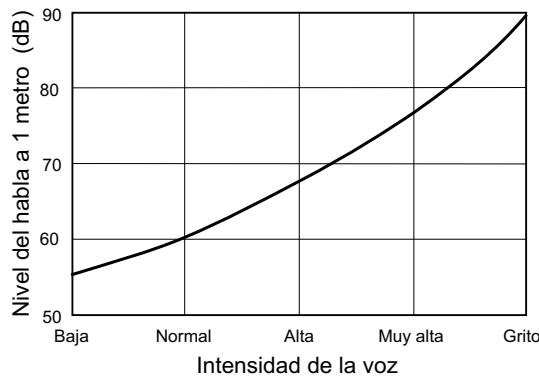


Fig. 1.11 Niveles medios de presión sonora SPL, a 1 m de distancia, producidos por una persona hablando con diferentes intensidades de voz

1.10 Percepción del sonido en función de la frecuencia

1.10.1 Relación entre niveles de presión sonora (SPL) y frecuencia (f)

Como se ha comentado en el apartado 1.6, la banda de frecuencias audibles para una persona joven con una audición normal, va desde 20 Hz (sonidos más graves) hasta 20.000 Hz ó 20 kHz (sonidos más agudos).

Ahora bien, el oído humano no tiene la misma sensibilidad para todo este margen de frecuencias. En la figura 1.12 se observa la variación de los umbrales de audición y de dolor en función de la frecuencia.

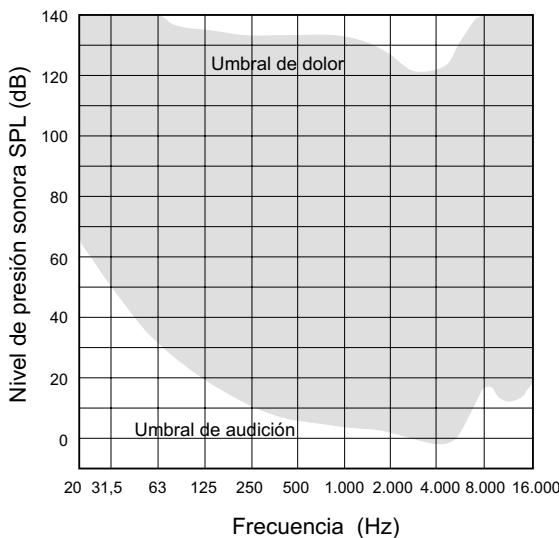


Fig. 1.12 Niveles audibles en función de la frecuencia

A partir de la observación de la figura 1.12, se extraen las siguientes conclusiones:

- Para niveles bajos de presión sonora, el oído es muy insensible a bajas frecuencias, es decir, el nivel de presión sonora de un sonido grave tiene que ser mucho más elevado que el correspondiente a un sonido de frecuencias medias para que ambos produzcan la misma sonoridad. Por ejemplo, un nivel $SPL = 70$ dB, a 20 Hz, produce la misma sonoridad que un nivel $SPL = 5$ dB, a 1 kHz (sonoridad = sensación subjetiva de nivel sonoro).
- Para dichos niveles bajos, el oído también presenta una cierta atenuación a altas frecuencias.
- A medida que los niveles aumentan, el oído tiende a responder de forma más homogénea en toda la banda de frecuencias audibles, hasta el punto de que cuando son muy elevados, la sonoridad asociada a tonos puros de diferente frecuencia es muy parecida.

Este cambio de comportamiento del oído en función del nivel de señal explica el hecho de que al subir el volumen del amplificador de un equipo de música, se percibe un mayor contenido de graves y agudos del pasaje musical reproducido. Igualmente pone de manifiesto la confusión que puede surgir al seleccionar unas cajas acústicas de parecida calidad: las de mayor rendimiento, y que por tanto rodian más potencia sonora para la misma potencia eléctrica aplicada, pueden producir la sensación de que suenan mejor, exclusivamente debido a que la percepción de graves y agudos es mayor.

Una vez descrito el comportamiento del oído humano desde el punto de vista de la percepción de niveles en función de la frecuencia, es conveniente establecer una comparación entre los mismos y las zonas representativas de generación sonora asociada a la voz humana y a los instrumentos musicales convencionales (figura 1.13).

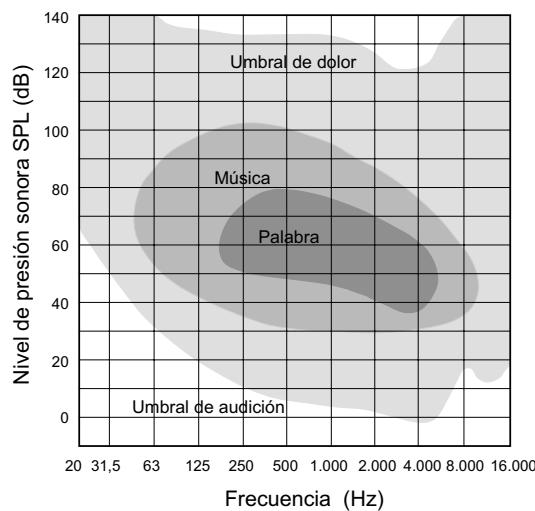


Fig. 1.13 Niveles auditivos en función de la frecuencia junto con las zonas correspondientes a la música y a la palabra

Según se puede apreciar, la capacidad de la persona como receptora del sonido es mucho mayor que como emisora.

1.10.2 Enmascaramiento del sonido

Cuando el oído está expuesto a dos o más tonos puros de frecuencias diferentes, existe la posibilidad de que uno de ellos enmascare los demás y, por tanto, evite su percepción de forma parcial o total. Del mismo modo, es evidente la dificultad que entraña entender una conversación en presencia de ruido.

El fenómeno del enmascaramiento se explica de una manera simplificada considerando la forma en que la denominada membrana basilar es excitada por tonos puros de diferente frecuencia. La membrana basilar se extiende a lo largo de la cóclea (conducto en forma de caracol de sección prácticamente circular alojado en el interior del oído interno), desde la llamada ventana oval (zona de separación entre el oído medio y el oído interno) hasta el extremo superior de aquélla.

En la figura 1.14 se muestra la amplitud relativa del desplazamiento de la membrana basilar en función de la distancia a la ventana oval, para cuatro tonos de frecuencia diferente.

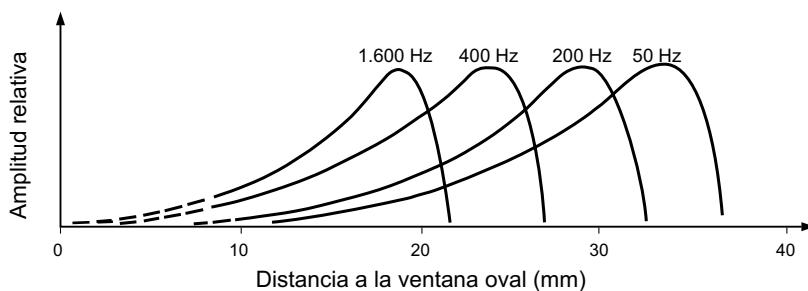


Fig. 1.14 Amplitud relativa del desplazamiento de la membrana basilar para diferentes tonos puros

Se observa que los tonos de alta frecuencia producen un desplazamiento máximo en la zona próxima a la ventana oval y que, a medida que la frecuencia disminuye, dicho máximo se va desplazando hacia puntos más alejados de la misma.

Por otra parte, la excitación es asimétrica puesto que presenta una cola que se extiende hacia la ventana oval (zona de frecuencias altas), mientras que por el lado contrario (frecuencias bajas) sufre una brusca atenuación.

La consecuencia de tal asimetría es que un tono de baja frecuencia puede enmascarar otro de frecuencia más elevada, tanto más, cuanto mayor sea su nivel de presión sonora. Ello es debido a que la zona de frecuencias cubierta por su cola será más extensa. En cambio, al considerar la situación inversa, el grado de enmascaramiento es claramente inferior.

La figura 1.15 muestra el efecto de enmascaramiento entre dos tonos puros A y B en cuatro situaciones distintas, por lo que a frecuencias y niveles asociados se refiere.

- La frecuencia del tono A es mayor que la del tono B y los niveles son semejantes → enmascaramiento inapreciable
- La frecuencia del tono A es ligeramente mayor que la del tono B y los niveles son semejantes → el tono B enmascara parcialmente el A
- La frecuencia del tono A es mayor que la del tono B, mientras que su nivel es bastante inferior → se produce un enmascaramiento prácticamente total

- d) La frecuencia y el nivel del tono A son superiores a las del tono B → el enmascaramiento producido es mínimo

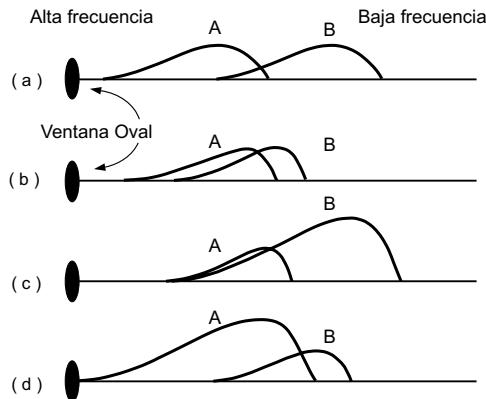


Fig. 1.15 Respuesta de la membrana basilar a diferentes combinaciones de tonos puros

1.11 Medición del sonido: el sonómetro

Debido a la complejidad del funcionamiento del oído humano, hasta el momento actual no ha sido posible diseñar un aparato de medida objetiva del sonido que sea capaz de dar unos resultados del todo equivalentes, para cualquier tipo de sonido, a las valoraciones subjetivas asociadas al mismo. Sin embargo, resulta evidente la necesidad de disponer de un instrumento electrónico que permita medir sonidos bajo unas condiciones rigurosamente prefijadas, de manera que los resultados obtenidos sean siempre objetivos y repetitivos, dentro de unos márgenes de tolerancia conocidos. Dicho aparato recibe el nombre de sonómetro (figura 1.16).

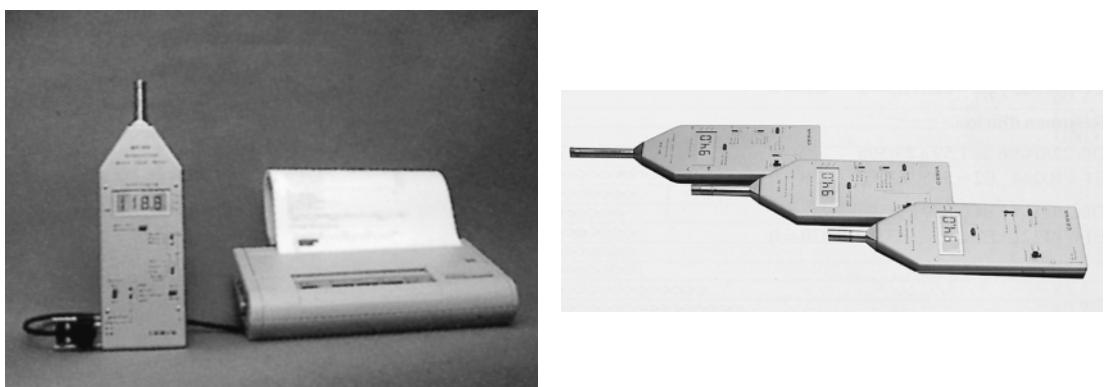


Fig. 1.16 Diferentes modelos de sonómetros convencionales (Dicesva, S.L.)

El sonómetro mide exclusivamente niveles de presión sonora. Su unidad de procesado permite realizar medidas globales, o bien por bandas de frecuencias, con diferentes respuestas temporales (respuestas “Fast”, “Slow”, “Impulse” o “Peak”).

Por otro lado, con el fin de reducir al máximo las posibles diferencias entre las mediciones efectuadas con sonómetros de distintas marcas y modelos, existen unas normas internacionales a las que deben ceñirse los fabricantes de tales instrumentos.

En Europa, las más representativas son las normas CEI (Comisión Electrotécnica Internacional) y, en concreto, las CEI 60651 y CEI 60804. Las normas equivalentes en España son, respectivamente, la UNE-EN 60651 y la UNE-EN 60804.

1.11.1 Medidas globales. Escala lineal y red de ponderación A

1.11.1.1 Escala lineal

La medida del nivel de presión sonora SPL o L_p utilizando dicha escala significa que no se aplica ningún tipo de acentuación ni atenuación a ninguna de las frecuencias integrantes del sonido objeto de análisis.

1.11.1.2 Red de ponderación A

40

Debido a la diferente sensibilidad del oído a las distintas frecuencias, los valores obtenidos haciendo uso de la escala lineal no guardan una relación directa con la sonoridad del sonido en cuestión. Con objeto de que la medida realizada sea más representativa de la sonoridad asociada a un sonido cualquiera, los sonómetros incorporan la llamada red de ponderación A. En la figura 1.17 se representa la curva de respuesta correspondiente a dicha red de ponderación.

Obsérvese que la frecuencia de 1 kHz queda inalterada y, por tanto, se puede considerar de referencia, y que para frecuencias inferiores existe una importante atenuación de nivel.

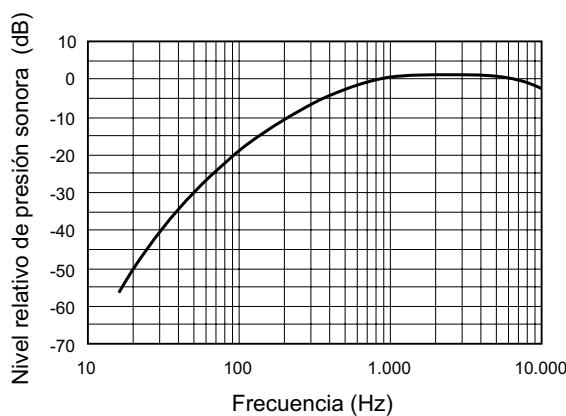


Fig. 1.17 Red de ponderación A

Los niveles de presión sonora medidos con la red de ponderación A se representan con las letras L_A y se expresan en dBA o dB(A).

1.11.2 Filtros para análisis frecuencial

En la mayoría de casos no es suficiente conocer el nivel de presión sonora total L_p y el nivel ponderado L_A , sino que es necesario disponer de una información más detallada de su espectro, es decir, de su contenido energético a distintas frecuencias. Es lo que se ha convenido en llamar análisis frecuencial de la señal.

Con este fin, existen sonómetros que incorporan un conjunto de filtros eléctricos, cada uno de los cuales sólo deja pasar aquellas frecuencias que están dentro de una banda de frecuencias determinada (habitualmente se trabaja con bandas de 1 octava). La banda de 1 octava incluye todas las frecuencias comprendidas entre una frecuencia dada y la frecuencia doble. Dicha denominación tiene su origen en el lenguaje musical. En la tabla 1.2 se indican las frecuencias centrales de tales bandas, según prescribe la norma ISO 266.

FRECUENCIAS CENTRALES DE LAS BANDAS DE OCTAVA ESTANDARIZADAS (ISO 266)										
16	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	16.000

Tabla 1.2 Frecuencias centrales de las bandas de octava estandarizadas según la norma ISO 266, en Hz

Por otra parte, las 6 bandas de octava cuyas frecuencias centrales están comprendidas entre 125 Hz y 4.000 Hz son las que generalmente se consideran tanto en la fase de diseño acústico como en la de diagnosis acústica de recintos, según se verá a lo largo de los próximos capítulos.

1.11.3 El sonómetro integrador

El sonómetro integrador realiza medidas del nivel de presión sonora obtenido como resultado de promediar linealmente la presión sonora cuadrática instantánea a lo largo del tiempo de medida. Dicha medida se denomina nivel continuo equivalente de presión sonora y se designa por L_{eq} .

Este tipo de sonómetro representa la alternativa actual al sonómetro convencional, ya que permite disponer de tiempos de promediado más largos, pudiendo llegar a muchos minutos o, incluso, horas.

Habitualmente, las medidas se realizan utilizando la red de ponderación A, en cuyo caso la designación correcta sería L_{Aeq} . Ahora bien, como la ponderación A está totalmente generalizada, la representación mediante las letras L_{eq} supone implícitamente el uso de la ponderación A, a menos que se indique expresamente lo contrario.

El nivel L_{eq} se utiliza como criterio de valoración del ruido ocupacional, de acuerdo con la norma ISO 1999.

1.12 Criterios de evaluación del ruido de fondo en un recinto. Curvas NC

La evaluación objetiva del grado de molestia que un determinado ruido ambiental provoca en un oyente se realiza por comparación de los niveles de ruido existentes en un recinto, en cada banda de octava comprendida entre 63 Hz y 8 kHz, con un conjunto de curvas de referencia denominadas NC (“Noise Criteria”).

Las curvas NC son, además, utilizadas de forma generalizada para establecer los niveles de ruido máximos recomendables para diferentes tipos de recintos en función de su aplicación (oficinas, salas de conferencias, teatros, salas de conciertos, etc.).

Se dice que un recinto cumple una determinada especificación NC (por ejemplo: NC-20) cuando los niveles de ruido de fondo, medidos en cada una de dichas bandas de octava, están por debajo de la curva NC correspondiente (figura 1.18).

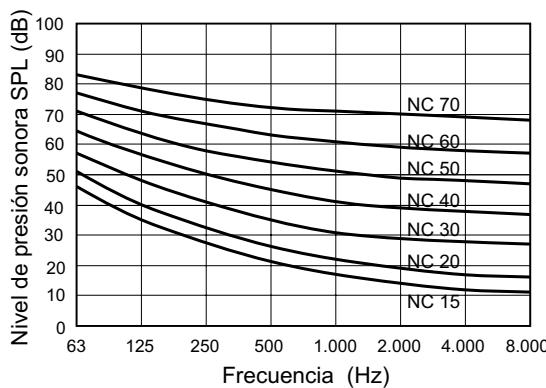


Fig. 1.18 Curvas NC (“Noise Criteria”)

Según se puede observar, las curvas NC siguen de forma aproximada la evolución de la sensibilidad del oído en función de la frecuencia. Ello significa que, para una determinada curva NC, los niveles SPL máximos permitidos a bajas frecuencias (sonidos graves) son siempre más elevados que los correspondientes a frecuencias altas (sonidos agudos), ya que el oído es menos sensible a medida que la frecuencia considerada es menor.

Lógicamente, para verificar el cumplimiento de una determinada especificación NC, es necesario analizar el ruido de fondo presente en el recinto por bandas de octava.

Ahora bien, el nivel de ruido de fondo en un recinto se puede representar, alternativamente, por el nivel global de presión sonora L_A o L_{eq} (medidos en dBA). Se puede comprobar que, a partir de la curva NC-35, dicho nivel está aproximadamente 10 dB por encima del correspondiente valor NC. Por ejemplo, si el nivel de ruido de fondo existente en un recinto es de 50 dBA, ello significa que dicho recinto cumple la especificación NC-40.

En consecuencia, la medida del nivel global L_A o L_{eq} constituye una forma indirecta y aproximada de determinar la curva NC de una sala cuando no se dispone de un sonómetro con filtros para el análisis frecuencial.

En la tabla 1.3 se muestran las curvas NC recomendadas para diferentes tipos de recintos, junto con su equivalencia en dBA.

TIPOS DE RECINTOS	CURVA NC RECOMENDADA	EQUIVALENCIA EN dBA
Estudios de grabación	15	28
Salas de conciertos y teatros	15-25	28-38
Hoteles (habitaciones individuales)	20-30	33-42
Salas de conferencias / Aulas	20-30	33-42
Despachos de oficinas / Bibliotecas	30-35	42-46
Hoteles (vestíbulos y pasillos)	35-40	46-50
Restaurantes	35-40	46-50
Salas de ordenadores	35-45	46-55
Cafeterías	40-45	50-55
Polideportivos	40-50	50-60
Talleres (maquinaria ligera)	45-55	55-65
Talleres (maquinaria pesada)	50-65	60-75

Tabla 1.3 Curvas NC recomendadas y niveles de ruido de fondo equivalentes (en dBA)

Finalmente, cabe mencionar que existen otros criterios de evaluación del ruido de fondo, como las curvas PNC (“Preferred Noise Criteria”) y las NR (“Noise Rating”), de funcionamiento operativo análogo a las curvas NC.

1.13 El sistema de fonación humana

Los órganos que forman parte del sistema de fonación humana y que constituyen el denominado tracto vocal son: los pulmones, la laringe, la faringe, la cavidad nasal y la cavidad bucal (figura 1.19).

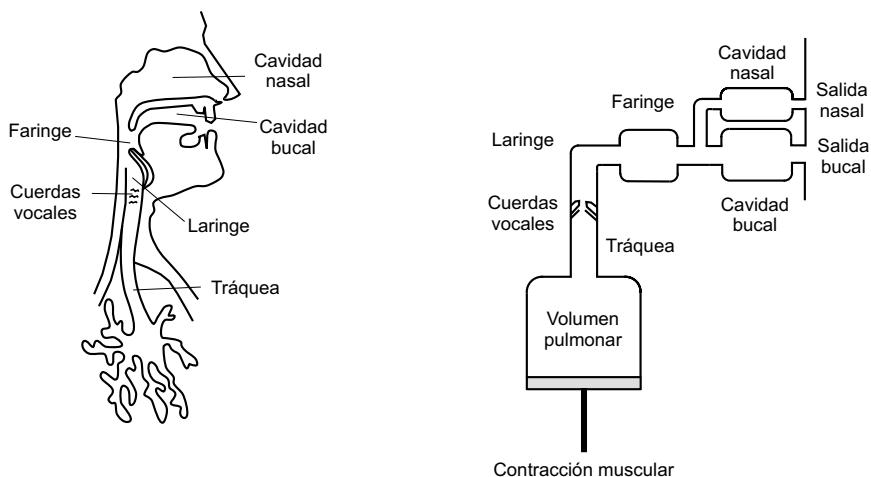


Fig. 1.19 Tracto vocal y representación esquemática del mismo

El flujo de aire impulsado por los pulmones pasa por la laringe. En ella se encuentran situadas las cuerdas vocales. Dicho aire provoca un movimiento rápido de abertura y cierre de las mismas (vibración), produciéndose una modulación del mencionado flujo (figura 1.20).

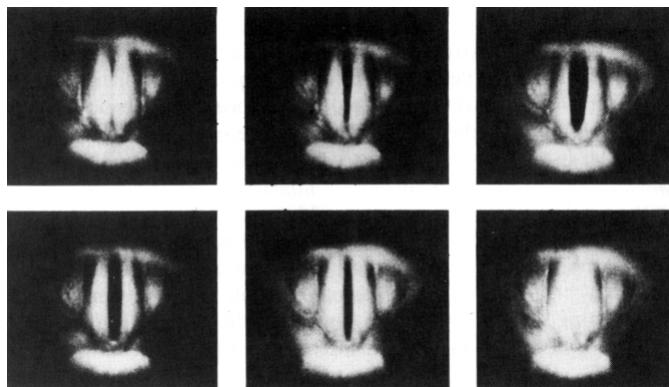


Fig. 1.20 Fases sucesivas de un ciclo de vibración de las cuerdas vocales

La duración de un ciclo completo de abertura y cierre es de aproximadamente 8 ms (milisegundos). Es el denominado pulso glotal (figura 1.21). En dicho intervalo la velocidad volumétrica del aire pasa de un valor máximo (máxima elongación de las cuerdas vocales) a un valor nulo (cuerdas vocales en su posición de equilibrio).

El número de ciclos completos por segundo es, en consecuencia, de 125. De esta forma, el espectro frecuencial de la señal generada presenta una máxima contribución a la frecuencia de 125 Hz (frecuencia fundamental) y un conjunto de armónicos situados a frecuencias múltiplos de la anterior (figura 1.22).

Dicho espectro resulta alterado como consecuencia de la existencia de las tres cavidades que atraviesa el flujo de aire: faringe, cavidad nasal y cavidad bucal, que actúan a modo de cavidades resonantes. El resultado final no es otro que la voz característica de cada persona.

Los sonidos generados de la forma anteriormente expuesta se denominan sonidos sonoros. A este grupo de sonidos pertenecen todas las vocales, así como aquellas consonantes generadas a partir de la vibración de las cuerdas vocales (/b/, /d/, /g/, etc.).

Existen, además, otro tipo de sonidos denominados sonidos sordos. Dichos sonidos se

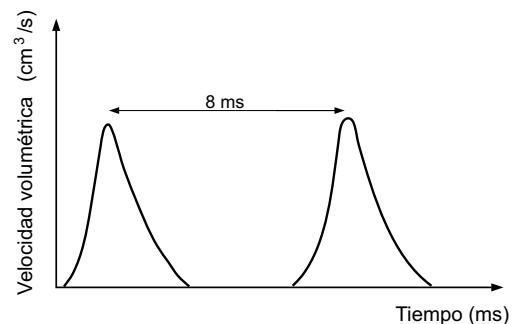


Fig. 1.21 Flujo de aire en un pulso glotal

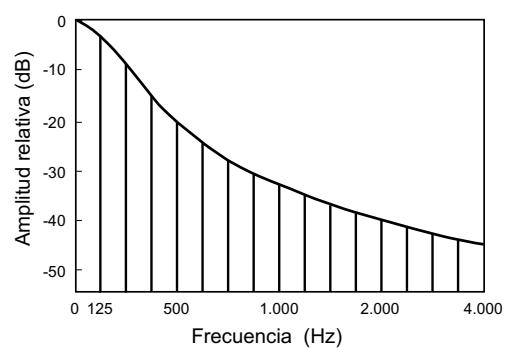


Fig. 1.22 Espectro frecuencial de la señal generada por la vibración de las cuerdas vocales

generan sin vibración alguna de las cuerdas vocales, simplemente mediante una constricción del flujo de aire que atraviesa la cavidad bucal. A este grupo pertenecen la mayoría de consonantes (/s/, /f/, /p/, /t/, /k/, etc.).

1.13.1 Características del mensaje oral

Cuando una persona emite un mensaje, emplea un tiempo mayor en la emisión de las vocales que en la de las consonantes. Es por ello que las vocales constituyen el llamado régimen permanente del habla, mientras que las consonantes se asocian al régimen transitorio.

La duración en promedio de una vocal es del orden de 90 ms, reduciéndose a 20 ms en el caso de una consonante.

El hecho de que la duración de las vocales sea más elevada hace que el nivel de presión sonora asociado a las mismas sea, en promedio, del orden de 12 dB mayor que el correspondiente a las consonantes. Por otra parte, su contenido frecuencial es más rico en bajas frecuencias, mientras que las consonantes presentan una mayor contribución de altas frecuencias.

Por otro lado, el grado de inteligibilidad de la palabra está estrechamente relacionado con la correcta percepción de las altas frecuencias. En consecuencia, son las consonantes las que determinan la comprensión del mensaje oral. En cambio, la información contenida en las vocales es redundante. En la tabla 1.4 se resumen las características mencionadas.

	DURACIÓN (PROMEDIO)	CONTENIDO FRECUENCIAL DOMINANTE	NIVEL (PROMEDIO)	CONTRIBUCIÓN A LA INTELIGIBILIDAD DE LA PALABRA
VOCALES	≈ 90 ms	bajas frecuencias	nivel vocales ≈ nivel consonantes + 12 dB	baja
CONSONANTES	≈ 20 ms	altas frecuencias		alta

Tabla 1.4 Características más relevantes del mensaje oral

En la figura 1.23 se muestra la contribución de cada banda de frecuencias de octava al nivel de la voz y a la inteligibilidad de la palabra.

Según se puede observar, la máxima contribución al nivel de la voz se sitúa en la zona de frecuencias medias, destacando la banda de 500 Hz con un 46%. En cambio, la máxima contribución a la inteligibilidad de la palabra está situada a frecuencias más elevadas (57% sumando la contribución de las bandas de 2 y 4 kHz).

1.13.2 Directividad de la voz humana

En general, cualquier fuente sonora radia más potencia en unas direcciones que en otras y, por tanto, presenta una cierta directividad. Dicha directividad depende de la frecuencia y aumenta con la misma.

La manera de expresar la directividad de una fuente sonora en un punto cualquiera del espacio es mediante el denominado factor de directividad Q. El factor Q depende de la relación entre el nivel de presión sonora producido por dicha fuente en la dirección considerada y el nivel que se obtendría si la fuente no fuese directiva. Cuanto mayor sea el nivel de presión sonora en una dirección determinada, mayor será el valor de Q en dicha dirección.

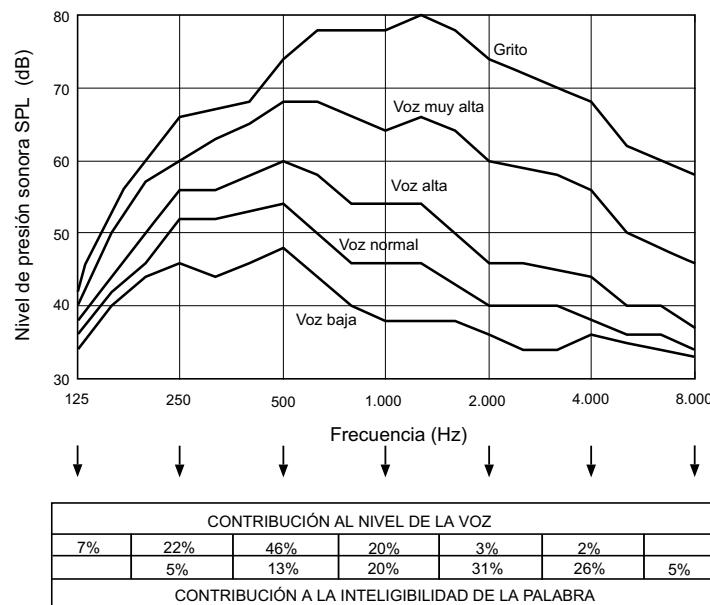


Fig. 1.23 Contribución frecuencial al nivel de la voz y a la inteligibilidad de la palabra

46

La voz humana presenta unas características de directividad que vienen determinadas por el sistema de fonación y la forma de la cabeza, siendo la dirección frontal la de mayor directividad. Si bien la directividad aumenta con la frecuencia (figura 1.24), a efectos prácticos, se considera que el factor de directividad de la voz humana en la dirección frontal es $Q=2$.

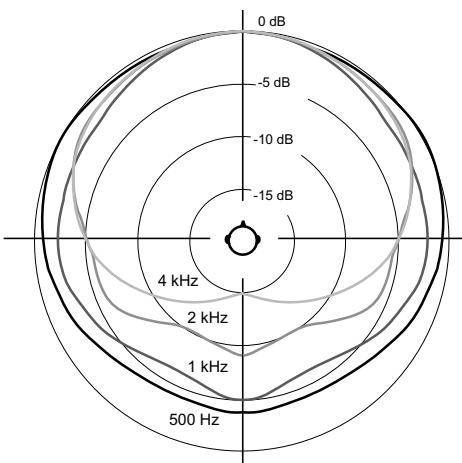


Fig. 1.24 Directividad de la voz humana en las bandas de octava comprendidas entre 500 Hz y 4 kHz (según Moreno y Pfretzscher)

A título de ejemplo de todo lo expuesto anteriormente, en la figura 1.25 se muestra la evolución de una frase filtrada en las bandas de 500 Hz y 4 kHz, suponiendo que la escucha se realiza delante y detrás del locutor.

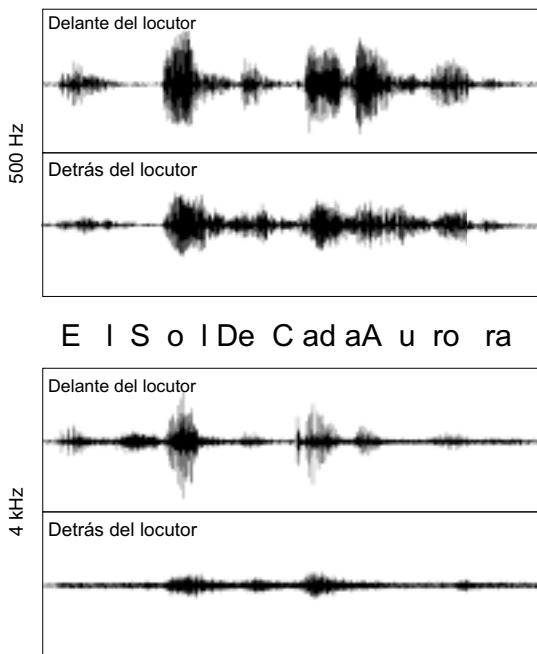


Fig. 1.25 Evolución del nivel de señal correspondiente a una frase filtrada en las bandas de frecuencias centradas en 500 Hz y 4 kHz

De su observación se desprende lo siguiente:

- El nivel de presión sonora es más alto en la banda de 500 Hz que en la de 4 kHz.
- El nivel sonoro asociado a las vocales es más elevado que el correspondiente a las consonantes.
- La directividad de la voz humana provoca una percepción menor detrás del locutor, a la vez que la diferencia delante-detrás es efectivamente más notable en la banda de 4 kHz, por ser la voz más directiva a medida que la frecuencia considerada es mayor.

1.14 Propagación del sonido en el espacio libre

Cuando una fuente sonora situada en un recinto cerrado es activada, genera una onda sonora que se propaga en todas las direcciones. Un oyente ubicado en un punto cualquiera del mismo recibe dos tipos de sonido: el denominado sonido directo, es decir, aquél que le llega directamente desde la fuente sin ningún tipo de interferencia, y el sonido indirecto o reflejado originado como consecuencia de las diferentes reflexiones que sufre la onda sonora al incidir sobre las superficies límite del recinto.

Mientras que las características del sonido reflejado serán objeto de estudio en el apartado 1.15, a continuación se exponen una serie de conceptos asociados al sonido directo, que es el único que llegaría a dicho oyente si estuviese situado en el espacio libre.

En primer lugar, se considera una fuente sonora omnidireccional, es decir, una fuente que radia energía de manera uniforme en todas las direcciones (factor de directividad $Q=1$).

El hecho de que la radiación sea uniforme implica que, a una distancia cualquiera de la fuente, el nivel de presión sonora SPL será siempre el mismo, con independencia de la dirección de propagación considerada. Es la llamada propagación esférica.

A medida que uno se aleja de la fuente, la energía sonora se reparte sobre una esfera cada vez mayor, por lo que el nivel SPL en cada punto va disminuyendo progresivamente. En concreto, la disminución del mismo es de 6 dB cada vez que se dobla la distancia a la fuente. Es la denominada ley cuadrática inversa y significa que el valor de la presión sonora se reduce a la mitad. En la figura 1.26 se muestra la mencionada disminución del nivel SPL con la distancia en el caso de que la fuente sonora sea un avión.

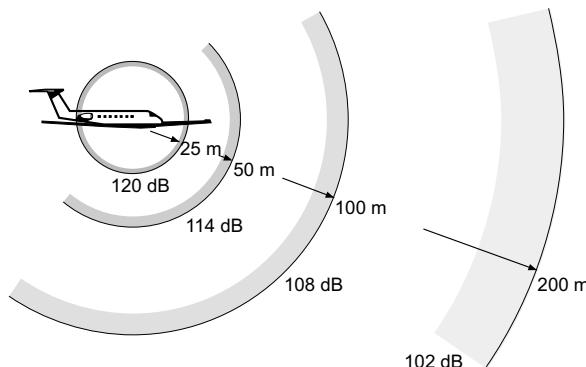


Fig. 1.26 Ejemplo de propagación esférica en el espacio libre

Para que una fuente sonora radie de forma omnidireccional es necesario que sus dimensiones sean pequeñas respecto a la longitud de onda del sonido emitido y que el receptor esté alejado de la misma.

Si bien existe toda una variedad de fuentes sonoras omnidireccionales, también es cierto que el cumplimiento simultáneo de ambos requisitos es difícil, sobre todo si la banda de frecuencias considerada es amplia. Es el caso de la voz humana que, como se ha visto en el apartado anterior, constituye un claro ejemplo de fuente directiva.

En la figura 1.27 se representa el mapa de niveles SPL producidos por un orador situado en el espacio libre, en la banda de 2 kHz, en función de la distancia y del ángulo referido a su eje frontal. Se puede observar la disminución del nivel con la distancia, así como el efecto de directividad de la voz humana, evidenciado por la reducción del nivel a medida que aumenta dicho ángulo.

A través de la realización de una serie de experimentos, se ha podido averiguar que un mensaje oral emitido en una zona silenciosa (en ausencia de fenómenos atmosféricos ruidosos) puede ser oído de forma satisfactoria a una distancia máxima de 42 m en la dirección frontal del orador, de 30 m lateralmente y de 17 m en la dirección posterior. A distancias superiores, el mensaje deja de ser inteligible debido a que queda inmerso en el ruido de fondo existente, independientemente del lugar elegido para llevar a cabo la experiencia.

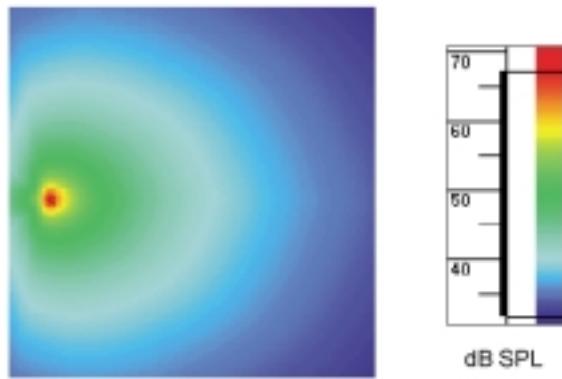


Fig. 1.27 Niveles de presión sonora producidos por un orador en el espacio libre, banda de 2 kHz

1.15 Propagación del sonido en un recinto cerrado

Según se acaba de comentar, la energía radiada por una fuente sonora en un recinto cerrado llega a un oyente ubicado en un punto cualquiera del mismo de dos formas diferentes: una parte de la energía llega de forma directa (sonido directo), es decir, como si fuente y receptor estuviesen en el espacio libre, mientras que la otra parte lo hace de forma indirecta (sonido reflejado), al ir asociada a las sucesivas reflexiones que sufre la onda sonora cuando incide sobre las diferentes superficies del recinto.

En un punto cualquiera del recinto, la energía correspondiente al sonido directo depende exclusivamente de la distancia a la fuente sonora, mientras que la energía asociada a cada reflexión depende del camino recorrido por el rayo sonoro, así como del grado de absorción acústica de los materiales utilizados como revestimientos de las superficies implicadas. Lógicamente, cuanto mayor sea la distancia recorrida y más absorbentes sean los materiales empleados, menor será la energía asociada tanto al sonido directo como a las sucesivas reflexiones.

49

1.15.1 Sonido reflejado

Al analizar la evolución temporal del sonido reflejado en un punto cualquiera del recinto objeto de estudio, se observan básicamente dos zonas de características notablemente diferenciadas: una primera zona que engloba todas aquellas reflexiones que llegan inmediatamente después del sonido directo, y que reciben el nombre de primeras reflexiones o reflexiones tempranas (“early reflections”), y una segunda formada por reflexiones tardías que constituyen la denominada cola reverberante.

Si bien la llegada de reflexiones al punto en cuestión se produce de forma continua, y por tanto sin cambios bruscos, también es cierto que las primeras reflexiones llegan de forma más discretizada que las tardías, debido a que se trata de reflexiones de orden bajo (habitualmente, orden ≤ 3). Se dice que una reflexión es de orden “n” cuando el rayo sonoro asociado ha incidido “n” veces sobre las diferentes superficies del recinto antes de llegar al receptor.

Desde un punto de vista práctico, se suele establecer un límite temporal para la zona de primeras reflexiones de aproximadamente 100 ms desde la llegada del sonido directo, aunque dicho valor varía en cada caso concreto en función de la forma y del volumen del recinto.

La representación gráfica temporal de la llegada de las diversas reflexiones, acompañadas de su nivel energético correspondiente, se denomina ecograma o reflectograma. En la figura 1.28 se representa de forma esquemática la llegada de los diferentes rayos sonoros a un receptor junto con el ecograma asociado, con indicación del sonido directo, las primeras reflexiones y la zona de reflexiones tardías (cola reverberante).

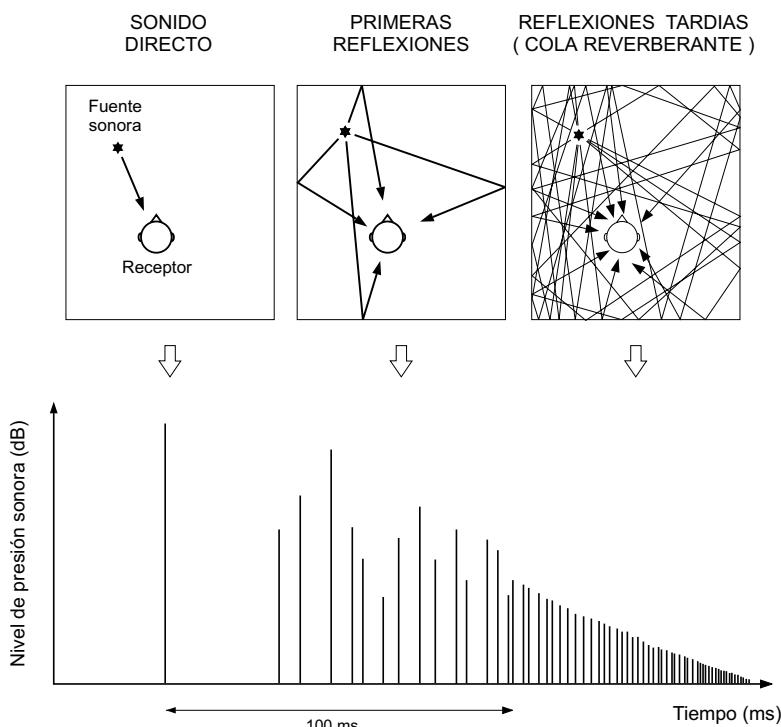


Fig. 1.28 Ecograma asociado a un receptor con indicación del sonido directo, las primeras reflexiones y la cola reverberante

En un recinto real, la manera más elemental de obtener dicha representación gráfica es emitiendo un sonido intenso y breve como, por ejemplo, un disparo. Sin embargo, en la actualidad existen sofisticados equipos de medida basados en técnicas TDS (“Time Delay Spectrometry”) o MLS (“Maximum Length Sequence”) que permiten obtener en cada punto de interés la curva de decaimiento energético, denominada curva energía-tiempo ETC (“Energy-Time Curve”), de forma rápida, precisa y automatizada. A partir de la obtención de dicha curva en distintos puntos del recinto considerado es posible extraer una gran cantidad de información sobre las características acústicas del mismo.

En la figura 1.29 se muestra una curva ETC medida en un punto de un recinto. En absisas se indica el tiempo, expresado en ms (milisegundos), mientras que en ordenadas se indica el nivel, expresado en dB.

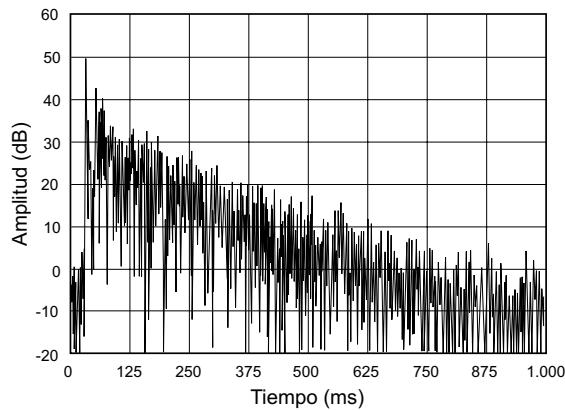


Fig. 1.29 Curva energía-tiempo ETC medida en un punto de un recinto

1.15.2 Estudio de las primeras reflexiones. Acústica geométrica

En general, las primeras reflexiones presentan un nivel energético mayor que las correspondientes a la cola reverberante, ya que son de orden más bajo (según se ha comentado en el apartado anterior, se suelen considerar primeras reflexiones hasta un orden 3).

Además, por el hecho de depender directamente de las formas geométricas de la sala, son específicas de cada punto y, por tanto, determinan las características acústicas propias del mismo, juntamente con el sonido directo (figura 1.30).

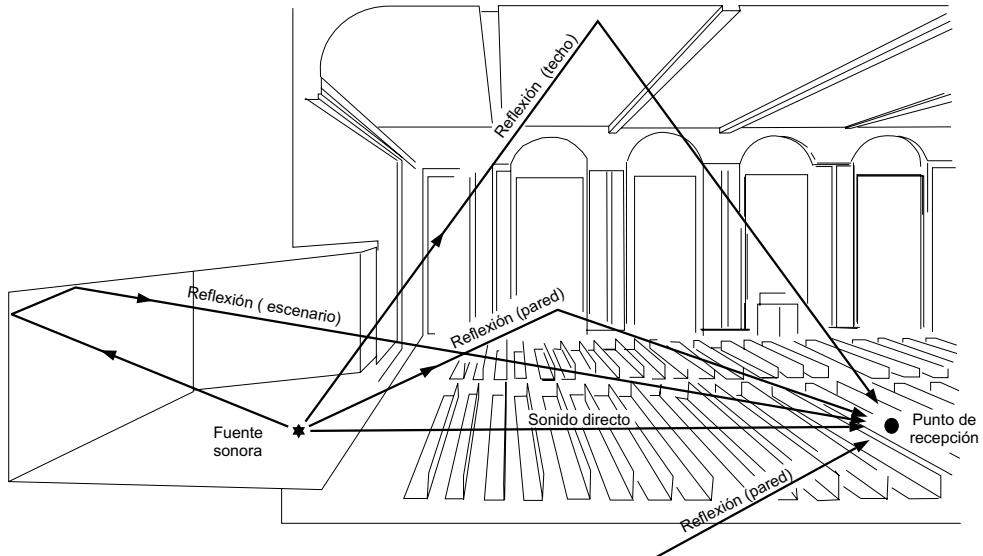


Fig. 1.30 Ejemplo de llegada del sonido directo y de las primeras reflexiones a un receptor

La hipótesis elemental de partida para calcular el ecograma asociado a un punto cualquiera consiste en tratar los rayos sonoros como si se tratase de rayos de luz, es decir, considerando que las reflexiones de los mismos sobre las distintas superficies son totalmente especulares y que, por tanto, verifican la ley de la reflexión. En la figura 1.31 se representa gráficamente dicha ley.

El análisis acústico basado en la hipótesis de reflexiones especulares constituye la base de la denominada acústica geométrica.

Evidentemente, dicho análisis no es más que una aproximación a la realidad, ya que sólo en determinadas circunstancias la hipótesis de reflexión specular es totalmente veraz.

Para que en la práctica se produzca una reflexión marcadamente specular es necesario que se cumplan los siguientes requisitos, por lo que a la superficie de reflexión se refiere:

- Dimensiones grandes en comparación con la longitud de onda del sonido en consideración
- Superficie lisa y muy reflectante (poco absorbente)

52

En el caso de que las dimensiones sean menores o similares a la longitud de onda del sonido, la onda sonora rodea la superficie y sigue propagándose como si el obstáculo que representa la misma no existiese. Dicho fenómeno se conoce con el nombre de difracción (apartado 2.3.1).

Por otra parte, si la superficie presenta irregularidades de dimensiones comparables con la longitud de onda, se produce una reflexión de la onda incidente en múltiples direcciones. Dicho fenómeno se conoce con el nombre de difusión del sonido (apartado 2.4).

En este punto conviene destacar el hecho de que existen programas informáticos avanzados de simulación acústica que permiten el análisis teniendo en cuenta tanto el fenómeno de la difracción como el de la difusión del sonido. Obviamente, los resultados obtenidos con dichos programas se aproximan más a los obtenidos mediante mediciones reales efectuadas “in situ” que en el caso de utilizar programas de simulación más simples.

Por otro lado, como se ha comentado anteriormente, la cola reverberante está formada por las reflexiones tardías (por regla general, se consideran las reflexiones de orden superior a 3). Debido a que la densidad temporal de reflexiones en un punto cualquiera de un recinto cerrado aumenta de forma cuadrática con el tiempo, existe una gran concentración de dichas reflexiones en cualquier punto de recepción y, además, sus características son prácticamente iguales con independencia del punto considerado. Es por ello que el estudio de la cola reverberante se efectúa siempre mediante criterios basados en la denominada acústica estadística, en lugar de la acústica geométrica, según se verá en el apartado 1.15.7.

A título de ejemplo, en un auditorio de tamaño medio un oyente recibe alrededor de 8.000 reflexiones en el primer segundo después de la llegada del sonido directo. De todas formas, debido a que el oído humano es incapaz de discriminar la llegada discreta de todas y cada

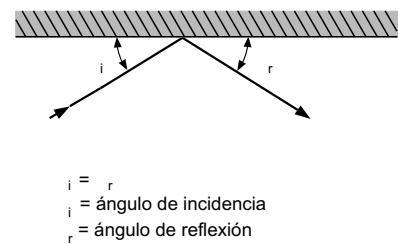


Fig. 1.31 Reflexión specular del sonido sobre una superficie

una de las reflexiones, lo que generalmente se percibe es un sonido continuo. Sólo en determinados casos es posible percibir individualmente una o varias reflexiones. Para ello es necesario que su nivel y retardo respecto al sonido directo sean significativos, como se verá a continuación.

1.15.3 Percepción subjetiva de primeras reflexiones. Ecos

Todas aquellas reflexiones que llegan a un oyente dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo son integradas por el oído humano y, en consecuencia, su percepción no es diferenciada respecto al sonido directo.

Cuando el sonido emitido es un mensaje oral, tales reflexiones contribuyen a mejorar la inteligibilidad o comprensión del mensaje y, al mismo tiempo, producen un aumento de sonoridad (o sensación de amplitud del sonido).

Por el contrario, la aparición en un punto de escucha de una reflexión de nivel elevado con un retardo superior a los 50 ms es totalmente contraproducente para la obtención de una buena inteligibilidad de la palabra, ya que es percibida como una repetición del sonido directo (suceso discreto). En tal caso, dicha reflexión se denomina eco. El retardo de 50 ms equivale a una diferencia de caminos entre el sonido directo y la reflexión de, aproximadamente, 17 m.

En la figura 1.32 se representa gráficamente dicho efecto.

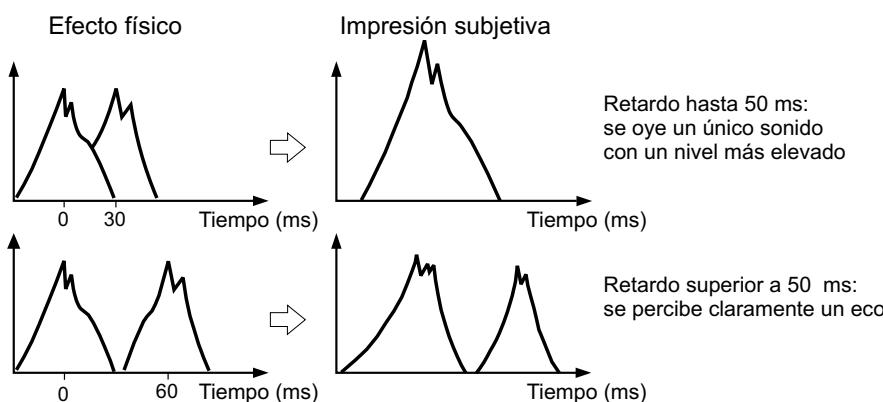


Fig. 1.32 Superposición de sonidos con diferentes retardos e impresión subjetiva asociada

De forma más precisa, en la figura 1.33 se muestran las cuatro zonas características por lo que a relación entre sonido retardado e inteligibilidad de la palabra se refiere. En el eje de abscisas se indica el retardo temporal entre la reflexión (sonido retardado) y el sonido directo, mientras que en el eje de ordenadas aparece la diferencia de niveles entre ambos sonidos. La curva de separación entre las cuatro zonas es sólo aproximada.

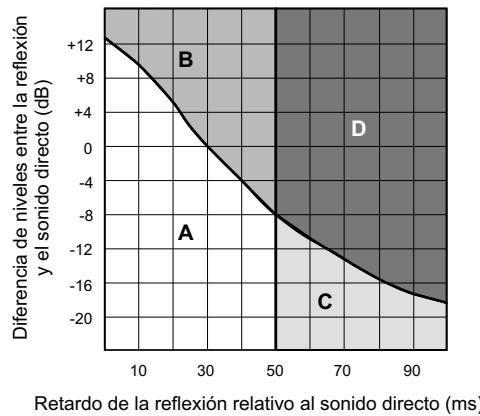


Fig. 1.33 Relación entre sonido retardado e inteligibilidad de la palabra (zonas características)

a) Zona A

La reflexión llega antes de los 50 ms: el oído integra la reflexión y se produce un aumento de inteligibilidad y de sonoridad.

En la figura 1.34 se representa una curva de decaimiento energético ETC donde se observa la existencia de una reflexión perteneciente a dicha zona A.

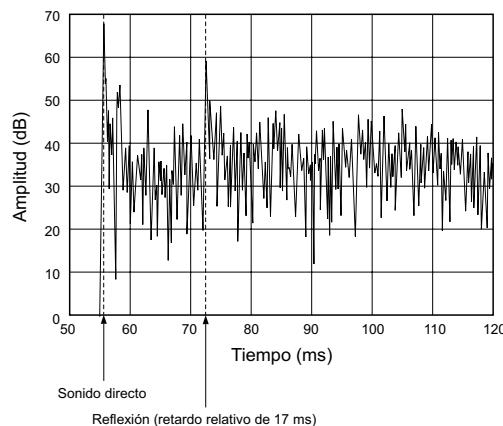


Fig. 1.34 Curva energía-tiempo ETC mostrando la llegada del sonido directo y de una reflexión significativa beneficiosa para la inteligibilidad

b) Zona B

La reflexión llega antes de los 50 ms, si bien con un nivel relativo más elevado: el oído integra la reflexión, pero se produce un desplazamiento de la localización de la fuente sonora, generadora del sonido directo, hacia la superficie generadora de la reflexión (“image shift”).

En la figura 1.35 se representa una curva de decaimiento energético ETC donde se aprecia la existencia de una reflexión perteneciente a la mencionada zona B.

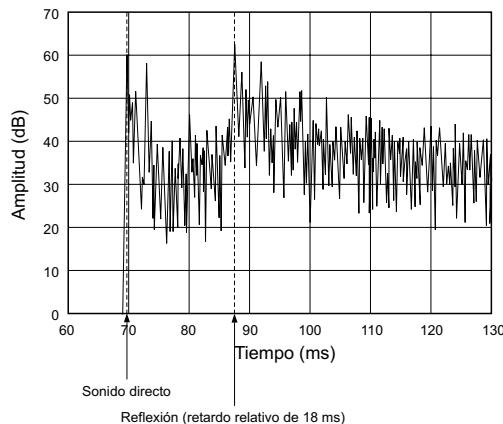


Fig. 1.35 Curva energía-tiempo ETC mostrando la llegada del sonido directo y de una reflexión significativa causante de una falsa localización de la fuente sonora

c) Zona C

La reflexión llega después de los 50 ms: la reflexión no es perjudicial para la inteligibilidad debido a que su nivel relativo es suficientemente bajo.

d) Zona D

La reflexión llega después de los 50 ms, si bien con un nivel relativo más elevado: la reflexión es percibida como un eco y se produce una pérdida de inteligibilidad.

En la figura 1.36 se representa una curva de decaimiento energético ETC donde aparece una reflexión perteneciente a dicha zona D.

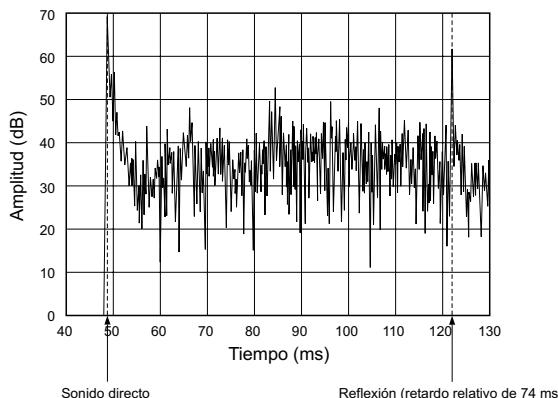


Fig. 1.36 Curva energía-tiempo ETC mostrando la llegada del sonido directo y de una reflexión significativa causante de eco

1.15.4 Eco flotante

El eco flotante (“flutter echo”) consiste en una repetición múltiple, en un breve intervalo de tiempo, de un sonido generado por una fuente sonora, y aparece cuando ésta se sitúa entre dos superficies paralelas, lisas y muy reflectantes (figuras 1.37 y 1.38).

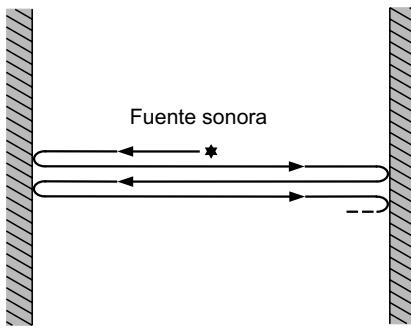


Fig. 1.37 Eco flotante aparecido al colocar la fuente sonora entre dos paredes paralelas, lisas y muy reflectantes

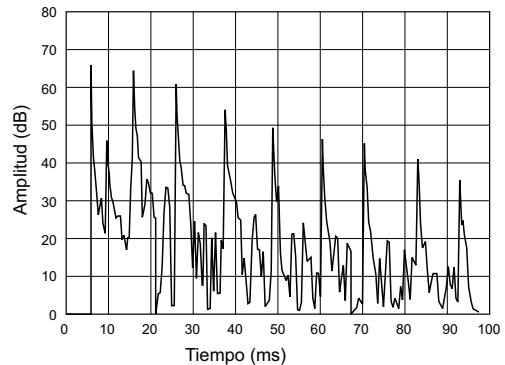


Fig. 1.38 Curva energía-tiempo ETC ilustrativa de la existencia de eco flotante

1.15.5 Modos propios de una sala. Acústica ondulatoria

La combinación de ondas incidentes y reflejadas en una sala da lugar a interferencias constructivas y destructivas o, lo que es lo mismo, a la aparición de las denominadas ondas estacionarias o modos propios de la sala. Cada modo propio va asociado a una frecuencia, igualmente denominada propia, y está caracterizado por un nivel de presión sonora SPL que varía en función del punto considerado (figura 1.39).

El estudio analítico de los modos propios se realiza mediante la denominada acústica ondulatoria que, conjuntamente con la acústica geométrica y la estadística anteriormente comentadas, constituyen las tres teorías clásicas que hacen posible conocer con rigor el comportamiento del sonido en un recinto cualquiera.

El número de modos propios es ilimitado, si bien su distribución a lo largo del eje frecuencial es discreta, aumentando su densidad con la frecuencia. La presencia de todos ellos provoca en cada punto una concentración de energía alrededor de las diversas frecuencias propias, lo cual confiere un sonido característico a cada sala. Dicho sonido recibe el nombre de “coloración” y normalmente se pone de manifiesto en espacios

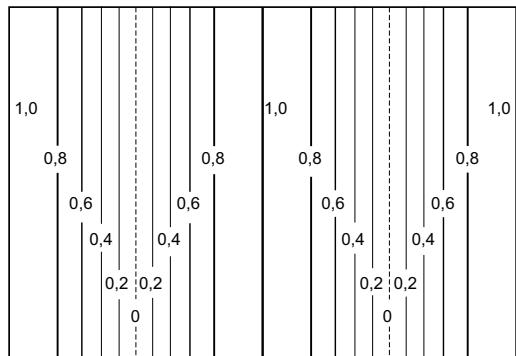


Fig. 1.39 Distribución de niveles SPL normalizados asociados a un modo propio de una sala

de dimensiones relativamente reducidas, como por ejemplo los estudios de grabación (figura 1.40).

Los valores de las frecuencias propias asociadas a los diferentes modos propios dependen de la geometría y de las dimensiones del recinto y, en general, su determinación resulta muy compleja. Únicamente cuando se trata de recintos de forma paralelepípedica con superficies totalmente reflectantes es posible calcularlos de una forma muy sencilla, mediante la denominada fórmula de Rayleigh:

$$f_{k,m,n} = 172,5 \sqrt{\left(\frac{k}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2}$$

donde:

L_x , L_y y L_z representan las dimensiones de la sala (en metros)
k, m, n pueden tomar cualquier valor entero (0, 1, 2, 3, ...).

Cada combinación de valores k, m, n da lugar a una frecuencia y modo propio asociado, que recibe el nombre de modo propio k, m, n. Por ejemplo, la combinación:

$$k = 2, \quad m = 1, \quad n = 1$$

da lugar al modo propio 2, 1, 1.

Partiendo de que la existencia de modos propios es inevitable, conviene elegir una relación entre las dimensiones de la sala tal que la distribución de los mismos en el eje frecuencial sea lo más uniforme posible. De esta manera se consigue evitar concentraciones de energía en bandas estrechas de frecuencias o, lo que es lo mismo, coloraciones intensas del sonido.

A título de ejemplo, en la figura 1.41 se representa la distribución de los modos propios más significativos de dos salas: la primera, con una relación óptima entre sus dimensiones (6,25 x 3,75 x 2,5 m), y la segunda, de forma cúbica (4 x 4 x 4 m).

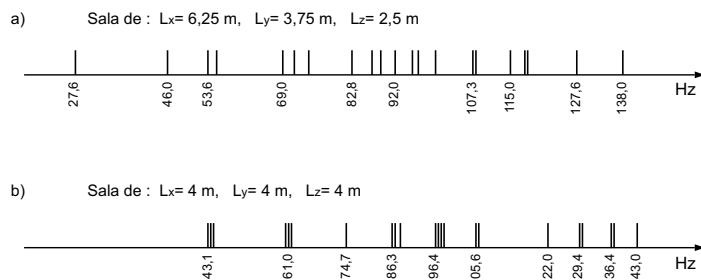


Fig. 1.41 Distribución de las frecuencias propias en el eje frecuencial para:
a) una sala rectangular de proporciones óptimas; b) una sala cúbica

Se observa claramente que, en el primer caso, la distribución es uniforme, mientras que en el segundo existe una concentración de modos propios que provocará, sin lugar a dudas, la aparición de coloraciones.

En la figura 1.42 se representa una zona sombreada indicativa del conjunto de relaciones recomendadas entre la longitud y la anchura de una sala rectangular (suponiendo una altura normalizada de valor 1), con objeto de obtener una distribución lo más uniforme posible de sus frecuencias propias.

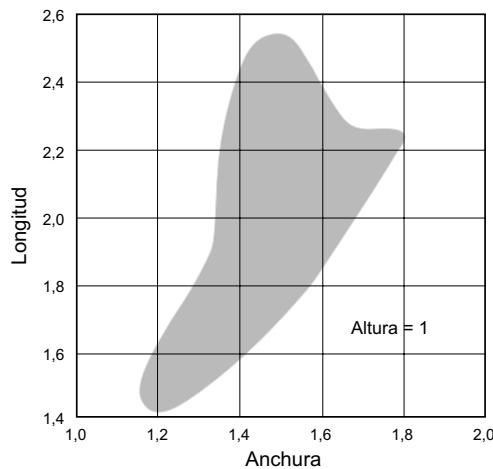


Fig. 1.42 Relaciones recomendadas entre las dimensiones de una sala rectangular para obtener una distribución uniforme de sus frecuencias propias

Por otra parte, y como se ha mencionado anteriormente, la densidad de modos propios aumenta con la frecuencia. Ello significa que, a partir de una cierta frecuencia, el concepto de coloración del sonido deja de tener sentido, ya que una gran densidad de modos propios es equivalente a la ausencia de éstos, por el hecho de que dejan de existir concentraciones discretas de energía.

La fórmula empírica que permite calcular, para cada sala, la frecuencia límite superior a partir de la cual los modos propios tienen una influencia prácticamente nula, es la siguiente:

$$f_{\max} = 1849 \sqrt{\frac{RT_{\text{mid}}}{V}}$$

donde:

RT_{mid} es el valor del tiempo de reverberación obtenido como promedio de los valores correspondientes a las bandas de octava centradas en 500 Hz y 1 kHz, expresado en segundos (apartado 1.15.8)

V es el volumen de la sala, expresado en m^3

De la anterior expresión se desprende que el efecto de los modos propios tiene una mayor incidencia cuanto más pequeña es la sala en consideración, como es el caso de los locutorios y las salas de control pertenecientes a estudios de grabación.

La manera práctica de minimizar dicho efecto es mediante la utilización de sistemas electrónicos de ecualización, o bien a través de la instalación de elementos resonadores (apartado 2.2.5). En general, las frecuencias propias cuyo efecto se pretende atenuar suelen estar situadas por debajo de los 200 Hz.

En el caso de recintos grandes, como teatros y salas de conciertos, la coloración del sonido a causa de los modos propios es prácticamente nula y, por tanto, no se tiene en cuenta en la fase de diseño.

1.15.6 Balance energético sonoro

En el apartado 1.15 se ha descrito la propagación de una onda sonora en un recinto cerrado partiendo de la hipótesis de que la fuente sonora emite un sonido intenso y breve.

A continuación se analiza dicho comportamiento, si bien ahora suponiendo que la fuente radia energía de forma continua. En tal caso resulta evidente que, una vez transcurrido un periodo de tiempo transitorio, se alcanza un estado de equilibrio caracterizado por el hecho de que la absorción acústica producida por las superficies del recinto se iguala con el aporte energético de la fuente. Existe, en consecuencia, un balance energético sonoro.

El punto de partida consiste en poner en marcha una fuente sonora omnidireccional y en dejarla emitir de forma continua. A partir del instante inicial, la onda sonora generada se propaga en todas las direcciones y cada rayo sonoro recorre un camino distinto, reflejándose una y otra vez sobre las diferentes superficies de la sala. En cada reflexión, parte de la energía es absorbida y parte es devuelta al recinto en mayor o menor cuantía, en función del grado de absorción acústica del revestimiento correspondiente a la superficie implicada.

El aporte constante de energía por parte de la fuente sonora hace que la energía total recibida en cualquier punto de la sala, obtenida como suma de la directa y la indirecta o reflejada, vaya aumentando progresivamente hasta alcanzar el mencionado punto de equilibrio.

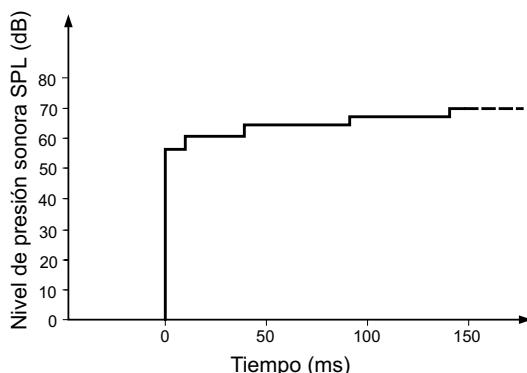


Fig. 1.43 Aumento del nivel de presión sonora SPL en un punto receptor por la acumulación del sonido directo y de las sucesivas reflexiones

En la figura 1.43 se observa el incremento del nivel de presión sonora en un punto receptor genérico hasta llegar a un valor máximo correspondiente al régimen permanente. Cabe señalar que los incrementos discretos de nivel producidos en una serie de instantes concretos pretenden únicamente destacar la contribución tanto del sonido directo como de cada una de las reflexiones sucesivas que llegan al receptor. En la práctica, dichas discontinuidades no suelen observarse de manera tan evidente, ya que el número de reflexiones y la proximidad entre las mismas es mucho mayor.

El proceso anteriormente descrito es totalmente reversible, de forma que cuando la fuente sonora se detiene bruscamente, el nivel de presión sonora empieza a disminuir progresivamente hasta desaparecer (estrictamente hablando, dicho nivel disminuye hasta confundirse con el nivel de ruido de fondo de la sala).

Siguiendo con el ejemplo simplificado anterior, en la figura 1.44 se observan los decrementos discretos de nivel, asociados en primer lugar a la desaparición del sonido directo y, posteriormente, a la desaparición de las sucesivas reflexiones.

La rapidez en la atenuación del sonido depende del grado de absorción de las superficies del recinto: a mayor absorción, atenuación más rápida. El grado de permanencia del sonido una vez que la fuente sonora se ha desconectado se denomina reverberación. Por lo tanto, la reverberación de una sala es mayor cuanto más tarda el sonido en atenuarse, es decir, cuanto menos absorbente es el recinto.

La evolución teórica de la presión sonora asociada a las fases descritas anteriormente (conexión de la fuente sonora, alcance del régimen permanente y desconexión de la fuente) se representa en la figura 1.45 tanto en escala lineal como en escala semilogarítmica. Dichas gráficas surgen de la aplicación exclusiva de la acústica estadística y, por consiguiente, son válidas para cualquier punto de la sala objeto de estudio, con independencia de su ubicación dentro de la misma.

Según se observa, el decaimiento en escala lineal sigue una evolución exponencial, lo cual se traduce en una línea recta en escala semilogarítmica. Esto resulta de gran utilidad para la determinación teórica del tiempo de reverberación, definido en el apartado 1.15.8.

En la práctica nunca se obtiene una curva tan regular y, además, a cada punto de medida le corresponde una curva diferente del resto. Esto es especialmente evidente durante, aproximadamente, los primeros 100 ms desde la llegada del sonido directo debido

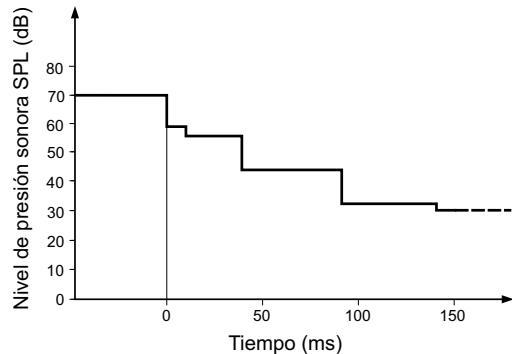


Fig. 1.44 Disminución del nivel de presión sonora SPL en un punto receptor después de que la fuente sonora se haya detenido

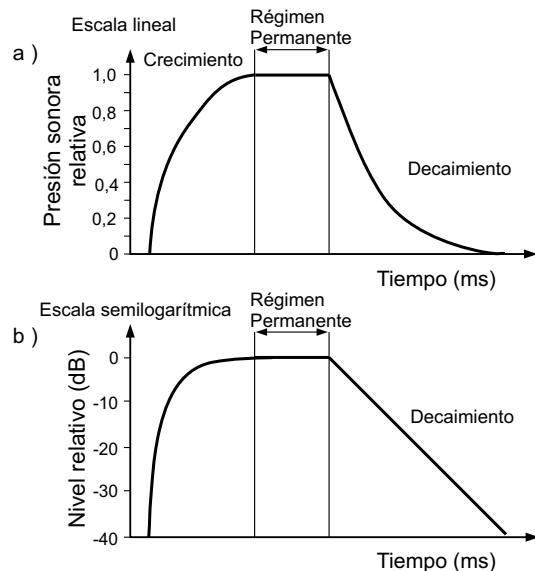


Fig. 1.45 Evolución teórica de la presión sonora en un punto de un recinto al conectar y, posteriormente, desconectar una fuente sonora : a) escala lineal; b) escala semilogarítmica

a la existencia de primeras reflexiones específicas asociadas al punto considerado (como ya se dicho con anterioridad, el estudio de las primeras reflexiones se realiza por medio de la acústica geométrica).

1.15.7 Campo directo y campo reverberante. Nivel total de presión sonora

Siguiendo con la hipótesis de régimen permanente y aplicando exclusivamente la teoría de la acústica estadística, resulta que la energía sonora total presente en cualquier punto de una sala se obtiene como suma de una energía de valor variable, que depende de la ubicación del punto, y otra de valor constante. Se supone que se parte de una fuente sonora de directividad conocida que radia una potencia constante.

La energía de valor variable corresponde al sonido directo, y disminuye a medida que el receptor se aleja de la fuente, mientras que la energía de valor constante va asociada al sonido indirecto o reflejado. El hecho de que dicha energía no dependa del punto en consideración proviene de aplicar la teoría estadística a todo el sonido reflejado y, en consecuencia, de tratar por igual todas las reflexiones, sean primeras o tardías (cola reverberante). Esta hipótesis teórica conduce a resultados evidentemente aproximados, si bien presenta la ventaja de la simplicidad de cálculo de la energía total.

Habitualmente no se trabaja en términos de energía, sino de nivel de presión sonora SPL, lo cual es totalmente equivalente. Ello se debe a que, en la práctica, el nivel SPL es fácilmente medible (ver descripción del sonómetro en el apartado 1.11).

Por lo tanto, según lo que se acaba de exponer, la presión sonora total en un punto cualquiera de un recinto se obtiene a partir de la contribución de las presiones del sonido directo (disminuye con la distancia a la fuente) y del sonido reflejado (se mantiene constante).

La zona donde predomina el sonido directo se denomina zona de campo directo. A dicha zona pertenecen los puntos más próximos a la fuente sonora y en ella el nivel de presión sonora, llamado nivel de campo directo L_D , disminuye 6 dB cada vez que se dobla la distancia a la fuente. Es como si el receptor estuviese situado en el espacio libre.

La zona donde predomina el sonido reflejado recibe el nombre de zona de campo reverberante (es por ello que a dicho sonido también se le denomina sonido reverberante). A ella pertenecen los puntos más alejados de la fuente sonora. En esta zona, el nivel de presión sonora, denominado nivel de campo reverberante L_R , se mantiene constante.

La distancia para la cual $L_D = L_R$ se denomina distancia crítica D_c . Se puede demostrar que:

$$D_c = 0,14 \sqrt{QR}$$

donde:

Q = factor de directividad de la fuente sonora en la dirección considerada

$$R = \text{constante de la sala} = \frac{S_t \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \text{ (en m}^2\text{)}$$

S_t = superficie total de la sala (en m^2)

$\bar{\alpha}$ = coeficiente medio de absorción de la sala (apartado 1.15.8.2)

En la figura 1.46 se muestra la evolución del nivel relativo total de presión sonora en función de la distancia a la fuente, normalizada con respecto a la distancia crítica D_c .

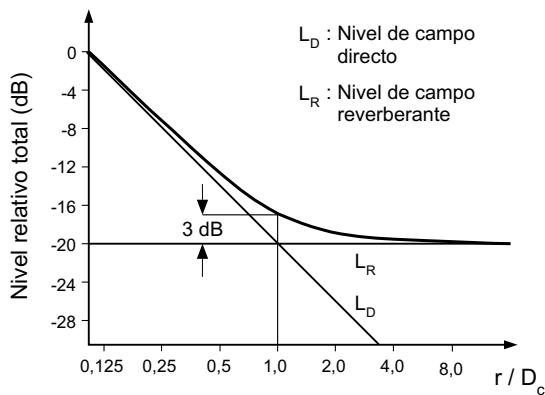


Fig. 1.46 Evolución del nivel relativo total de presión sonora en función de la distancia a la fuente sonora normalizada con respecto a la distancia crítica D_c

Se puede comprobar que, para puntos próximos a la fuente sonora ($\frac{r}{D_c} \ll 1$):

$$L_p \approx L_D$$

mientras que para puntos alejados ($\frac{r}{D_c} \gg 1$):

$$L_p \approx L_R$$

Por otra parte, se puede demostrar que cuanto mayor sea el grado de absorción de un recinto a una determinada frecuencia, mayor será el valor de la constante de la sala R (aumento de la distancia crítica D_c) y menor el nivel de presión sonora de campo reverberante L_R .

A título de ejemplo, en la figura 1.47 se representan tres gráficas de niveles relativos totales de presión sonora correspondientes a una sala “viva” (poco absorbente), a una sala intermedia y a una sala “apagada” (muy absorbente), en función de la distancia a la fuente sonora.

Se puede observar que, efectivamente:

$$L_{R1} > L_{R2} > L_{R3}$$

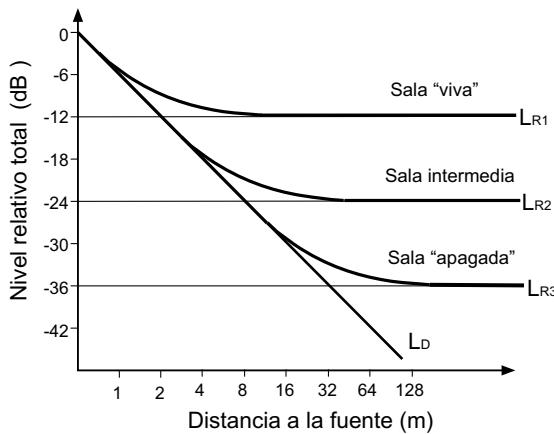


Fig. 1.47 Gráficas de niveles relativos totales de presión sonora correspondientes a una sala “viva”, a una sala intermedia y a una sala “apagada”

1.15.8 Tiempo de reverberación RT

Con el fin de poder cuantificar la reverberación de un recinto, se define el tiempo de reverberación (de forma abreviada RT) a una frecuencia determinada como el tiempo (en segundos) que transcurre desde que el foco emisor se detiene hasta el momento en que el nivel de presión sonora SPL cae 60 dB con respecto a su valor inicial.

Un recinto con un RT grande se denomina “vivo” (nave industrial, iglesia, etc.), mientras que si el RT es pequeño recibe el nombre de recinto “apagado” o “sordo” (locutorio, estudio de grabación, etc.). Ambas denominaciones coinciden con las del apartado anterior, lo cual es lógico habida cuenta de que el nivel de campo reverberante aumenta con el tiempo de reverberación.

Por lo general, el RT varía con la frecuencia, tendiendo a disminuir a medida que ésta aumenta. Ello es debido, en parte, a las características de mayor absorción con la frecuencia de los materiales comúnmente empleados como revestimientos, así como a la absorción del aire, especialmente manifiesta en recintos grandes y a altas frecuencias.

1.15.8.1 Valores recomendados del tiempo de reverberación

Habitualmente, cuando se establece un único valor recomendado de RT para un recinto dado, se suele hacer referencia al obtenido como media aritmética de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1kHz. Se representa por RT_{mid} .

En general, el valor más adecuado de RT_{mid} depende tanto del volumen del recinto como de la actividad a la que se haya previsto destinarlo. Por ejemplo, como se verá en capítulos sucesivos, cuando se trata de salas destinadas a la palabra, es conveniente que los valores de RT sean bajos, con objeto de conseguir una buena inteligibilidad, mientras que en el caso de

salas de conciertos son recomendables unos valores apreciablemente más elevados a fin de que la audición musical resulte óptima.

En la tabla 1.5 se dan los márgenes de valores recomendados de RT_{mid} para diferentes tipos de salas en el supuesto de que estén ocupadas.

TIPO DE SALA	RT_{mid} , SALA OCUPADA (EN S)
Sala de conferencias	0,7 – 1,0
Cine	1,0 – 1,2
Sala polivalente	1,2 – 1,5
Teatro de ópera	1,2 – 1,5
Sala de conciertos (música de cámara)	1,3 – 1,7
Sala de conciertos (música sinfónica)	1,8 – 2,0
Iglesia/catedral (órgano y canto coral)	2,0 – 3,0
Locutorio de radio	0,2 – 0,4

Tabla 1.5 Márgenes de valores recomendados de RT_{mid} en función del tipo de sala (recintos ocupados)

1.15.8.2 Cálculo del tiempo de reverberación

Si bien existe un gran número de fórmulas para el cálculo teórico del RT (ver algunas de ellas en el apéndice 2), la fórmula clásica por excelencia, y aceptada como de referencia a nivel internacional por su sencillez de cálculo, es la denominada fórmula de Sabine. La correspondiente expresión matemática, obtenida aplicando la teoría acústica estadística y despreciando el efecto de la absorción producida por el aire, es la siguiente:

$$RT = 0,161 \frac{V}{A_{tot}} \text{ (en segundos)}$$

donde:

V = volumen del recinto (en m^3)

A_{tot} = absorción total del recinto (definida seguidamente)

El grado de absorción del sonido de un material cualquiera se representa mediante el llamado coeficiente de absorción α . Se define como la relación entre la energía absorbida por dicho material y la energía incidente sobre el mismo:

$$\alpha = \frac{\text{Energía absorbida}}{\text{Energía incidente}}$$

Sus valores están comprendidos entre 0 (correspondiente a un material totalmente reflectante) y 1 (caso de absorción total). El valor de α está directamente relacionado con las propiedades físicas del material y varía con la frecuencia.

En cuanto a la denominada absorción A de un material cualquiera, ésta se obtiene como resultado de multiplicar su coeficiente de absorción α por su superficie S . La unidad de absorción es el sabin (1 sabin corresponde a la absorción de 1m² de ventana abierta).

Finalmente, y debido a que un recinto está constituido por distintas superficies recubiertas de materiales diversos, se define la absorción total A_{tot} como la suma de todas y cada una de las absorciones individuales, es decir:

$$A_{tot} = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n$$

A partir de A_{tot} es posible calcular el coeficiente medio de absorción $\bar{\alpha}$ dividiendo la absorción total A_{tot} por la superficie total del recinto S_t :

$$\bar{\alpha} = \frac{A_{tot}}{S_t}$$

donde:

$$S_t = S_1 + S_2 + \dots + S_n = \text{superficie total del recinto (paredes + techo + suelo)}$$

Con todo lo anterior, el tiempo de reverberación se puede expresar como sigue:

$$RT = \frac{0,161 V}{\bar{\alpha} S_t}$$

Según se observa, el RT calculado a cada frecuencia de interés mediante dicha fórmula no tiene en cuenta la ubicación del receptor, es decir, es único para cada recinto. Ello es consecuencia de que la misma surge exclusivamente de la aplicación de la acústica estadística.

Por otra parte es preciso comentar que, a pesar de la utilización universal de esta fórmula, su validez se circunscribe al caso de recintos con las siguientes características:

- Decaimiento energético exponencial asociado a un campo sonoro perfectamente difuso (la energía se propaga con la misma probabilidad en todas las direcciones)
- Geometría regular de la sala
- Coeficiente medio de absorción $\bar{\alpha}$ inferior a, aproximadamente, 0,4

El RT resulta ser un parámetro fundamental en el diseño acústico de recintos. Ahora bien, en la práctica se utilizan una serie de parámetros complementarios que, por estar fundamentados en la acústica geométrica, dependen de la situación del receptor (ver capítulos 4 y 5). La optimización de todos ellos en la fase de diseño permite garantizar con un elevado grado de fiabilidad la obtención de una acústica adecuada, una vez construido el recinto.

1.15.8.3 Medida del tiempo de reverberación

El RT se calcula a partir de la curva de decaimiento energético, medida en un punto cualquiera de una sala.

Según lo comentado en el apartado 1.15.1, dicha curva se puede obtener como respuesta a la emisión de un sonido intenso y breve, o bien más modernamente, mediante técnicas TDS o MLS, en cuyo caso se denomina ETC.

La obtención del RT a cada frecuencia de interés, a partir de la correspondiente curva ETC, no se lleva a cabo directamente por simple observación del tiempo que transcurre hasta que el nivel disminuye 60 dB. Ello es debido a que dicha curva presenta irregularidades, a pesar de que su decaimiento asintótico es efectivamente en forma de línea recta. El motivo de la aparición de dichas irregularidades es que en ningún recinto real existe un campo sonoro perfectamente difuso. Teóricamente, sería necesario repetir la medida de la curva ETC un número infinito de veces para, posteriormente, obtener una curva promedio exenta ya de irregularidades.

En la práctica, la determinación del RT se realiza aplicando el método de Schroeder. Dicho investigador demostró matemáticamente que la curva promedio anterior se puede obtener de forma totalmente equivalente a base de integrar (sumar) todas las contribuciones energéticas asociadas a una única curva ETC, desde un instante de tiempo infinito (en la práctica, habitualmente entre 1 y 3 segundos) hasta el instante inicial.

A título de ejemplo, en la figura 1.48 se muestra una curva ETC, la curva obtenida a partir de la integración temporal de la ETC y el valor del RT calculado a partir de esta última (margen superior derecho).

En la práctica, nunca es posible observar una caída de 60 dB, por falta de margen dinámico. En consecuencia, es el usuario quien fija los instantes inicial y final, a partir de los cuales el sistema de medida calcula automáticamente el RT.

En el ejemplo anterior, se han fijado unos márgenes tales que la disminución de nivel es de 20 dB, ya que corresponde al tramo más recto de la curva. En este caso, el RT se obtiene multiplicando por 3 el tiempo asociado a dicha disminución.

Finalmente, conviene señalar que la manera práctica de obtener el valor del RT representativo de una sala, a cada de frecuencia de trabajo, consiste en promediar los valores medidos en diferentes puntos de la misma (habitualmente entre 10 y 15 puntos, según su volumen).

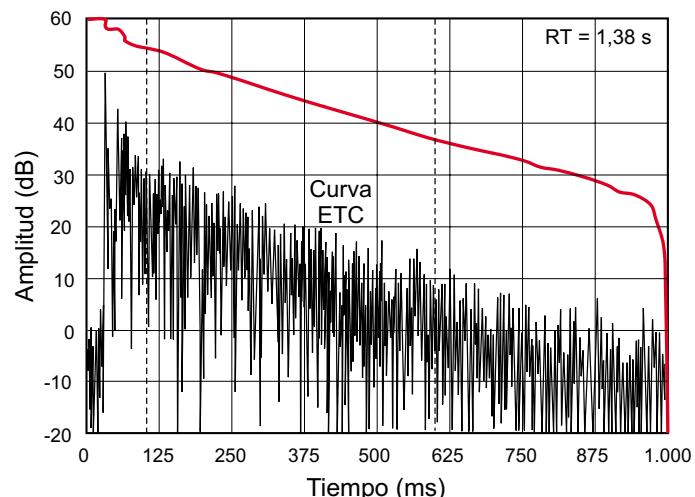


Fig. 1.48 Curva ETC y curva utilizada para el cálculo del RT, obtenida como resultado de la integración de la ETC

1.15.9 Cálculo de la inteligibilidad de la palabra: %ALCons y STI/RASTI

A parte del perjuicio que representa para la inteligibilidad de la palabra la existencia de eco o de eco flotante en una sala (apartados 1.15.3 y 1.15.4), la comprensión de un mensaje oral depende fundamentalmente de la correcta percepción de sus consonantes (apartado 1.13.1).

A principios de la década de los años 70, el investigador holandés V.M.A. Peutz llevó a cabo un exhaustivo trabajo a partir del cual estableció una fórmula para el cálculo de la inteligibilidad.

El trabajo se dividió en dos partes perfectamente diferenciadas: la primera consistió en realizar una serie de pruebas de audiencia en diferentes recintos basadas en la emisión de un conjunto preestablecido de “logatomos” (palabras sin significado formadas por: consonante-vocal-consonante). Cada individuo receptor tomaba nota de lo que escuchaba y, posteriormente, se procesaba toda la información recogida y se establecía una estadística de los resultados obtenidos. Si, por ejemplo, el porcentaje medio de logatomos detectados correctamente en uno de los recintos era de un 85%, entonces se consideraba que la pérdida de información era de un 15%. Como dicha pérdida se asociaba a una percepción incorrecta de las consonantes, Peutz la denominó: % de Pérdida de Articulación de Consonantes, o lo que es lo mismo, %ALCons (“Articulation Loss of Consonants”). En el ejemplo anterior, se tendría un %ALCons de un 15%. Huelga decir que, al tratarse de un parámetro indicativo de una pérdida, cuanto mayor sea, peor será el grado de inteligibilidad existente.

La segunda parte del trabajo consistió en encontrar una ley matemática que, a partir del conocimiento de una serie de parámetros acústicos del recinto en estudio, permitiese hallar el valor de %ALCons en cada punto del mismo, sin necesidad de tener que realizar las laboriosas pruebas de audiencia. Lógicamente, una vez establecida dicha ley, sería posible predecir la inteligibilidad de la palabra en cualquier punto de un recinto todavía por construir.

Haciendo uso de la teoría acústica estadística, Peutz dedujo que el valor de %ALCons en un punto dado se podía determinar, simplemente, a partir del conocimiento del tiempo de reverberación RT y de la diferencia entre los niveles de presión sonora de campo directo L_D y de campo reverberante L_R en dicho punto.

La ley en cuestión, expresada de forma gráfica, se presenta en la figura 1.49. El valor de %ALCons (eje de ordenadas izquierdo) se determina a partir de los valores de RT (eje de ordenadas derecho) y de la diferencia $L_D - L_R$ (eje de abscisas).

Para el cálculo de $L_D - L_R$, la fórmula a emplear es la siguiente:

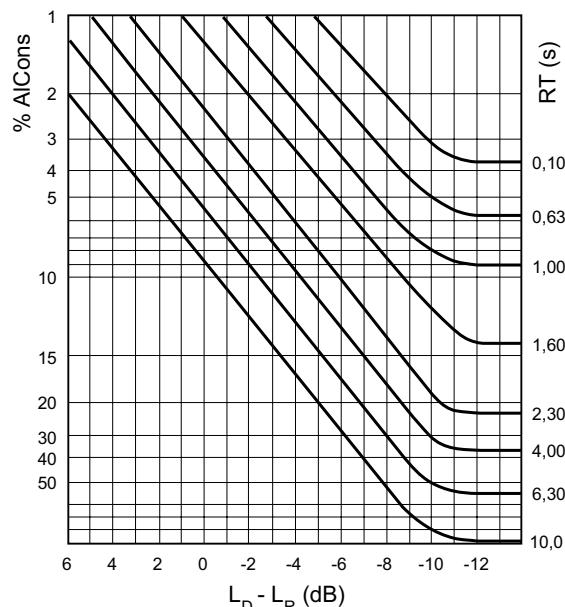


Fig. 1.49 Obtención del %ALCons a partir de RT y de $L_D - L_R$

$$L_D - L_R = 10 \log \left(\frac{QR}{r^2} \right) - 17 \text{ (en dB)}$$

donde:

\log = logaritmo decimal

Q = factor de directividad de la fuente sonora en la dirección considerada ($Q = 2$ en el caso de la voz humana, considerando la dirección frontal del orador)

R = constante de la sala (en m^2)

r = distancia del punto considerado a la fuente sonora (en m)

Como tanto RT como R dependen del coeficiente medio de absorción $\bar{\alpha}$, su conocimiento, junto con el del volumen V y el de la superficie total S_t permiten calcular los valores de RT y de $L_D - L_R$.

A nivel práctico, se suele elegir para el cálculo el valor de $\bar{\alpha}$ correspondiente a la banda de 2 kHz, por ser la de máxima contribución a la inteligibilidad de la palabra.

De la observación de la figura anterior se desprende lo siguiente:

- Cuanto más cerca esté situado el receptor de la fuente sonora ($L_D - L_R$ mayor), menor será el valor de %ALCons, es decir, mayor inteligibilidad.
- Cuanto menor sea el RT, igualmente menor será el %ALCons, es decir, mayor inteligibilidad.
- El valor de %ALCons va aumentando a medida que el receptor se aleja de la fuente, hasta una distancia: $r = 3,16 D_c$. Para distancias $r > 3,16 D_c$, equivalentes a $(L_D - L_R) < -10$ dB, el valor de %ALCons tiende a ser constante. Ello significa que, a partir de dicha distancia, la inteligibilidad de la palabra ya no empeora.

Alternativamente, en lugar de usar las gráficas anteriores, se pueden utilizar las fórmulas del apéndice 2.

Otro factor no mencionado hasta el momento, pero que contribuye sustancialmente a la pérdida de inteligibilidad, es el ruido de fondo presente en la sala. Desde un punto de vista práctico, y sin entrar en aspectos cuantitativos, se considera que su efecto es despreciable cuando el correspondiente nivel de ruido de fondo está, como mínimo, 12 dB por debajo del nivel de la señal.

Finalmente, es preciso indicar que existe otro parámetro alternativo que permite cuantificar el grado de inteligibilidad de la palabra. Dicho parámetro, conceptualmente más complejo, se denomina STI (“Speech Transmission Index”) y su valor oscila entre 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad total). La definición del mismo se halla en el apéndice 2. Asimismo, existe una versión simplificada del STI denominada RASTI (“Rapid Speech Transmission Index”). Habitualmente, el RASTI es el parámetro medido en recintos, debido a su rapidez de cálculo en relación con el STI. Su definición se encuentra igualmente en el apéndice 2.

Se ha podido demostrar que existe una muy buena correlación entre los valores de %ALCons y de STI / RASTI. Dicha correspondencia se muestra en la figura 1.50 y en la tabla 1.6. En esta última aparece también la valoración subjetiva del grado de inteligibilidad.

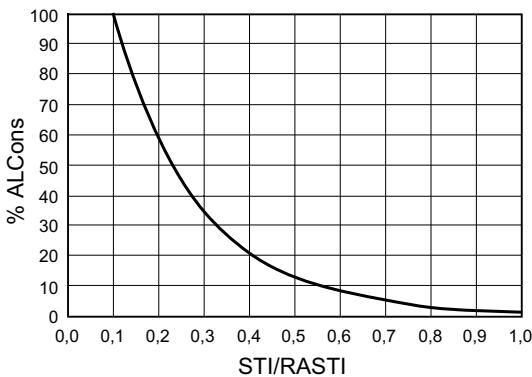


Fig. 1.50 Correspondencia entre STI / RASTI y %ALCons

%ALCONS	STI / RASTI	VALORACIÓN SUBJETIVA
1,4% - 0%	0,88 - 1	Excelente
4,8% - 1,6%	0,66 - 0,86	Buena
11,4% - 5,3%	0,50 - 0,64	Aceptable
24,2% - 12%	0,36 - 0,49	Pobre
46,5% - 27%	0,24 - 0,34	Mala

Tabla 1.6 Relación entre %ALCons, STI / RASTI y la valoración subjetiva del grado de inteligibilidad

1.15.10 Relación entre el tiempo de reverberación y la inteligibilidad de la palabra

Seguidamente se da la explicación de por qué en un recinto muy “vivo” la palabra resulta ininteligible.

Según se ha expuesto en el apartado 1.13.1, al emitir un mensaje oral, la duración de las vocales y su correspondiente nivel de presión sonora es mayor que el de las consonantes. Además, el contenido frecuencial de las vocales es más rico en bajas frecuencias, en tanto que las consonantes presentan un mayor contenido de altas frecuencias.

En una sala con un tiempo de reverberación alto, el decaimiento energético de una vocal emitida en la misma es apreciablemente más lento que su decaimiento propio (aquél que se observaría si la vocal se emitiese en el espacio libre). Tal hecho, junto con la mayor duración y nivel comentados anteriormente, provoca un solapamiento temporal de la vocal con la consonante emitida inmediatamente después, según se observa en la figura 1.51.

La simultaneidad temporal de la vocal y de la consonante con sus correspondientes niveles, así como las características espectrales de ambos sonidos, son las causantes del enmascaramiento parcial o total de la consonante, producido por la vocal (según se ha visto en el apartado 1.10.2, un tono de baja frecuencia y nivel elevado enmascara otro tono de frecuencia más elevada y nivel inferior).

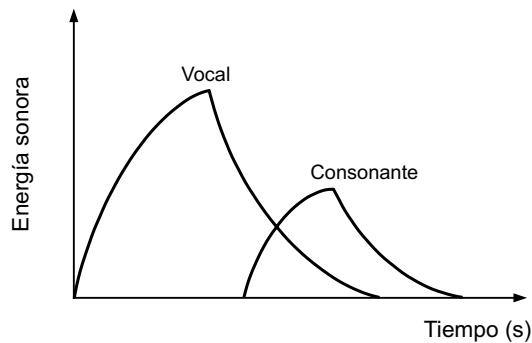


Fig. 1.51 Evolución temporal de la energía sonora correspondiente a la emisión de una vocal seguida de una consonante en un recinto cerrado (según Kurtovic)

Finalmente, como quiera que el grado de inteligibilidad está estrechamente ligado a la correcta percepción de las consonantes por su importante contenido de altas frecuencias, el enmascaramiento de las mismas debido a un exceso de reverberación provoca indefectiblemente una pérdida de inteligibilidad en la sala.

2

Materiales y elementos utilizados en el acondicionamiento acústico de recintos

2.1 Introducción

El éxito en el diseño acústico de cualquier tipo de recinto, una vez fijado su volumen y definidas sus formas, radica en primer lugar en la elección de los materiales más adecuados para utilizar como revestimientos del mismo con objeto de obtener unos tiempos de reverberación óptimos.

Además, en según qué tipo de espacios, resulta necesario potenciar la aparición de primeras reflexiones (es el caso de teatros y salas de conciertos) y/o conseguir una buena difusión del sonido (exclusivamente en el caso de salas de conciertos).

En este capítulo se describen los diferentes tipos de materiales y elementos utilizados a tal efecto, así como sus características básicas. Cada uno de ellos produce principalmente uno de los siguientes efectos sobre la energía sonora:

- Absorción del sonido: debida mayoritariamente a la presencia en el recinto de materiales absorbentes, de elementos absorbentes selectivos (resonadores), del público y de las sillas.
- Reflexión del sonido: debida a la existencia de elementos reflectores utilizados para la generación de reflexiones útiles hacia la zona de público.
- Difusión del sonido: debida a la presencia de elementos difusores utilizados para dispersar, de forma uniforme y en múltiples direcciones, la energía sonora incidente.

2.2 Absorción del sonido

En un recinto cualquiera, la reducción de la energía asociada a las ondas sonoras, tanto en su propagación a través del aire como cuando inciden sobre sus superficies límite, es determinante en la calidad acústica final del mismo.

Básicamente, dicha reducción de energía, en orden de mayor a menor importancia, es debida a una absorción producida por:

- El público y las sillas
- Los materiales absorbentes y/o los absorbentes selectivos (resonadores), expresamente colocados sobre determinadas zonas a modo de revestimientos del recinto.
- Todas aquellas superficies límite de la sala susceptibles de entrar en vibración (como, por ejemplo, puertas, ventanas y paredes separadoras ligeras).
- El aire
- Los materiales rígidos y no porosos utilizados en la construcción de las paredes y techo del recinto (como, por ejemplo, el hormigón).

Antes de exponer con detalle y por separado las diferentes características de absorción de los elementos anteriores, es preciso seguir la recomendación de tipo práctico expuesta a continuación. Las características de absorción de los materiales absorbentes y de los resonadores dependen no sólo de sus propiedades físicas, sino también en gran parte de un sinfín de condicionantes y de detalles constructivos, que varían sustancialmente de un caso a otro y que no se pueden representar mediante una expresión matemática. Es por ello que, para realizar cualquier diseño acústico, resulta imprescindible disponer de los coeficientes de absorción α obtenidos mediante ensayos de laboratorio, según un procedimiento homologado (norma ISO 354 / UNE-EN 20354). Dichos coeficientes deberán ser solicitados, en cada caso, al correspondiente proveedor, que tendrá que acreditar su validez mediante el pertinente certificado.

La determinación de los coeficientes de absorción se lleva a cabo en una sala denominada cámara reverberante. Dicha sala es asimétrica, presenta unas superficies límite revestidas con materiales totalmente reflectantes y dispone de un conjunto de elementos convexos suspendidos del techo con una orientación y distribución completamente irregulares, cuya misión es la de crear un campo sonoro difuso.

En la figura 2.1 se presenta una vista de la cámara reverberante perteneciente al laboratorio de acústica del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Cataluña, así como un conjunto de sillas en un montaje típico para la determinación de sus coeficientes de absorción.



Fig. 2.1 Cámara reverberante del laboratorio de acústica del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona, España) y montaje típico de un conjunto de sillas para la medida de sus coeficientes de absorción

Debido a que la determinación de dichos coeficientes se lleva a cabo a partir de la medida de tiempos de reverberación y posterior utilización de la fórmula de Sabine, habitualmente se representan por el símbolo α_{SABINE} o, de forma abreviada, α_{SAB} .

A continuación se explican con detalle las características de absorción de los materiales y elementos mencionados anteriormente, por orden de menor a mayor importancia.

2.2.1 Absorción de los materiales utilizados en la construcción de las paredes y techo de un recinto

Dichos materiales, por regla general muy rígidos y con porosidad nula, dan lugar a una mínima absorción del sonido. Si bien, desde un punto de vista físico, la disipación de energía en forma de calor, y por tanto la absorción del sonido, se produce en las capas de aire adyacentes a cada una de las superficies consideradas, a efectos prácticos, dicho fenómeno habitualmente se representa en forma de coeficientes de absorción asignados a dichas superficies.

Este efecto es únicamente apreciable cuando no existe ningún material absorbente en el recinto, ya sea en forma de revestimiento de alguna de sus superficies, o bien de público presente en el mismo. Es el caso, por ejemplo, de las mencionadas cámaras reverberantes, especialmente diseñadas para obtener tiempos de reverberación muy altos.

En la tabla 2.1 se indican los valores de los coeficientes de absorción α_{SAB} de una serie de materiales utilizados comúnmente en la construcción de recintos.

FRECUENCIA (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Hormigón macizo	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
Bloques de hormigón pintados	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
Ladrillo revestido con yeso	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04

Tabla 2.1 Coeficientes de absorción α_{SAB} de materiales habitualmente utilizados en la construcción de recintos

Según se observa, si bien todos los valores son extremadamente bajos, el material con una mayor rugosidad presenta unos coeficientes de absorción ligeramente más elevados. Esto es debido a que su superficie es mayor y, por tanto, la capa de aire adyacente donde se produce la disipación de energía también lo es.

2.2.2 Absorción del aire

La absorción producida por el aire es solamente significativa en recintos de grandes dimensiones, a frecuencias relativamente altas ($\geq 2 \text{ kHz}$) y con porcentajes bajos de humedad relativa (del orden de un 10 a un 30%). Dicha absorción se representa por la denominada constante de atenuación del sonido en el aire m .

En la figura 2.2 se presenta un conjunto de gráficas mediante las que es posible determinar el valor del producto $4m$ en condiciones normales de presión y temperatura ($P_0 = 10^5 \text{ Pa}$ y 20°C), para cada frecuencia y porcentaje de humedad relativa del aire.

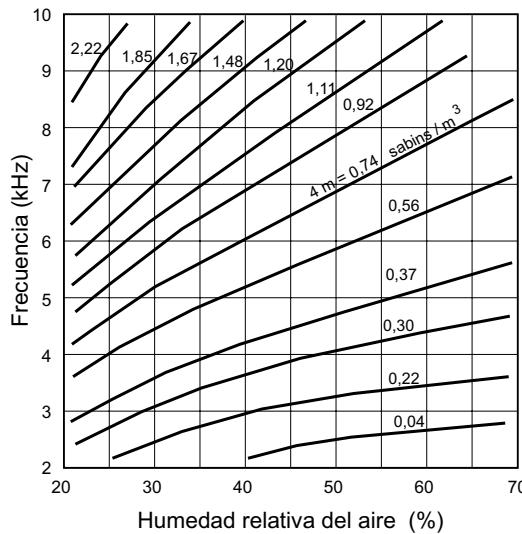


Fig. 2.2 Gráficas para la determinación del producto $4m$
(m es la constante de atenuación del sonido en el aire)

A partir del conocimiento del producto $4m$ y del volumen V del recinto, es posible calcular el valor del tiempo de reverberación RT del mismo, teniendo en cuenta la atenuación producida por el aire. La fórmula a utilizar es la de Sabine completa:

$$RT = \frac{0,161 V}{A_{\text{tot}} + 4mV} \quad (\text{en s})$$

siendo A_{tot} la absorción total del recinto (en sabins).

Por ejemplo, considerando una humedad relativa del 25% y la frecuencia de 4 kHz, el producto $4m$ valdrá 0,56 sabins/m³. Por lo tanto, para un recinto de volumen 5.000 m³, la absorción producida por el aire a dicha frecuencia será:

$$4mV = 2.800 \text{ sabins}$$

2.2.3 Absorción de las superficies vibrantes

La presencia en una sala de superficies límite susceptibles de entrar en vibración, como por ejemplo, puertas, ventanas y paredes separadoras ligeras, también da lugar a una cierta absorción que en principio conviene tener presente.

En el caso de los materiales absorbentes (apartado 2.2.4), la mayor absorción se produce de una forma totalmente controlada y va asociada a un proceso de disipación de energía, es decir, de conversión de energía sonora en calor. En cambio, en el caso de una superficie vibrante, una parte de la energía vibracional es radiada hacia el exterior. Aunque en realidad la energía no es disipada, el efecto es equivalente a una verdadera absorción, ya que dicha

energía es sustraída de la energía sonora incidente. En este sentido, una ventana abierta puede considerarse como un absorbente muy efectivo, ya que actúa a modo de sumidero de toda la energía sonora incidente.

La expresión aproximada del coeficiente de absorción α de una superficie vibrante, en función de la frecuencia, es:

$$\alpha = \left(\frac{2\rho_0 c}{\omega M} \right)^2$$

donde:

ρ_0 = densidad del aire = 1,18 Kg/m³

ω = 2πf

f = frecuencia (en Hz)

M = masa por unidad de superficie (en Kg/m²)

Dicha aproximación es solamente válida en el caso habitual de que el numerador sea pequeño comparado con el denominador.

Según se puede observar, la absorción sólo puede llegar a ser mínimamente significativa a bajas frecuencias, aunque los valores habituales de α son siempre pequeños. A título de ejemplo, el coeficiente de absorción de un cristal de 4 mm de espesor ($M \approx 9$ Kg/m²) a la frecuencia de 125 Hz es únicamente de 0,01.

Por otra parte, el hecho de que una pared entre en vibración puede dar lugar a una falta de aislamiento acústico entre el espacio considerado y el exterior. Dicha problemática no es objeto de estudio en este libro.

2.2.4 Materiales absorbentes

La absorción que sufren las ondas sonoras cuando inciden sobre los distintos materiales absorbentes utilizados como revestimientos de las superficies límite del recinto, así como su dependencia en función de la frecuencia, varían considerablemente de un material a otro. En consecuencia, la correcta elección de los mismos permitirá obtener, en cada caso, la absorción más adecuada en todas las bandas de frecuencias de interés.

Según se ha comentado en el apartado 2.1, existen dos tipos genéricos de elementos específicamente diseñados para producir una determinada absorción: los simplemente denominados materiales absorbentes, descritos en este apartado, y los llamados absorbentes selectivos o resonadores, detallados en el apartado 2.2.5.

En ambos casos, cuando la absorción en una o más bandas de frecuencias es muy elevada, puede ocurrir que el coeficiente de absorción medido α_{SAB} sea superior a 1. Ello no debe conducir a la interpretación totalmente errónea y carente de sentido desde un punto de vista físico de que la energía absorbida en dichas bandas es mayor que la energía incidente. La justificación proviene de la existencia de un efecto de difracción (apartado 2.3.1) que hace que la superficie efectiva de la muestra de material utilizada para la medida sea mayor que la superficie real.

Los materiales absorbentes se utilizan generalmente para conseguir uno de los siguientes objetivos:

- Obtención de los tiempos de reverberación más adecuados en función de la actividad (o actividades) a la cual se haya previsto destinar el espacio objeto de diseño
- Prevención o eliminación de ecos
- Reducción del nivel de campo reverberante en espacios ruidosos (restaurantes, fábricas, estaciones, etc.)

Estos materiales presentan un gran número de canales a través de los cuales la onda sonora puede penetrar. La disipación de energía en forma de calor se produce cuando la onda entra en contacto con las paredes de dichos canales. Cuanto mayor sea el número de canales, mayor será la absorción producida. El correspondiente coeficiente de absorción α es asignado a la superficie del material.

En la figura 2.3 se representa dicho proceso de forma gráfica y simplificada. Se parte de un material poroso y homogéneo, situado delante de una pared rígida.

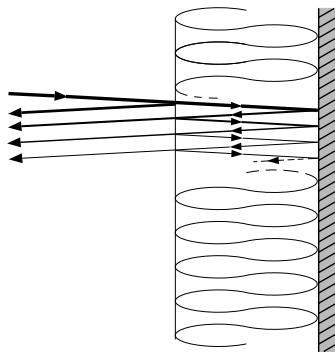


Fig. 2.3 Proceso de disipación de energía en el interior de un material poroso situado delante de una pared rígida

La onda sonora incidente es parcialmente reflejada. La energía sonora no reflejada penetra en el material, se atenúa y alcanza de nuevo su superficie después de reflejarse en la pared rígida posterior. La energía remanente se divide, nuevamente, en una parte que atraviesa la superficie del material y otra que vuelve a la pared posterior a través del material. Desde un punto de vista teórico, este proceso continúa indefinidamente. Esta explicación cualitativa sirve para demostrar que la onda sonora reflejada por el material puede imaginarse como compuesta por un número ilimitado de componentes sucesivas, cada una más débil que la precedente a causa de la considerable atenuación que tiene lugar en el interior del material.

El mencionado mecanismo de absorción del sonido es propio de todos los materiales porosos, siempre y cuando los poros sean accesibles desde el exterior. Normalmente tales materiales están formados por sustancias fibrosas o granulares a las que se les confiere un grado suficiente de compacidad a través de un proceso de prensa o de tejeduría. Los materiales absorbentes comerciales de este tipo se manufacturan básicamente a partir de:

- Lana de vidrio
- Lana mineral

- Espuma a base de resina de melamina
- Espuma de poliuretano

En las figuras 2.4 a 2.7 se muestran los cuatro tipos de materiales absorbentes mencionados.

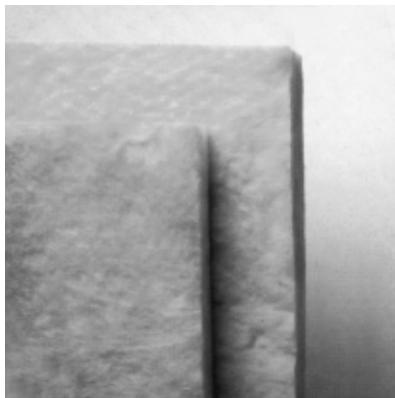


Fig. 2.4 Material absorbente a base de lana de vidrio (paneles PI-256 de Isover, Cristalería Española, S.A.)

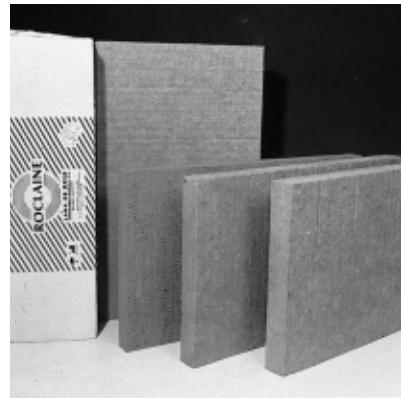


Fig. 2.5 Material absorbente a base de lana mineral (paneles BX Spintex de Roclaine, Cristalería Española, S.A.)

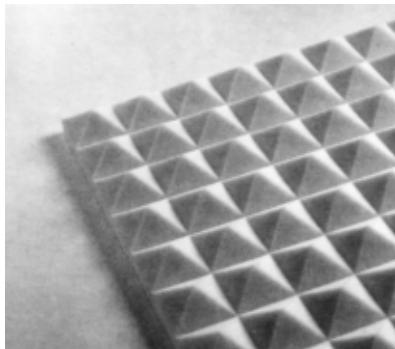


Fig. 2.6 Material absorbente a base de espuma de resina de melamina (Illsonic Pirámide de Illbruck, distribuido por Macco, S.L.)



Fig. 2.7 Material absorbente a base de espuma de poliuretano (Illsonic Sonex de Illbruck, distribuido por Macco, S.L.)

2.2.4.1 Coeficiente de reducción acústica NRC

En ocasiones, en lugar de hacer uso de todos los valores de los coeficientes de absorción por bandas de frecuencias, el grado de absorción acústica de un material absorbente se indica con un único coeficiente. Dicho coeficiente, denominado coeficiente de reducción acústica NRC (“Noise Reduction Coefficient”), se define como la media aritmética de los coeficientes de absorción correspondientes a las bandas centradas en 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz:

$$NRC = \frac{\alpha(250 \text{ Hz}) + \alpha(500 \text{ Hz}) + \alpha(1 \text{ kHz}) + \alpha(2 \text{ kHz})}{4}$$

Si bien presenta la ventaja de la simplicidad, se desaconseja su utilización en la fase de diseño acústico, debido a que dicho diseño se lleva a cabo teniendo en cuenta seis bandas de frecuencias por separado (de 125 Hz a 4 kHz).

2.2.4.2 Variación de la absorción en función del espesor del material

Siguiendo con la hipótesis anterior de que el material absorbente está colocado delante de una pared rígida y partiendo de que su espesor inicial es D, al aumentar dicho espesor también aumenta la absorción que produce, especialmente a frecuencias bajas y medias. A continuación se expone el motivo por el cual existe dicho incremento de absorción con el espesor.

En primer lugar, es preciso tener en cuenta que la absorción es baja a todas aquellas frecuencias para las que se cumple que el espesor D es mucho menor que la longitud de onda λ' del sonido dentro del material:

$$D \ll \lambda'$$

78

En efecto, el hecho de que la pared sea rígida obliga a que las partículas de aire situadas en sus inmediaciones no se muevan, es decir, a que su velocidad sea nula. Además, al alejarse de la pared, los valores de dicha velocidad seguirán siendo próximos a cero, ya que $D \ll \lambda'$. En la figura 2.8 se observa la variación de la amplitud de la velocidad de las partículas de aire "u" en función de la distancia a la pared rígida, para una frecuencia tal que $D \ll \lambda'$.

Al ser dicha velocidad tan baja en todos los puntos del material absorbente, la fricción de las partículas de aire con las paredes de los canales del material es reducida y, en consecuencia, la transformación de energía sonora en energía calorífica es mínima.

En cambio, a medida que la frecuencia aumenta, la longitud de onda λ' disminuye, con lo cual el espesor D será cada vez mayor en comparación con λ' . Ello significa que la velocidad "u" dentro del material irá aumentando, la energía disipada se verá incrementada y, por lo tanto, la absorción será mayor.

En la figura 2.9 se muestra la variación de la velocidad de las partículas de aire en función de la distancia a la pared rígida, para una frecuencia tal que $D = \lambda'/4$.

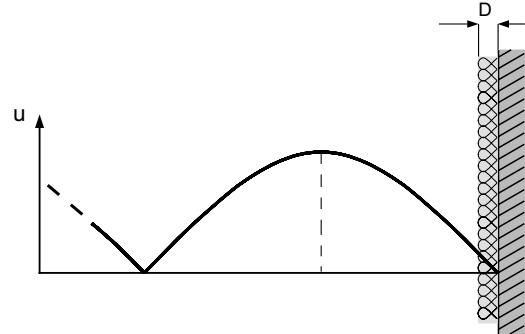


Fig. 2.8 Evolución de la amplitud de la velocidad "u" de las partículas de aire en función de la distancia a la pared rígida ($D \ll \lambda'$)

Efectivamente, se puede comprobar que la velocidad de las partículas de aire dentro del material es sustancialmente mayor que en el caso anterior, correspondiente a una banda de frecuencias más bajas ($D \ll \lambda'$).

Por consiguiente, si el espesor D es pequeño, la condición de baja absorción ($D \ll \lambda'$) se cumple a bajas y medias frecuencias. Al incrementar el espesor, dicha condición se verifica para longitudes de onda más elevadas, es decir, para frecuencias inferiores. Ello significa que, a igualdad de frecuencia, la absorción es mayor.

Otra forma de justificar el aumento de absorción con el espesor consiste en tener presente que el camino recorrido por la onda sonora en el interior del material de mayor grosor es también mayor y, además, que la velocidad de las partículas de aire en el interior del nuevo tramo de material adquiere valores más elevados.

En la figura 2.10 se muestra la variación de la absorción en función de la frecuencia para diferentes espesores de un material absorbente comercial a base de lana de vidrio.

Por otra parte, se puede demostrar que si la onda sonora se ve sometida solamente a una pequeña atenuación dentro del material absorbente, el coeficiente de absorción oscilará de forma periódica entre un valor máximo y otro mínimo, en función de la frecuencia. Los valores máximos tendrán lugar a todas aquellas frecuencias para las cuales el espesor D del material sea igual a $\lambda'/4$, o a un múltiplo impar de $\lambda'/4$.

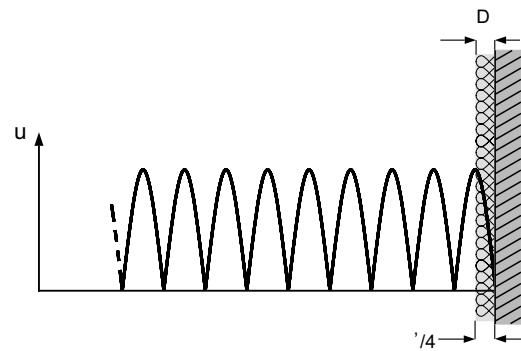


Fig. 2.9 Evolución de la amplitud de la velocidad “ u ” de las partículas de aire en función de la distancia a la pared rígida ($D = \lambda'/4$)

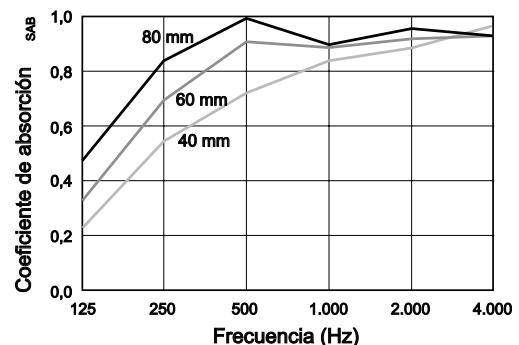


Fig. 2.10 Variación de la absorción en función de la frecuencia para diferentes espesores de un material absorbente comercial a base de lana de vidrio

2.2.4.3 Variación de la absorción en función de la porosidad del material

Partiendo de la misma hipótesis anterior en cuanto a la situación del material, al aumentar su porosidad también aumenta la absorción a todas las frecuencias. Este efecto era de esperar, ya que la penetración de la onda sonora incidente es mayor a medida que se incrementa el grado de porosidad.

En la figura 2.11 se observa la evolución del coeficiente de absorción en función de la frecuencia de un mismo material con tres grados de porosidad diferentes, en el supuesto de que la onda sonora se vea sometida a una fuerte atenuación en el interior del material.

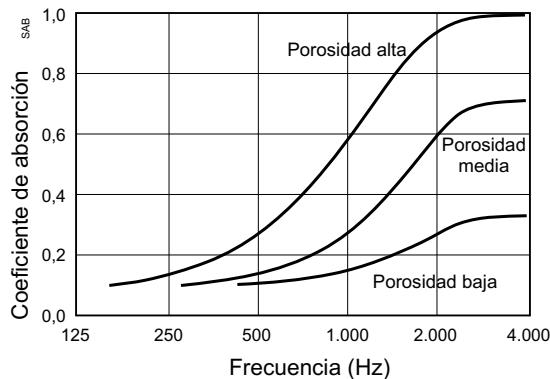


Fig. 2.11 Variación de la absorción en función de la frecuencia de un material absorbente con distintos grados de porosidad

2.2.4.4 Variación de la absorción en función de la densidad del material

Si la densidad del material es baja, existen pocas pérdidas por fricción y, en consecuencia, la absorción es pequeña. A medida que la densidad va aumentando, se produce un incremento progresivo de absorción hasta llegar a un valor límite, a partir del cual la absorción disminuye, debido a que existe una menor penetración de la onda sonora en el material, es decir, una mayor reflexión de energía.

Desde un punto de vista práctico, es aconsejable que los materiales absorbentes utilizados en el acondicionamiento acústico de recintos tengan una densidad situada entre, aproximadamente, 40 y 70 Kg/m³, no debiéndose superar en ningún caso los 100 Kg/m³.

En la figura 2.12 se muestran los valores de los coeficientes de absorción de una lana de roca de 60 mm de espesor y densidades de 40 y 100 Kg/m³, respectivamente.

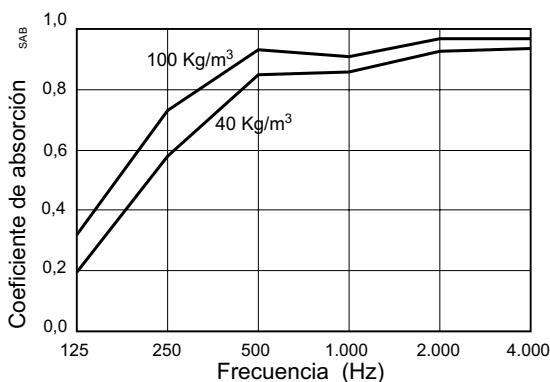


Fig. 2.12 Coeficientes de absorción de una lana de roca de 60 mm de espesor y densidades de 40 y 100 Kg/m³

2.2.4.5 Variación de la absorción en función de la distancia del material a la pared rígida

Si se pretenden obtener coeficientes de absorción elevados a bajas frecuencias, no es imprescindible hacer uso de materiales muy gruesos. Basta con utilizar un material con un espesor medio y colocarlo a una cierta distancia de la pared rígida, sabiendo que la máxima absorción se producirá a aquella frecuencia para la cual la distancia “d” del material a la pared sea igual a $\lambda/4$ (en este caso, λ es la longitud de onda del sonido cuando se propaga a través del aire existente entre el material y la pared). Ello es debido a que la amplitud de la velocidad de las partículas de aire es máxima para $d = \lambda/4$ (figura 2.13).

Cuanto mayor sea “d”, menor será la frecuencia a la que la absorción será máxima. Por lo tanto, para aumentar la absorción a bajas frecuencias, es preciso incrementar la separación entre el material y la pared. De todas formas, dicha mejora se ve contrarrestada por una disminución de absorción a frecuencias más elevadas.

En la figura 2.14 se muestran los coeficientes de absorción de una lana de roca de 30 mm de espesor y 46 Kg/m^3 de densidad, montada de dos maneras distintas: sobre una pared rígida y a una distancia de 50 mm de la misma.

Según se observa, con el segundo sistema de montaje es posible obtener un coeficiente de absorción de 0,95 a la frecuencia de 500 Hz, mientras que con el primero dicho valor no se alcanza hasta los 2 kHz.

En la situación límite de que el espesor del material tienda a cero, el comportamiento del mismo es análogo al de una tela porosa colocada a una distancia “d” de una pared rígida y paralela a la misma. En tal caso, y partiendo de la hipótesis teórica de que el material es tan pesado que no vibra bajo la influencia de la onda sonora incidente, los valores del coeficiente de absorción α oscilan de forma periódica entre un máximo y un mínimo.

En la figura 2.15 se muestra la evolución de α en función de d/λ , para tres valores diferentes de la resistencia de flujo r_s (se define como la relación entre la diferencia de presiones correspondientes a las dos caras del material y la velocidad del flujo de aire que atraviesa sus poros), suponiendo que la onda sonora incide perpendicularmente sobre el material. La resistencia de flujo r_s engloba todas las pérdidas de energía que tienen lugar en el material.

Según se puede observar, la máxima absorción se produce a aquellas frecuencias para las cuales “d” es un múltiplo impar de $\lambda/4$, dependiendo su valor del valor de r_s . En cambio,

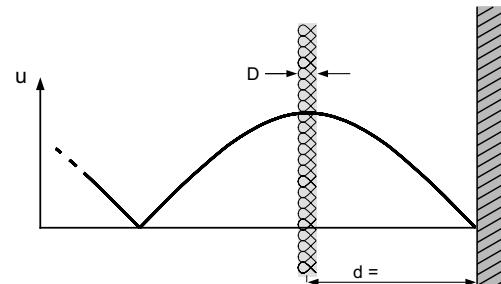


Fig. 2.13 Amplitud de la velocidad “u” de las partículas de aire en el interior de un material absorbente situado a una distancia de la pared rígida $d = \lambda/4$

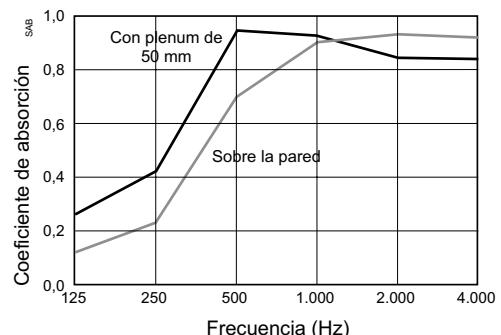


Fig. 2.14 Coeficientes de absorción de una lana de roca de 30 mm de espesor y 46 Kg/m^3 de densidad, montada: a) sobre una pared de hormigón; b) a una distancia de 50 mm de la pared

la mínima absorción (absorción nula) tiene lugar a todas las frecuencias para las que “d” es un múltiplo par de $\lambda/2$. Ello también es lógico ya que, a dichas distancias, la velocidad de las partículas de aire en el plano del material es cero y la disipación de energía sólo es posible si el aire situado en los poros del mismo está en movimiento.

Debido a que la mayoría de materiales no son lo suficientemente pesados como para garantizar la ausencia completa de vibraciones, las características de absorción pueden diferir de las expuestas anteriormente. De todas formas, en general se pueden considerar válidas.

Por otro lado, en la práctica, se recomienda colocar el material en forma de zigzag con objeto de tener una distancia variable entre el mismo y la pared y, de esta forma, suavizar las irregularidades del coeficiente de absorción.

A modo de ejemplo, en la figura 2.16 se muestran los coeficientes de absorción de una cortina fruncida al 180%, montada de dos formas distintas: adosada a la pared y con una separación media de 14 cm de la misma.

Como cabía esperar, al separar la cortina de la pared aumenta la absorción a bajas frecuencias y, además, el alto porcentaje de fruncido suaviza la curva de absorción obtenida.

Otro ejemplo es el mostrado en la figura 2.17. Se trata de un material absorbente a base de lana de vidrio moldeada de tal manera que la distancia del mismo a la pared es variable. Con este diseño se consiguen unos valores del coeficiente de absorción en función de la frecuencia más regulares que si el material fuese plano.

Finalmente conviene tener presente que, con independencia del grosor del material, cuando éste se separa de forma ostensible de la pared, todos los razonamientos anteriores dejan de ser válidos. En tal caso, es necesario tratar los espacios situados a ambos lados del material como dos cavidades acoopladas. Dicho estudio está fuera del alcance de este libro.

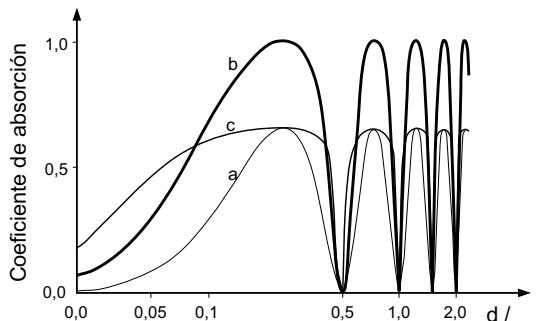


Fig. 2.15 Coeficientes de absorción de una tela porosa situada a una distancia “d” de una pared rígida, en función de d/λ , para los siguientes valores de r_s : a) $r_s = 0,25 \rho_0 c$; b) $r_s = \rho_0 c$; c) $r_s = 4 \rho_0 c$

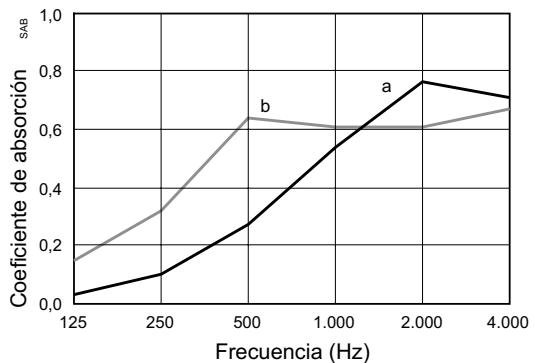


Fig. 2.16 Coeficientes de absorción en función de la frecuencia de una cortina fruncida al 180% montada: a) sobre la pared; b) separada, en promedio, 14 cm de la misma

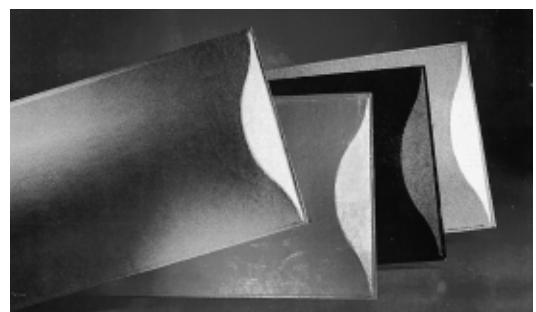


Fig. 2.17 Material absorbente a base de lana de vidrio moldeada (Paneles Ipawan de Procustic, S.A., distribuidos por Wanner y Vinyas, S.A. y Metrasoni, S.L.)

2.2.4.6 Materiales absorbentes suspendidos del techo

En aquellos recintos donde no existe suficiente superficie disponible para el montaje de la cantidad de material absorbente necesaria, o bien donde es imprescindible aumentar la superficie de absorción más allá de la estrictamente asociada a las superficies límite, se suele recurrir a la utilización de materiales absorbentes suspendidos del techo.

Dichos materiales se suelen utilizar en espacios de dimensiones medias o grandes, como por ejemplo, comedores, talleres, fábricas y polideportivos. A continuación se presentan dos ejemplos ilustrativos.

En la figura 2.18 se muestra la solución adoptada en un comedor de grandes dimensiones a base de elementos rectangulares de lana mineral comprimida. Son los coloquialmente denominados “bafles”.



83

Fig. 2.18 Ejemplo de tratamiento acústico de un techo a base de bafles rectangulares absorbentes de lana mineral comprimida (Eurobafles de Eurocoustic, Cristalería Española, S.A.)

En la figura 2.19 se muestran dos soluciones utilizadas en plantas industriales a base de elementos cilíndricos absorbentes de lana mineral dispuestos horizontal y verticalmente, respectivamente.



Fig. 2.19 Ejemplos de tratamiento acústico a base de cilindros absorbentes de lana mineral (Sonover de Wanner y Vinyas, S.A.)

2.2.4.7 Protección de los materiales absorbentes

En muchas ocasiones, resulta conveniente cubrir los materiales absorbentes por la cara expuesta al recinto. Los principales motivos son los siguientes:

- En el curso del tiempo, algunos materiales desprenden partículas que pueden llegar a contaminar el aire de la sala.
- Si los materiales están al alcance del público, existe el peligro de que puedan resultar dañados.
- El arquitecto habitualmente desea ocultarlos por razones eminentemente estéticas.

A continuación se indican los recubrimientos más comúnmente utilizados:

- Velo acústicamente transparente
- Superficie microporosa
- Placa rígida de mortero poroso a base de granos de mármol, piedras naturales o cuarzo pigmentado
- Placa de viruta de madera fina aglomerada con magnesita o cemento
- Lámina de plástico o de papel
- Panel perforado o ranurado de madera, chapa metálica o cartón-yeso
- Ladrillo perforado o ranurado
- Listones de madera

Seguidamente se dan algunos ejemplos gráficos ilustrativos.

a) Velo acústicamente transparente

En la figura 2.20 se muestra un ejemplo de un material absorbente recubierto por una de sus caras con un velo negro acústicamente transparente.



Fig. 2.20 Paneles de lana de roca con un recubrimiento de velo negro acústicamente transparente sobre una de sus caras (paneles NV-40 de Roclidean, Cristalería Española, S.A.)

b) Superficie microporosa

En la figura 2.21 se muestra un ejemplo de un material absorbente recubierto con una superficie microporosa. Dicha superficie presenta la propiedad de que se puede lavar sin sufrir ningún deterioro.



Fig. 2.21 Paneles de lana de vidrio de alta densidad recubiertos con un material microporoso (paneles Ecophon Hygiene Performance, distribuidos por Notson, S.L.)

Otras características destacables del material anterior son que se puede curvar y que se puede instalar en forma de falso techo registrable (figura 2.22).



Fig. 2.22 Ejemplos de montaje de los paneles de la figura 2.21

c) Placa rígida de mortero poroso

En la figura 2.23 se aprecian diferentes modelos de una placa de mortero poroso a base de piedras naturales aglomeradas con resina, así como el aspecto de este tipo de material una vez montado sobre una pared.

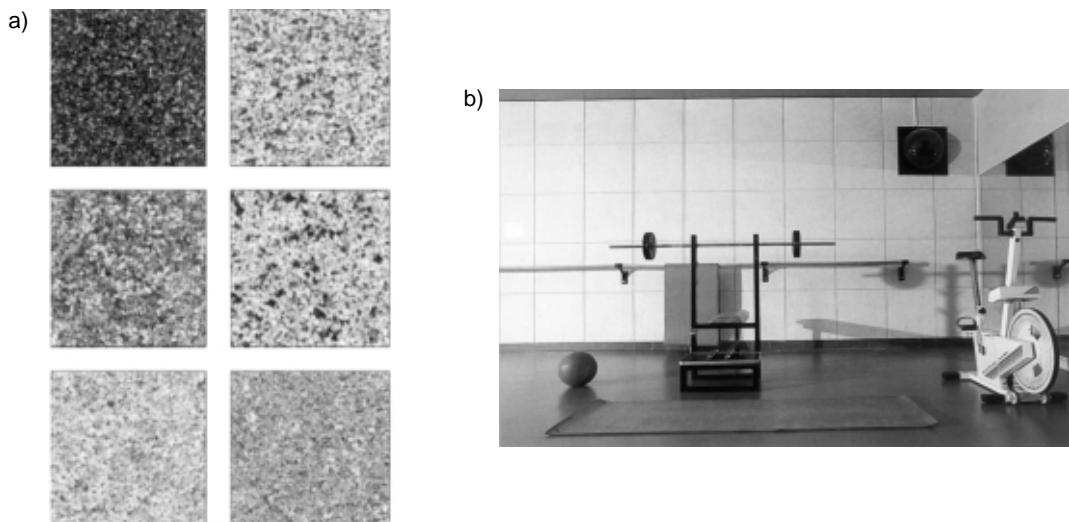


Fig. 2.23 a) Muestra de diversos modelos de una placa porosa a base de piedras naturales aglomeradas con resina; b) pared de la sala del deporte del Museo del Louvre (París, Francia), revestida con dicho material (Chromoroc, distribuido por Wanner y Vinyas, S.A.)

En la figura 2.24 se muestra un croquis de un conjunto formado por una placa del tipo anterior colocada a una distancia de 150 mm de la pared. La cavidad de aire resultante está

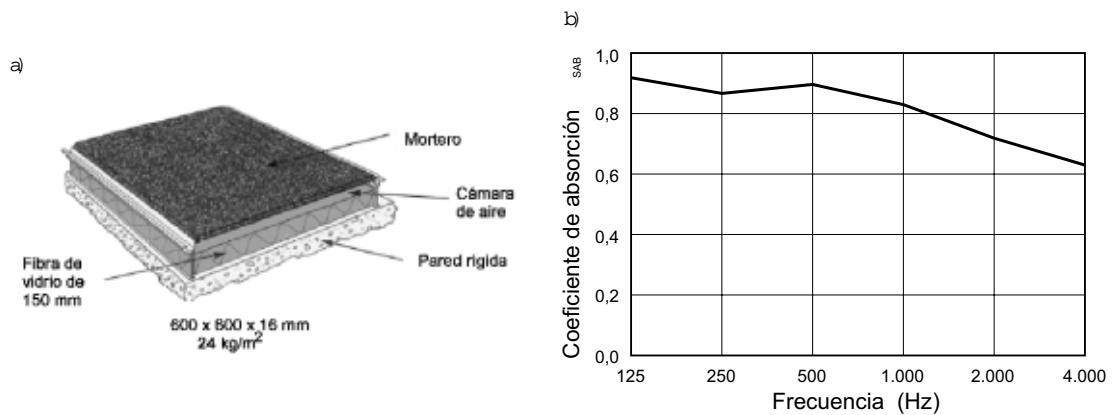


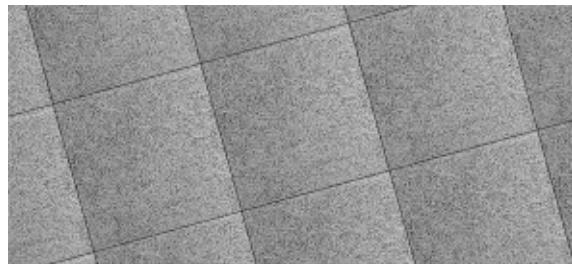
Fig. 2.24 a) Ejemplo de placa de mortero poroso a base de piedras naturales aglomeradas con resina, con cavidad rellena de lana de vidrio de 150 mm de espesor; b) coeficientes de absorción en función de la frecuencia de dicho conjunto (Alpha Bardage de Chromoroc, distribuido por Wanner y Vinyas, S.A.)

rellena de lana de vidrio. La mencionada placa, de densidad 24 Kg/m^2 , presenta una gran resistencia a los impactos, a los actos vandálicos y al agua, y debido a su gran porosidad deja pasar la onda sonora para su posterior absorción. Asimismo, se detallan los valores del coeficiente de absorción de dicho conjunto.

Según se observa, la absorción que se consigue es muy elevada a bajas y medias frecuencias. Ello es debido a que la placa también contribuye a la absorción global del conjunto en dichas bandas. La disminución de absorción que tiene lugar a altas frecuencias, respecto a la que presentaría la lana de vidrio sin ningún tipo de protección, se debe al obstáculo que representa la placa al paso de la onda sonora a dichas frecuencias (las longitudes de onda asociadas son muy inferiores a las correspondientes a bajas frecuencias).

d) Placa de viruta de madera

En la figura 2.25 se observa un conjunto de placas de viruta de madera aglomerada con magnesita.



87

Fig. 2.25 Conjunto de placas de viruta de madera aglomerada con magnesita (Herakustik F, Heraklith España, S.L.)

En la figura 2.26 se muestra un posible montaje de dicha placa separada de la pared y con lana de vidrio en la cavidad de aire creada, así como la absorción del conjunto.

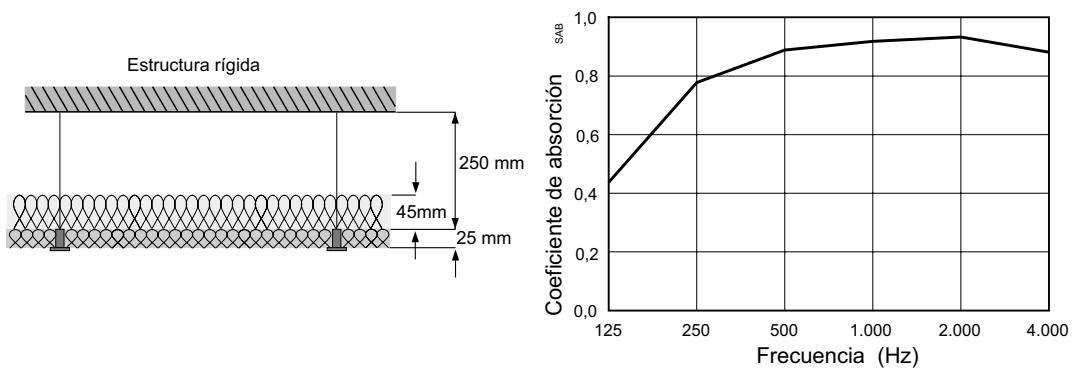


Fig. 2.26 Conjunto formado por placas de Herakustik F de 25 mm de espesor con cavidad de aire de 250 mm y lana de vidrio de 45 mm, junto con sus coeficientes de absorción en función de la frecuencia

Según se observa, la absorción del conjunto es elevada y uniforme en todas las bandas de frecuencias, exceptuando la banda de 125 Hz, donde es apreciablemente menor.

En ocasiones, se utilizan únicamente dichas placas, prescindiendo del material absorbente. En tal caso, y como es lógico, la absorción conseguida es sustancialmente menor.

En cuanto al resto de los recubrimientos comentados anteriormente, todos ellos dan lugar a diferentes tipos de absorbentes selectivos, es decir, de resonadores. Dichos elementos se estudian en el siguiente apartado.

2.2.5 Elementos absorbentes selectivos (resonadores)

Como se ha visto en el apartado 2.2.4, por regla general, los materiales absorbentes de espesor estándar colocados sobre una pared rígida presentan una pobre absorción a bajas frecuencias. Al separarlos de la pared, se produce una notable mejora de la absorción a dichas frecuencias.

De todas formas, si se pretende obtener una gran absorción a frecuencias bajas con objeto de reducir sustancialmente los valores del tiempo de reverberación, es preciso hacer uso de absorbentes selectivos o resonadores. Se trata de elementos que presentan una curva de absorción con un valor máximo a una determinada frecuencia. Dicha frecuencia recibe el nombre de frecuencia de resonancia, y depende de las características tanto físicas como geométricas del resonador. Generalmente, está situada por debajo de los 500 Hz.

Los resonadores pueden utilizarse de forma independiente, o bien, como complemento a los materiales absorbentes.

Básicamente, existen los siguientes tipos de resonadores:

- de membrana o diafragma
- simple de cavidad (Helmholtz)
- múltiple de cavidad (Helmholtz) a base de paneles perforados o ranurados
- múltiple de cavidad (Helmholtz) a base de listones

2.2.5.1 Resonador de membrana o diafragma

Está formado por un panel de un material no poroso y flexible, como por ejemplo la madera, montado a una cierta distancia de una pared rígida con objeto de dejar una cavidad cerrada de aire entre ambas superficies.

Cuando una onda sonora incide sobre el panel, éste entra en vibración como respuesta a la excitación producida. Dicha vibración, cuya amplitud depende principalmente de la frecuencia del sonido y es máxima a la frecuencia de resonancia, provoca una cierta deformación del material y la consiguiente pérdida de una parte de la energía sonora incidente, que se disipa en forma de calor. Por otro lado, aunque el panel también produce una pequeña radiación, a efectos prácticos resulta ser totalmente inaudible.

En la figura 2.27 se representa un esquema básico de un resonador de membrana constituido por un panel de masa por unidad de superficie M , separado una distancia “ d ” de la pared rígida.

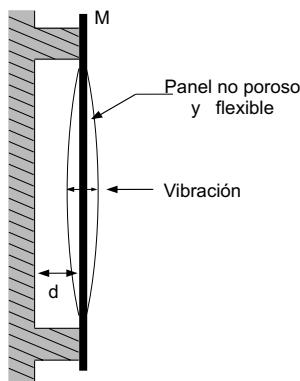


Fig. 2.27 Esquema básico de un resonador de membrana o diafragmático

Partiendo de que, a las frecuencias de diseño generalmente bajas, se cumple que:

$$d \ll \lambda$$

el aire de la cavidad se comporta como un muelle, cuya rigidez aumenta a medida que el volumen de la misma disminuye (distancia “d” menor). Dicha rigidez del aire junto con la masa del panel constituyen un sistema resonante que presenta un pico de absorción a la frecuencia de resonancia f_0 .

Suponiendo que la onda sonora incide perpendicularmente sobre el panel, la expresión teórica para el cálculo de f_0 es la siguiente:

$$f_0 = \frac{600}{\sqrt{Md}} \text{ (en Hz)}$$

donde:

M = masa por unidad de superficie del panel (en Kg/m^2)

d = distancia del panel a la pared rígida (en cm)

La expresión anterior puede considerarse suficientemente aproximada para espesores del panel de hasta 20 mm (caso habitual en la práctica), siempre y cuando la distancia entre puntos o líneas de fijación consecutivas no sea inferior a 80 cm.

En cuanto a la variación del coeficiente de absorción en función de la frecuencia, en la figura 2.28 se muestra un conjunto de gráficas teóricas, válidas para el caso de incidencia normal y suponiendo que: $2\pi f_0 M = 10 \rho_0 c$. Esta última hipótesis da lugar a valores del todo coherentes, ya que, por ejemplo, si se elige $M = 5 \text{ Kg/m}^2$, entonces $f_0 = 125 \text{ Hz}$. Todas ellas se representan en función de f/f_0 y para diferentes valores de $r_s/\rho_0 c$.

Según se puede observar, a medida que aumenta la relación $r_s/\rho_0 c$, también lo hace el valor del coeficiente de absorción α , hasta llegar a $r_s = \rho_0 c$, en cuyo caso $\alpha = 1$ a la frecuencia de resonancia f_0 . Para valores tales que $r_s > \rho_0 c$, el valor de máxima absorción va disminuyendo progresivamente y la correspondiente curva de absorción se va ensanchando.

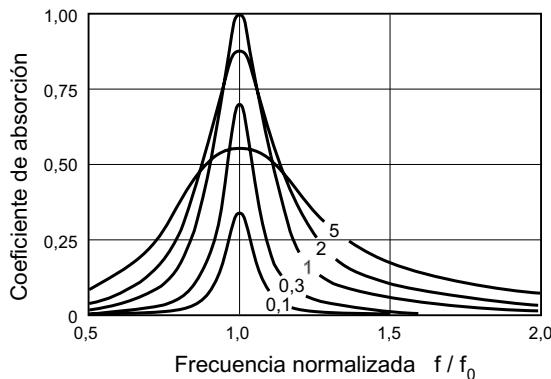


Fig. 2.28 Coeficientes de absorción teóricos de resonadores de membrana en función de f/f_0 , considerando incidencia normal y $2\pi f_0 M = 10 \rho_0 c$. Parámetro de cada curva: relación $r_s/\rho_0 c$

Desde un punto de vista práctico, la manera de incrementar r_s , y por lo tanto de conseguir la curva de absorción deseada, es llenando la cavidad de aire parcial o totalmente con un material absorbente del tipo lana de vidrio o lana mineral. Si el valor de r_s del panel es bajo ($r_s < \rho_0 c$), el hecho de añadir dicho material producirá un aumento de r_s y de absorción, principalmente a f_0 . Por contra, si $r_s > \rho_0 c$, la utilización de material absorbente dará lugar a una curva de absorción menos selectiva, si bien con una absorción inferior a f_0 .

A modo de ejemplo ilustrativo, en la figura 2.29 se muestran las curvas de absorción, obtenidas mediante ensayos de laboratorio, correspondientes a un resonador de membrana formado por un panel de contrachapado de 3 mm de espesor y $1,8 \text{ Kg/m}^2$ de masa por unidad de superficie, montado a una distancia de 4,4 cm de la pared, con y sin absorbente en la cavidad de aire.

Según se observa en este caso concreto, el hecho de añadir material absorbente provoca un aumento notable de absorción. El ejemplo presentado también sirve para demostrar que la fórmula dada anteriormente para el cálculo de la frecuencia de resonancia f_0 es sólo aproximada, ya que mediante su aplicación resulta que $f_0 = 213 \text{ Hz}$, mientras que el valor real medido es de 125 Hz.

Otro ejemplo es el mostrado en la figura 2.30. Se trata del resonador instalado en la sala de actos de la Torre de Telecomunicaciones de Telefónica, Barcelona (España).

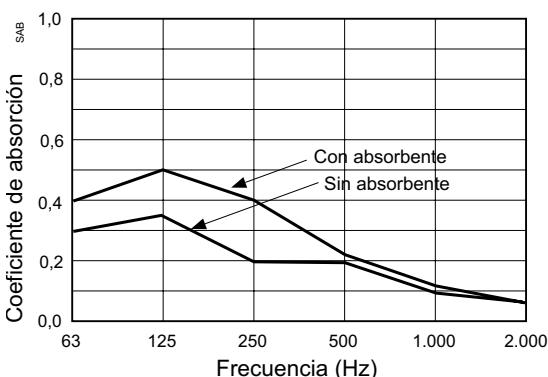


Fig. 2.29 Coeficiente de absorción de un resonador de membrana con $M = 1,8 \text{ Kg/m}^2$ y $d = 4,4 \text{ cm}$ (con y sin absorbente en la cavidad)

ñā). Está formado por un panel de DM de 800 Kg/m^3 de densidad y 6 mm de espesor ($M = 4,8 \text{ Kg/m}^2$), colocado sobre rastrelles de madera de $50 \times 50 \text{ mm}$ ($d = 5 \text{ cm}$) y con la cavidad rellena de lana de roca de 30 mm de espesor y 40 Kg/m^3 de densidad. Se utiliza a fin de disminuir el tiempo de reverberación a bajas frecuencias, ya que su frecuencia de resonancia es del orden de 125 Hz.

Por otra parte, en el apartado 2.2.4.7 se ha comentado que los materiales absorbentes se recubren a menudo con un revestimiento protector, con lo cual se convierten en resonadores. Uno de los recubrimientos habituales es la lámina de plástico o de papel, y el tipo de resonador creado es de membrana. A continuación se presentan unos ejemplos ilustrativos.

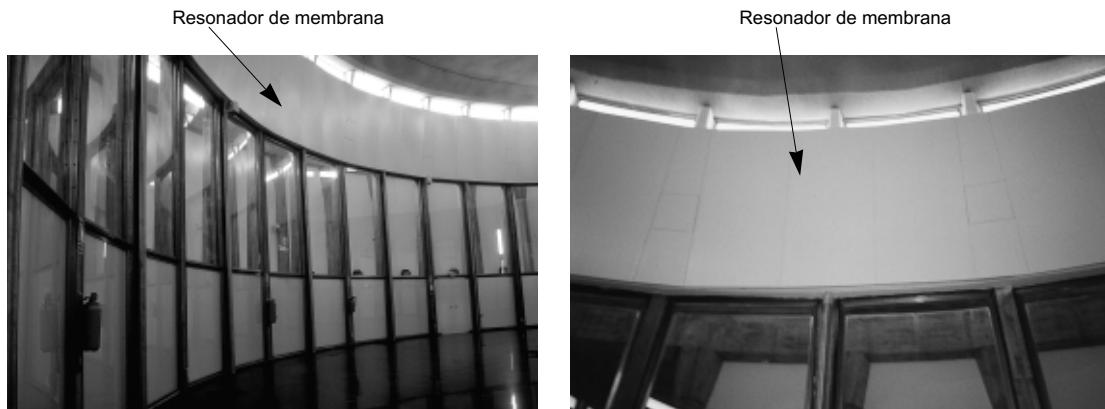


Fig. 2.30 Resonador de membrana instalado en la sala de actos de la Torre de Telecomunicaciones de Telefónica, Barcelona (España); $M = 4,8 \text{ Kg/m}^2$; $d = 5 \text{ cm}$; cavidad con lana de roca de 30 mm de espesor y 40 Kg/m^3 de densidad

Se parte de un material absorbente formado por un panel rígido de lana de vidrio aglomerada con resinas termoendurecibles, recubierto en una de sus caras con una película elástica acústicamente transparente (figura 2.31).

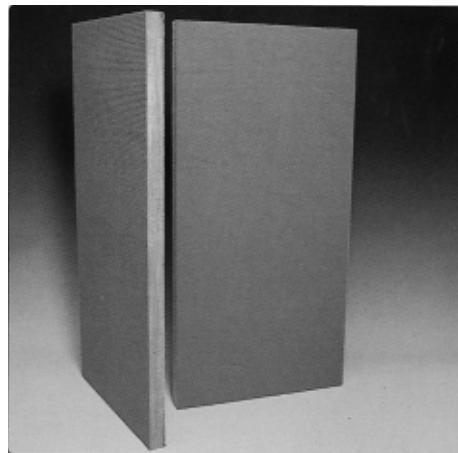


Fig. 2.31 Material absorbente (Panel PA de Isover, Cristalería Española, S.A.)

Si en lugar de recubrirlo con una película elástica, se protege con una película de P.V.C., o bien, con un complejo de papel Kraft aluminio, el material se convierte en un resonador de membrana (figura 2.32).

Ambos recubrimientos ofrecen las siguientes ventajas:

- Constituyen una barrera eficaz contra el vapor de agua.
- Tienen un elevado poder de reflexión de la luz.
- No precisan de recubrimiento adicional.

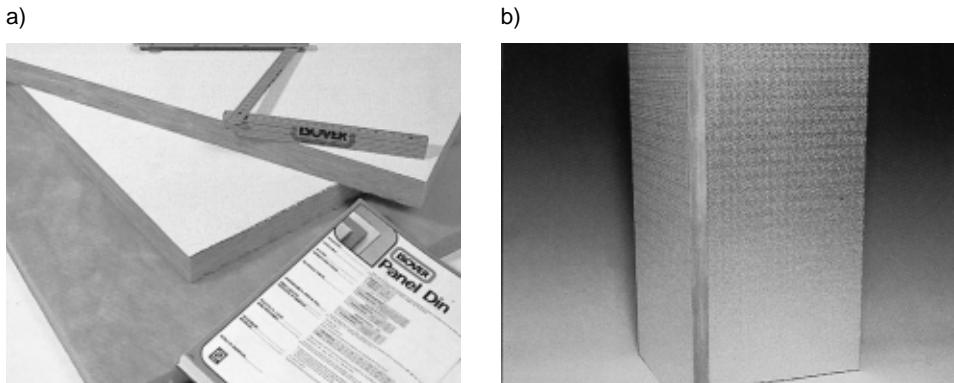


Fig. 2.32 Resonador de membrana formado por un material absorbente recubierto:
a) con una película de P.V.C. (Panel DIN de Isover, Cristalería Española, S.A.); b) con un complejo de papel Kraft aluminio (Panel ALUMISOL de Isover, Cristalería Española, S.A.)

En la figura 2.33 se presentan las curvas de absorción, obtenidas mediante ensayo, de los tres paneles mencionados colocados sobre perfilería metálica con una cámara de aire de 25 cm.

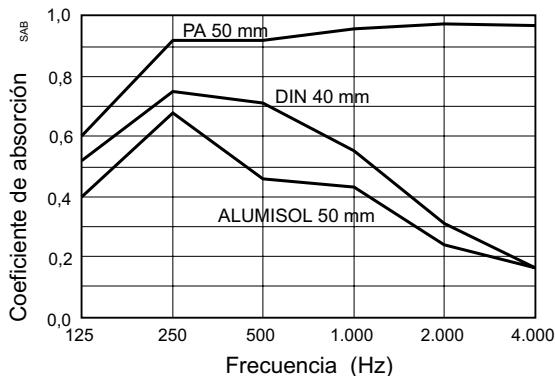


Fig. 2.33 Coeficientes de absorción de los paneles PA de 50 mm, DIN de 40 mm y ALUMISOL de 50 mm, montados con cámara de aire de 25 cm

Efectivamente, los dos resonadores de membrana (paneles DIN y ALUMISOL) presentan una frecuencia de resonancia a 250 Hz y una gran atenuación a frecuencias altas.

Finalmente, cabe comentar que todo lo expuesto con anterioridad sirve para desmentir la falsa creencia popular de que los paneles delgados de madera utilizados como revestimientos de paredes, o bien los falsos techos a base de cartón-yeso delgado, son favorables para la buena acústica de una sala debido al efecto de “amplificación” del sonido que producen cuando entran en “resonancia”.

2.2.5.2 Resonador simple de cavidad (Helmholtz)

Está formado por una cavidad cerrada de aire conectada a la sala a través de una abertura o cuello estrecho.

En la figura 2.34 se muestra un esquema básico de este tipo de resonador. El volumen de la cavidad se indica por V , mientras que la sección transversal y la longitud del cuello se representan por S y L , respectivamente.

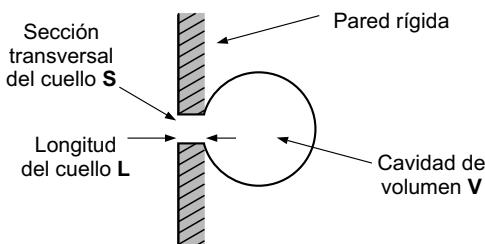


Fig. 2.34 Esquema básico de un resonador simple de cavidad (Helmholtz) montado en una pared

Partiendo de que, a las frecuencias de diseño generalmente bajas, se cumple que:

$$L \ll \lambda$$

$$\sqrt[3]{V} \ll \lambda$$

el aire del cuello se mueve como una unidad, y constituye el elemento de masa, mientras que el aire de la cavidad se comporta como un muelle, constituyendo el elemento de rigidez. De forma análoga al resonador de membrana, la masa del aire del cuello junto con la rigidez del aire de la cavidad dan lugar a un sistema resonante que presenta un pico de absorción a la frecuencia de resonancia f_0 .

En este caso, la expresión teórica para el cálculo de f_0 es la siguiente:

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{S}{LV}} \text{ (en Hz)}$$

donde:

S = sección transversal del cuello (en cm^2)

L = longitud del cuello (en cm)

V = volumen de la cavidad (en cm^3)

Esta expresión es siempre válida con independencia de la forma del resonador. Esto significa que las frecuencias de resonancia de dos resonadores con formas muy distintas son iguales, siempre y cuando la relación $S/(LV)$ también lo sea.

Por otro lado, la longitud efectiva del cuello L' es mayor que la longitud real L , debido a que la masa efectiva del aire contenido en el mismo es también mayor que la masa que le

correspondería por el volumen que ocupa. El factor de corrección, suponiendo que la abertura sea circular, es el siguiente:

$$L_c = 2(0,8a) = 1,6a$$

siendo “a” el radio del cuello (en cm).

Por consiguiente, la expresión final para el cálculo de f_0 es:

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{S}{L'V}} \text{ (en Hz)}$$

donde:

$$L' = L + L_c = L + 1,6a$$

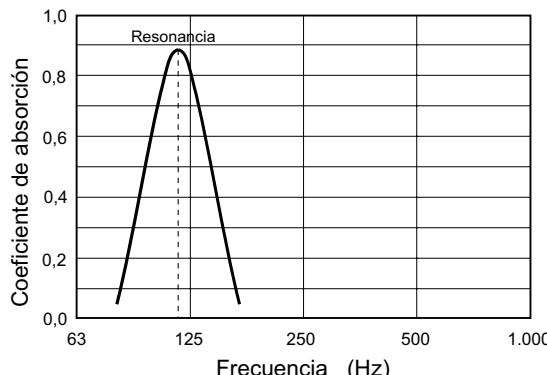


Fig. 2.35 Coeficientes de absorción de un resonador simple de cavidad (Helmholtz)

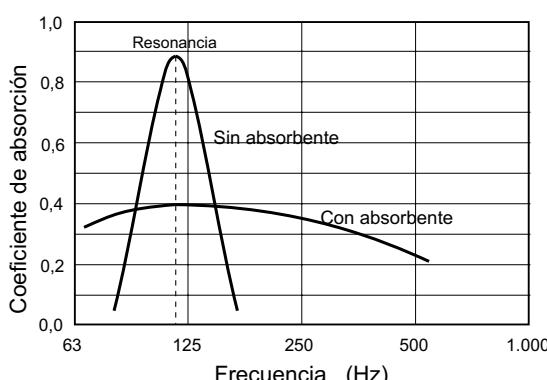


Fig. 2.36 Coeficientes de absorción de un resonador simple de cavidad (Helmholtz) con y sin absorbente en la cavidad

Si bien la expresión para el cálculo de f_0 , incluso con la corrección anterior, lleva a resultados sólo aproximados, se puede considerar suficientemente válida para su utilización en la fase de diseño.

Por lo que se refiere a la variación de la absorción en función de la frecuencia, en la figura 2.35 se muestra una gráfica teórica de la evolución del coeficiente de absorción de un resonador de este tipo.

Según se puede observar, su comportamiento es muy selectivo, es decir, presenta una absorción muy elevada a la frecuencia de resonancia f_0 , decreciendo bruscamente en cuanto la frecuencia considerada se aparta de f_0 .

Con objeto de suavizar la curva de absorción anterior, es preciso llenar la cavidad de aire con material absorbente, tipo lana de vidrio o lana mineral. De esta forma se consigue una absorción útil en un margen más amplio de frecuencias, si bien con una absorción claramente inferior a la frecuencia f_0 . En la figura 2.36 se muestra la nueva gráfica del coeficiente de absorción superpuesta con la anterior.

El uso de un resonador individual no es habitual en la práctica, ya que la superficie ocupada por el mismo en una sala (coincidente con la sección transversal de

la abertura) es extremadamente pequeña. Más bien, se suele utilizar una agrupación de resonadores simples dispuestos de la forma indicada en la figura 2.37.

Lógicamente, a igualdad de dimensiones y formas, la frecuencia de resonancia de todos ellos es la misma, puesto que no existe ningún tipo de conexión entre las diversas cavidades. En cambio, la absorción A del conjunto (en sabins, apartado 1.15.8.2) es significativamente mayor debido a que la superficie ocupada por el mismo también lo es.

Como ejemplo ilustrativo, en la figura 2.38 se muestra el tipo de resonador colocado en el techo de la sala de conciertos Berlin Philharmonie (Alemania), mientras que en la figura 2.39 se observa una vista de dicho techo con los resonadores incorporados.

Según se puede apreciar, los resonadores tienen forma de pirámide y disponen de una pequeña abertura ajustable entre 1 y 3 cm. Dicha anchura determina la frecuencia de resonancia que, en todos los casos, está situada por debajo de los 250 Hz.

Dichos resonadores presentan la ventaja acústica adicional de proporcionar reflexiones en diferentes direcciones a medias y altas frecuencias, es decir, de crear difusión del sonido. Como se verá en el capítulo 5, la existencia de difusión es vital para que la acústica de una sala de conciertos sea óptima.

Este tipo de resonador es frecuentemente utilizado para eliminar los modos propios más significativos existentes en salas pequeñas, como por ejemplo locutorios o estudios de grabación, causantes del denominado efecto de coloración (apartado 1.15.5). También se usa en aquellas salas grandes que disponen de un sistema de resonancia asistida como parte integrante de las mismas (apartado 6.3.1).

Por último, mencionar que el hecho de que estos resonadores puedan rerradiar sonido cuando son excitados por una onda sonora, ha llevado tradicionalmente a la conclusión errónea de que pueden producir un efecto destacado de amplificación. Ya en la antigüedad, el arquitecto romano Vitruvio justificaba la utilización de vasijas de barro con cuellos más bien estrechos situadas entre los asientos de los teatros, afirmando que amplificaban el sonido y mejoraban la inteligibilidad de la palabra.

Con los conocimientos actuales, se puede asegurar con toda certeza que el sonido rerradiado únicamente es perceptible en los puntos más próximos al resonador (distancia máxima

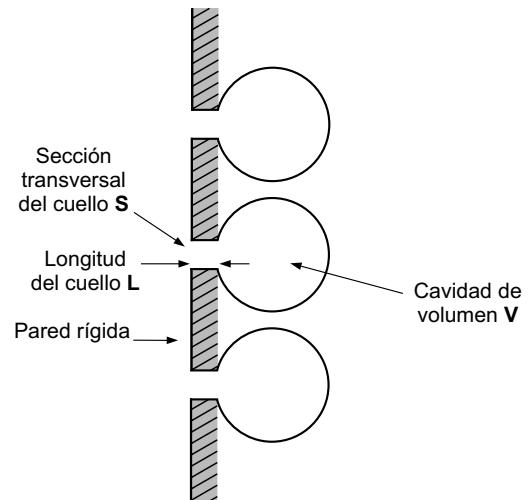


Fig. 2.37 Esquema básico de una agrupación de resonadores simples de cavidad (Helmholtz) montados en una pared

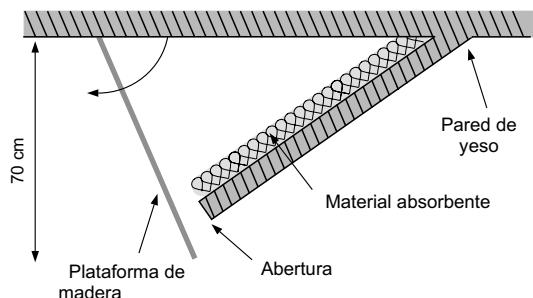


Fig. 2.38 Corte transversal del tipo de resonador simple de cavidad (Helmholtz) instalado en la Berlin Philharmonie (Alemania)



Fig. 2.39 Vista del techo de la Berlin Philharmonie (Alemania) con los resonadores simples de cavidad (Helmholtz) incorporados

aproximada = 0,5 m). Por lo tanto, al igual que sucede con los resonadores de membrana, este tipo de resonadores sólo se utiliza cuando es preciso disponer de una absorción más o menos selectiva en una determinada banda de bajas frecuencias.

2.2.5.3 Resonador múltiple de cavidad (Helmholtz) a base de paneles perforados o ranurados

Está formado por un panel de un material no poroso y rígido de espesor D, en el que se han practicado una serie de perforaciones circulares o ranuras, montado a una cierta distancia “d” de una pared rígida, a fin de dejar una cavidad cerrada de aire entre ambas superficies.

En la figura 2.40 se representa un esquema básico de este tipo de resonador.

Partiendo de la base de que, a las frecuencias de diseño normalmente bajas, se cumple que:

$$d \ll \lambda$$

el resonador múltiple de cavidad puede ser considerado de cualquiera de las siguientes maneras:

- Como un resonador de membrana en el que la masa del panel ha sido sustituida por la masa del aire contenido en

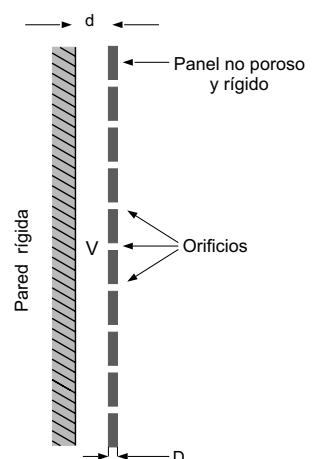


Fig. 2.40 Esquema básico de un resonador múltiple de cavidad (Helmholtz) a base de paneles perforados o ranurados

cada perforación o ranura. En este caso, es precisamente dicho aire, y no el panel, el que entra en vibración cuando una onda sonora incide sobre el elemento.

- Como un conjunto de resonadores simples de Helmholtz que comparten una misma cavidad. Dicha cavidad actúa a modo de elemento acoplador entre los diferentes orificios practicados.

La expresión teórica para el cálculo de la frecuencia de resonancia f_0 es análoga a la correspondiente al resonador simple, es decir:

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{S}{DV}} \text{ (en Hz)}$$

donde:

S = suma de las secciones transversales de los orificios (en cm^2)

D = espesor del panel (coincide con la longitud de los orificios) (en cm)

V = volumen de la cavidad (en cm^3)

Ahora bien:

$$V = S_p d$$

siendo:

S_p = superficie del panel (en cm^2)

d = distancia del panel a la pared rígida (en cm)

97

Sustituyendo dicho valor en la expresión de f_0 , se obtiene la siguiente nueva expresión:

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{S}{DS_p d}}$$

o también:

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{p}{Dd}}$$

donde:

$p = S/S_p$ = porcentaje de perforación del panel (en tanto por uno)

Por otra parte, al igual que en el caso del resonador simple, la longitud efectiva de los orificios es mayor que la real D (espesor del panel), debido a que la masa efectiva del aire contenido en los mismos es también mayor que la masa que les correspondería por el volumen que ocupan.

La expresión final para el cálculo de f_0 es, pues:

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{p}{D'd}}$$

En la práctica se utilizan dos tipos de resonadores múltiples de cavidad: los que disponen de un panel con perforaciones circulares y los que presentan un panel con ranuras. A continuación se detallan las expresiones de p y D' correspondientes a cada tipo.

a) Panel perforado

En el caso de que las perforaciones circulares estén distribuidas uniformemente sobre el panel, el porcentaje de perforación p se obtiene a través de la expresión:

$$p = \frac{\pi a^2}{D_1 D_2}$$

donde tanto a (radio de las perforaciones) como D_1 y D_2 se expresan en cm (figura 2.41).

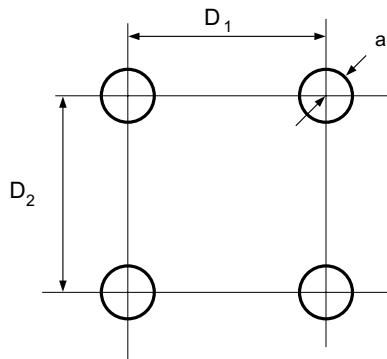


Fig. 2.41 Detalle de un tramo unitario de un panel perforado con indicación de sus dimensiones características

En cuanto a la longitud efectiva de las perforaciones D' , su expresión es la siguiente:

$$D' = D + 1,6a \text{ (en cm)}$$

b) Panel ranurado

En el caso de que existan ranuras y también estén distribuidas uniformemente sobre el panel, el porcentaje de perforación p se obtiene a través de la expresión:

$$p = \frac{a_1 a_2}{D_1 D_2}$$

donde tanto a_1 y a_2 (dimensiones de las ranuras) como D_1 y D_2 se expresan en cm (figura 2.42).

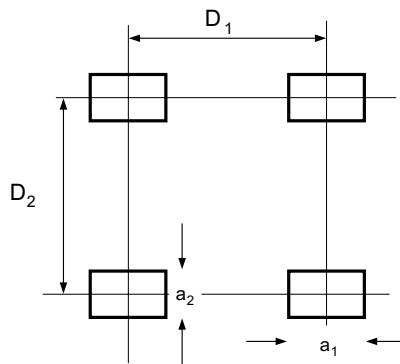


Fig. 2.42 Detalle de un tramo unitario de un panel ranurado
con indicación de sus dimensiones características

Por lo que se refiere a la longitud efectiva de las perforaciones D' , su expresión es la siguiente:

$$D' = D + 1,6a_{eq} \text{ (en cm)}$$

donde a_{eq} es el radio equivalente de las ranuras:

$$a_{eq} = \sqrt{\frac{a_1 a_2}{\pi}} \text{ (en cm)}$$

Por otra parte, debido al efecto de acoplamiento entre los diferentes orificios (perforaciones circulares o ranuras), este tipo de resonador es menos selectivo que el resonador simple, es decir, la curva de absorción en función de la frecuencia es más amplia.

En cuanto a su grado de absorción en función de la frecuencia, por regla general aumenta cuando la cavidad se rellena parcial o totalmente con un material absorbente del tipo lana de vidrio o lana mineral. Además, el hecho de añadir dicho material produce un aumento aparente del volumen de la cavidad y, por consiguiente, una disminución de la frecuencia de resonancia.

A modo de ejemplo numérico, en la figura 2.43 se muestra la absorción de un resonador múltiple formado por un panel de cartón-yeso de 13 mm de espesor, perforado en un 18% y separado una distancia de 100 mm de la pared rígida. Se presentan dos curvas de absorción: una corresponde al resonador sin absorbente en la cavidad, y la otra pertenece al mismo resonador, pero con lana de vidrio de 80 mm de espesor en dicha cavidad. La frecuencia de resonancia f_0 teórica del resonador sin absorbente es de 550 Hz.

De su observación se desprende lo siguiente:

- Existe una buena concordancia entre el valor calculado de la frecuencia de resonancia f_0 y el valor real medido.
- Cuando la cavidad se rellena parcialmente con lana de vidrio, la absorción aumenta en todas las bandas de frecuencias y el valor medido de f_0 disminuye prácticamente a la mitad.

En general, cuando se utiliza un resonador múltiple de cavidad resulta aconsejable llenar la cavidad de aire existente con un material absorbente. De esta forma, se obtiene un mayor grado de absorción a todas las frecuencias.

Por otro lado, la colocación exacta del material absorbente dentro de la cavidad también influye en la forma de la curva de absorción final. Cuando el absorbente se sitúa inmediatamente detrás del panel, la absorción es relativamente poco selectiva, y a medida que dicho material se va separando del mismo, la curva se va estrechando. La absorción más selectiva se obtiene cuando el absorbente se coloca sobre la pared rígida.

En la figura 2.44 se muestran dos curvas genéricas correspondientes a las dos situaciones extremas: con el material absorbente situado justo detrás del panel y con el mismo colocado sobre la pared.

Por consiguiente, siempre que se pretenda obtener una curva de absorción menos selectiva, es preceptivo colocar el material absorbente justo detrás del panel perforado o ranurado.

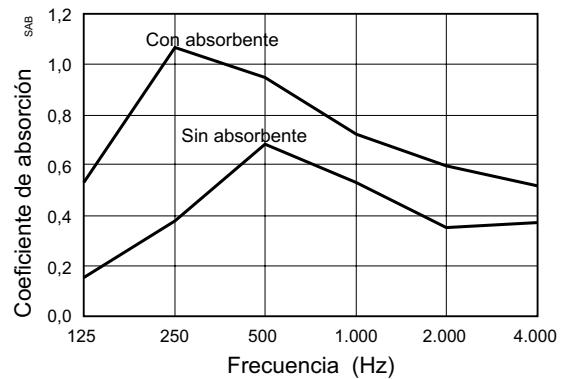
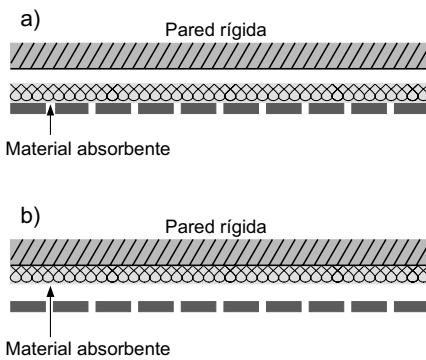


Fig. 2.43 Coeficientes de absorción de un resonador múltiple de cavidad formado por un panel de cartón-yeso de 13 mm de espesor, perforado en un 18% y separado una distancia de 100 mm de la pared rígida (sin absorbente en la cavidad y con lana de vidrio de 80 mm)

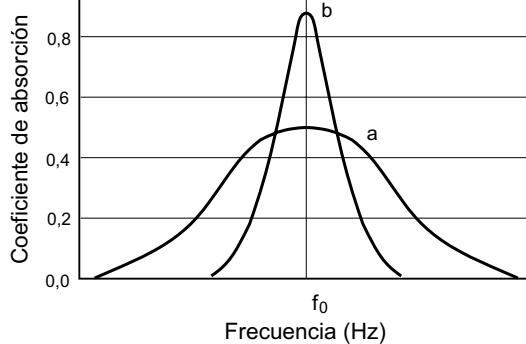


Fig. 2.44 Coeficientes de absorción genéricos de un resonador múltiple: a) con el material absorbente en contacto con el panel; b) con el material adosado a la pared rígida

Hasta este punto se ha descrito el comportamiento de un resonador múltiple partiendo de la definición inicial de que la distancia del panel a la pared es constante, así como del supuesto de que la distribución de las perforaciones o ranuras sobre el mismo es totalmente uniforme.

En todos los casos expuestos, la curva de absorción presenta una frecuencia de resonancia para la cual la absorción es máxima, es decir, el resonador se comporta como un absorbente selectivo.

En el caso de que se pretenda conseguir un comportamiento más parecido al de un material absorbente (apartado 2.2.4), es preciso proceder de una de las siguientes maneras :

- Rompiendo la mencionada uniformidad a base de utilizar paneles con perforaciones o ranuras de diferentes dimensiones. Ello significa que la masa de aire contenida en cada orificio deja de ser constante.
- Haciendo que la distancia del panel a la pared sea variable a base de montarlo con una inclinación adecuada. Ello significa que la rigidez del aire de la cavidad varía, ya que es inversamente proporcional a dicha distancia.
- Aumentando ostensiblemente el porcentaje de perforación del panel.

En los dos primeros casos, el cambio de comportamiento absorbente se justifica considerando que las alteraciones de masa o de rigidez del aire dan lugar a la aparición de un gran número de frecuencias de resonancia de valores muy dispares.

En la figura 2.45 se dan dos ejemplos ilustrativos consistentes en un resonador múltiple formado por dos tramos de panel perforado con lana mineral en su parte posterior, dis-

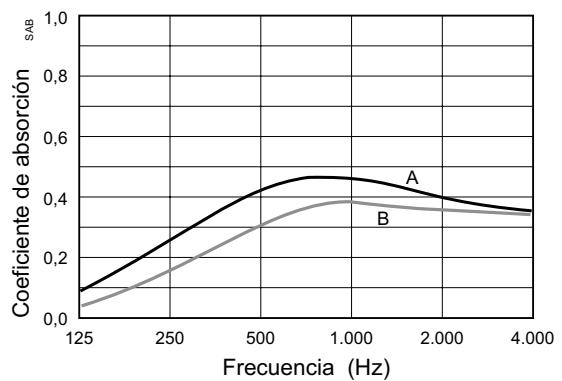
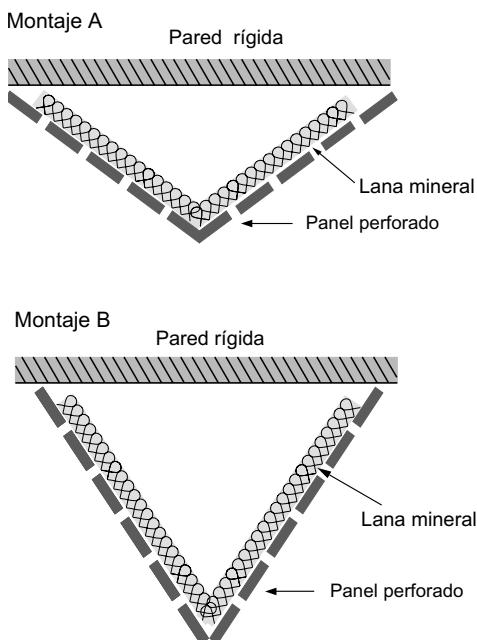


Fig. 2.45 Ejemplos de resonador múltiple formado por dos tramos de panel perforado con lana mineral en su parte posterior junto con sus correspondientes curvas de absorción

puestos con dos inclinaciones diferentes. Asimismo se dan sus correspondientes curvas de absorción.

Se observa que, en efecto, la absorción es mucho menos selectiva, especialmente en el montaje B.

En el tercer caso (incremento del porcentaje de perforación del panel), la absorción a frecuencias medias y altas aumenta de forma paulatina, es decir, su comportamiento tiende a aproximarse progresivamente al de un material absorbente. Ello es lógico, pues en el caso límite de un 100% de perforación, el resonador dejaría de existir.

A modo de ejemplo, en la figura 2.46 se observa la evolución del grado de absorción en función del porcentaje de perforación de un resonador múltiple formado por un panel de madera de 17 mm de espesor con perforaciones de 8 mm de diámetro, separado 100 mm de la pared y provisto de una lana de vidrio de 60 mm en contacto con el panel. En concreto, los porcentajes de perforación considerados son: 5%, 12% y 19%.

Además del incremento de absorción a medias y altas frecuencias con el porcentaje de perforación, se puede observar el aumento de la frecuencia de resonancia. Ello es lógico si se tiene en cuenta que, como se ha visto anteriormente, f_0 es directamente proporcional a la raíz cuadrada de dicho porcentaje.

Analizado bajo otro punto de vista, y según lo comentado en el apartado 2.2.4.7, la existencia de un panel perforado o ranurado delante de un material absorbente puede ser considerada como una forma de protección de dicho material. Obviamente, dicha protección produce un efecto negativo en relación con la absorción propia del material absorbente, ya que da lugar a una pérdida de absorción a altas frecuencias. Sin embargo, con la creación del sistema resonante se consigue un cierto incremento de absorción a la frecuencia de resonancia (habitualmente se trata de una frecuencia baja o media), en comparación con la del material sin protección.

Como ejemplo ilustrativo, en la figura 2.47 se presentan las curvas de absorción de una lana de vidrio de 50 mm de espesor montada sobre hormigón, sin

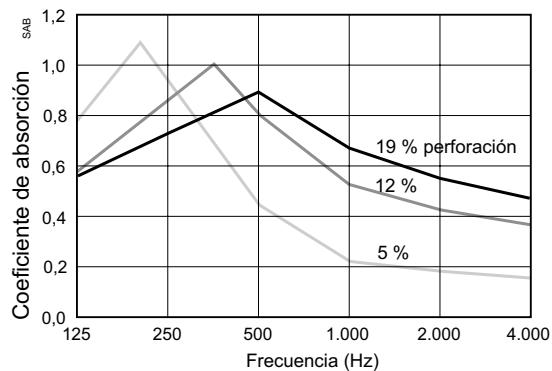


Fig. 2.46 Coeficientes de absorción correspondientes a un resonador múltiple formado por un panel de madera de 17 mm de espesor con perforaciones de 8 mm de diámetro, separado 100 mm de la pared y provisto de una lana de vidrio de 60 mm en contacto con el panel. Porcentajes de perforación: 5%, 12% y 19%

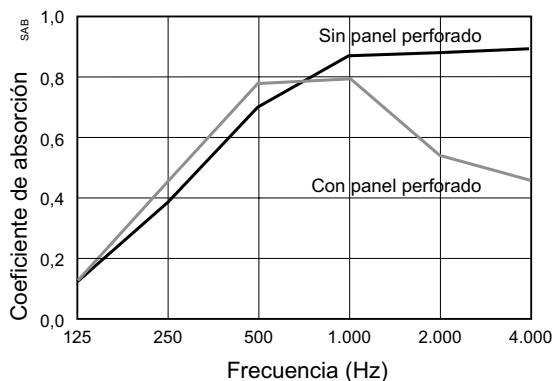


Fig. 2.47 Coeficientes de absorción correspondientes a una lana de vidrio de 50 mm de espesor montada sobre una pared rígida: a) sin protección; b) cubierta con un panel perforado de 5 mm de espesor con un porcentaje de perforación del 14 %

protección y cubierta con un panel perforado de 5 mm de espesor con un porcentaje de perforación del 14 %.

Según se puede observar, cuando el material absorbente se recubre con el panel, el coeficiente de absorción disminuye apreciablemente a partir de 1 kHz y, en cambio, aumenta alrededor de los 500 Hz (frecuencia próxima a la de resonancia).

Los paneles perforados o ranurados integrantes de los resonadores múltiples de cavidad suelen ser de alguno de los siguientes materiales:

- madera
- cartón-yeso
- chapa metálica
- ladrillo

En las figuras 2.48 a 2.51 se muestran diversos resonadores comerciales que utilizan alguno de los mencionados materiales.

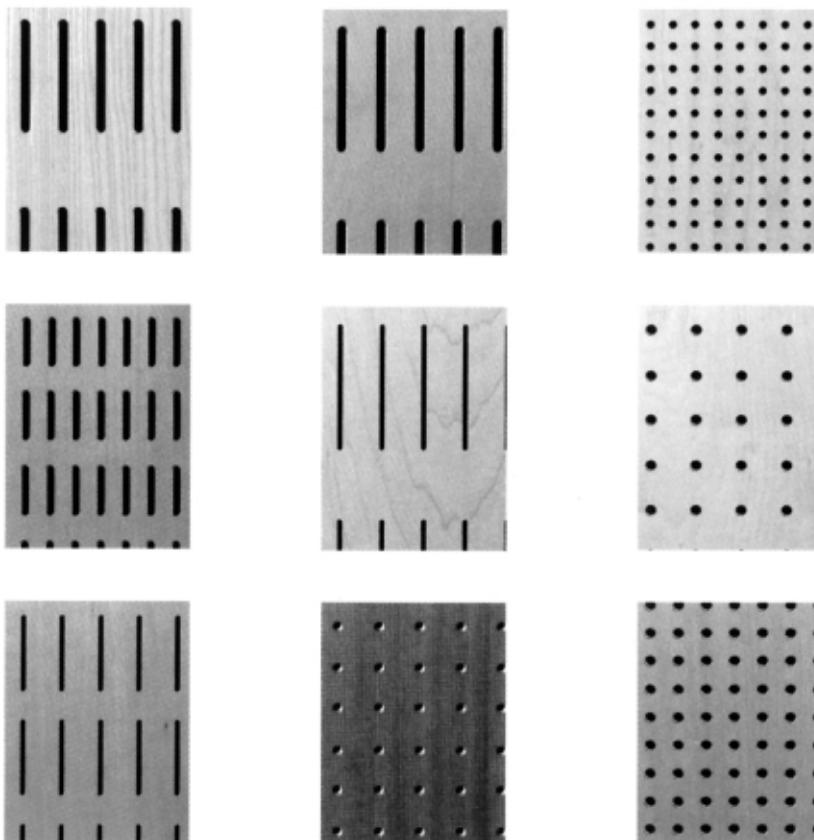


Fig. 2.48 Resonadores a base de paneles de madera perforados y ranurados (paneles Obersound, distribuidos por C.i.C.S. Cortines i Control Solar, S.L.)

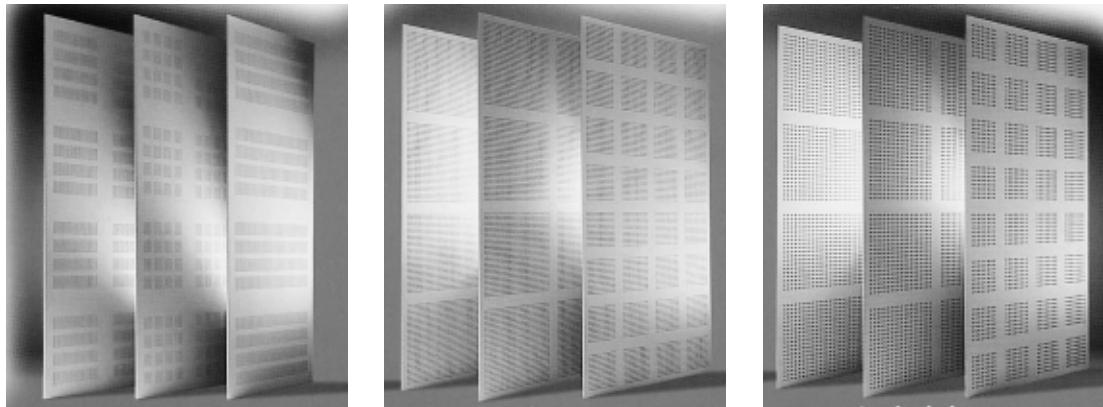


Fig. 2.49 Resonadores a base de placas de cartón-yeso perforadas y ranuradas
(Knauf Delta, Knauf GmbH Sucursal en España)

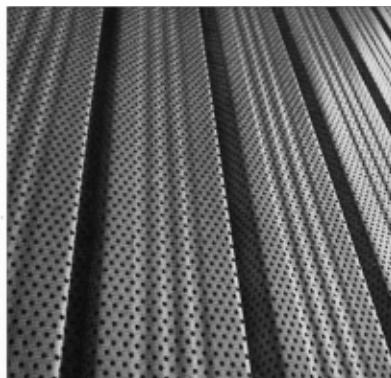


Fig. 2.50 Resonador a base de chapa metálica nervada, prelacada y perforada (Panel Antison-I, Acieroid, S.A.)



Fig. 2.51 Resonadores a base de ladrillos perforados y ranurados (modelos BMA, Phonbric,
Brique acoustique y Phoniceram, de Guiraud Frères, distribuidos por Cerámicas del Ter, S.A.)

Finalmente, es preciso tener presente que los paneles utilizados como parte integrante de los resonadores múltiples de cavidad sólo podrán ser pintados en el caso de que exista la absoluta seguridad de que las perforaciones circulares o ranuras no resultarán obstruidas. De lo contrario, el grado de absorción se verá fuertemente reducido.

2.2.5.4 Resonador múltiple de cavidad (Helmholtz) a base de listones

Está formado por un conjunto de listones de espesor D equiespaciados y montados a una cierta distancia “d” de una pared rígida con objeto de dejar interpuesta una cavidad cerrada de aire.

En la figura 2.52 se representa un esquema básico de este tipo de resonador.

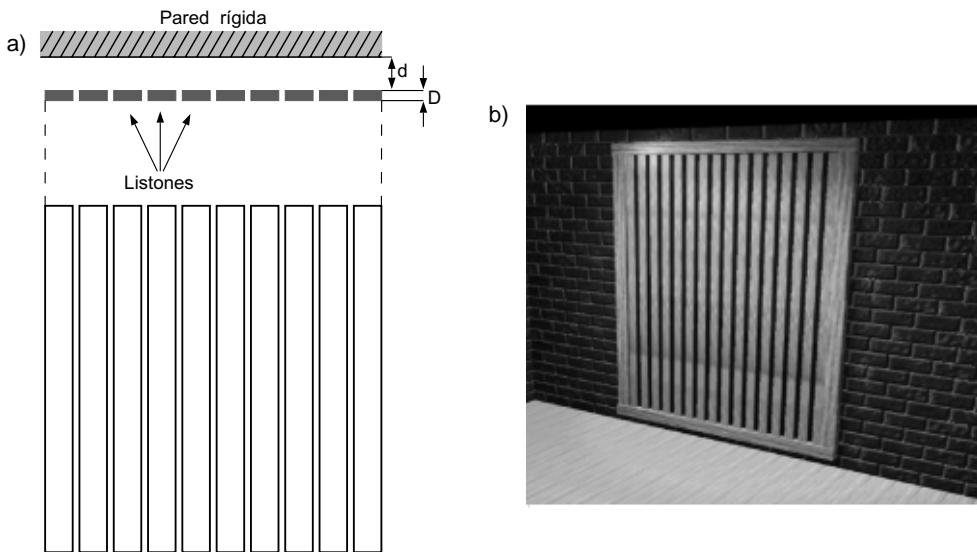


Fig. 2.52 Resonador múltiple de cavidad (Helmholtz) a base de listones: a) esquema básico; b) imagen virtual

Este tipo de resonador es parecido al resonador múltiple a base de paneles, con la diferencia de que, en este caso, la masa que se debe considerar es la del aire contenido en los espacios intermedios entre listones.

La expresión teórica para el cálculo de la frecuencia de resonancia f_0 es análoga a la correspondiente al resonador múltiple a base de paneles. Por lo tanto:

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{S}{DV}} \text{ (en Hz)}$$

donde:

S = suma de las secciones transversales de las zonas entre listones ocupadas por el aire (en cm^2)

D = espesor de un listón (coincide con la longitud de la mencionada zona) (en cm)

V = volumen de la cavidad (en cm^3)

Ahora bien:

$$V = S_p d$$

siendo:

S_p = superficie de los listones + superficie de las zonas entre listones (en cm^2)

d = distancia de los listones a la pared rígida (en cm)

Sustituyendo dicho valor en la expresión de f_0 , resulta:

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{S}{DS_p d}}$$

o también:

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{p}{Dd}}$$

donde p es el porcentaje de superficie abierta (en tanto por uno):

$$p = \frac{S}{S_p} = \frac{r}{r + w}$$

donde:

r = separación entre listones (en cm)

w = anchura del listón (en cm)

Por otro lado, la longitud efectiva de las zonas entre listones D' es mayor que la real D (espesor del panel), debido a que la masa efectiva del aire contenido en las mismas es también mayor que la masa que les correspondería por el volumen que ocupan. En concreto:

$$D' = 1,2 D \text{ (en cm)}$$

Sustituyendo p por $r/(r + w)$ y D por $1,2D$ en la expresión de f_0 , se obtiene la siguiente expresión final para el cálculo de f_0 :

$$f_0 = 5002 \sqrt{\frac{r}{Dd(r + w)}} \text{ (en Hz)}$$

Por otra parte, el comportamiento de este tipo de resonador es totalmente equivalente al del resonador múltiple a base de paneles en cuanto a:

- las características de absorción con y sin material absorbente en la cavidad: al llenar parcial o totalmente la cavidad de aire con un material absorbente, la absorción aumenta a todas las frecuencias y la frecuencia de resonancia f_0 disminuye,
- la influencia en la forma de la curva de absorción de la ubicación concreta del material absorbente dentro de la cavidad: cuando el absorbente se sitúa inmediatamente detrás de los listones, la absorción es relativamente poco selectiva, y a medida que dicho mate-

rial se va separando de los mismos, la curva se va estrechando. La absorción más selectiva se obtiene cuando el absorbente se coloca sobre la pared rígida,

- la obtención de una curva de absorción mucho menos selectiva a base de modificar la estructura del resonador. En este caso, las posibles modificaciones consisten en variar la distancia entre listones consecutivos (figura 2.53a), o entre los listones y la pared a base de montarlos con una cierta inclinación (figura 2.53b), o bien, incrementando apreciablemente el porcentaje de superficie abierta.

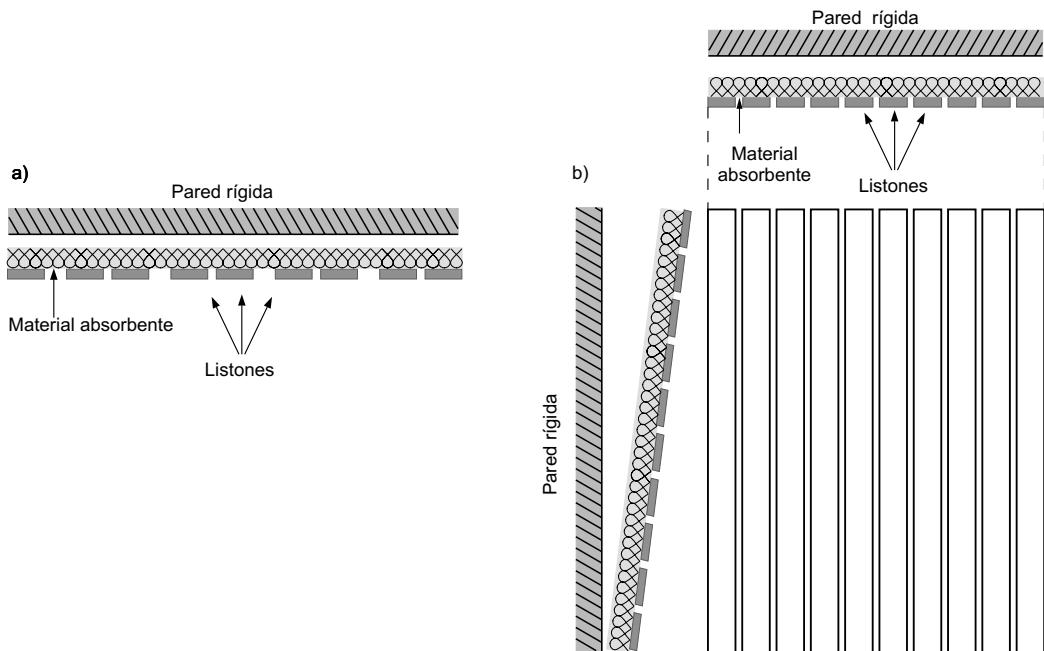


Fig. 2.53 Resonador múltiple a base de: a) listones no equiespaciados; b) listones equiespaciados con cavidad de aire de profundidad variable

Con objeto de comprobar que efectivamente la absorción a frecuencias medias y altas producida por este tipo de resonadores aumenta con el porcentaje de superficie abierta, en la figura 2.54 se presentan las curvas correspondientes a dos resonadores con un porcentaje de un 50% (curva 2) y un 14% (curva 3), respectivamente. A efectos comparativos, también se muestra la curva de absorción de la lana de roca utilizada en ambos resonadores (curva 1) y la de un resonador de membrana formado por un panel de las mismas características que los listones (curva 4).

De su observación se desprende lo siguiente:

- Los elementos absorbentes más selectivos son el resonador múltiple con un porcentaje de superficie abierta del 14% (curva 3) y el resonador de membrana (curva 4).
- El elemento más absorbente a altas frecuencias es la lana de roca (curva 1).

- El resonador múltiple con un porcentaje de superficie abierta del 50% (curva 2) tiende a comportarse a altas frecuencias como la lana de roca.

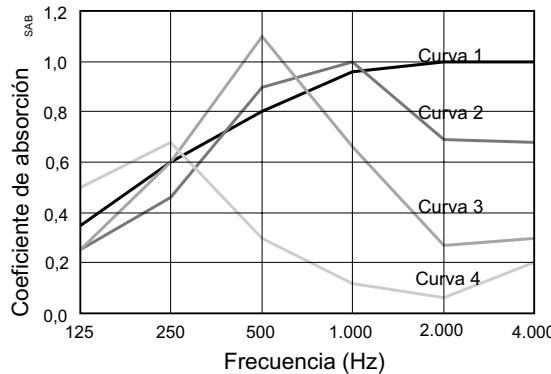


Fig. 2.54 Coeficientes de absorción en función de la frecuencia de los siguientes elementos: lana de roca de 45 mm sobre pared rígida (curva 1); resonador múltiple a base de listones de 12 mm de espesor, con un porcentaje de superficie abierta del 50%, separados 50 mm de la pared y con lana de roca de 45 mm en la cavidad (curva 2); ídem que 2, pero con un porcentaje de superficie abierta del 14% (curva 3); resonador de membrana formado por un panel de 12 mm de espesor, separado 50 mm de la pared y con lana de roca de 45 mm en la cavidad (curva 4)

2.2.6 Absorción del público y de las sillas

El grado de reverberación asociado a un recinto cualquiera viene principalmente determinado por los materiales absorbentes utilizados como revestimientos de sus superficies así como, y de forma muy notoria, por la absorción producida por el público y las sillas existentes.

Si se considera que el público se halla más o menos disperso, como es el caso de los usuarios de un polideportivo o de una estación de ferrocarril, en lugar de hacer uso del coeficiente de absorción unitario α (es decir, absorción por m^2), se suele utilizar la absorción por persona A_{pp} (en sabins). En tal caso, la absorción total del público A_p es:

$$A_p = N A_{pp} \text{ (en sabins)}$$

donde:

N = número de personas

A_{pp} = absorción de una persona, de pie o sentada (en sabins)

La absorción total A_{tot} del recinto considerado se obtiene sumando este término con la absorción producida por sus superficies límite:

$$A_{tot} = \sum_i S_i \alpha_i + A_p$$

donde:

Σ = símbolo de sumatorio

S_i = superficie “i”

α_i = coeficiente de absorción de la superficie “i”

En el caso de que interesase asignar al público un coeficiente de absorción unitario α_p , simplemente sería preciso dividir A_p por la superficie ocupada por el mismo S_p :

$$\alpha_p = \frac{A_p}{S_p}$$

En cuanto a la absorción producida por el público, ésta se debe principalmente al tipo de ropa utilizada y a su grado de porosidad. Debido a que la ropa no suele ser muy gruesa, la absorción a bajas frecuencias es relativamente pequeña, mientras que aumenta a frecuencias medias y altas. Por otra parte, el hecho de que la vestimenta difiera entre individuos hace que sólo sea posible disponer de valores promediales de absorción. Dichos valores suelen variar en función del autor que los proporciona y, además, pueden sufrir alteraciones con el paso del tiempo debido a cambios en la moda dominante.

A modo de ejemplo, en la tabla 2.2 se indican algunas absorciones (en sabins) calculadas por Kath y Kuhl.

FRECUENCIA (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Persona de pie con abrigo	0,17	0,41	0,91	1,30	1,43	1,47
Persona de pie sin abrigo	0,12	0,24	0,59	0,98	1,13	1,12
Músico sentado con instrumento	0,60	0,95	1,06	1,08	1,08	1,08

109

Tabla 2.2 Ejemplos de absorción de una persona A_{pp} , en sabins (según Kath y Kuhl)

Se observa que, efectivamente, la absorción a bajas frecuencias es escasa y que se produce un notable incremento de la absorción a medida que la frecuencia aumenta.

Si ahora se considera la disposición habitual del público en salas destinadas a actos o espectáculos públicos (como, por ejemplo: salas de conferencias, teatros, salas de conciertos, etc.), en las que las personas se hallan siempre sentadas de forma agrupada, resulta más correcto utilizar coeficientes de absorción unitarios (por m^2), en lugar de la absorción por persona. En tal caso, se usan dos conjuntos de coeficientes de absorción en función de la frecuencia: los correspondientes a las sillas ocupadas y los asociados a las sillas vacías. Ello es debido a que las sillas, por sí mismas, presentan una notable absorción que hay que tener siempre en cuenta.

El motivo de este cambio de planteamiento en el cálculo de la absorción es que, según verificaron Kosten y Beranek, la absorción de las sillas (vacías u ocupadas) aumenta en proporción directa a la superficie que ocupan, casi con total independencia del número de las mismas existente en dicha superficie. Esta afirmación es válida siempre y cuando el espacio ocupado por cada silla oscile entre 0,45 y 0,79 m^2 (situación habitual en la práctica).

La absorción total de las sillas A_s se calcula de la siguiente forma:

$$A_s = S_A \alpha_s \text{ (en sabins)}$$

donde:

S_A = superficie acústica efectiva ocupada por las sillas (en m²): formada por la superficie real S_s ocupada por las mismas + la superficie total de las bandas perimetrales de 0,5 m de anchura que bordean los diferentes bloques de sillas (exceptuando las zonas contiguas a una pared)

α_s = coeficiente de absorción unitario de las sillas, vacías u ocupadas

En la figura 2.55 se muestra un ejemplo de cómo calcular S_A .

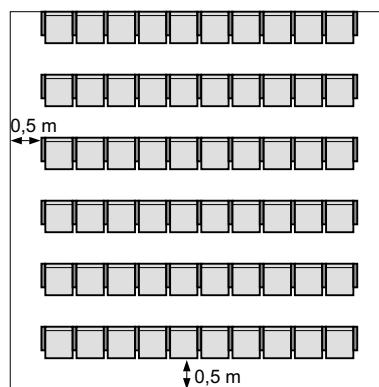


Fig. 2.55 Superficie acústica efectiva S_A ocupada por las sillas, calculada a partir de la superficie real S_s y de la banda perimetral de anchura 0,5 m

Al igual que en el caso anterior, la absorción total A_{tot} del recinto considerado se obtiene sumando A_s con la absorción producida por sus superficies límite:

$$A_{tot} = \sum_i S_i \alpha_i + A_s$$

Recientemente, Beranek (1.996) ha publicado nuevos valores de coeficientes de absorción, que ha determinado a partir de mediciones realizadas en una serie de salas existentes. Los nuevos datos corresponden a tres tipos de sillas, en función del grado de tapizado. Los valores correspondientes a las sillas difieren ostensiblemente de los publicados con anterioridad y son de gran valor a la hora de plantear el diseño de nuevos recintos.

Los tres tipos de sillas considerados son:

- Sillas con un alto porcentaje de superficie tapizada
- Sillas con un porcentaje medio de superficie tapizada
- Sillas con un bajo porcentaje de superficie tapizada

Los nuevos coeficientes de absorción propuestos, tanto en el caso de silla vacía como ocupada, se muestran en las tablas 2.3 y 2.4, respectivamente.

FRECUENCIA (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Sillas con un alto porcentaje de superficie tapizada	0,72	0,79	0,83	0,84	0,83	0,79
Sillas con un porcentaje medio de superficie tapizada	0,56	0,64	0,70	0,72	0,68	0,62
Sillas con un bajo porcentaje de superficie tapizada	0,35	0,45	0,57	0,61	0,59	0,55

Tabla 2.3 Coeficientes de absorción de sillas vacías (según Beranek, 1.996)

FRECUENCIA (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Sillas con un alto porcentaje de superficie tapizada	0,76	0,83	0,88	0,91	0,91	0,89
Sillas con un porcentaje medio de superficie tapizada	0,68	0,75	0,82	0,85	0,86	0,86
Sillas con un bajo porcentaje de superficie tapizada	0,56	0,68	0,79	0,83	0,86	0,86

Tabla 2.4 Coeficientes de absorción de sillas ocupadas (según Beranek, 1.996)

Según se puede apreciar:

- A todas las frecuencias existe un aumento de absorción al pasar de silla vacía a ocupada.
- La absorción de la sillas ocupadas aumenta con el porcentaje de superficie tapizada, en especial a bajas frecuencias.
- En general, la absorción aumenta con la frecuencia hasta llegar a la frecuencia de 1 kHz. A partir de dicha frecuencia, y en el caso de las sillas vacías, la absorción disminuye, debido probablemente a un efecto de sombra producido por las mismas sillas. Tal efecto es especialmente notorio a altas frecuencias, puesto que las sillas prácticamente no producen difracción del sonido (apartado 2.3.1).

En la tabla 2.5 se indican las diferencias entre los valores promediales correspondientes a las sillas ocupadas y vacías, a bajas (125 Hz - 250 Hz), medias (500 Hz - 1 kHz) y altas frecuencias (2 kHz - 4 kHz).

DESCRIPCIÓN	BAJAS FRECUENCIAS (125 Hz – 250 Hz)	FRECUENCIAS MEDIAS (500 Hz – 1 kHz)	ALTAS FRECUENCIAS (2 kHz – 4 kHz)
Sillas con un alto porcentaje de superficie tapizada	0,04	0,06	0,09
Sillas con un porcentaje medio de superficie tapizada	0,11	0,13	0,16
Sillas con un bajo porcentaje de superficie tapizada	0,22	0,22	0,29

Tabla 2.5 Diferencias entre los coeficientes de absorción medios de sillas ocupadas y vacías

Según se observa, las diferencias más notables corresponden a las sillas con menor porcentaje de superficie tapizada y, en concreto, a altas frecuencias (diferencia de 0,29). Las diferencias menores tienen lugar para las sillas con un porcentaje más elevado de superficie tapizada y, concretamente, a bajas frecuencias (0,04).

En las figuras 2.56 a 2.58 se muestran tres ejemplos de sillas con diferentes grados de superficie tapizada.



Fig. 2.56 Silla con un elevado porcentaje de superficie tapizada
(modelo Clásica de Figueras International Seating, S.A.)





Fig. 2.58 Silla con un bajo porcentaje de superficie tapizada
(modelo Carmen de Figueras International Seating, S.A.)

Las sillas, tanto vacías como ocupadas, no sólo absorben una parte importante de la energía correspondiente a las ondas sonoras incidentes, sino que también producen una atenuación de las ondas que se propagan paralelamente por encima de las mismas. Es el denominado “seat dip”, tratado en el siguiente apartado.

113

2.2.7 Incidencia rasante. Efecto “seat dip”

Cuando el sonido generado en el escenario de un recinto se propaga por encima del área altamente absorbente ocupada por las sillas (con o sin público) y el ángulo de incidencia es pequeño (incidencia rasante), tiene lugar una absorción de dicho sonido.

Dicho efecto recibe el nombre de “seat dip” y se caracteriza por una fuerte absorción (entre 10 y 20 dB) en la banda de frecuencias comprendida entre 100 y 300 Hz. Como valores más habituales, se pueden tomar los siguientes:

Máxima atenuación = 15 dB

Frecuencia de máxima atenuación = 125 Hz

En la figura 2.59 se ilustra dicha atenuación medida por Schultz y Watters en una sala real.

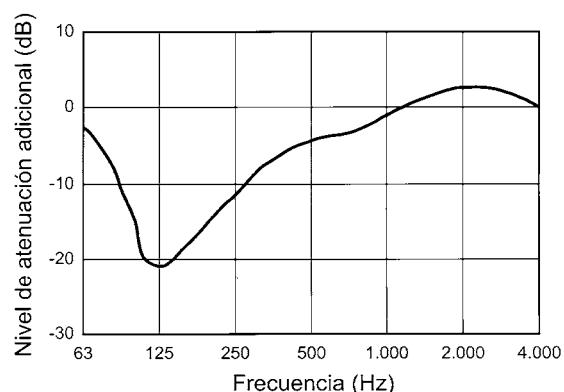


Fig. 2.59 Atenuación adicional del sonido sobre la zona ocupada por las sillas en relación con la debida exclusivamente a la distancia (ley cuadrática inversa, apartado 1.14)

Esta atenuación se pone de manifiesto en cuanto el sonido se ha propagado por encima de las primeras filas, y se mantiene constante con independencia del número de filas existentes en la sala. Según parece, la causa de dicha atenuación es la existencia de resonancias horizontales y verticales entre filas consecutivas, que produce un efecto de cancelación por interferencia destructiva.

Según Bradley, la estrategia a seguir para atenuar dicho efecto consiste en aumentar la altura del escenario o, alternativamente, incrementar la inclinación del área de público hasta que el ángulo formado por el rayo directo y el plano del público sea mayor que 15° . En realidad, cualquiera de las dos actuaciones provoca una disminución de la frecuencia de máxima atenuación, situándose en una banda subjetivamente de menor importancia (figura 2.60).

Según se observa, la frecuencia de máxima atenuación disminuye progresivamente a medida que el ángulo de incidencia aumenta, desde aproximadamente los 180 Hz hasta los 85 Hz.

Por otra parte, el incremento del mencionado ángulo mejora la visual del escenario y, desde un punto de vista práctico, es posible afirmar que si la visión es buena, el sonido en general también lo es.

Paradójicamente, las tres salas de conciertos consideradas como mejores del mundo (apartado 5.5.2.2) disponen de una platea prácticamente sin inclinación y con visuales pobres desde muchas de sus localidades. Bradley ha podido comprobar que, en las tres salas, el efecto “seat dip” aparece alrededor de la frecuencia de 125 Hz, con atenuaciones que oscilan entre los 8 y los 11 dB. Sin embargo, por extraño que pueda parecer, la anomalía existente no ha sido percibida nunca por los espectadores en ninguna de las tres salas, aunque eso sí, los mejores asientos desde un punto de vista acústico son los que tienen una buena visión de toda la orquesta.

El hecho de que el efecto “seat dip” ocurra en todas las salas y que, en cambio, no sea percibido por el público puede ser explicado, según Barron, por la existencia de primeras reflexiones importantes procedentes del techo que compensan la deficiencia energética del sonido directo a bajas frecuencias. Tal compensación es posible debido a que, según parece, el oído es relativamente insensible a la diferencia entre los tiempos de llegada de las componentes de baja frecuencia del sonido directo y de las primeras reflexiones.

De todas formas, el fenómeno de la incidencia rasante y el efecto “seat dip” asociado todavía no son, hoy por hoy, completamente comprendidos.

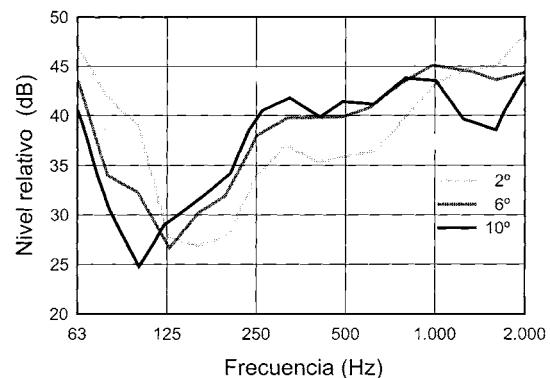


Fig. 2.60 Curvas de respuesta medidas en el centro de la platea de una sala, para tres ángulos de incidencia del sonido procedente del escenario

2.3 Reflexión del sonido

Tal como se ha comentado en la introducción de este capítulo (apartado 2.1), el diseño específico de elementos reflectores posibilita la aparición de reflexiones útiles en la zona de público.

co. Dichos elementos están constituidos por materiales lisos, no porosos y totalmente rígidos capaces de reflejar la mayor parte de la energía sonora que incide sobre ellos.

Ahora bien, no todas las salas precisan de este tipo de reflexiones. De hecho, sólo resultan ser necesarias, y en ocasiones imprescindibles, en salas destinadas a la palabra (teatros y salas de conferencias sin sistema de megafonía) y a la música no amplificada (salas de conciertos de música sinfónica). Es por ello que el diseño de elementos reflectores se expone en los capítulos 4 y 5, dedicados al diseño acústico de teatros y salas de conciertos, respectivamente, mientras que en este apartado se exponen únicamente los conceptos básicos asociados a los mismos.

En primer lugar, al hablar de reflexiones útiles es preciso distinguir precisamente entre salas destinadas a la palabra y salas de conciertos.

En el primer caso, se entiende por reflexiones útiles todas aquéllas que llegan al receptor dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo. Dichas reflexiones, al ser integradas por el oído humano junto con el sonido directo, contribuyen a mejorar la inteligibilidad de la palabra y a incrementar la sonoridad en el punto considerado. Se trata de las denominadas primeras reflexiones, según se ha visto en el capítulo 1.

En el caso de salas de conciertos, la definición anterior sigue siendo válida, con la salvedad de que el intervalo temporal se amplía hasta los 80 ms. La existencia de reflexiones útiles, o primeras reflexiones, contribuye principalmente a un aumento de sonoridad y de claridad musical. Si, además, se trata de reflexiones laterales se produce un incremento del grado de impresión espacial en la sala. Todos estos conceptos se definirán en el apartado 5.2.

En la práctica, cualquier superficie de una sala es susceptible de generar reflexiones más o menos intensas, en función del grado de absorción que presente. La única superficie que teóricamente no generaría reflexiones sería aquélla que estuviese provista de un revestimiento ideal totalmente absorbente a todas las frecuencias ($\alpha = 1$).

Ahora bien, de todas las superficies existentes en un recinto tan sólo algunas de ellas están específicamente diseñadas para generar primeras reflexiones hacia la zona de público, es decir, para actuar como elementos reflectores del sonido. El resto de superficies, con independencia de si se trata de superficies absorbentes o reflectantes, únicamente contribuyen a la obtención de los tiempos de reverberación deseados en cada caso. Incluso en aquellos casos en que la forma y/o la ubicación de las superficies poco absorbentes sean incorrectas, puede ocurrir que aparezcan ecos (apartado 1.15.3), totalmente contraproducentes desde un punto de vista acústico.

2.3.1 Estudio de reflectores. Efecto de difracción del sonido

Retomando el planteamiento efectuado en el apartado 1.15.2 en cuanto al análisis del fenómeno de la reflexión del sonido desde el punto de vista de la acústica geométrica (reflexiones especulares), conviene tener presente que dicho fenómeno sólo se produce de forma completa si la superficie reflectora es lisa y tiene unas dimensiones grandes en comparación con la longitud de onda del sonido considerado.

Por lo tanto, partiendo de un elemento reflector de dimensiones prefijadas y suponiendo que el sonido considerado tiene un contenido espectral amplio, dicho elemento solamente

actuará como tal a partir de una cierta frecuencia. En cambio, a todas aquellas frecuencias para las que se cumpla que las dimensiones del reflector sean menores que las correspondientes longitudes de onda, tendrá lugar un efecto de difracción de la onda sonora incidente. Dicho efecto consiste en un cambio en la dirección de propagación de la onda sonora de manera que, en lugar de ser reflejada, la onda rodea el reflector y sigue su camino como si el elemento no existiese (figura 2.61).

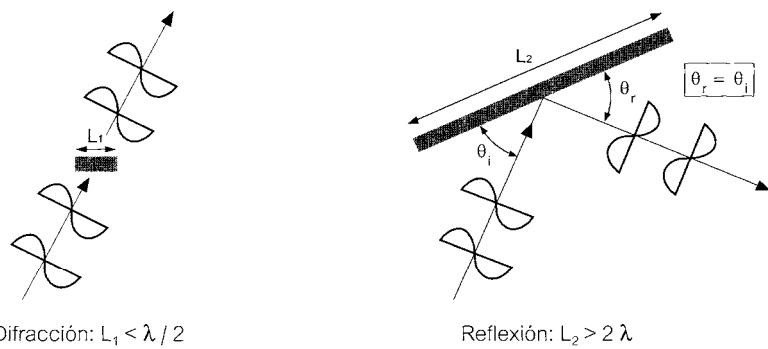


Fig. 2.61 Visualización de los efectos de difracción y reflexión del sonido sobre dos superficies reflectantes de distintas dimensiones para una misma onda sonora de longitud de onda λ

116

En la figura 2.62 se muestra un ejemplo práctico de difracción del sonido motivada por la colocación de un muro delante de una vivienda, a modo de barrera o pantalla acústica de protección frente al ruido.

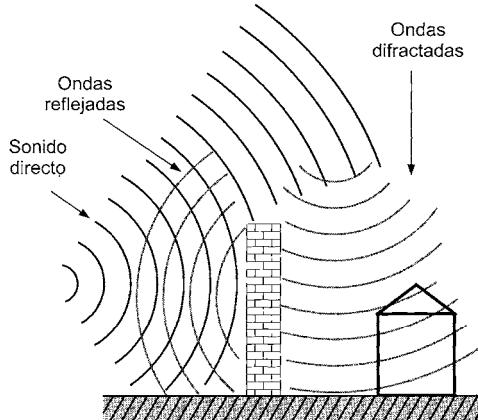


Fig. 2.62 Ejemplo de difracción del sonido alrededor de una barrera acústica instalada delante de una vivienda a modo de protección frente al ruido

La difracción se produce básicamente a bajas frecuencias (sonidos graves) y disminuye gradualmente a medida que la frecuencia aumenta. Ello significa que dichas frecuencias bajas serán las que se percibirán de forma más notoria en la vivienda.

Esta aseveración se puede generalizar de la siguiente manera: la existencia de un obstáculo entre una fuente ruidosa y un receptor atenúa de forma considerable las componentes de alta frecuencia del ruido (agudos), pero no así las de baja frecuencia (graves), que siguen siendo percibidas a menos que las dimensiones del obstáculo sean desmesuradamente grandes.

El fenómeno de la difracción tiene un carácter más general que el que se acaba de exponer, ya que también se presenta cuando una onda atraviesa una abertura de dimensiones pequeñas respecto a la longitud de onda. En tal caso, cuando la onda en cuestión alcanza el extremo de la abertura, tiende a propagarse en todas las direcciones del espacio.

Como muestra de ello, en la figura 2.63 se observa la difracción a la que se ve sujeta una onda que se propaga a través del agua, cuando atraviesa diversas aberturas de tamaño diferente. Cuanto más estrecha es la abertura, mayor grado de difracción existe.

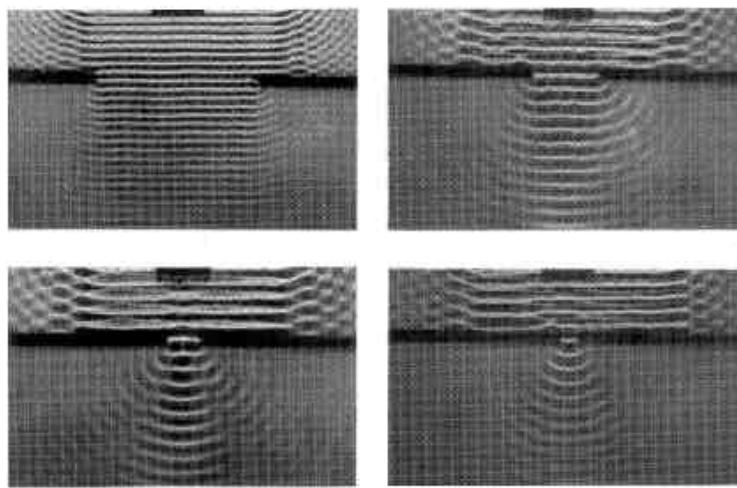


Fig. 2.63 Difracción de una onda que se propaga a través del agua cuando atraviesa aberturas de diferentes tamaños

A continuación se estudia de forma cuantitativa el fenómeno de la difracción a partir de un planteamiento matemático elemental.

2.3.1.1 Reflectores planos

Si bien la teoría de la difracción es compleja, existe un caso concreto que merece ser comentado por su simplicidad. Los resultados aquí presentados se han extraído de un exhaustivo estudio realizado por Rindel en 1.986. Se trata de un reflector plano de dimensiones $A \times B$, separado de las superficies límite de la sala, sobre el cual incide una onda sonora con un ángulo θ , proveniente de una fuente situada a una distancia “ s ” del centro del reflector. El receptor se halla a una distancia “ r ” de dicho centro (figura 2.64).

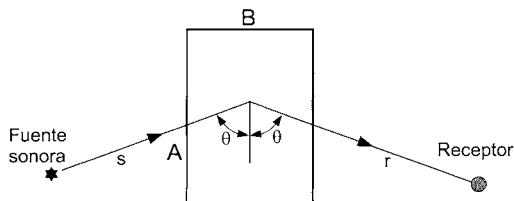
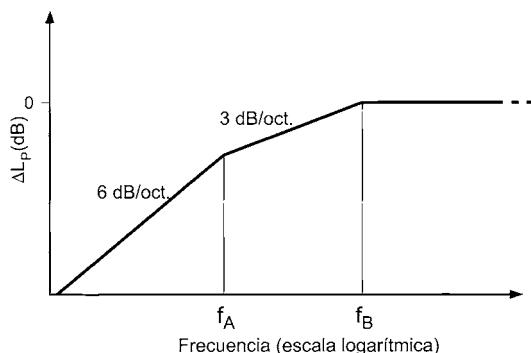


Fig. 2.64 Proceso de reflexión sobre un reflector plano de dimensiones A x B

Por el hecho de ser un reflector finito, se produce un efecto de difracción de la onda sonora incidente. Ello significa que, a partir de una cierta frecuencia, el nivel de presión sonora asociado a la reflexión disminuirá progresivamente a medida que la frecuencia también lo haga, en relación con el que se obtendría si el reflector fuese infinito.

Denominando ΔL_p (en dB) al mencionado decremento de nivel, se puede demostrar que su variación en función de la frecuencia es la representada en la figura 2.65.

Fig. 2.65 Disminución relativa del nivel de presión sonora ΔL_p correspondiente al sonido reflejado por un reflector plano de dimensiones A x B

Las expresiones correspondientes a las frecuencias límite f_A y f_B son las siguientes:

$$f_A = \frac{c}{(1/s + 1/r) B^2 \cos^2 \theta}$$

$$f_B = \frac{c}{(1/s + 1/r) A^2}$$

donde:

s = distancia de la fuente sonora al centro del reflector (en m)

r = distancia del receptor al centro del reflector (en m)

A = longitud del reflector (en m)

B = anchura del reflector (en m)

θ = ángulos de incidencia y reflexión sobre el reflector

c = velocidad del sonido (345 m/s a 22°C)

Según se puede observar:

- Para $f > f_B$, $\Delta L_p = 0$ dB, el reflector se comporta como si fuese infinito, ya que no existe difracción del sonido.
- Para $f_A \leq f \leq f_B$, ΔL_p empieza a disminuir por efecto de la difracción del sonido aparecida como consecuencia de la anchura finita B. En concreto, la disminución es de 3 dB cada vez que la frecuencia se reduce a la mitad (3 dB por octava).
- Para $f < f_A$, ΔL_p disminuye más ostensiblemente por efecto de la difracción del sonido aparecida como consecuencia de la anchura finita B y de la longitud finita A. En este caso, la disminución es de 6 dB cada vez que la frecuencia se reduce a la mitad (6 dB por octava).

En cuanto a las frecuencias límite f_A y f_B , se constata lo siguiente:

- Son inversamente proporcionales al cuadrado de una de las dimensiones del reflector. Por consiguiente, cuanto mayor sea el reflector, menores serán las frecuencias a partir de las cuales existe difracción del sonido (disminución del nivel del sonido reflejado).
- Cuanto menor es la distancia de la fuente y/o el receptor al reflector, más efectivo resulta el reflector, es decir, menores son los valores de las frecuencias límite.
- Cuanto menor es el ángulo de incidencia de la onda sonora con respecto a la normal, menores son los valores de las frecuencias límite.

A partir de la gráfica y de las expresiones anteriores, resulta evidente que es prácticamente imposible evitar la aparición de difracción a frecuencias bajas debido a las limitaciones físicas en cuanto al tamaño máximo de los reflectores. Ello significa que, a dichas frecuencias, los reflectores no pueden actuar plenamente como tales.

A la hora de diseñar reflectores, conviene tener presente las relaciones entre las frecuencias estandarizadas y sus correspondientes longitudes de onda (tabla 2.6).

FRECUENCIA (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000
LONGITUD DE ONDA (m)	2,76	1,38	0,69	0,34	0,17	0,09

Tabla 2.6 Relación entre frecuencias estándar y longitudes de onda asociadas

Un criterio práctico consiste en diseñar los reflectores de manera que trabajen de forma óptima a partir de la banda de frecuencias centrada en 500 Hz.

Por otra parte, la utilización de grandes reflectores planos en teatros y salas de conciertos no es en absoluto aconsejable, ya que puede dar lugar a la aparición de las siguientes anomalías, analizadas en los capítulos 4 y 5:

- Coloración del sonido: realce o atenuación manifiesta de las frecuencias que componen su espectro como resultado de la combinación entre el sonido directo y el sonido reflejado por dichas superficies

- Desplazamiento de la fuente sonora: el sonido parece proceder de la superficie reflejante en lugar de provenir del escenario, es decir, tiene lugar un efecto de falsa focalización de la fuente sonora (apartado 1.15.3)

De todas formas, el riesgo de aparición de estos defectos potenciales puede ser minimizado si se disminuye el nivel del sonido reflejado. Ello se puede conseguir creando difusión del sonido (apartado 2.4), o bien, dando una forma convexa al elemento o elementos reflectores, según se expone a continuación.

2.3.1.2 Reflectores curvos

Los reflectores de perfil convexo dispersan el sonido en mayor proporción que los reflectores planos, es decir, abarcan una mayor zona de cobertura y, por lo tanto, en cada punto de dicha zona el nivel del sonido reflejado es menor. En la práctica, para que un reflector convexo cumpla su función de manera óptima, es decir, siga funcionando como reflector sin producir las citadas anomalías, es preciso que su radio de curvatura sea aproximadamente mayor que 5 m. Para radios menores, el elemento deja de actuar como reflector y tiende a comportarse como un difusor del sonido (apartado 2.4.1).

Por contra, la existencia de superficies cóncavas da lugar a un efecto de focalización del sonido reflejado, es decir, a una concentración del mismo en una zona más reducida, si bien con un nivel mucho más elevado. Es el denominado “sonido focalizado”. A menudo ocurre que la energía asociada a dicho sonido es incluso superior a la correspondiente al sonido directo. En general, dicho tipo de superficies debe ser evitado.

Desde un punto de vista geométrico, la dirección del sonido reflejado sobre una superficie curva coincide con la dirección de la reflexión especular sobre el plano tangente al punto de reflexión. Ello es equivalente a decir que el ángulo de incidencia y el de reflexión son iguales con respecto a la dirección del radio de curvatura (figura 2.66).

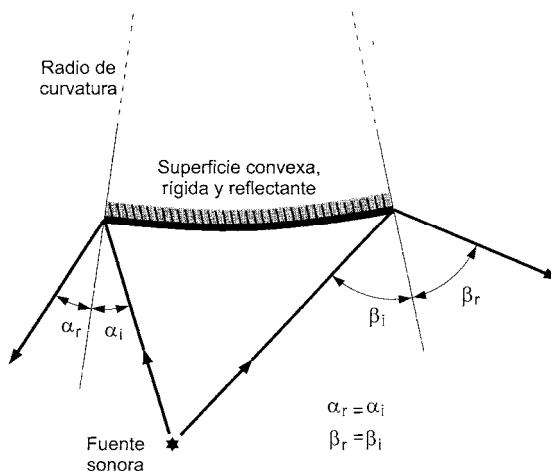


Fig. 2.66 Forma gráfica de determinar las direcciones de las reflexiones especulares

En la figura 2.67 se observa la dispersión y concentración del sonido producidas, respectivamente, por una superficie convexa y otra cóncava, en comparación con la zona de cobertura correspondiente a una superficie plana.

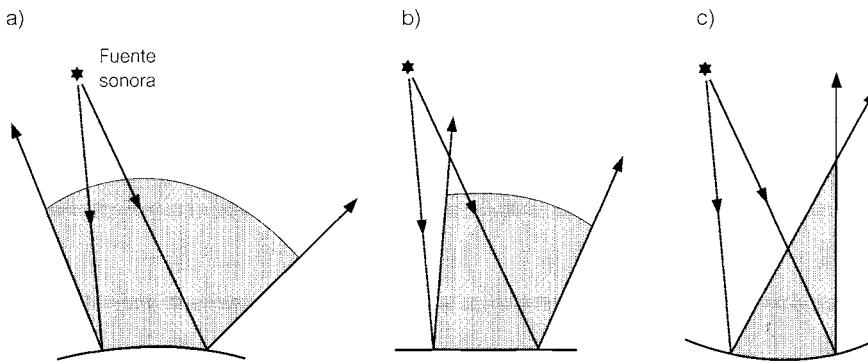


Fig. 2.67 Zonas de cobertura asociadas a diferentes superficies reflectantes:
a) superficie convexa; b) superficie plana; c) superficie cóncava

Como ejemplo ilustrativo de focalización del sonido producida por una superficie cóncava reflectante, en la figura 2.68 se muestra el caso de una sala con una forma semiesférica.

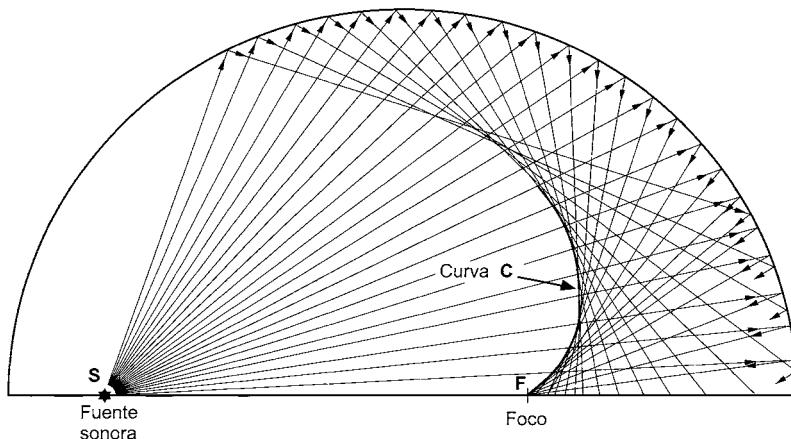


Fig. 2.68 Ejemplo de focalización del sonido en una sala de forma semiesférica

Según se puede observar, con la ubicación de la fuente sonora en el punto S, los rayos sonoros tienden a converger a lo largo de la curva C, con una máxima concentración de sonido en el foco F. Dicha concentración crea un desequilibrio entre la sonoridad correspondiente a los puntos situados sobre la mencionada curva y la asociada al resto de puntos. Esta anomalía es especialmente notable a bajas frecuencias ya que, a dichas frecuencias, la absorción de las paredes es generalmente menor que a frecuencias más elevadas.

Otro caso de focalización es el que se produce cuando la sala presenta una forma elíptica (figura 2.69).

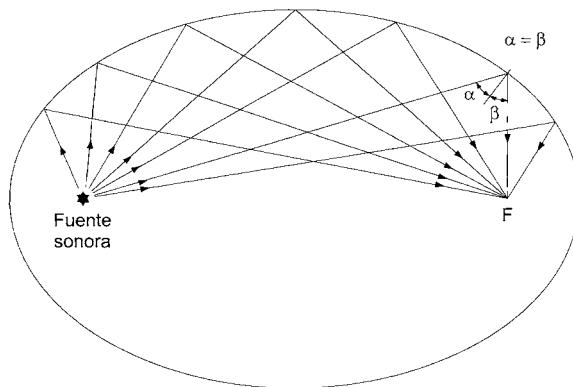


Fig. 2.69 Focalización del sonido producida por una sala en forma elíptica (F es el punto focal)

De todas maneras, no todas las superficies cóncavas son susceptibles de crear focalizaciones. En efecto, Cremer y Müller demostraron que las superficies con un elevado grado de concavidad y suficientemente separadas del escenario actúan normalmente como dispersoras o difusoras del sonido. La regla para saber si una superficie cóncava crea difusión del sonido en lugar de producir focalizaciones es muy simple: cuando ni la fuente sonora ni el receptor están situados dentro de la esfera creada a partir de la prolongación de la mencionada superficie, entonces tiene lugar dicha dispersión (figura 2.70).

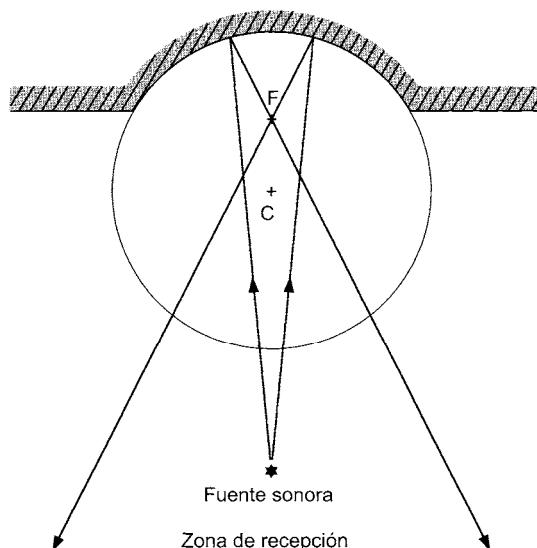


Fig. 2.70 Superficie cóncava actuando como dispersora del sonido debido a que la fuente y la zona de recepción se hallan fuera de la esfera creada a partir de dicha superficie (F es el punto focal y C es el centro de la esfera)

2.4 Difusión del sonido

Según se ha mencionado en el apartado 2.1, la difusión del sonido en una sala se consigue mediante la colocación de elementos expresamente diseñados para dispersar, de forma uniforme y en múltiples direcciones, la energía sonora que incide sobre los mismos.

En la figura 2.71 se presenta una comparación entre el efecto producido sobre una onda sonora incidente por un material absorbente, un reflector y un difusor.

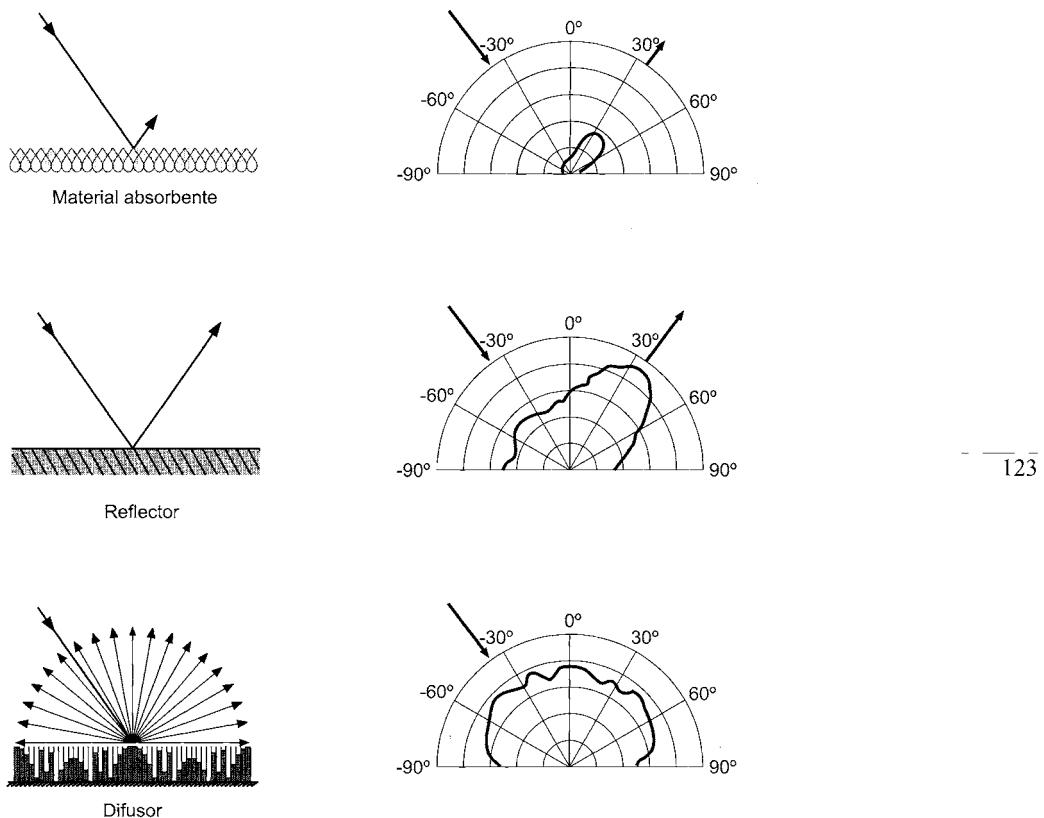


Fig. 2.71 Comparativa entre los efectos de absorción, reflexión especular y difusión del sonido

De su observación se deduce lo siguiente:

- En el caso del material absorbente, la energía reflejada es mínima.
- En el caso del elemento reflector, la energía reflejada es mucho mayor y está concentrada alrededor de la dirección de reflexión especular.
- En el caso del elemento difusor, la energía reflejada es elevada y está repartida de forma uniforme en todas las direcciones de reflexión.

En el contexto de este libro, la necesidad de disponer de una óptima difusión del sonido es exclusiva de las salas de conciertos, aunque existen determinados tipos de difusores que también son ampliamente utilizados en estudios de grabación.

Según se verá en el capítulo 5, la existencia de difusión del sonido en salas de conciertos significa que la energía de campo reverberante llegará a los oídos de los espectadores por un igual desde todas las direcciones del espacio. Ello contribuirá a crear un sonido altamente envolvente y, por lo tanto, a aumentar el grado de impresión espacial existente. Cuanto mayor sea el grado de impresión espacial, mejor será la valoración subjetiva de la calidad acústica del recinto en cuestión.

En ocasiones, la difusión también es utilizada para eliminar alguna de las anomalías que pueden aparecer tanto en recintos destinados a la palabra como en salas de conciertos. Como se verá, dichas anomalías pueden aparecer en forma de coloraciones, desplazamiento de la fuente sonora, ecos o focalizaciones del sonido.

Si bien cualquier superficie produce un cierto grado de difusión, la existencia de ornamentación, nichos, irregularidades y relieves en las superficies de una sala provoca un notable incremento de la difusión. Es el caso de las salas de conciertos clásicas, repletas de molduras decorativas, estatuas y techos artesonados. Es por ello que actualmente existen diferentes tipos de difusores construidos a base de superficies irregulares, de acuerdo con secuencias matemáticas previamente fijadas (apartado 2.4.2). De todas formas, hay que tener presente que solamente existe una óptima difusión en una banda de frecuencias limitada, y que dicha banda depende de las dimensiones del difusor.

En la figura 2.72 se muestra un ejemplo sencillo de difusión producida por un conjunto de pirámides construidas a base de un material reflectante y dispuestas sobre una pared rígida.

124

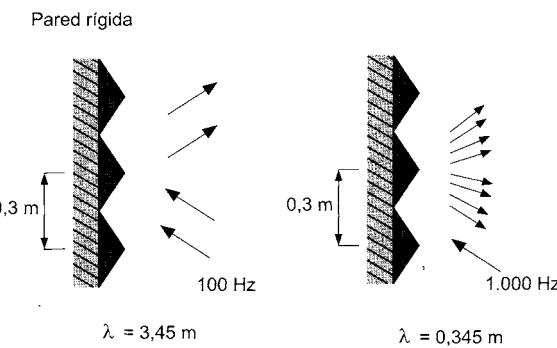


Fig. 2.72 Ejemplo de difusión del sonido producida por un conjunto de pirámides colocadas sobre una pared rígida

Según se puede observar, a la frecuencia de 100 Hz, las reflexiones generadas son especulares, es decir, a efectos de la onda sonora incidente es como si las pirámides no existiesen. Ello es debido a que la longitud de onda asociada es mucho mayor que la máxima dimensión de cada pirámide.

Por contra, a la frecuencia de 1.000 Hz, el grado de difusión es manifiesto, ya que la máxima dimensión de cada pirámide es del mismo orden de magnitud que la longitud de onda.

Por otra parte, en una sala destinada a la palabra o a actividades musicales, la superficie que siempre presenta un alto grado de difusión es la superficie ocupada por las sillas (vacías u ocupadas). De todas maneras, en la práctica, la energía difusa obtenida de esta forma es

baja, como consecuencia del elevado grado de absorción que presentan. Ello significa que, para conseguir el grado de difusión deseado, generalmente es necesario disponer de otras superficies difusoras adicionales.

A continuación se presenta un ejemplo de techo altamente difusor. Se trata del techo artesonado de la sala Herkulessaal de Munich, Alemania (figura 2.73). Otro ejemplo es el mostrado en la figura 5.37, correspondiente al techo de la sala Beethovenhalle de Bonn (Alemania).

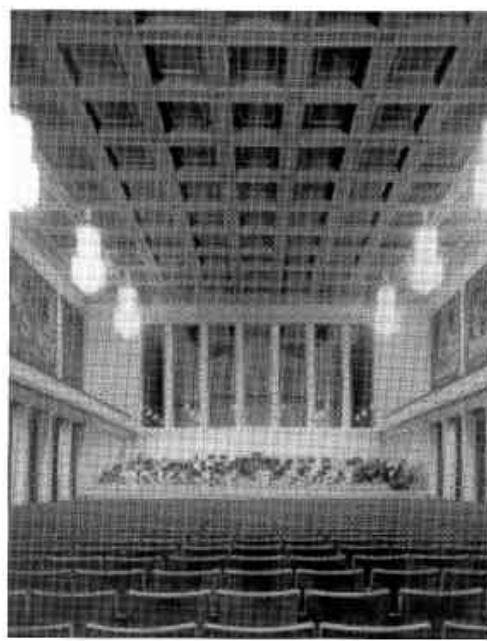


Fig. 2.73 Vista del techo artesonado altamente difusor de la Herkulessaal, Munich (Alemania)

En los siguientes apartados se exponen los tipos más representativos de elementos difusores, específicamente diseñados con este fin.

2.4.1 Difusores policilíndricos

Los difusores policilíndricos consisten en un conjunto de superficies lisas de forma convexa dispuestas secuencialmente y con un radio de curvatura inferior, aproximadamente, a 5 m. Habitualmente, el material empleado para su construcción suele ser la madera.

Según se ha comentado en el apartado 2.3.1.2, las superficies convexas con un radio de curvatura superior a unos 5 m actúan como reflectores del sonido, es decir, como si fuesen superficies planas. La diferencia entre ambas estriba en que la zona de cobertura es mayor y, por tanto, el nivel asociado a cada reflexión menor.

Al reducir el radio de curvatura por debajo de los 5 m, la zona de cobertura aumenta de tal manera que el sonido reflejado ya no puede ser concentrado sobre la zona de público (figura 2.74). El reflector se convierte en difusor.

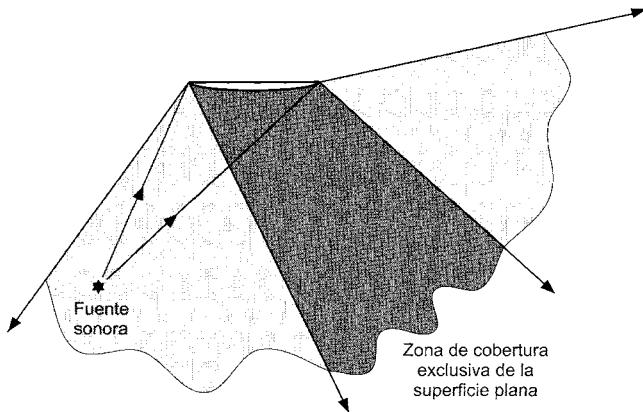


Fig. 2.74 Comparativa entre las zonas de cobertura asociadas a un reflector plano y una superficie convexa integrante de un difusor policilíndrico

En la figura 2.75 se observa un elemento integrante de este tipo de difusores, así como el difusor policilíndrico instalado en el Teatro “El Jardí” de Figueres (Girona, España).

126

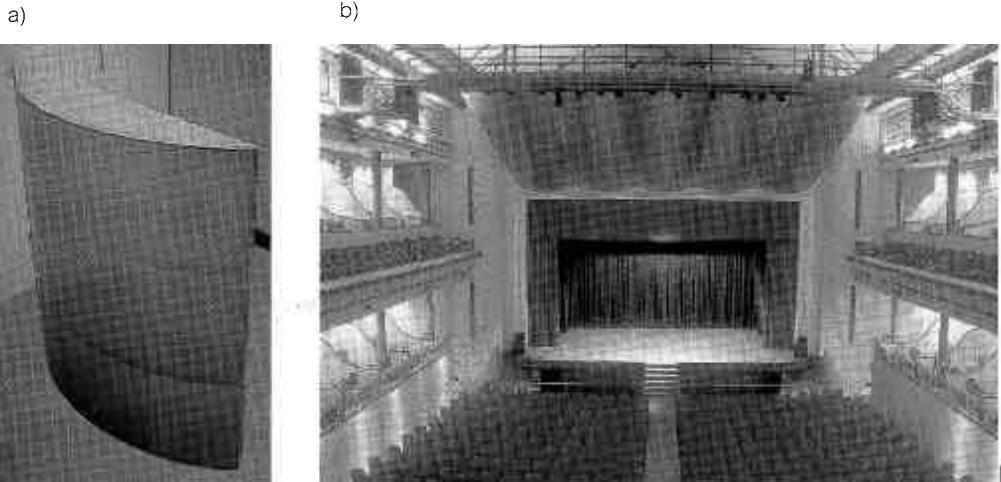


Fig. 2.75 Difusores policilíndricos: a) elemento integrante de un difusor; b) difusor instalado en el Teatro “El Jardí”, Figueres (Girona, España)

2.4.2 Difusores de Schroeder

A parte de las superficies irregulares y de los difusores policilíndricos, existen una serie de elementos que habitualmente se colocan por delante de las superficies límite de la sala (paredes o

techo) y que están específicamente diseñados para actuar como superficies difusoras del sonido, en un margen de frecuencias determinado. Todos ellos tienen su origen en la denominada teoría de los números, desarrollada por el prestigioso investigador alemán Manfred R. Schroeder, y se basan en distintas secuencias matemáticas previamente fijadas. Los difusores de Schroeder se denominan genéricamente RPG (“Reflection Phase Grating”). El elemento básico empleado en la construcción de los RPG utilizados en salas de conciertos es la madera.

Los tipos de difusores RPG más relevantes son los siguientes:

- Difusores MLS
- Difusores QRD
- Difusores PRD

Seguidamente se describe cada tipo de difusor por separado.

2.4.2.1 Difusores MLS

Los difusores MLS (“Maximum Length Sequence”) están basados en unas secuencias pseudoaleatorias periódicas, denominadas de longitud máxima o de Galois, que sólo pueden adquirir dos valores diferentes: -1 y +1.

El elemento difusor consiste en una superficie dentada. Se crea partiendo de una superficie lisa y reflectante, subdividiéndola en tramos de igual anchura y creando sobre la misma ranuras de igual profundidad. A cada tramo se le asigna un valor de la secuencia pseudoaleatoria, de acuerdo con el siguiente procedimiento (el proceso inverso es igualmente correcto):

- Si el valor es -1, el correspondiente tramo de superficie queda inalterado.
- Si el valor es +1, se crea una ranura en el espacio ocupado por el correspondiente tramo.

La anchura W de cada tramo y la profundidad “ d ” de cada ranura deben valer:

$$W = \lambda/2$$

$$d = \lambda/4$$

donde λ es la longitud de onda correspondiente a la frecuencia de diseño del difusor.

En la figura 2.76 se muestra el perfil de un difusor de este tipo, así como un diagrama de difusión a la frecuencia de diseño. Por diagrama de difusión se entiende la representación de la energía reflejada por el difusor en cada dirección del espacio y a cada frecuencia de interés.

El margen de frecuencias para el cual la difusión es óptima es únicamente del orden de una octava. Tal circunstancia se puede comprobar observando el diagrama de difusión correspondiente a una frecuencia doble de la anterior (figura 2.77a). La reflexión specular es claramente dominante y, por tanto, deja de existir difusión. De hecho, el diagrama obtenido es muy parecido al de la figura 2.77b, correspondiente a una superficie plana y lisa.

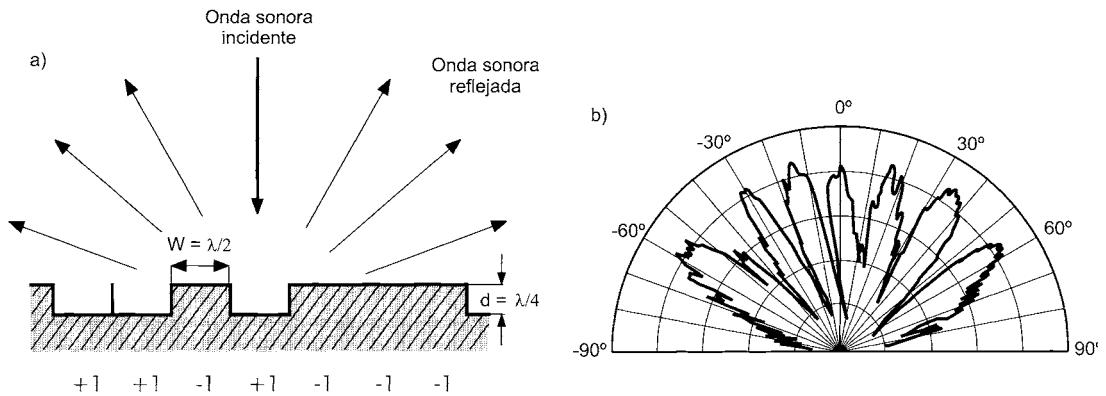


Fig. 2.76 Difusores MLS: a) perfil de un difusor con indicación de la dirección de la onda incidente y de las direcciones en las que la energía reflejada es máxima; b) diagrama de difusión a la frecuencia de diseño

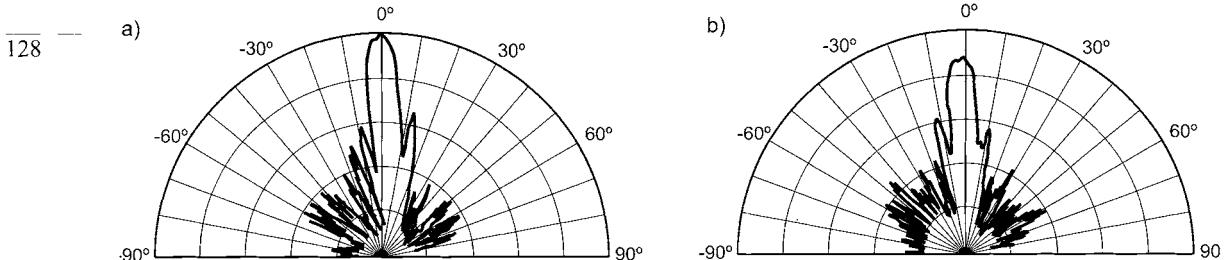


Fig. 2.77 Diagramas de difusión de: a) difusor MLS de la figura 2.76, a una frecuencia doble de la de diseño; b) superficie plana y lisa

Este tipo de difusores presenta una menor absorción a bajas frecuencias que los difusores QRD y PRD. Ello significa que, en salas de conciertos, se pueden utilizar en un porcentaje mayor de superficie sin que ello suponga una disminución excesiva del tiempo de reverberación a dichas frecuencias.

En la figura 2.78 se observa una muestra de los difusores MLS instalados en 1.994 sobre las paredes laterales de la Sala Pléyel, París (Francia), así como una sección longitudinal de la sala con indicación de su ubicación. La profundidad de las ranuras es de 6,35 cm, lo cual implica que la frecuencia de diseño es de 1.358 Hz y que el margen útil de frecuencias se halla, aproximadamente, entre 1 y 2 kHz.

En la práctica, los difusores MLS son poco utilizados.

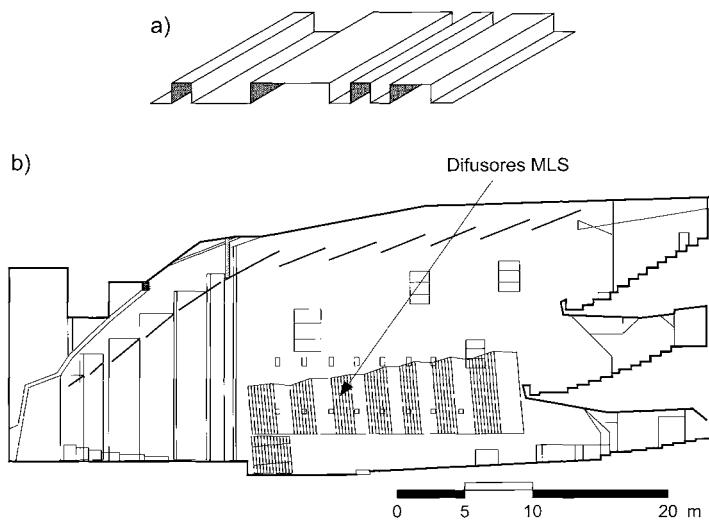


Fig. 2.78 Difusores MLS instalados en las paredes laterales de la Sala Pléyel, París (Francia):
a) muestra unitaria; b) sección longitudinal de la sala con indicación de la ubicación de los difusores

2.4.2.2 Difusores QRD

129

Existen dos tipos de difusores de residuos cuadráticos QRD (“Quadratic-Residue Diffusor”): los unidimensionales y los bidimensionales. A continuación se expone cada uno de ellos por separado.

a) Difusores unidimensionales QRD^(*)

Los difusores unidimensionales QRD son los más utilizados a nivel práctico, tanto en salas de conciertos como en estudios de grabación. Consisten en una serie de ranuras paralelas de forma rectangular, de igual anchura y de diferente profundidad. Generalmente, dichas ranuras están separadas por unos divisores delgados y rígidos (figura 2.79).

La profundidad de cada ranura se obtiene a partir de una secuencia matemática prefijada dando lugar a estructuras repetitivas (periódicas) que producen, en un determinado margen de frecuencias, una dispersión o difusión del sonido incidente en planos perpendiculares a dichas ranuras (figura 2.80).

La mencionada secuencia se obtiene a partir de la siguiente expresión generadora:

$$s_n = n^2 \bmod p$$

^(*) Ver desarrollo analítico y procedimiento de diseño en el apéndice 1

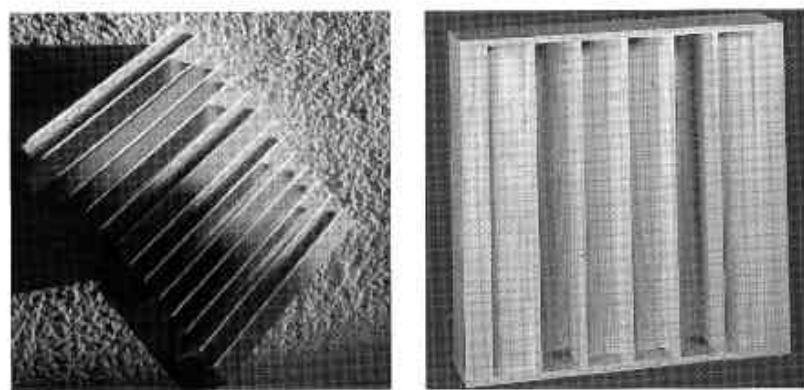


Fig. 2.79 Ejemplos de difusores unidimensionales QRD

130

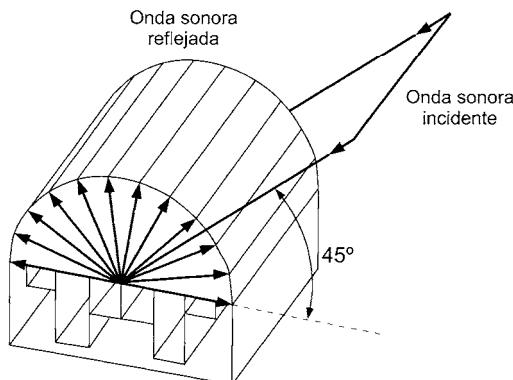


Fig. 2.80 Difusión producida por un difusor unidimensional QRD de una onda sonora incidente con un ángulo de 45° respecto a su superficie

donde:

 $p = \text{número primo } (3, 7, 11, \dots)$ $n = \text{número entero que va desde } 0 \text{ hasta } p-1$ mod = operación matemática “módulo”, indicativa de que cada valor de s_n se obtiene como el resto o residuo del cociente entre n^2 y p (de ahí el nombre de difusor de residuos cuadráticos)

La secuencia resultante es periódica y de periodo p . A modo de ejemplo, en la tabla 2.7 se observan los valores de un periodo de la secuencia unidimensional de residuos cuadráticos s_n que se obtiene para $p=7$.

n	0	1	2	3	4	5	6
n^2	0	1	4	9	16	25	36
$s_n = n^2 \bmod 7$	0	1	4	2	2	4	1

Tabla 2.7 Secuencia unidimensional de residuos cuadráticos s_n para $p = 7$

En la figura 2.81 se observan los perfiles correspondientes a 1 periodo de tres difusores unidimensionales QRD con $p = 7$, $p = 19$ y $p = 43$, respectivamente. Según se puede ver, existe simetría dentro de cada periodo.

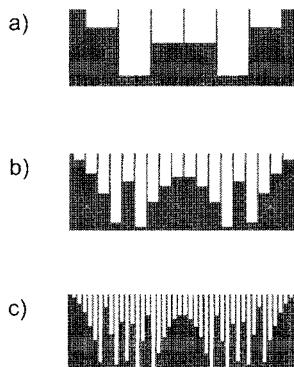


Fig. 2.81 Perfiles de tres difusores unidimensionales QRD para: a) $p = 7$; b) $p = 19$; c) $p = 43$

La profundidad real de las ranuras se obtiene, en cada caso, multiplicando los valores de la secuencia adimensional por un determinado factor, según se detalla en el apéndice 1.

A modo de ejemplo del grado de difusión que se puede conseguir, en la figura 2.82 se observa el diagrama de difusión de un difusor unidimensional QRD de 1 periodo con $p = 23$.

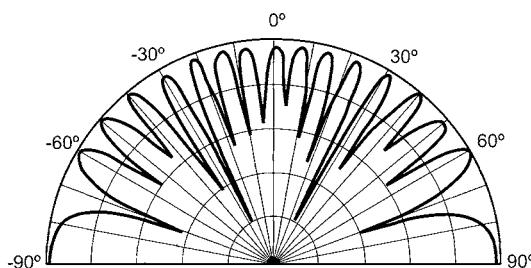


Fig. 2.82 Diagrama de difusión correspondiente a un difusor unidimensional QRD de 1 periodo con $p = 23$

De todo lo anterior se deduce que el diseño de este tipo de difusores se centra en la elección de un cierto número primo, una máxima profundidad de las ranuras y una determinada anchura de las mismas. Con ello se logra una óptima difusión del sonido dentro de un determinado margen de frecuencias, que depende de la relación entre ambas dimensiones. En efecto, la frecuencia más elevada para la cual se produce difusión del sonido aumenta a medida que la anchura de las ranuras disminuye, en tanto que la frecuencia más baja disminuye a medida que aumenta la máxima profundidad.

De todas formas, existe un límite en cuanto al valor máximo de dicha relación, puesto que se ha podido comprobar que las ranuras estrechas y muy profundas producen un exceso de absorción acústica. Dicho límite lleva a que, en la práctica, el margen útil de frecuencias

del difusor quede restringido a, aproximadamente, tres octavas. Fuera de dicho margen, el difusor tiende a comportarse como una superficie plana, dando lugar a reflexiones prácticamente especulares.

A modo de ejemplo ilustrativo de la existencia de difusores QRD en salas de conciertos, en la figura 2.83 se observa una vista panorámica y un detalle de los difusores QRD instalados en las zonas laterales superiores de la Glasgow Royal Concert Hall (Gran Bretaña).

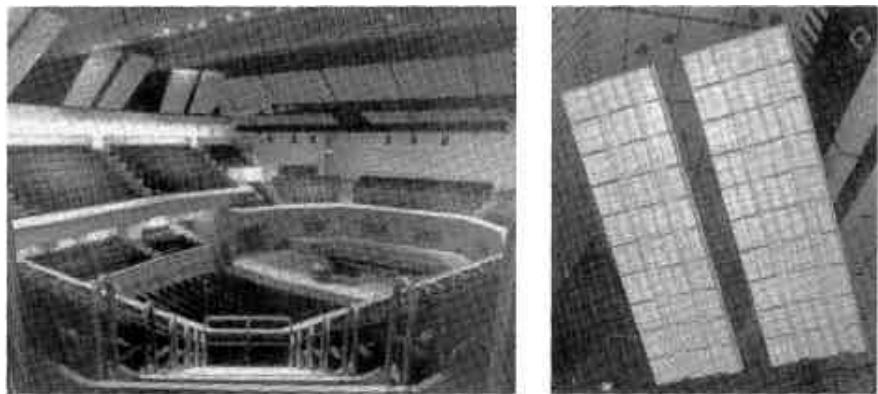


Fig. 2.83 Vista panorámica de la Glasgow Royal Concert Hall (Gran Bretaña) y detalle de los difusores unidimensionales QRD instalados en las zonas laterales superiores

132

En la figura 2.84 se muestra otro ejemplo ilustrativo. Se trata de los difusores montados en el escenario de la Joseph Meyerhoff Symphony Hall de Baltimore (EE.UU.), con el objetivo de mejorar las condiciones de escucha entre los músicos.

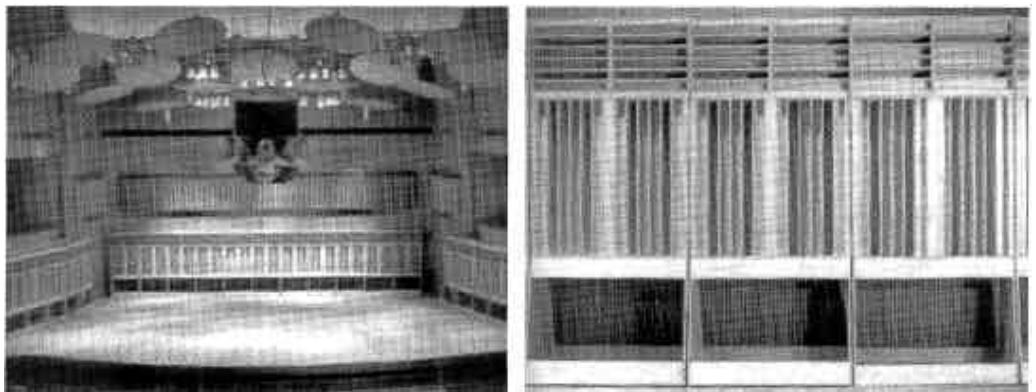


Fig. 2.84 Vista del escenario de la Joseph Meyerhoff Symphony Hall, Baltimore (EE.UU.), con difusores unidimensionales QRD instalados en la zona perimetral del mismo, y detalle de tres conjuntos de difusores

Se observa que cada conjunto está formado por dos difusores: uno inferior y el otro superior. El primero está dispuesto verticalmente, y crea difusión en el plano horizontal, mientras que el segundo, con una disposición horizontal, crea difusión en el plano vertical.

b) Difusores bidimensionales QRD

Los difusores bidimensionales QRD aparecen como una generalización de los unidimensionales con el objetivo de obtener una óptima difusión del sonido incidente en todas las direcciones del espacio.

En este tipo de difusores, las ranuras son sustituidas por pozos dispuestos en paralelo, de profundidad variable y de forma habitualmente cuadrada (figura 2.85).

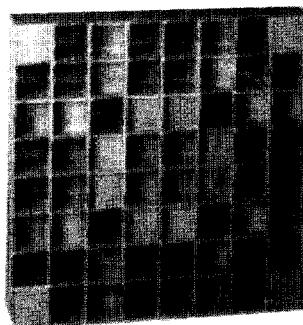


Fig. 2.85 Ejemplo de difusor bidimensional QRD

Los ángulos de difusión dejan de señalar direcciones de máxima energía reflejada en un mismo plano para indicar direcciones de máxima energía localizadas sobre una semisuperficie esférica (figura 2.86).

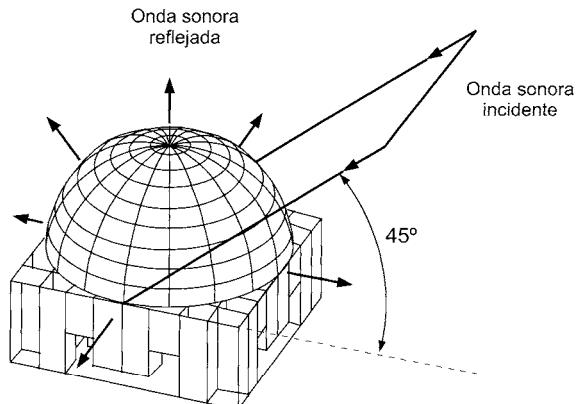


Fig. 2.86 Difusión producida por un difusor bidimensional QRD de una onda sonora incidente con un ángulo de 45° respecto a su superficie

Las expresiones a utilizar en el diseño de los difusores bidimensionales son iguales que las correspondientes a los difusores unidimensionales, con la única salvedad de que la secuencia adimensional de profundidades de los pozos se obtiene a partir de la siguiente expresión generadora:

$$s_{m,n} = (m^2 + n^2) \bmod p$$

donde:

p = número primo (3, 7, 11, ...)

m y n = números enteros que van desde 0 hasta $p-1$

A modo de ejemplo, en la tabla 2.8 se observan los valores de un periodo de la secuencia bidimensional de residuos cuadráticos $s_{m,n}$ correspondiente a $p=7$.

m/n	0	1	2	3	4	5	6
0	0	1	4	2	2	4	1
1	1	2	5	3	3	5	2
2	4	5	1	6	6	1	5
3	2	3	6	4	4	6	3
4	2	3	6	4	4	6	3
5	4	5	1	6	6	1	5
6	1	2	5	3	3	5	2

Tabla 2.8 Secuencia bidimensional de residuos cuadráticos $s_{m,n}$ para $p = 7$

134

La profundidad real de las ranuras se obtiene multiplicando los valores de la secuencia adimensional por el mismo factor que en el caso de los difusores unidimensionales.

En la práctica, los difusores bidimensionales QRD son relativamente poco utilizados.

2.4.2.3 Difusores PRD

Los difusores de raíces primitivas PRD (“Primitive-Root Diffusor”) son análogos a los difusores unidimensionales QRD, con la única diferencia de que la profundidad de cada ranura se obtiene a partir de una secuencia generadora distinta. Dicha secuencia se obtiene a partir de la siguiente expresión generadora:

$$s_n = g^n \bmod p$$

donde:

p = número primo (3, 7, 11, ...)

g = raíz primitiva de p

n = número entero que va desde 1 hasta $p-1$

mod = operación matemática “módulo”, que devuelve el residuo de la división de g^n entre p

Para que g sea una raíz primitiva de p es preciso que el número de residuos distintos generados a través de la operación matemática anterior sea igual a $p-1$.

La secuencia resultante es periódica y de periodo $p-1$. A modo de ejemplo, en la tabla 2.9 se observan los valores de un periodo de la secuencia que se obtiene para $g = 3$ y $p = 7$.

n	1	2	3	4	5	6
g^n	3	9	27	81	243	729
$s_n = g^n \bmod 7$	3	2	6	4	5	1

Tabla 2.9 Secuencia s_n correspondiente a $g = 3$ y $p = 7$

En la figura 2.87 se observa el perfil correspondiente a 2 periodos de un difusor PRD con $g = 2$ y $p = 11$.

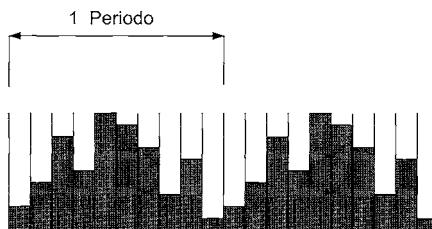


Fig. 2.87 Perfil de un difusor PRD con $g = 2$ y $p = 11$ (2 periodos)

Se puede comprobar que, a diferencia de lo que sucede con los difusores QRD, no existe simetría dentro de cada periodo.

Las propiedades de este tipo de difusores son muy parecidas a las de los difusores unidimensionales QRD, salvo por el hecho de que la energía asociada a la reflexión specular es muy baja.

A modo de ejemplo, en la figura 2.88 se muestra el diagrama de difusión de un difusor PRD correspondiente al caso de incidencia normal (dirección de la onda sonora incidente perpendicular a la superficie del difusor).

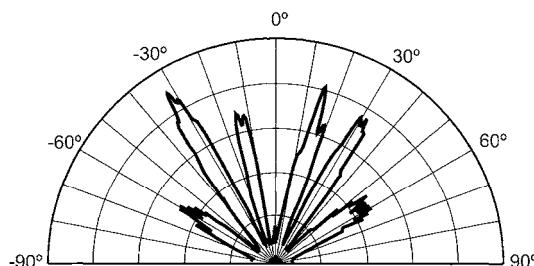


Fig. 2.88 Diagrama de difusión correspondiente a un difusor PRD (incidencia normal)

Según se puede observar, la reflexión specular es, en efecto, prácticamente nula. Ello los hace aconsejables para ser utilizados como canceladores de ecos.

Al igual que sucede con los difusores MLS y con los difusores bidimensionales QRD, los difusores PRD son escasamente utilizados en la práctica.

Diseño acústico de espacios de uso comunitario, de uso deportivo y de salas de conferencias/aulas

3.1 Introducción

En el presente capítulo se describen los objetivos acústicos básicos a cumplir y se exponen los criterios generales de diseño en relación con los siguientes espacios:

- Espacios de uso comunitario
- Espacios de uso deportivo
- Salas de conferencias/aulas

Por espacios de uso comunitario se entienden todos aquellos lugares cerrados de concurrencia pública o privada con un grado habitual de ocupación medio o elevado. Es el caso, por ejemplo, de restaurantes, comedores escolares, bibliotecas, estaciones de ferrocarril, aeropuertos, etc. (se exceptúan los teatros y las salas de conciertos, ya que serán estudiados con detalle en los dos capítulos próximos).

Las diferencias existentes entre cada una de dichas tipologías se irán exponiendo paulatinamente en los distintos apartados del capítulo.

Por otra parte, también se exponen los objetivos básicos a cumplir por los sistemas de megafonía habitualmente utilizados en muchos de dichos espacios y se dan unos criterios generales de ubicación de los altavoces integrantes de tales sistemas.

3.2 Objetivos acústicos

Los objetivos a cumplir son los siguientes:

- Garantizar la existencia de confort acústico.
- Asegurar una correcta inteligibilidad de la palabra.
- En caso de que el espacio considerado disponga de un sistema de megafonía, asegurar que los mensajes emitidos sean claramente inteligibles y lleguen a todos los puntos con un nivel suficiente y sin coloraciones.

El hecho de que exista confort acústico significa que el campo sonoro existente no generará ninguna molestia significativa a las personas o espectadores presentes en el recinto considerado. Además, la existencia de confort acústico es indicativa de que el grado de inteligibilidad será más bien alto, aunque no supone una garantía absoluta de que sea óptimo. La obtención de una correcta inteligibilidad de la palabra es imprescindible en todos aquellos recintos donde la comprensión del mensaje oral sea de capital importancia (salas de conferencias, aulas, etc.), pero también es necesaria en espacios de pública concurrencia, como por ejemplo bares y restaurantes, al menos entre interlocutores próximos.

Para conseguir un adecuado confort acústico, a la vez que una correcta inteligibilidad de la palabra, es preciso que:

- el ruido de fondo existente en la sala sea suficientemente bajo,
- el nivel de campo reverberante sea, igualmente, suficientemente bajo,
- no existan ecos, ni focalizaciones del sonido, ni eco flotante.

En los próximos apartados se estudia con detalle cada uno de los parámetros relacionados con la consecución de los objetivos anteriormente planteados.

3.2.1 Ruido de fondo (curvas NC)

Se considera ruido de fondo todo aquel ruido que se percibe en una sala cuando en la misma no se realiza ninguna actividad. Dicho ruido puede ser debido al sistema de climatización, a las demás instalaciones eléctricas y/o hidráulicas, e incluso puede provenir del exterior del recinto (por ejemplo, el ruido de tráfico).

Según se ha visto en el apartado 1.12, la evaluación del grado de molestia que un determinado ruido de fondo provoca sobre un oyente se hace por comparación de los niveles de ruido existentes en la sala, para cada banda de octava comprendida entre los 63 Hz y los 8 kHz, con un conjunto de curvas de referencia denominadas NC (“Noise Criteria”).

Las curvas NC son, además, utilizadas para establecer los niveles máximos recomendados para diferentes tipos de espacios en función de su uso.

Se dice que un recinto cumple una determinada especificación NC (por ejemplo: NC-15, NC-20, etc.) cuando los niveles de ruido de fondo, medidos por bandas de octava, están por debajo de la curva NC correspondiente, para todas las frecuencias comprendidas entre 63 Hz y 8 kHz.

En la tabla 3.1 se recuerdan las especificaciones NC recomendadas para los diferentes espacios tipo considerados en este capítulo.

ESPACIO TIPO	CURVA NC RECOMENDADA
Sala de conferencias / aula	20-30
Biblioteca	30-35
Restaurante	35-40
Cafetería	40-45
Polideportivo	40-50

Tabla 3.1 Curvas NC recomendadas para diferentes espacios tipo

El cumplimiento, en cada caso, de la especificación NC supone el primer paso para conseguir un confort acústico y un grado de inteligibilidad adecuados.

3.2.2 Tiempo de reverberación (RT)

Según se ha comentado anteriormente, otro de los requisitos básicos para conseguir un buen confort acústico y una correcta inteligibilidad de la palabra es que el nivel de campo reverberante L_R sea suficientemente bajo.

Como se ha visto en el apartado 1.15.7, la zona de campo reverberante es aquélla donde predomina el sonido reflejado o reverberante, y a ella pertenecen todos los puntos situados a una distancia de la fuente sonora superior a la distancia crítica D_c .

Si el espacio objeto de estudio tiene un gran volumen y/o está escasa o nulamente tratado con materiales absorbentes (espacio excesivamente “vivo”), el nivel de campo reverberante resultará muy alto, ya que el tiempo de reverberación del mismo será demasiado elevado. Esto significa que la distancia crítica D_c será pequeña. Por lo tanto, a poco que uno se aleje de la fuente sonora, se hallará dentro de la zona de campo reverberante donde la inteligibilidad de la palabra no es buena (figura 3.1a).

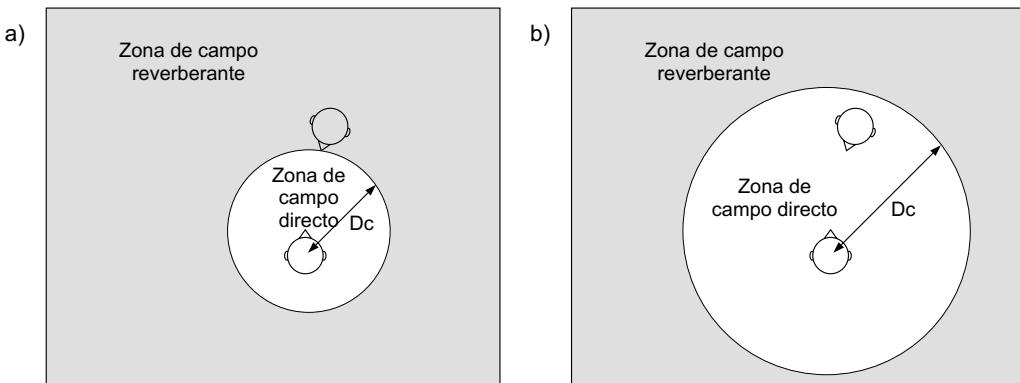


Fig. 3.1 Salas con diferentes grados de acondicionamiento acústico: a) sala poco tratada, el receptor se halla a una distancia superior a la distancia crítica D_c (zona de campo reverberante); b) sala con mayor tratamiento, el receptor se encuentra a una distancia inferior a D_c (zona de campo directo)

Esta situación se suele producir, por ejemplo, en un restaurante sin ningún tipo de tratamiento acústico. En tal caso, es probable que incluso una persona (receptor) sentada en la misma mesa que otra persona que esté hablando (emisor), se encuentre en la zona de campo reverberante de esta última. De hecho, hay que tener presente que el nivel de campo reverberante existente no sólo se deberá al emisor en cuestión, sino a todas las personas de otras mesas que estén hablando simultáneamente. En esta situación, la dificultad de comprensión hará que el emisor hable más fuerte. Dicha reacción será adoptada por todos los emisores, con lo cual el nivel total de campo reverberante todavía aumentará más, incluso en mayor proporción que el sonido directo debido al emisor en cuestión. El efecto resultante de todo ello será una pérdida adicional de confort acústico, además de una posible irritación de las cuerdas

vocales por el hecho de tener que elevar excesivamente el tono de voz. Dicho fenómeno, lamentablemente tan frecuente, recibe el nombre de efecto “cocktail party”.

Al tratar acústicamente y de forma adecuada el espacio en cuestión, se producirá una disminución del tiempo de reverberación y, por consiguiente, una disminución del nivel de campo reverberante y un aumento de la distancia crítica D_c (más puntos dentro de la zona de campo directo, según se observa en la figura 3.1b). Lógicamente, todo ello redundará en beneficio del confort acústico y de la inteligibilidad de la palabra.

Ahora bien, debido a la relación directa entre el nivel de campo reverberante L_R y el tiempo de reverberación RT , el objetivo a cumplir desde un punto de vista cuantitativo se fija siempre sobre este último parámetro, como se verá a continuación.

Recordando la definición dada en el apartado 1.15.8, el tiempo de reverberación RT , a una determinada frecuencia de interés, se define como el tiempo que transcurre desde que el foco sonoro se detiene hasta que el nivel de presión sonora cae 60 dB.

Con objeto de conseguir que en cada espacio tipo considerado exista un nivel de campo reverberante suficientemente bajo, es necesario que el valor promediado del tiempo de reverberación RT_{mid} , considerando un elevado grado de ocupación del recinto, se halle dentro de los márgenes representados en la figura 3.2. Dicho valor se define de la siguiente manera:

$$RT_{mid} = \frac{RT(500 \text{ Hz}) + RT(1 \text{ kHz})}{2}$$

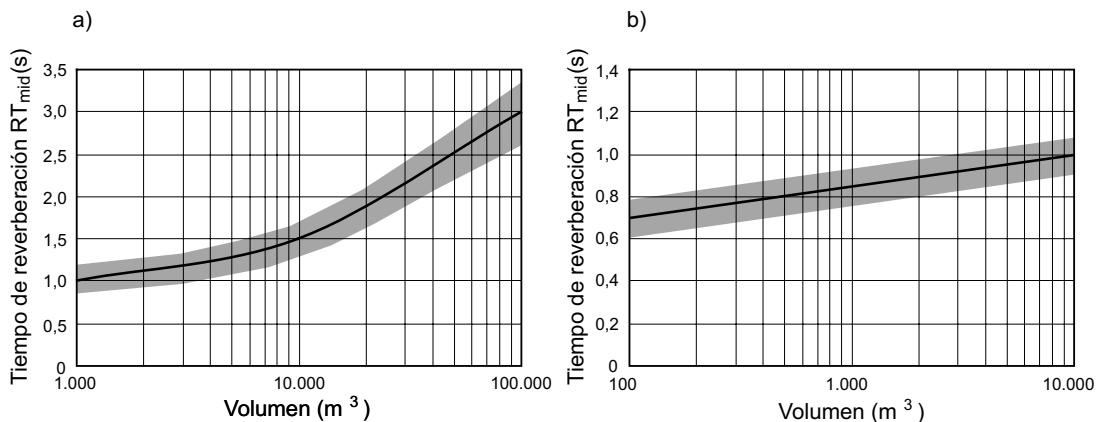


Fig. 3.2 Valores recomendados de RT_{mid} (500 Hz - 1 kHz) en función del volumen del recinto:
a) espacios de uso deportivo; b) salas de conferencias/aulas (recintos ocupados)

Según se puede observar, el valor de RT_{mid} recomendado para recintos de uso deportivo con volúmenes entre 1.000 y 100.000 m³ oscila aproximadamente entre:

$$1 \leq RT_{mid} \leq 3 \text{ s}$$

En el caso de salas de conferencias/aulas, el valor de RT_{mid} recomendado, considerando volúmenes situados entre 100 y 10.000 m³, se halla entre:

$$0,7 \leq RT_{mid} \leq 1 \text{ s}$$

Por otro lado, es conveniente que la variación de dicho valor en función del grado de ocupación de la sala sea lo menor posible con objeto de independizar al máximo sus características acústicas del número de personas presentes en cada caso.

Según se puede observar, a igualdad de volumen, los valores de RT_{mid} recomendados para salas de conferencias/aulas son algo inferiores a los correspondientes a recintos deportivos. Por ejemplo, para un volumen de 1.000 m³, los valores aproximados son los siguientes:

- Salas de conferencias/aulas: $RT_{mid} = 0,85 \text{ s}$
- Polideportivos: $RT_{mid} = 1 \text{ s}$

Ello se debe a que el grado de inteligibilidad de la palabra deseable en una sala de conferencias o en un aula es superior al correspondiente a un espacio de uso deportivo, y dicho grado de inteligibilidad aumenta a medida que el tiempo de reverberación obtenido es menor.

En cuanto a los espacios de uso comunitario, debido a la diversidad de recintos englobados dentro de esta tipología, no es posible dar un único valor de RT_{mid} para cada volumen. Como criterio a seguir, se recomienda utilizar la gráfica 3.2b para aquellos espacios donde la inteligibilidad sea de capital importancia, y la gráfica 3.2a cuando sea suficiente un grado de inteligibilidad aceptable.

Por otra parte, hay que tener presente el posible uso de algunos de los espacios tipo tratados en este capítulo como recintos multifuncionales (por ejemplo, un polideportivo usado como espacio para conciertos de música rock). En dichos casos, a no ser que se planteen soluciones basadas en la acústica variable (capítulo 6), es necesario fijar como objetivo un valor de RT_{mid} intermedio, en función de las actividades previstas.

Finalmente, es conveniente que el RT se mantenga lo más constante posible con respecto a la frecuencia, especialmente a frecuencias bajas (bandas de octava centradas en 125 Hz y 250 Hz), ya que un aumento de reverberación a baja frecuencia produce un empeoramiento del grado de inteligibilidad de la palabra. Por otro lado, a partir de la banda de octava centrada en 2 kHz, existe una disminución inevitable de los valores de RT debida a la absorción producida por el aire. Dicha disminución se hace particularmente patente cuando se trata de espacios grandes.

En el apartado 3.3.1 se dan unos criterios orientativos de diseño encaminados a la obtención, en cada caso, de los tiempos de reverberación deseados.

3.2.3 Ecos y focalizaciones del sonido

El último requerimiento para que tanto el confort acústico como el grado de inteligibilidad en una sala sean correctos, consiste en evitar la aparición de ecos (apartado 1.15.3), focalizaciones del sonido (apartado 2.3.1.2) y eco flotante (apartado 1.15.4).

Si bien la existencia de focalizaciones y de eco flotante viene generalmente determinada por las formas del recinto, la presencia de ecos puede ser debida tanto a una geometría inadecuada como a un diseño incorrecto del sistema de megafonía, obviamente en el caso de que tal sistema exista. De hecho, puede darse la circunstancia de que el diseño acústico del recinto sea óptimo y que una distribución errónea de los altavoces dé lugar a la aparición de ecos en distintos puntos del mismo.

Finalmente, cabe comentar que este tipo de anomalías se pone especialmente de manifiesto cuando el tiempo de reverberación del recinto es más bien corto. En el apartado 3.3.2 se dan una serie de criterios prácticos para prevenir o eliminar ecos y focalizaciones.

3.2.4 Efecto tambor

En un recinto de uso deportivo, el efecto tambor consiste en el efecto resonador del pavimento originado por la existencia de cavidades de aire vacías entre dicho pavimento y la correspondiente estructura de soporte. Este efecto resulta ser muy molesto y, en consecuencia, es preciso tomar las precauciones oportunas para que no aparezca.

Los criterios para la eliminación o atenuación del efecto tambor se exponen en el apartado 3.3.3.

142

3.2.5 Sistema de megafonía

Por regla general, en todos los espacios tipo tratados en este capítulo se suele utilizar un sistema de megafonía. Dicho sistema está formado, como mínimo, por:

- Micrófonos
- Fuentes de sonido (platina-cassette y reproductor de Compact-Disc)
- Amplificadores
- Altavoces

La utilización de dicho sistema en cada espacio tipo permite:

- Espacios de uso comunitario: enviar avisos y música ambiental a las diferentes zonas de público.
- Espacios de uso deportivo: enviar avisos procedentes de recepción, información emitida desde la pista y música ambiental a la zona de público y a la pista de juego.
- Salas de conferencias/aulas: enviar la señal emitida por el ponente, o ponentes, a la zona de público.

El sistema de megafonía propuesto para cada espacio deberá garantizar el cumplimiento de una serie de objetivos y, asimismo, presentar unas determinadas prestaciones mínimas. Seguidamente, se enumeran los objetivos y prestaciones más relevantes:

- Nivel de presión sonora suficientemente elevado en todos los puntos del recinto.
- Uniformidad de cobertura, es decir, mínima fluctuación de los niveles de presión sonora en el recinto.
- Inteligibilidad de la palabra correcta en todos los puntos.
- Ausencia de ecos (como se ha mencionado con anterioridad, los ecos pueden aparecer a causa de una incorrecta colocación de los altavoces en el recinto).
- Respuesta frecuencial de los altavoces adecuada, entendiéndose por tal el margen útil de frecuencias reproducidas por los mismos. Dicho margen recibe el nombre de ancho de banda útil. Cuanto mayor sea, mayor será la calidad de la música reproducida.
- Distorsión armónica total mínima. La existencia de distorsión lleva asociada la aparición, en la señal reproducida por los altavoces, de frecuencias no existentes en la señal original, causantes de un sonido altamente desagradable.

A continuación se exponen los objetivos a cumplir desde un punto de vista numérico.

3.2.5.1 Nivel de presión sonora

El nivel de presión sonora SPL o L_p (apartado 1.9) deberá ser igual o mayor que 90 dB en la zona de público y, en el caso de espacios de uso deportivo, también en la pista:

$$L_p \geq 90 \text{ dB}$$

Además, habrá que disponer de un margen de reserva mínimo de 10 dB con objeto de cubrir los picos de señal.

3.2.5.2 Uniformidad de cobertura

La uniformidad de cobertura se define como el grado de homogeneidad que presentan los niveles de presión sonora en la zona de público y, en el caso de espacios de uso deportivo, también en la pista.

Se establece como objetivo la obtención de un margen de fluctuación de dicho nivel no superior a ± 3 dB, en las bandas de 500 Hz y 2.000 Hz:

$$\Delta L_p \leq \pm 3 \text{ dB} \text{ (bandas de 500 Hz y 2 kHz)}$$

3.2.5.3 Inteligibilidad de la palabra

El grado de inteligibilidad de la palabra que se obtendrá en un punto cualquiera del recinto objeto de estudio depende tanto del cumplimiento de los objetivos acústicos planteados en los anteriores apartados como del sistema de megafonía diseñado. Por lo tanto, la consecución de los objetivos expuestos a continuación mediante un correcto diseño del sistema de megafonía, sólo será posible si, a su vez, se satisfacen los mencionados objetivos acústicos.

La cuantificación del grado de inteligibilidad se lleva a cabo mediante los siguientes dos parámetros definidos en el apartado 1.15.9:

- % ALCons
- STI / RASTI

En los espacios de uso deportivo, la inteligibilidad en todos los puntos del recinto ocupado deberá ser, como mínimo, “aceptable”. Por consiguiente, se deberá cumplir que:

$$\% \text{ALCons} \leq 11,4 \% \quad (\text{STI} / \text{RASTI} \geq 0,50)$$

En el caso de salas de conferencias/aulas, la inteligibilidad en todos los puntos de la sala ocupada deberá ser, como mínimo, “buena”. Por lo tanto, se deberá verificar que:

$$\% \text{ALCons} \leq 5 \% \quad (\text{STI} / \text{RASTI} \geq 0,65)$$

Por lo que se refiere a los espacios de uso comunitario, debido a la disparidad de recintos incluidos dentro de esta tipología no es posible establecer el mismo objetivo para todos ellos. Como criterio a seguir, en aquellos espacios donde la inteligibilidad sea de capital importancia se recomienda establecer como objetivo el correspondiente a salas de conferencias/aulas. Para el resto de espacios se recomienda fijar como objetivo el correspondiente a espacios de uso deportivo.

3.2.5.4 Curva de respuesta frecuencial. Ancho de banda útil

La curva de respuesta frecuencial de un sistema de megafonía está formada por un conjunto de valores del nivel de presión sonora L_p , cada uno asociado a una frecuencia de interés. Las frecuencias de interés son todas aquéllas que resultan audibles (espectro audible), es decir, desde 20 Hz hasta 20 kHz.

El ancho de banda útil BW (“BandWidth”) está formado por todas aquellas frecuencias comprendidas entre las frecuencias límite f_{L1} y f_{L2} ($f_{L1} < 1 \text{ kHz}$ y $f_{L2} > 1 \text{ kHz}$). Ambas frecuencias se definen como aquéllas a las que les corresponde el siguiente nivel de presión sonora:

$$L_p(f_{L1}) = L_p(f_{L2}) = L_p(1 \text{ kHz}) - 10 \text{ dB}$$

donde $L_p(1 \text{ kHz})$ es el nivel correspondiente a la frecuencia de 1 kHz (nivel de referencia).

Como se ha mencionado anteriormente, cuanto mayor sea el ancho de banda útil del sistema, mayor será la calidad musical obtenida.

Cuantitativamente, el ancho de banda útil deberá estar comprendido, como mínimo, entre 150 Hz y 16.000 Hz, con una tolerancia del 20%:

$$150 \leq \text{BW} \leq 16.000 \text{ Hz} \quad (\text{tolerancia} = 20 \%)$$

3.2.5.5 Distorsión armónica total

Cuando se aplica una señal de frecuencia f_0 a un altavoz que no funciona correctamente, éste genera una respuesta con nuevas componentes espectrales, es decir, nuevas señales de frecuencias múltiplos de la frecuencia f_0 (denominada frecuencia fundamental o primer armónico), que reciben el nombre de armónicos.

Este comportamiento anómalo provoca un desaprovechamiento de una parte de la potencia entregada al altavoz, que es precisamente la que se distribuye entre los diferentes armónicos y da lugar a un sonido manifiestamente desagradable.

La distorsión armónica total THD (“Total Harmonic Distortion”) se define mediante la siguiente expresión (en tanto por ciento):

$$\text{THD (\%)} = \frac{\text{Potencia correspondiente a los diferentes armónicos}}{\text{Potencia correspondiente a la frecuencia } f_0} \times 100$$

Evidentemente, cuanto menor sea la distorsión armónica total, mayor será la calidad del sonido reproducido por el altavoz en cuestión.

Cuantitativamente, la THD deberá ser inferior a:

$\text{THD} \leq 4\%$ (en las bandas de octava centradas en 125 y 250 Hz)

$\text{THD} \leq 2\%$ (en el resto de bandas de octava de interés)

Finalmente, conviene señalar que los objetivos anteriores referentes a salas de conferencias/aulas son igualmente válidos para teatros, siempre y cuando en dichos recintos se plantee la posibilidad de utilizar un sistema de megafonía.

3.3 Criterios generales de diseño

Una vez definidos los objetivos acústicos relacionados con el diseño de espacios de uso comunitario, espacios de uso deportivo y salas de conferencias/aulas, en este apartado se dan unos criterios generales de diseño aplicables a dichos espacios tipo.

3.3.1 Procedimiento para la obtención del tiempo de reverberación RT_{mid} deseado

Una vez conocido o fijado el volumen del espacio en cuestión, y de acuerdo con lo expuesto en el apartado 3.2.2, es preciso definir las superficies que deberán ser tratadas acústicamente y los materiales absorbentes a utilizar a fin de que el tiempo de reverberación medio RT_{mid} , en condiciones de ocupación elevada, se halle dentro de los márgenes establecidos en dicho apartado.

La fórmula a emplear para el cálculo de los RT es la de Sabine completa (apartado 2.2.2):

$$RT = \frac{0,161 V}{A_{tot} + 4 mV} \text{ (en s)}$$

donde:

$$A_{tot} = \sum_i S_i \alpha_i + A_p \text{ (o bien } A_s) = \text{absorción total del recinto (en sabins)}$$

S_i = superficie “i”

α_i = coeficiente de absorción de la superficie “i”

A_p = absorción total del público (en sabins), definida en el apartado 2.2.6

A_s = absorción total de las sillas (en sabins), definida en el apartado 2.2.6

4mV = absorción producida por el aire (en sabins)

El proceso de cálculo es el siguiente:

- 146
- Definir cuáles son las superficies a tratar. En principio, con independencia de la tipología considerada, las superficies óptimas son el techo (o falso techo) y las partes superiores de las paredes. El porcentaje que deberá ser tratado de cada una de ellas surgirá como fruto de los cálculos a realizar posteriormente.
 - Asignar a las superficies elegidas los materiales absorbentes que se utilizarán como revestimientos.
 - Calcular todas las componentes $S_i \alpha_i$ de la absorción total A_{tot} , en las bandas de octava de 500 Hz y 1 kHz, teniendo en cuenta que el resto de superficies podrán ser tratadas con materiales reflectantes, tipo madera o cartón-yeso, adheridos perfectamente a las mismas, o bien simplemente con un enlucido de yeso o similar.
 - Determinar la absorción correspondiente al público en las bandas de octava de 500 Hz y 1 kHz:
 - Si se trata de un espacio donde las personas no están agrupadas, como por ejemplo una estación o un aeropuerto, se partirá de la absorción asociada a una persona A_{pp} , y los correspondientes valores se multiplicarán por el número estimado de personas. Los resultados obtenidos corresponderán a la absorción buscada y constituyen la componente A_p de la absorción total A_{tot} .
 - Si se trata de un espacio donde las personas se hallan agrupadas y sentadas, será necesario utilizar los coeficientes unitarios de absorción α_s proporcionados por el fabricante de la silla que se vaya a utilizar, en condiciones de silla ocupada. En el caso, poco deseable, de no disponer de los mismos, habrá que recurrir al uso de una base de datos con el riesgo de error que ello conlleva.
 - Es preciso tener presente que la superficie correspondiente no será exclusivamente la ocupada por las sillas, sino que deberá considerarse la denominada superficie acústica efectiva de audiencia S_A (apartado 2.2.6).

La absorción total de las sillas será $A_s = S_A \alpha_s$.

 - Si se trata de una sala de conferencias o un aula, se procederá de forma análoga al caso anterior. En caso de que el fabricante no disponga de los coeficientes de absorción, se podrán utilizar los valores publicados por Beranek en 1.996, detallados en el apartado 2.2.6.

- e) Calcular, mediante la fórmula de Sabine, los valores de los tiempos de reverberación en las bandas de octava de 500 Hz y 1 kHz.
- f) Hallar el valor de RT_{mid} , de acuerdo con la expresión definida en el apartado 3.2.2.
- g) En el caso de que el valor calculado de RT_{mid} esté situado dentro de los márgenes pre establecidos, el proceso de elección de materiales habrá finalizado. En caso contrario, habrá que introducir las modificaciones oportunas hasta lograr el objetivo planteado. Si el valor de RT_{mid} es demasiado alto, habrá que cambiar uno o varios de los materiales propuestos, por otros de más absorbentes. Otra posibilidad consiste en tratar más superficies de las inicialmente previstas. Si, por contra, dicho valor está por debajo del recomendado, entonces habrá que actuar en sentido contrario, es decir, habrá que utilizar materiales con una absorción menor o, alternativamente, disminuir el número de superficies tratadas. Finalmente, cabe indicar que el procedimiento de cálculo anterior es aproximado, al estar basado en la fórmula clásica de Sabine. Para obtener unos resultados más exactos, es indispensable hacer uso de un programa de simulación acústica (capítulo 7).

3.3.2 Criterios para prevenir o eliminar ecos y focalizaciones del sonido

Según se ha expuesto en el apartado 3.2.3, uno de los objetivos fundamentales del diseño acústico de espacios pertenecientes a una cualquiera de las tres tipologías consideradas consiste en evitar la aparición de ecos, focalizaciones del sonido y eco flotante, ya que las tres anomalías van en detrimento del confort acústico y, además, contribuyen a una pérdida de inteligibilidad de la palabra.

3.3.2.1 Ecos

Las posibles soluciones para prevenir o eliminar ecos son las siguientes:

- Colocar material absorbente por delante de las superficies conflictivas. En cualquier caso, conviene evitar la utilización de grandes cantidades de absorción, ya que ello podría suponer una disminución excesiva del tiempo de reverberación. Como norma práctica, el porcentaje de superficie tratada para evitar exclusivamente la aparición de estas anomalías no debe ser superior al 10% de la superficie total de la sala.
- Dar una forma convexa a las superficies conflictivas.
- Reorientar las superficies conflictivas a fin de redirigir el sonido reflejado hacia otras zonas no problemáticas.

3.3.2.2 Focalizaciones del sonido

En cuanto a la prevención de focalizaciones, habrá que evitar las formas cóncavas en las paredes del recinto, así como la existencia de techos en forma de cúpula. Si el recinto está ya cons-

truido y las focalizaciones son producidas por alguna de sus paredes, las posibles soluciones son equivalentes a las expuestas previamente en relación con la aparición de ecos. Si el techo tiene forma de cúpula, la manera de atenuar el posible efecto de focalización consiste en cubrirlo con algún tipo de material absorbente.

3.3.2.3 Eco flotante

La solución evidente para prevenir la aparición de eco flotante consiste en evitar la existencia de grandes paredes paralelas reflectantes en cualquier zona del recinto, a base de dar una pequeña inclinación (del orden de 5°) a una de las dos paredes. Otra posible solución, aunque menos efectiva, consiste en aplicar un tratamiento absorbente, al menos sobre una de las dos paredes conflictivas.

3.3.3 Criterios para la eliminación o atenuación del efecto tambor

Con objeto de eliminar, o como mínimo atenuar, el efecto tambor en los recintos de uso deportivo, es preciso llenar la cavidad de aire con material absorbente (lana de vidrio o lana mineral) o, preferentemente, montar el pavimento en contacto directo con el forjado para así evitar la existencia de dicha cavidad.

A título ilustrativo, en la tabla 3.2 se dan los valores relativos de los niveles de ruido de impacto generados por diferentes tipos de pavimento. Los valores mostrados corresponden a las bandas de frecuencias desde 125 Hz hasta 4 kHz. Se indican, asimismo, los valores medios globales. Todos los valores están referidos a los valores correspondientes al pavimento de hormigón, que se han tomado como 0 dB.

Según se observa, los niveles más elevados tienen lugar cuando el pavimento es de madera montada sobre rastreles, ya que se crea la mencionada cavidad de aire. En tal caso, el nivel medio de ruido de impacto está 10 dB por encima del correspondiente al pavimento de hormigón. Al llenar la cavidad con material absorbente se produce una atenuación

FRECUENCIA (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000	VALOR MEDIO GLOBAL
Pavimento de madera sobre rastreles (cavidad de aire sin absorbente)	+8	+27	+14	+10	+3	-1	+10
Pavimento de madera sobre rastreles (cavidad rellena con lana de roca)	+10	+15	+11	+6	+3	-2	+7
Pavimento de hormigón	0	0	0	0	0	0	0
Moqueta de alta densidad	-2	-1	-3	-7	-7	-5	-4
Pavimento de linóleum	-3	-3	-6	-9	-9	-12	-7

Tabla 3.2 Niveles relativos de ruido de impacto, en dB, generados por diferentes tipos de pavimento (referencia: pavimento de hormigón)

media de 3 dB, por lo que dicho nivel medio pasa a ser de +7 dB respecto al pavimento de referencia.

Por otro lado, si se parte de un pavimento de hormigón y se recubre con moqueta de alta densidad, entonces tiene lugar una reducción del nivel de ruido en todas las bandas de frecuencias. El valor medio se sitúa 4 dB por debajo del nivel medio de referencia.

Finalmente, con la utilización de un pavimento de linóleum en lugar del de hormigón se consigue el mejor resultado, ya que la reducción del nivel medio de ruido de impacto es de 7 dB.

3.3.4 Criterios de ubicación de los altavoces del sistema de megafonía

Si bien el diseño de sistemas de megafonía no se halla dentro de los objetivos de este libro, sí que resulta conveniente dar unos criterios generales en cuanto a las diferentes posibilidades de ubicación de los altavoces.

Básicamente existen dos planteamientos:

- Colocación de los altavoces agrupados en forma de “piña” (“cluster”) → sistema concentrado
- Distribución de los altavoces en diferentes puntos del espacio → sistema distribuido

La concentración de altavoces es recomendable cuando las condiciones acústicas del espacio son buenas, es decir, cuando los objetivos acústicos inicialmente planteados se han podido alcanzar.

Habitualmente, esta disposición permite conseguir una buena uniformidad de cobertura, ya que los altavoces se hallan relativamente lejos del público. Por otra parte, también permite una simplificación en el diseño del sistema de canalizaciones y cableado que proporciona la señal eléctrica a los altavoces, precisamente debido al hecho de que todos ellos están muy próximos entre sí. Como desventaja respecto al sistema distribuido, cabe destacar la obtención de una menor inteligibilidad de la palabra debido a la mayor distancia entre los altavoces y el público.

El sistema distribuido es beneficioso cuando las condiciones acústicas no son todo lo favorables que cabría esperar. Es el caso, por ejemplo, de multitud de polideportivos, estaciones de tren y aeropuertos.

El criterio a seguir consiste en situar los altavoces en puntos cercanos a las diferentes zonas de público, con objeto de aumentar el nivel de campo directo. Obviamente, para conseguir una uniformidad de cobertura correcta es preciso utilizar muchos más altavoces que en el caso de los sistemas concentrados, lo cual complica y encarece el sistema de canalizaciones y cableado. En cambio, la inteligibilidad de la palabra es mayor, especialmente en todos los puntos situados dentro de la zona de campo directo de cada uno de los altavoces utilizados.

Por otro lado, los altavoces no deben colocarse enfrentados, especialmente si la distancia entre los mismos es grande, ya que ello probablemente daría lugar a la aparición de ecos en diferentes puntos del recinto. Es el caso, por ejemplo, de aquellos polideportivos con un tratamiento acústico adecuado, pero con un conjunto de altavoces distribuidos de forma peri-

metral por detrás de las gradas de público, como si se tratase de focos de luz. Además, si el espacio es muy reverberante, es conveniente utilizar el máximo número de altavoces posible y aplicarles una potencia eléctrica mínima a fin de que su contribución al nivel de campo reverberante sea, igualmente, mínima.

En ocasiones, se utiliza un sistema híbrido constituido por un sistema de altavoces concentrado (sistema principal) y un conjunto de altavoces adicionales (altavoces satélite), estratégicamente distribuidos con objeto de reforzar todas aquellas zonas que resultan ser más problemáticas.

En el apartado 3.5 se presentan dos ejemplos de sistemas de megafonía, uno con altavoces concentrados y otro con altavoces distribuidos. Los resultados mostrados se han obtenido con el programa de simulación electroacústica CADP2 (“Computer Aided Design Program 2”) de la casa JBL. Dicho programa, así como otros programas existentes en el mercado, permite calcular niveles de presión sonora, cobertura e inteligibilidad de la palabra, además de ecogramas. El programa parte del modelo arquitectónico de la sala, de información relativa a los materiales utilizados como acabados de la misma y de las características técnicas del sistema de altavoces propuesto (figura 3.3).

150

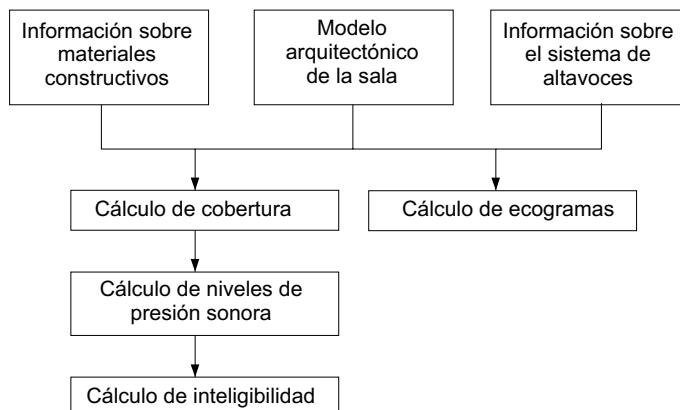


Fig. 3.3 Estructura básica de un programa de simulación electroacústica

3.4 Ejemplos prácticos de diseño acústico

A continuación se describen de forma resumida tres ejemplos prácticos de diseño de los siguientes espacios tipo, todos ellos tratados en este capítulo:

- Bar-restaurante
- Polideportivo
- Sala de conferencias

3.4.1 Bar-restaurante de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Vallés, Sant Cugat (Barcelona, España)

Arquitecto: Lluís Nadal Oller

Estudio acústico: Audioscan, ingeniería del sonido

3.4.1.1 Descripción del espacio

Sala de planta rectangular de 21,6 m de largo, 8,5 m de ancho y 3,05 m de alto, con un volumen de 560 m³ (figura 3.4).



151



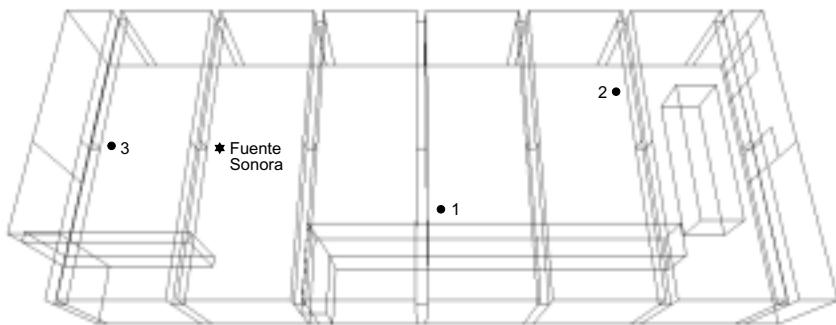
Fig. 3.4 Bar-restaurante de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Vallés, Sant Cugat (Barcelona, España)

3.4.1.2 Objetivos acústicos

- RT_{mid} (sala ocupada): entre 0,7 y 0,9 s
- RASTI (sala ocupada) $\geq 0,65$
- Ausencia de ecos y focalizaciones del sonido

3.4.1.3 Resultados de las medidas previas al acondicionamiento acústico. Diagnóstico acústico

Las medidas se realizaron en condiciones de sala vacía. En la figura 3.5 se muestran las ubicaciones de los 3 puntos de medida, así como la situación de la fuente sonora.



152

Fig. 3.5 Ubicación de la fuente sonora y de los puntos de medida

a) Tiempo de reverberación (RT)

En la figura 3.6 se representan los valores medidos del tiempo de reverberación.

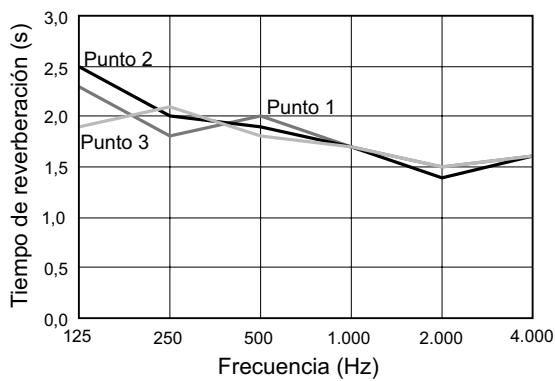


Fig. 3.6 Valores medidos del tiempo de reverberación

El valor promedio de RT_{mid} es de 1,8 s. Si bien el valor de RT_{mid} calculado con la sala ocupada disminuye, sigue siendo superior al valor recomendado y, por tanto, el grado de confort acústico no es satisfactorio.

b) Inteligibilidad de la palabra (RASTI)

En la tabla 3.3 aparecen representados los valores de RASTI medidos en los tres puntos, junto con la valoración subjetiva asociada.

PUNTO DE MEDIDA	RASTI	VALORACIÓN SUBJETIVA
Punto 1	0,48	Pobre
Punto 2	0,48	Pobre
Punto 3	0,52	Regular

Tabla 3.3 Valores de RASTI medidos y correspondiente valoración subjetiva

El valor promedio de RASTI es de 0,49. Aunque con la sala ocupada dicho valor aumenta, sigue siendo inferior al mínimo deseado. Ello viene motivado por el valor excesivamente alto del tiempo de reverberación RT_{mid} .

c) Análisis de posibles ecos y focalizaciones del sonido

En la figura 3.7 se muestra la gráfica de decaimiento energético correspondiente al punto 1.

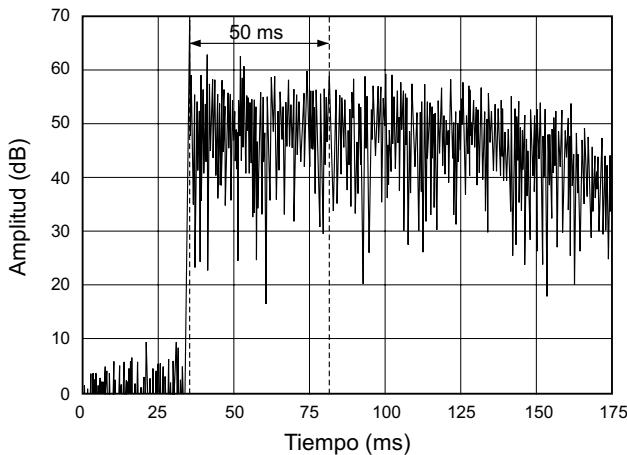


Fig. 3.7 Curva de decaimiento energético en el punto de medida 1

Según se observa, no existen reflexiones significativas a partir de los 50 ms desde la llegada del sonido directo. Como también sucede lo mismo en los otros dos puntos de medida, se puede concluir que no aparecen ecos ni focalizaciones del sonido.

3.4.1.4 Propuesta de acondicionamiento acústico

Con objeto de mejorar las condiciones acústicas de la sala y cumplir los objetivos marcados, se plantea el tratamiento del techo del bar, ya que representa un porcentaje grande de superficie respecto a la superficie total y, en consecuencia, su influencia sobre el comportamiento acústico es notoria.

En concreto, se propone el montaje de un falso techo a base de placas de cartón-yeso perforadas y revestidas por el dorso con un velo de protección de la caída de polvo. Las perforaciones serán circulares y estarán dispuestas en forma de cuadrícula. El diámetro y la separación entre las mismas será de 12 mm y 25 mm, respectivamente. Ello supone un porcentaje de superficie perforada del 18%.

Para aumentar la absorción acústica, por encima de dichas placas se propone colocar planchas de lana mineral de espesor 80 mm y densidad 15 Kg/m³. Además, el conjunto deberá instalarse a una distancia media de 25 cm del techo a fin de conseguir una absorción más uniforme en las todas las bandas de frecuencias de interés.

3.4.1.5 Resultados de las medidas efectuadas después del acondicionamiento acústico propuesto y valoración acústica de la sala

a) Tiempo de reverberación (RT)

154

En la figura 3.8 se representan los valores de los tiempos de reverberación de la sala vacía y de la sala ocupada.

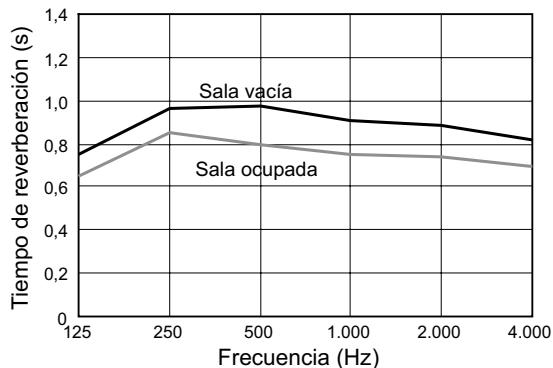


Fig. 3.8 Valores de los tiempos de reverberación correspondientes a la sala vacía y a la sala ocupada, con el tratamiento acústico propuesto

Los valores correspondientes a la sala vacía se han obtenido a partir de las medidas realizadas una vez efectuado el tratamiento acústico propuesto. Los valores de la sala ocupada se han calculado mediante simulación informática a partir de los correspondientes a la sala vacía.

El valor de RT_{mid} correspondiente a la sala vacía es de 0,94 s, mientras que para la sala ocupada es de 0,78 s. Este último valor se halla dentro del margen de valores prefijado (entre 0,7 y 0,9 s). El confort acústico es, pues, satisfactorio.

b) Inteligibilidad de la palabra (RASTI)

El valor promedio de RASTI obtenido a partir de las medidas realizadas es de 0,66, mientras que el calculado mediante simulación (sala ocupada) es de 0,68. Al hallarse por encima del valor mínimo prefijado de 0,65, la inteligibilidad de la palabra es, efectivamente, “buena”.

3.4.2 Polideportivo del Campus Norte de la Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona (España)

Arquitecto: Francesc Rius Camps

Estudio acústico: Audioscan, ingeniería del sonido

3.4.2.1 Descripción del espacio

Recinto con un volumen aproximado de 19.000 m³. Pista de planta rectangular, de 48 m de largo por 30 m de ancho. Existencia de dos pisos laterales a ambos lados de la pista (figura 3.9).



Fig. 3.9 Polideportivo del Campus Norte de la Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona (España)

3.4.2.2 Objetivos acústicos

- RT_{mid} (recinto ocupado): entre 1,5 y 2 s
- RASTI (recinto ocupado) $\geq 0,50$
- Ausencia de ecos y focalizaciones del sonido

3.4.2.3 Materiales utilizados como acabados del recinto

- Techo: chapa metálica perforada con cavidad de aire en su parte superior rellena de material absorbente
- Paredes fondos (altura $\leq 2,5$ m): listones de madera separados 1 cm, con absorbente en su parte posterior (porcentaje aproximado de superficie abierta: 5%)
- Paredes fondos (altura $\geq 2,5$ m): tablero perforado de madera de 1 cm de espesor dispuesto sobre rastreles, con material absorbente en su parte posterior
- Paredes laterales: tablero de madera sin perforar de 1 cm de espesor dispuesto sobre rastreles, sin absorbente en su parte posterior
- Paredes pisos y techo primer piso: hormigón visto
- Techo segundo piso: viruta de madera aglomerada con magnesita
- Barandillas pisos: tablero de madera sin perforar
- Ventana en pared del fondo sur: cristal (con una inclinación de 5°)
- Suelo pista: parquet de 24 mm montado sobre rastreles

3.4.2.4 Resultados de las medidas efectuadas y valoración acústica del recinto

a) Tiempo de reverberación (RT)

156

En la figura 3.10 se representan los valores medios de los tiempos de reverberación del recinto vacío y del recinto ocupado.

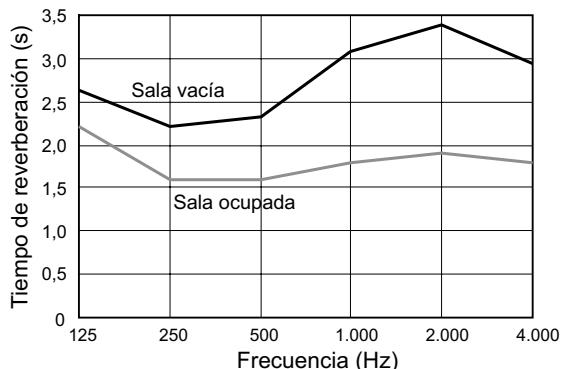


Fig. 3.10 Valores medios de los tiempos de reverberación correspondientes al recinto vacío y al recinto ocupado, con el tratamiento acústico utilizado

Los valores correspondientes al recinto vacío se han obtenido a partir de las medidas realizadas. Los valores del recinto ocupado se han calculado mediante simulación informática a partir de los correspondientes al recinto vacío.

El valor de RT_{mid} correspondiente a la sala vacía es de 2,71 s, mientras que para la sala ocupada es de 1,70 s. Este último valor está dentro del margen de valores recomendado (entre 1,5 y 2 s). El confort acústico es, pues, satisfactorio.

b) Inteligibilidad de la palabra (RASTI)

El valor promedio de RASTI obtenido a partir de las medidas realizadas es de 0,44 (recinto vacío), mientras que el calculado mediante simulación (recinto ocupado) es de 0,57. Dicho valor es superior al valor mínimo prefijado de 0,50. Por lo tanto, la inteligibilidad de la palabra es “aceptable”.

c) Análisis de posibles ecos y focalizaciones del sonido

La pequeña separación (1 cm) entre los listones de madera colocados sobre las paredes de los fondos del recinto hasta una altura de 2,5 m (muy inferior a la propuesta en el estudio acústico) provoca la aparición de reflexiones de nivel algo elevado. En determinados casos, dichas reflexiones pueden dar lugar a ecos.

A modo de ejemplo ilustrativo, en la figura 3.11 se muestra la curva de decaimiento energético correspondiente a un punto situado en el centro de la pista.

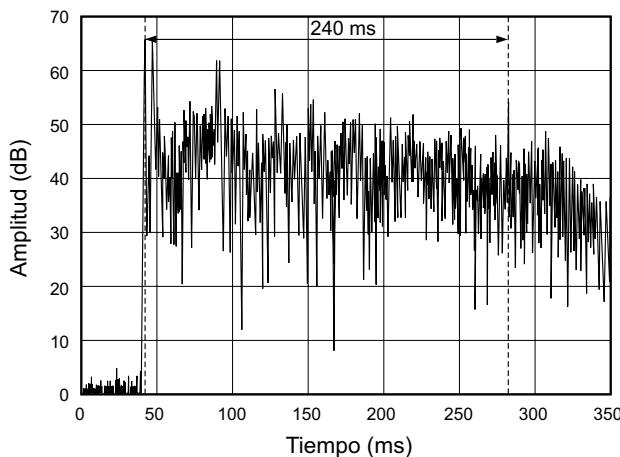


Fig. 3.11 Curva de decaimiento energético correspondiente a un punto situado en el centro de la pista

Se observa la existencia de una reflexión con un retardo de 240 ms respecto al sonido directo y con un nivel 11 dB por debajo del correspondiente a dicho sonido. La mencionada reflexión es percibida en forma de un ligero eco.

3.4.3 Sala de actos del edificio docente de la Dirección General de Deportes de la Generalitat de Cataluña, Esplugues de Llobregat (Barcelona, España)

Arquitecto: Luis Antonio Twose Roura

Estudio acústico y de sonorización: Audioscan, ingeniería del sonido

3.4.3.1 Descripción del espacio

Sala de planta rectangular, de unos 20 m de largo por 18 m de ancho, con un desnivel de unos 70 cm y una altura máxima de 5,5 m en la zona próxima al escenario. Su volumen aproximado es de 1.900 m³ y su capacidad de 288 localidades (figura 3.12).



158

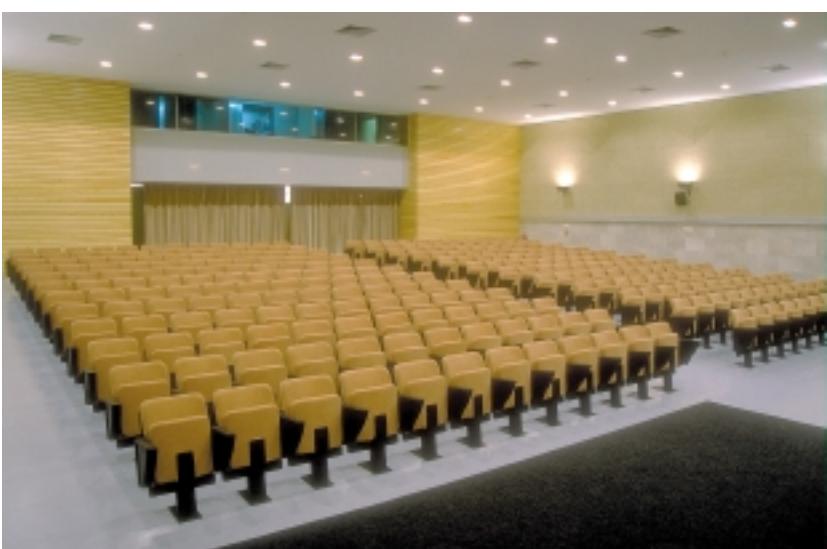


Fig. 3.12 Sala de actos del edificio docente de la Dirección General de Deportes de la Generalitat de Cataluña, Esplugues de Llobregat (Barcelona, España)

3.4.3.2 Objetivos acústicos

- RT_{mid} (sala ocupada): entre 0,8 y 1 s
- RASTI (sala ocupada y sistema de megafonía en marcha) $\geq 0,65$
- Ausencia de ecos y focalizaciones del sonido con el sistema de megafonía en marcha (condición normal de funcionamiento)

3.4.3.3 Materiales utilizados como acabados de la sala

- Techo: cartón-yeso
- Paredes laterales (hasta una altura media de 2 m): piedra
- Paredes laterales (a partir de una altura media de 2 m): viruta de madera aglomerada con magnesita
- Laterales escenario y laterales pared posterior: resonador múltiple de Helmholtz a base de listones de madera con lana de vidrio en su parte posterior
- Zona central escenario y zona posterior de acceso a la sala: cortinas
- Cabina de control: cristal
- Franja entre la cabina de control y la zona de acceso a la sala: enlucido de yeso
- Suelo escenario: moqueta
- Suelo sala: pavimento sintético (P.V.C.)
- Sillas: porcentaje medio de superficie tapizada

3.4.3.4 Sistema de altavoces propuesto

El sistema de altavoces propuesto para la sala está formado por 4 altavoces dispuestos según se muestra en la figura 3.13.

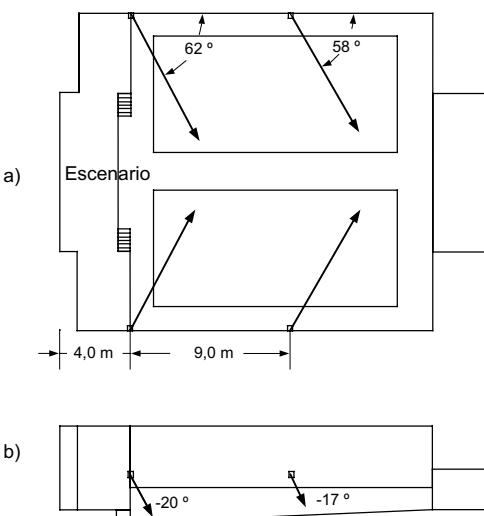


Fig. 3.13 Ubicación y orientación de los altavoces de la sala de actos del edificio docente de la Dirección General de Deportes de la Generalitat de Cataluña: a) planta; b) sección; c) detalle de un altavoz

3.4.3.5 Resultados de las medidas efectuadas y valoración acústica de la sala

a) Tiempo de reverberación (RT)

En la figura 3.14 se representan los valores medios de los tiempos de reverberación de la sala vacía y de la sala ocupada.

Los valores correspondientes a la sala vacía se han obtenido a partir de las medidas realizadas. Los valores de la sala ocupada se han calculado mediante simulación informática a partir de los correspondientes a la sala vacía.

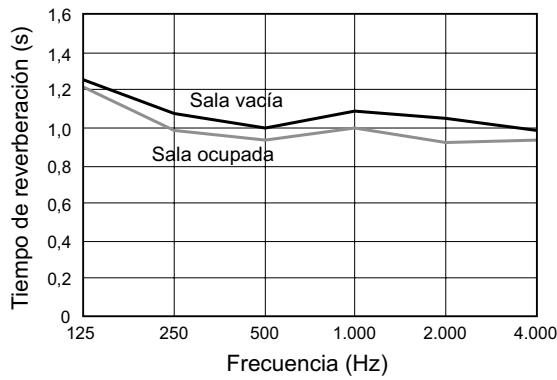


Fig. 3.14 Valores medios de los tiempos de reverberación correspondientes a la sala vacía y a la sala ocupada, con el tratamiento acústico propuesto

El valor de RT_{mid} correspondiente a la sala vacía es de 1,05 s, mientras que para la sala ocupada es de 0,95 s. Este último valor se encuentra dentro del margen de valores recomendado (entre 0,8 y 1 s). El confort acústico es, por lo tanto, satisfactorio.

b) Inteligibilidad de la palabra (RASTI)

El valor promedio de RASTI obtenido a partir de las medidas realizadas es de 0,71 (sala vacía), mientras que el calculado mediante simulación (sala ocupada) es de 0,75. Dicho valor es superior al valor mínimo prefijado de 0,65. Por consiguiente, la inteligibilidad de la palabra es “buena”.

c) Análisis de posibles ecos y focalizaciones del sonido

La medida de la curva de decaimiento energético en distintos puntos de la sala con el sistema de megafonía funcionando ha permitido verificar la ausencia total de ecos y focalizaciones en

la misma. Como ejemplo ilustrativo, en la figura 3.15 se muestra la curva correspondiente a un punto central de la sala.

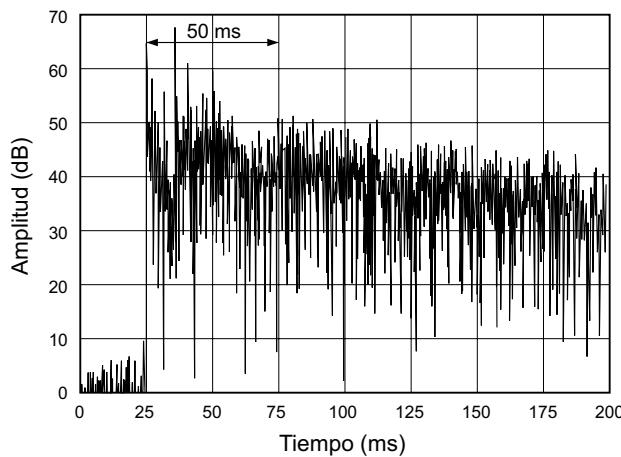


Fig. 3.15 Curva de decaimiento energético correspondiente a un punto central de la sala con el sistema de megafonía en funcionamiento

Se observa, en efecto, la inexistencia de reflexiones significativas con un retardo superior a los 50 ms desde la llegada del primer sonido directo.

3.5 Ejemplos prácticos de diseño de sistemas de megafonía

A continuación se describen de forma resumida dos ejemplos prácticos de diseño de sistemas de megafonía. El primero corresponde a un pabellón polideportivo (sistema concentrado) y el segundo a una catedral (sistema distribuido).

3.5.1 Pabellón Polideportivo de Zurbano (Vitoria, España)

Estudio de sonorización: Audioscan, ingeniería del sonido

3.5.1.1 Descripción del espacio

Recinto de planta circular con un radio de unos 38 m (incluyendo pista deportiva y gradas) y un volumen aproximado de 65.000 m³. La pista es rectangular con una superficie de unos 37 m de largo por 31 m de ancho. Las gradas están dispuestas perimetralmente en dos niveles. La cubierta está acústicamente tratada (figura 3.16).



162

Fig. 3.16 Pabellón Polideportivo de Zurbano (Vitoria, España) con el sistema de megafonía instalado

3.5.1.2 Objetivos a cumplir por el sistema de megafonía^(*)

- $L_p \geq 90 \text{ dB}$
- $\Delta L_p \leq \pm 3 \text{ dB}$ (bandas de 500 Hz y 2 kHz)
- RASTI (recinto ocupado y sistema de megafonía en marcha) $\geq 0,50$
- Ausencia de ecos

3.5.1.3 Sistema de megafonía propuesto

En las figuras 3.17 y 3.18 se muestran la ubicación y orientación de los altavoces correspondientes al sistema de megafonía propuesto. Se trata de dos piñas de altavoces situadas en la

^(*) Solamente se mencionan aquellos objetivos cuyo cumplimiento se puede verificar mediante simulación electroacústica

zona central del recinto. La piña superior está formada por 6 cajas acústicas y su misión es sonorizar las distintas zonas de público, mientras que la inferior está formada por 3 cajas acústicas, encargadas de proporcionar señal a la pista de juego.

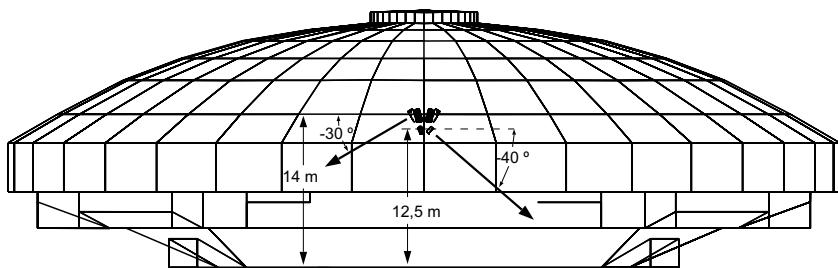


Fig. 3.17 Pabellón Polideportivo de Zurbano: ubicación y orientación de las cajas acústicas (vista en alzado)

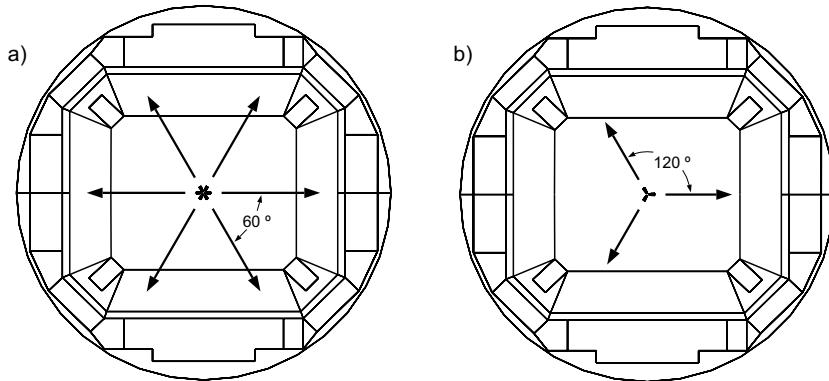


Fig. 3.18 Pabellón Polideportivo de Zurbano: orientación de las cajas acústicas destinadas a sonorizar: a) las zonas de público; b) la pista de juego (vista en planta)

3.5.1.4 Resultados de la simulación realizada y valoración electroacústica del recinto

a) Nivel total de presión sonora y uniformidad de cobertura

En la figura 3.19 se representan los mapas de niveles de presión sonora correspondientes a las bandas de 500 Hz y 2 kHz.

Como se puede observar, el nivel de presión sonora en cada banda de octava es superior al valor establecido como objetivo (90 dB).

Debido a que el nivel total de presión sonora L_p se obtiene como suma de las contribuciones de todas las bandas de octava reproducidas por los altavoces utilizados, se puede asegurar que:

$$L_p > 90 \text{ dB}$$

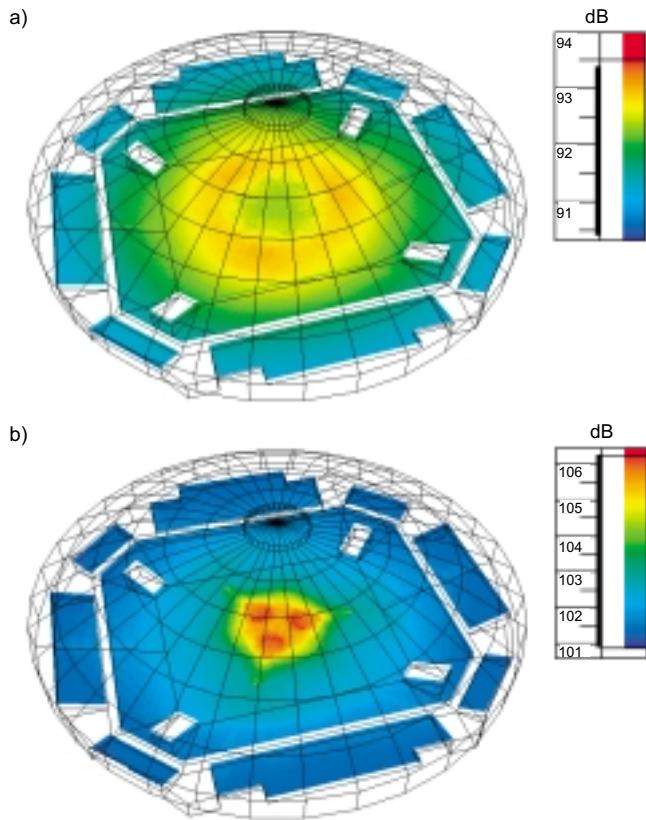


Fig. 3.19 Pabellón Polideportivo de Zurbano: mapas de niveles de presión sonora correspondientes a las bandas de: a) 500 Hz; b) 2 kHz

Por otro lado, la cobertura obtenida en cada banda es:

$$\Delta L_p = \pm 1,5 \text{ dB} \text{ (banda de 500 Hz)}$$

$$\Delta L_p = \pm 2,5 \text{ dB} \text{ (banda de 2 kHz)}$$

Luego, efectivamente, en ambas bandas la variación del nivel de presión sonora está por debajo de la máxima variación permitida de ± 3 dB.

b) Inteligibilidad de la palabra (RASTI y %ALCons)

Por lo que se refiere a la inteligibilidad de la palabra, en la figura 3.20 se muestra el mapa de valores de %ALCons, suponiendo que el recinto está ocupado.

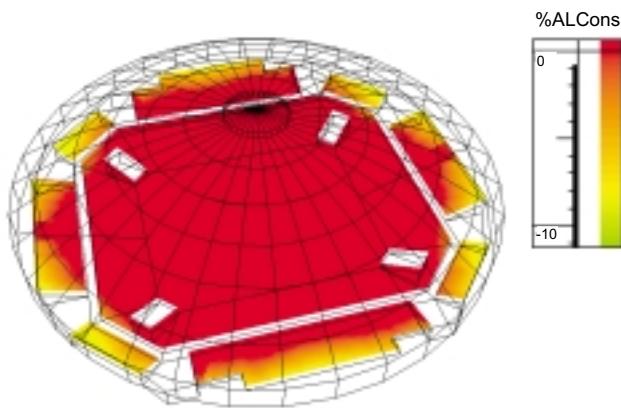


Fig. 3.20 Pabellón Polideportivo de Zurbano: mapa de valores de %ALCons (recinto ocupado)

Según se observa, los valores de %ALCons oscilan entre:

$$1 \leq \% \text{ALCons} \leq 6 \%$$

Ello equivale a unos valores de RASTI entre:

$$0,62 \leq \text{RASTI} \leq 0,94$$

Por lo tanto, en todos los puntos se cumple el objetivo establecido:

$$\text{RASTI} \geq 0,50 \quad (\% \text{ALCons} \leq 11,4 \%)$$

c) Análisis de posibles ecos

A partir del cálculo de ecogramas en diferentes puntos representativos del recinto se ha podido constatar la inexistencia de ecos debidos al sistema de megafonía.

3.5.2 Catedral de Vitoria (España)

Estudio de sonorización: Audioscan, ingeniería del sonido

3.5.2.1 Descripción del espacio

La catedral nueva de Vitoria presenta una planta cruciforme, con una longitud de unos 96 m desde el ábside hasta la puerta y de unos 62 m de un extremo al otro del crucero. El edificio está formado por 5 naves: una central de unos 12 m de anchura, dos naves intermedias cada

una con una anchura aproximada de 8 m, y dos naves externas laterales de 6,5 m de anchura. La altura es de unos 17 m y el volumen aproximado de 93.000 m³ (figura 3.21).

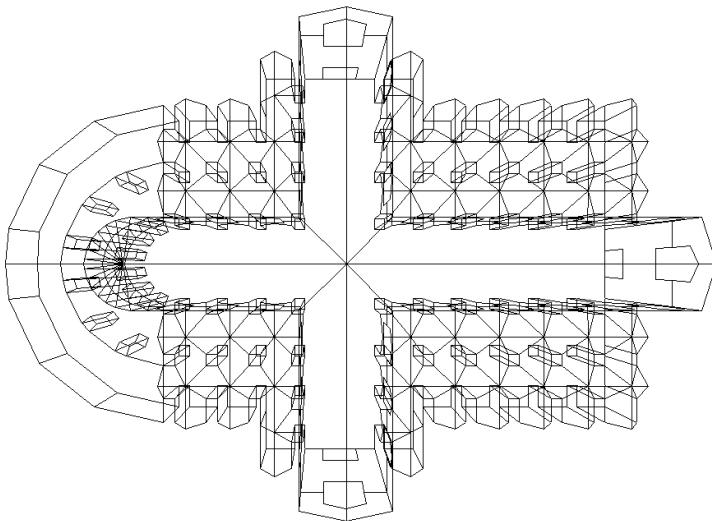


Fig. 3.21 Catedral de Vitoria (España): modelo informático elaborado para la posterior simulación electroacústica

3.5.2.2 Objetivos a cumplir por el sistema de megafonía^(*)

- $L_p \geq 90$ dB
- $L_p \leq \pm 3$ dB (bandas de 500 Hz y 2 kHz)
- RASTI (recinto ocupado y sistema de megafonía en marcha) $\geq 0,50$

3.5.2.3 Sistema principal de megafonía propuesto

En la figura 3.22 se muestra la ubicación de los altavoces correspondientes al sistema principal de megafonía propuesto. Se trata de un sistema distribuido formado por 36 cajas acústicas repartidas en un total de 28 puntos.

^(*) Solamente se mencionan aquellos objetivos cuyo cumplimiento se puede verificar mediante simulación electroacústica

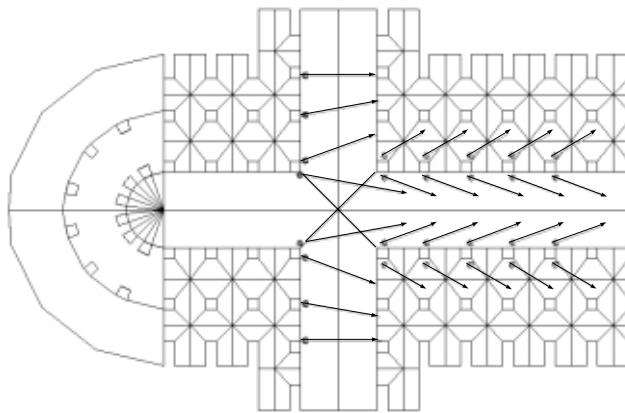


Fig. 3.22 Catedral de Vitoria: ubicación de las cajas acústicas propuestas (vista en planta)

3.5.2.4 Resultados de la simulación realizada y valoración electroacústica del recinto

a) Nivel total de presión sonora y uniformidad de cobertura

En la figura 3.23 se representan los mapas de niveles de presión sonora correspondientes a las bandas de 500 Hz y 2 kHz.

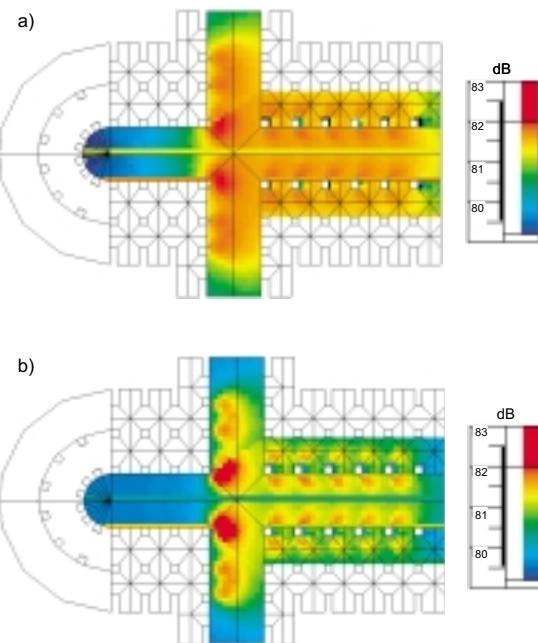


Fig. 3.23 Catedral de Vitoria: a) mapas de niveles de presión sonora correspondientes a las bandas de: a) 500 Hz; b) 2 kHz

Como se puede observar, el nivel medio de presión sonora en cada banda de octava es de aproximadamente 82 dB.

El nivel total de presión sonora L_p se obtiene como suma de las contribuciones de todas las bandas de octava reproducidas por los altavoces utilizados. Como dicho nivel está, como mínimo, 8 dB por encima del nivel correspondiente a cada octava, resulta que:

$$L_p \approx 90 \text{ dB}$$

Este nivel coincide con el valor mínimo establecido como objetivo.

Por otro lado, la cobertura obtenida en las dos bandas de interés es:

$$\Delta L_p = \pm 1,5 \text{ dB} \text{ (bandas de 500 Hz y de 2 kHz)}$$

Por lo tanto, en ambas bandas, la variación es inferior a la máxima permitida de ± 3 dB.

b) Inteligibilidad de la palabra (RASTI y %ALCons)

En cuanto a la inteligibilidad, en la figura 3.24 se muestra el mapa de valores de %ALCons, suponiendo que el recinto está ocupado.

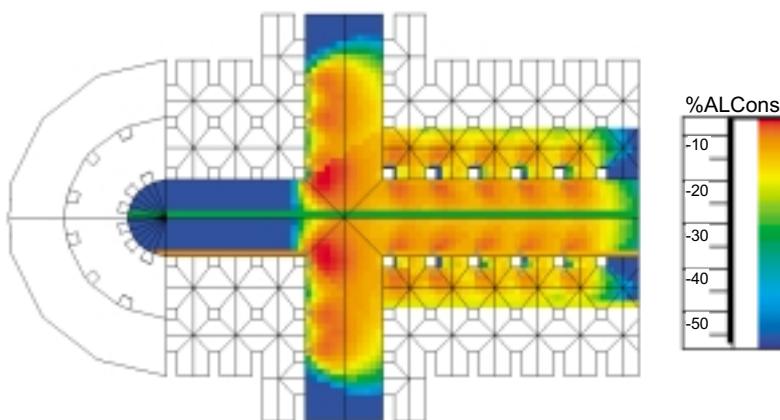


Fig. 3.24 Catedral de Vitoria: mapa de valores de %ALCons (recinto ocupado)

Según se observa, los valores de %ALCons oscilan entre:

$$8 \leq \% \text{ ALCons} \leq 20\%$$

Ello equivale a unos valores de RASTI entre:

$$0,40 \leq \text{RASTI} \leq 0,56$$

Como cabía esperar por el gran volumen del recinto y la falta de tratamiento acústico del mismo, el cumplimiento del objetivo establecido ($\text{RASTI} \geq 0,50$) solamente tiene lugar en las zonas más próximas a los altavoces. En cualquier caso, estos resultados son mucho más favorables que los que se obtendrían con un sistema de altavoces concentrado.

Diseño acústico de teatros

4.1 Introducción

El objetivo acústico fundamental que se pretende conseguir cuando se diseña un espacio destinado a actividades teatrales es que la inteligibilidad de la palabra, o grado de comprensión del mensaje oral, sea óptima en todos sus puntos. En el caso de que el espacio sea cerrado, se plantea un objetivo adicional, consistente en lograr que la sonoridad, indicativa del grado de amplificación producido por la sala, sea suficientemente elevada. Este último objetivo se debe cumplir en el supuesto de que no se utilice ningún sistema de megafonía en la sala, como así se considera a lo largo del capítulo. En el caso de plantearse el uso de tal sistema, los objetivos que se deberían cumplir serían coincidentes con los expuestos en el capítulo precedente (apartado 3.2.5).

A continuación se presenta una breve reseña histórica de la evolución de este tipo de recintos elaborada desde el punto de vista del cumplimiento de los citados objetivos acústicos.

4.2 Teatros al aire libre

En el espacio libre, el único sonido que se propaga desde la fuente sonora hasta el receptor es el sonido directo. Tal como se ha expuesto en el apartado 1.14, el nivel de presión sonora asociado al mismo disminuye 6 dB cada vez que se dobla la distancia a la fuente. Según experimentos llevados a cabo por Knudsen, la máxima distancia a la que puede ser oído un mensaje oral emitido en una zona extremadamente silenciosa (con ausencia total de viento) es de 42 m en la dirección frontal del orador, de 30 m lateralmente y de 17 m en la dirección posterior. A distancias superiores, el mensaje deja de ser inteligible, con independencia del lugar elegido para llevar a cabo la experiencia. La reducción tan significativa de la máxima distancia a medida que la dirección considerada se aleja de la dirección frontal se debe a las características direccionales de la voz humana expuestas en el apartado 1.13.2.

4.2.1 Teatros clásicos griegos

En los teatros clásicos griegos se alcanzaban distancias sustancialmente mayores que las anteriormente mencionadas. En concreto en el teatro de Epidauro, Grecia (figuras 4.1 y 4.2), construido alrededor del año 300 a.C. y actualmente conservado en buen estado, el asiento más alejado se hallaba a 70 m del escenario y la inteligibilidad en dicho punto era sorprendentemente buena.



170

Fig. 4.1 Teatro de Epidauro (Grecia)

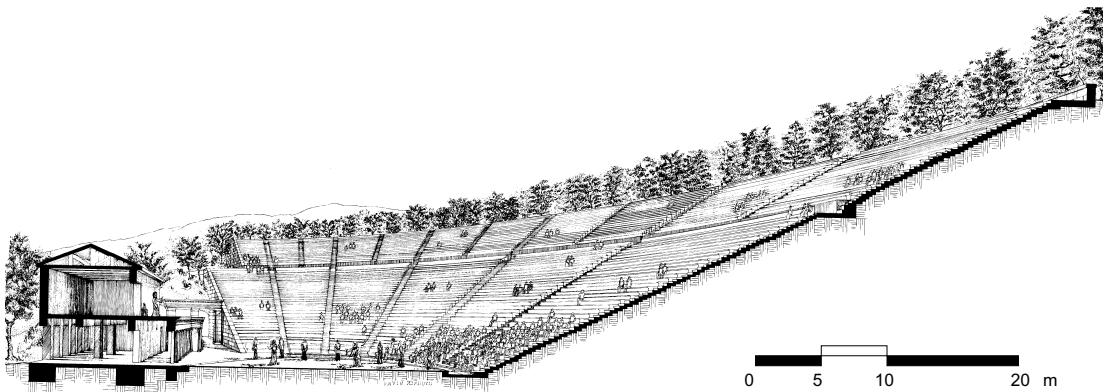


Fig. 4.2 Teatro de Epidauro, Grecia (sección longitudinal en perspectiva)

La explicación de tal circunstancia radica principalmente en el hecho de que el teatro se hallaba ubicado en una zona con un ruido ambiental extremadamente bajo y que, además, el sonido directo que llegaba a cada punto se veía reforzado por la existencia de primeras reflexiones (retardo máximo de 50 ms respecto a la llegada del sonido directo). Tales reflexiones se generaban en la plataforma circular altamente reflectante situada entre el escenario y las gradas, denominada “orquesta” (figura 4.3).

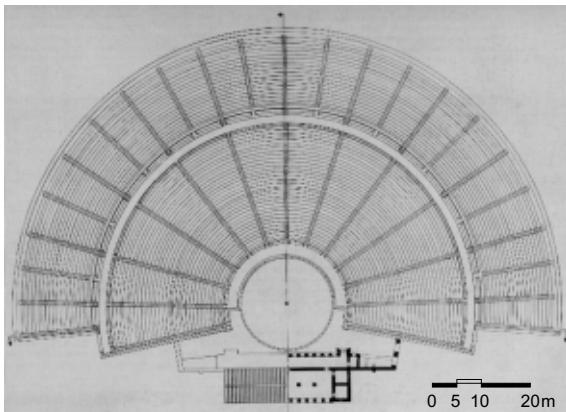


Fig. 4.3 Teatro de Epidauro, Grecia (planta)

zadas por los actores, que probablemente desempeñaban una función acústica al actuar a modo de megáfono por delante de su boca, justifican el hecho de alcanzar los mencionados 70 m.

En la figura 4.3 se observa que la forma típica de abanico de los teatros griegos abarcaba, en este caso, un arco de 210° . Ello implica que tanto la visibilidad como las condiciones acústicas en las zonas situadas a ambos extremos de la plataforma circular eran claramente menos favorables que en las zonas restantes. Dichas localidades se reservaban para los extranjeros, para los espectadores que llegaban tarde a la representación y para las mujeres.

Otra característica distintiva de los teatros griegos era la pronunciada pendiente de sus gradas, normalmente entre 20° y 34° . Estos elevados valores eran beneficiosos, tanto para conseguir buenas visuales desde todos los puntos de las gradas (apartado 4.7.2) como para la obtención de mayores ángulos de incidencia de los sonidos directo α y reflejado β .

Concretamente, en el teatro de Epidauro, el círculo interior presentaba una pendiente de $26,2^\circ$, el anillo exterior de $26,5^\circ$, mientras que el ángulo β formado por el plano de las gradas y las diversas reflexiones sobre la plataforma circular era siempre mayor que 5° . Ello era posible debido a que la altura del escenario no superaba los 3,5 m (figura 4.4).

El teatro de Epidauro acomodaba del orden de 14.000 espectadores, es decir, unas diez veces la capacidad de los mayores teatros actuales.

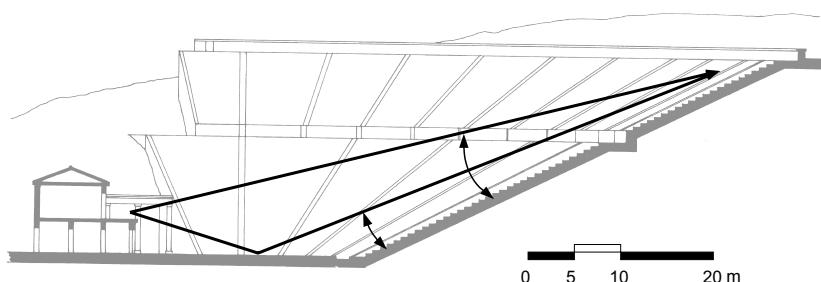


Fig. 4.4 Teatro de Epidauro (Grecia): ángulos de incidencia del sonido directo (α) y del sonido reflejado (β)

Desde un punto de vista teórico, la existencia de una única primera reflexión generada por una superficie totalmente reflectante produce un incremento de 3 dB en el nivel de presión sonora, ya que la energía sonora se dobla. Ello da lugar a un factor de aumento neto de la distancia límite de audición de $\sqrt{2}$. Por lo tanto, debido a dicha circunstancia, la distancia límite en la dirección frontal del actor pasaría a ser del orden de 60 m ($\sqrt{2} \times 42$ m). Ahora bien, la consideración de la reflexión producida por la pared posterior del escenario y las máscaras utilizadas por los actores, que probablemente desempeñaban una función acústica al actuar a modo de megáfono por delante de su boca, justifican el hecho de alcanzar los mencionados 70 m.

Un ejemplo de teatro moderno construido siguiendo la filosofía de los teatros griegos lo constituye el teatro de Waldbühne, Berlín, Alemania (figura 4.5). En este caso, las gradas están divididas en tres zonas, cada una con una pendiente de 15° , 23° y 30° , respectivamente.

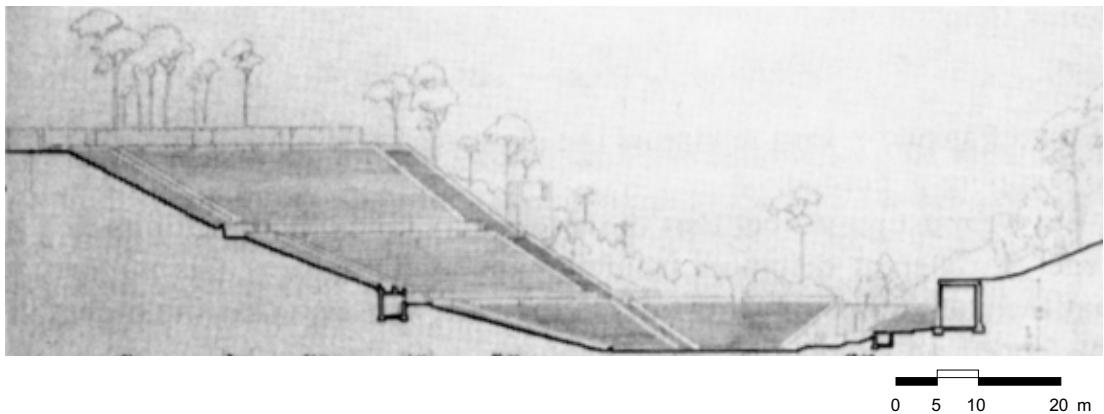


Fig. 4.5 Teatro de Waldbühne, Berlín, Alemania (sección longitudinal en perspectiva)

4.2.2 Teatros clásicos romanos

172

Siguiendo con los ejemplos de teatros clásicos al aire libre, los teatros romanos diferían de los teatros griegos en varios aspectos significativos.

Por detrás del escenario existía una pared muy elevada, repleta de elementos de decoración muy elaborados, conocida con el nombre de “scenae frons”. La zona denominada “orquestra” tenía una forma semicircular, al igual que las gradas de público, y estaba generalmente ocupada por los senadores. Ello exigía que la altura del escenario fuese inferior a la de los teatros griegos a fin de que la visión desde dicha zona fuera correcta y, además, impedía que la misma actuase como superficie generadora de primeras reflexiones hacia los espectadores debido a la absorción acústica propia de los senadores. Dicha altura era del orden de 1,5 m.

Así pues, con objeto de mantener unas condiciones de óptima inteligibilidad en todos los puntos, resultaba imprescindible reducir las dimensiones en relación con las de los teatros griegos y, al mismo tiempo, garantizar la existencia de una elevada pendiente de las gradas (habitualmente, entre 30° y 34°).

Un ejemplo de teatro romano bien conservado lo constituye el teatro de Aspendus, Turquía (figuras 4.6 y 4.7).

La capacidad del mismo era de 6.000 espectadores, mientras que la distancia entre el escenario y el asiento más lejano era de 53 m. Efectivamente, ambos valores son apreciablemente más bajos que los correspondientes al teatro griego de Epidauro.

Por otra parte, cabe destacar el hecho de que en éste y en otros teatros romanos existía una lona que protegía a los espectadores de los rayos del sol. Si bien este material es medianamente reflectante, se puede considerar que su presencia no daba lugar a la aparición de reverberación. En cambio, si la lona hubiese cubierto la totalidad del teatro, la reverberación habría sido tan elevada que habría impedido su uso como teatro debido a la considerable pérdida de inteligibilidad.

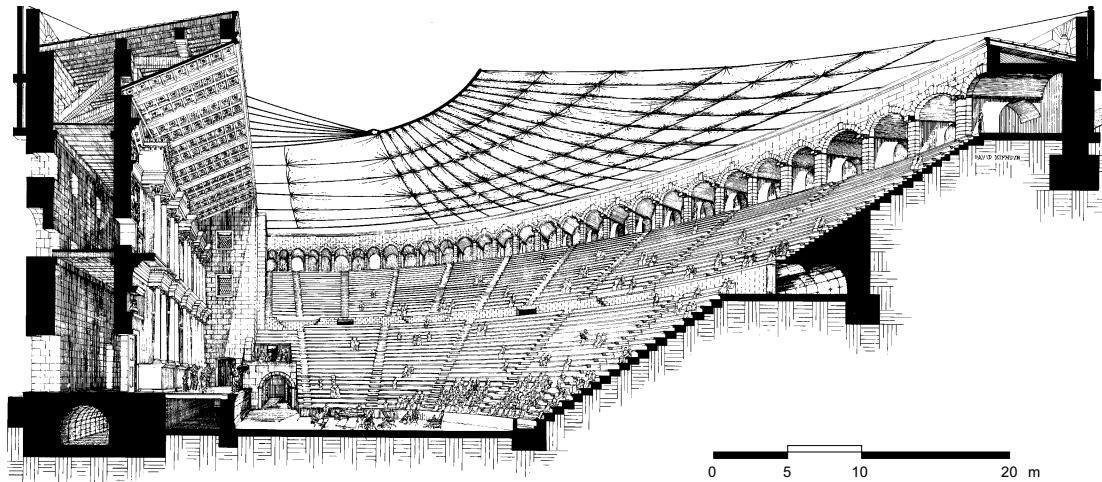


Fig. 4.6 Teatro de Aspendos, Turquía (sección longitudinal en perspectiva)

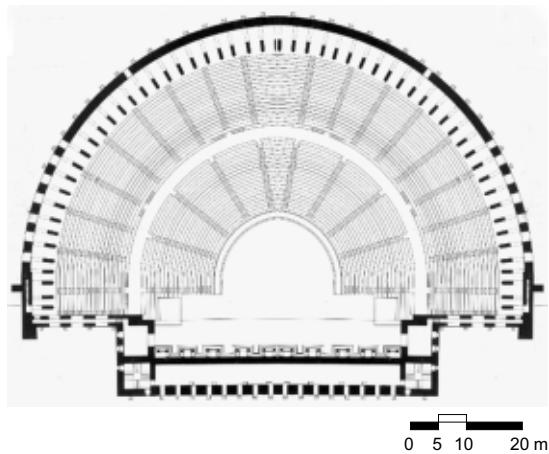


Fig. 4.7 Teatro de Aspendos, Turquía (planta)

4.3 Teatros en recintos cerrados

La situación cambia radicalmente cuando se trata de recintos cerrados. Si bien el grado de inteligibilidad depende igualmente de la relación entre la señal útil recibida (sonido directo y primeras reflexiones) y el ruido de fondo, son las características de este último las que difieren por completo de las del ruido ambiental existente al aire libre.

En efecto, se puede considerar que el ruido de fondo asociado a un espacio cerrado tiene dos componentes: la primera es debida al ruido producido por el sistema de climatización y demás instalaciones eléctricas y/o hidráulicas, así como al ruido proveniente del exte-

rior (por ejemplo, el ruido de tráfico), mientras que la segunda va asociada al nivel de campo reverberante (o sonido reverberante) existente en la sala. En cuanto a la primera, el nivel máximo recomendado de ruido de fondo se fija mediante la curva NC (apartado 4.5.3), mientras que la segunda depende del volumen del recinto y de los materiales utilizados como revestimientos de sus superficies internas.

El diseño de un recinto con un volumen excesivo y/o utilizando unos materiales con una absorción acústica insuficiente da lugar a unos valores excesivos del tiempo de reverberación. El mencionado diseño, incorrecto desde un punto de vista acústico, se traduce en un elevado nivel de campo reverberante, lo que es causa de una pérdida acusada de inteligibilidad de la palabra en la mayoría de puntos de dicho recinto.

El paradigma de los recintos donde la comprensión del mensaje oral es pésima (excepciónando los puntos cercanos al orador y a los altavoces) por causa de su gran volumen y de la ausencia de materiales absorbentes lo constituyen las catedrales. En cambio, en un espacio de dimensiones reducidas, como por ejemplo una sala de estar doméstica, el tiempo de reverberación es siempre bajo y, por lo tanto, la inteligibilidad es habitualmente buena.

Por lo tanto, la condición necesaria para conseguir una buena inteligibilidad en todos los puntos de un recinto cerrado es que su volumen sea limitado. Ello significa que su aforo tiene que ser mucho más reducido que el correspondiente a los teatros clásicos antiguos al aire libre.

Por otra parte, la existencia de superficies reflectantes generadoras de primeras reflexiones hacia la zona de público produce un incremento de la energía de la señal útil, ya que dichas reflexiones son integradas por el oído humano y, en consecuencia, su percepción no es diferenciada respecto al sonido directo. Ello supone un aumento de inteligibilidad y de sonoridad. En cuanto al sonido reverberante, aparte de constituir una de las dos componentes del ruido inherente a un recinto cerrado, produce un efecto beneficioso al contribuir a un aumento de la sonoridad en todos sus puntos.

4.3.1 Teatros del Renacimiento

Los teatros construidos en la época del Renacimiento constituyen un claro ejemplo de aplicación del criterio anterior relativo a la reducción de volumen. Sus formas son una imitación de las formas de los teatros clásicos antiguos pero, en cambio, al tratarse de recintos cerrados, su volumen es sustancialmente menor.

En las figuras 4.8 a 4.10 se muestra el Teatro Olímpico de Vicenza (Italia), construido por Palladio en 1.584. Se trata del teatro más antiguo perteneciente a dicha época que se conserva en la actualidad, y constituye uno de los primeros ejemplos del denominado teatro de proscenio. Dicha tipología está caracterizada por una clara separación entre el escenario y la sala donde se halla el público de manera que la representación se observa como si fuera a través de una ventana.

Según se aprecia, el escenario disponía de un “scenae frons” muy elaborado con aberturas permanentes en lugar de puertas, lo cual permitía al espectador tener una perspectiva mucho mayor. La distancia del escenario al asiento más lejano era de sólo 20 m y, en consecuencia, su aforo era efectivamente mucho más reducido.



Fig. 4.8 Teatro Olímpico de Vicenza (Italia)

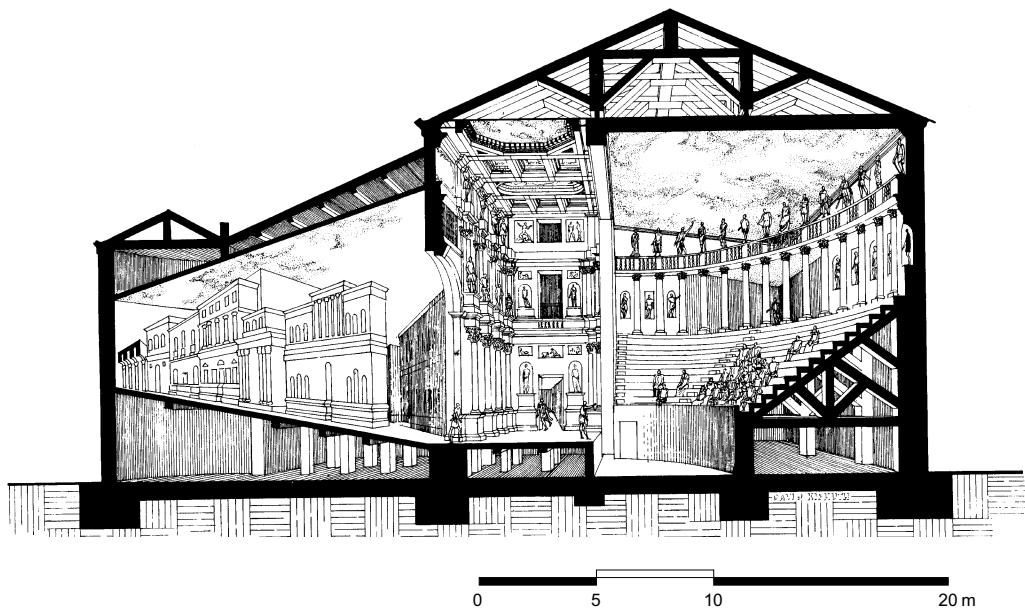


Fig. 4.9 Teatro Olímpico de Vicenza, Italia (sección longitudinal en perspectiva)

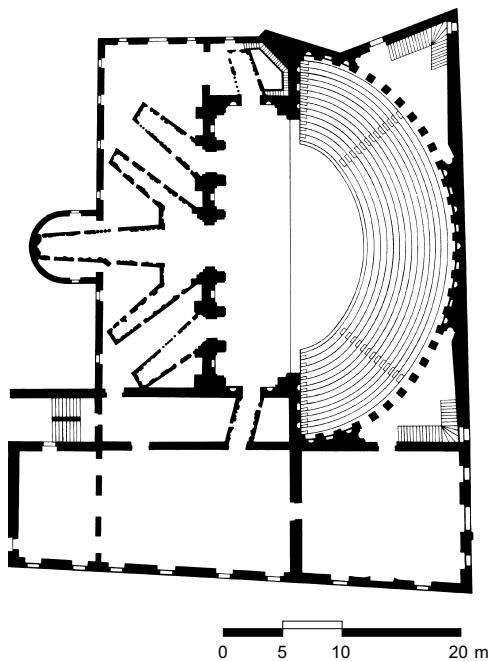


Fig. 4.10 Teatro Olímpico de Vicenza, Italia
(planta)

4.3.2 Teatros del Barroco

Las formas de los teatros de proscenio fueron evolucionando de manera experimental en la primera mitad del siglo XVII. Se diseñaron salas en forma de semicírculo, de U, de campana, de elipse y de herradura, entre otras. De todas ellas, la sala en forma de herradura fue la que se convirtió en más habitual y supuso el nacimiento del teatro Barroco italiano, precursor del teatro de ópera. Rápidamente, esta forma se extendió por toda Europa y marcó un estilo de diseño teatral que se prolongó durante doscientos años. Las características del teatro Barroco son las siguientes:

- Recintos más grandes que en el Renacimiento
- Aparición de la caja de escenario (mayor flexibilidad escenográfica)
- Aumento de la profundidad del escenario
- Máxima aproximación del público al actor
- Existencia de varios pisos con palcos (mayor número de localidades)
- Existencia de visuales deficientes en los palcos laterales

El teatro Drury Lane de Londres, Gran Bretaña (figuras 4.11 y 4.12), construido en el año 1.674 y remodelado en el año 1.823, constituye un ejemplo típico de este tipo de recintos.

La Scala de Milán (Piermarini, 1.778) y la Ópera de París (Garnier, 1.875) son otros dos ejemplos de entre los más representativos de este tipo de teatros.

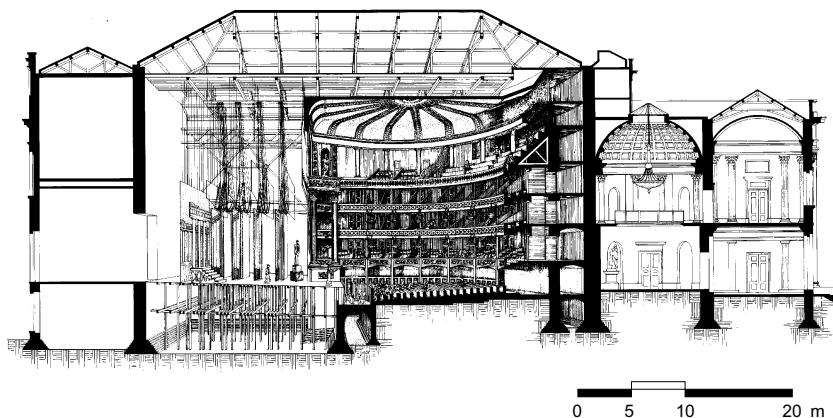


Fig. 4.11 Teatro Drury Lane (Londres, Gran Bretaña), remodelación de Beazley de 1.823
(sección longitudinal en perspectiva)

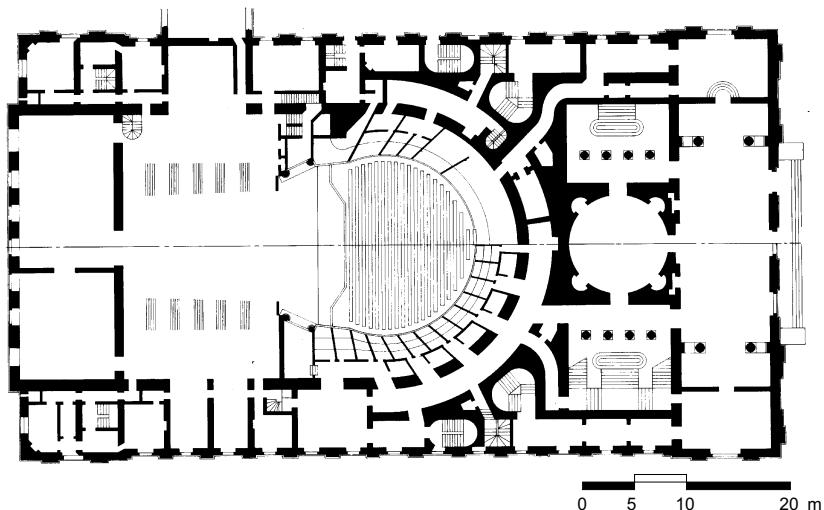


Fig. 4.12 Teatro Drury Lane (Londres, Gran Bretaña), remodelación de Beazley de 1.823 (planta)

4.3.3 Teatros de proscenio

Ya desde finales del siglo XIX y a lo largo del siglo XX, el teatro de proscenio ha seguido evolucionando hacia formas diversas, todas ellas claramente diferenciadas de la típica forma de herradura, aunque siempre pretendiendo conseguir los mismos objetivos acústicos: inteligibilidad óptima y sonoridad suficientemente elevada.

A modo de ejemplo, en las figuras 4.13 y 4.14 se muestra el Prinzregenten Theater de Munich (Alemania), inaugurado en 1.901.

El teatro, en forma de abanico, se construyó siguiendo el modelo del Festspielhaus de Bayreuth (Alemania). Presentaba el inconveniente de que la pared posterior de la sala era cóncava, lo cual daba lugar a la aparición de sonido focalizado en el escenario. Su capacidad era

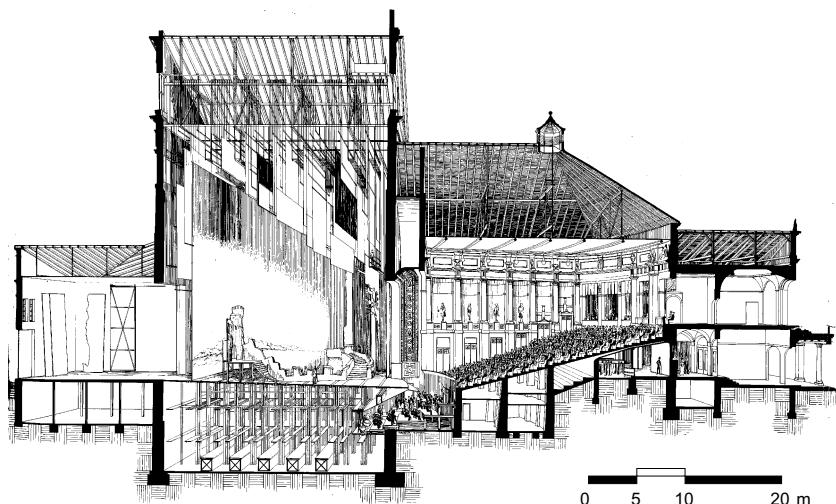


Fig. 4.13 Prinzregenten Theater, Munich, Alemania (sección longitudinal en perspectiva)

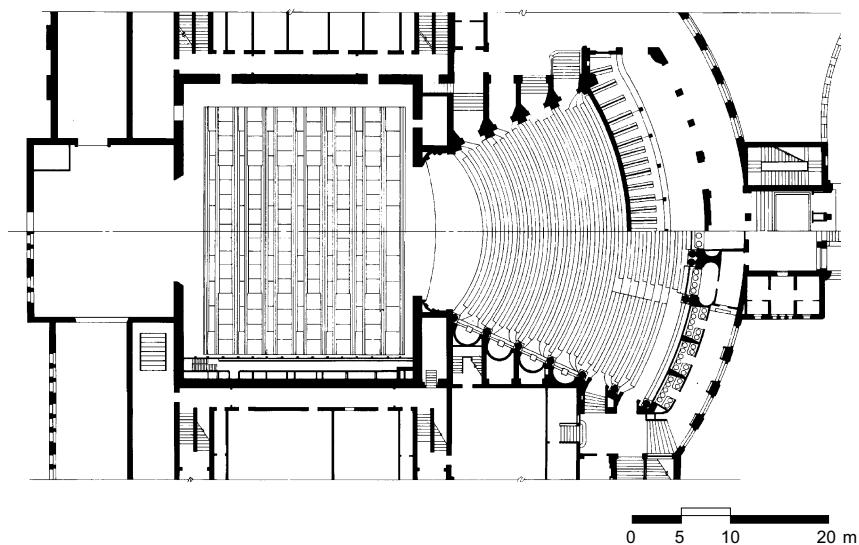


Fig. 4.14 Prinzregenten Theater, Munich, Alemania (planta)

de 1.515 localidades situadas en una única planta. Dicha cifra se aproxima a las 1.500, valor considerado como límite para los teatros de proscenio, si se pretende conseguir unas condiciones acústicas satisfactorias en la práctica totalidad de sus puntos.

4.3.4 Teatros con escenario integrado

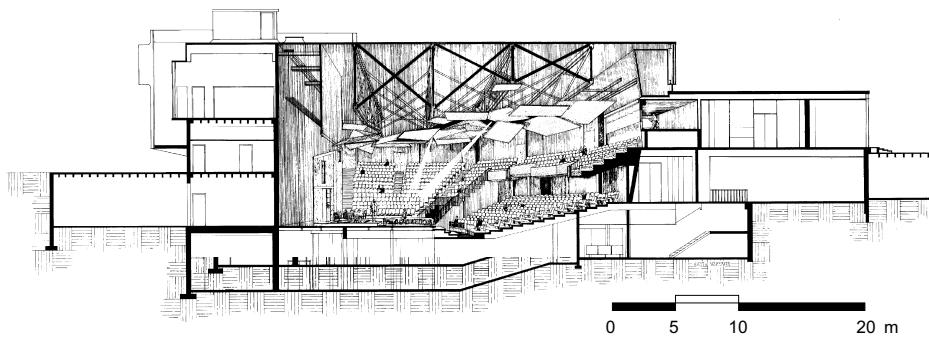
Con objeto de conseguir un contacto más íntimo entre el actor y el público que el proporcionado por el teatro de proscenio, Guthrie presentó en Edimburgo, en 1.948, el denominado teatro

con escenario integrado (“thrust-stage theatre”). Este tipo de recinto ofrece la posibilidad de una experiencia en tres dimensiones, en la que el actor se puede situar en el centro de la audiencia, en clara contraposición al formato bidimensional del teatro de proscenio donde los espectadores miran hacia el escenario como si se tratase de una pantalla. El teatro con escenario integrado ha tenido una cierta difusión, principalmente en Estados Unidos y en Gran Bretaña.

A título de ejemplo, en las figuras 4.15 y 4.16 se muestra el Guthrie Theatre de Minneapolis (EE.UU.), construido en 1.963 y con una capacidad de 1.437 localidades.

Según se observa, presenta una forma que recuerda la forma de los teatros clásicos griegos, si bien dispone de platea y anfiteatro.

Dispone, además, de un conjunto de reflectores suspendidos del techo que únicamente proporcionan primeras reflexiones útiles en el caso de que el actor esté orientado frontalmen-



179

Fig. 4.15 Guthrie Theatre, Minneapolis, EE.UU. (sección longitudinal en perspectiva)

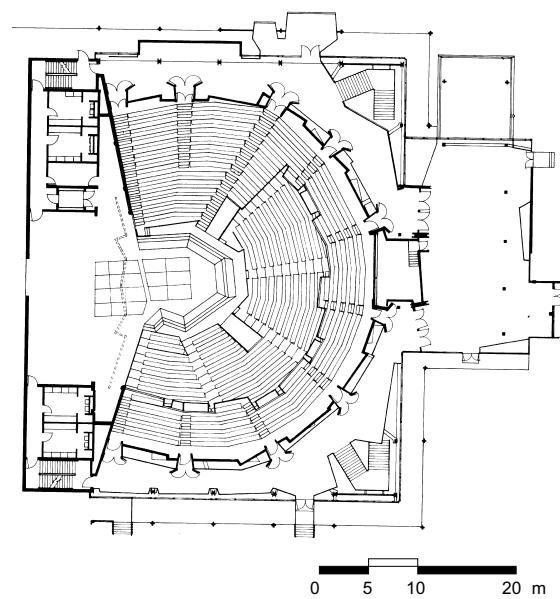


Fig. 4.16 Guthrie Theatre, Minneapolis, EE.UU. (planta)

te hacia la sala. El tiempo de reverberación del teatro es excesivo debido al acoplamiento de la sala con el espacio situado por encima de los mencionados reflectores.

4.3.5 Teatros circulares

Llevando a su extremo la idea de conseguir la máxima intimidad entre el actor y el público, surge el denominado teatro circular (“theatre in the round”). En este tipo de teatro, el escenario está totalmente rodeado por el público, con lo cual en todo momento una parte de la audiencia se halla detrás del actor. Lógicamente, en dicha zona la inteligibilidad de la palabra es menor. Además, al no existir ninguna pared en la parte posterior del escenario, las únicas superficies capaces de proporcionar primeras reflexiones son las paredes perimetrales y el techo, aunque éste es utilizado habitualmente para colocar los focos. Estas limitaciones acústicas exigen que la distancia entre el escenario y el espectador más alejado sea muy inferior a la correspondiente a los teatros con escenario integrado. Ello significa que su aforo será también claramente menor.

Con todo, el teatro circular constituye una de las formas primitivas más utilizadas para todo tipo de representaciones. Sin ir más lejos, los actores callejeros crean de forma natural un círculo de espectadores a su alrededor, y es probable que en la Edad Media se llevasen a cabo representaciones teatrales esporádicas en las que el público se colocase según una disposición circular.

Un ejemplo de este tipo de teatros lo constituye el Royal Exchange Theatre de Manchester, Gran Bretaña (figuras 4.17 y 4.18).

El teatro, construido en 1.976, tiene una capacidad total de 700 asientos distribuidos en tres niveles. Su forma es heptagonal con objeto de evitar la existencia de paredes paralelas que pudieran dar lugar a la aparición de ecos. El comportamiento acústico del teatro

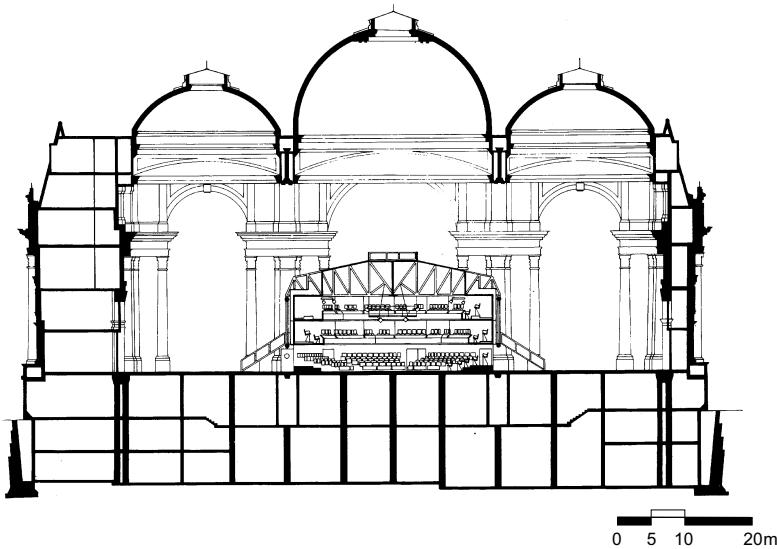


Fig. 4.17 Royal Exchange Theatre, Manchester, Gran Bretaña (sección longitudinal en perspectiva)

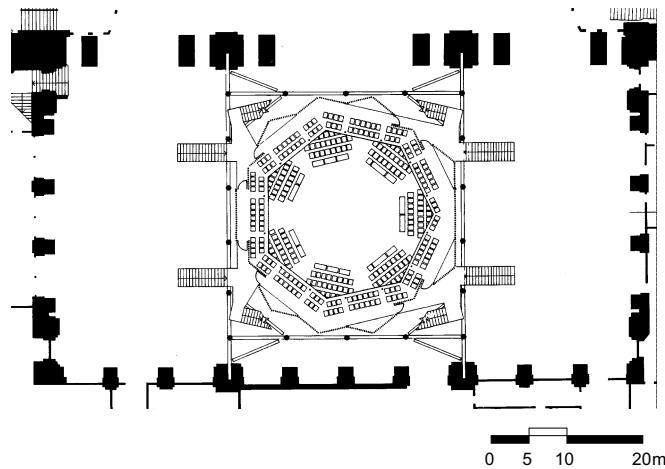


Fig. 4.18 Royal Exchange Theatre, Manchester, Gran Bretaña (planta)

es satisfactorio, incluso cuando el actor se coloca de espaldas a los espectadores. Ello es debido a que la distancia desde el centro del escenario al espectador más alejado es de sólo 13 m.

4.4 Objetivos acústicos asociados a teatros. Parámetros básicos^(*)

181

4.4.1 Tiempo de reverberación (RT)

Según se ha visto en el apartado 1.15.8, el tiempo de reverberación RT a una determinada frecuencia de interés se define como el tiempo que transcurre desde que el foco emisor se detiene hasta que el nivel de presión sonora cae 60 dB.

El tiempo de reverberación es indicativo del grado de reverberación o “viveza” de una sala.

Considerando volúmenes entre 100 y 10.000 m³, se recomienda que el valor promedio de los RT correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1 kHz para una sala ocupada destinada a actividades teatrales esté comprendido, aproximadamente, entre:

$$0,7 \leq RT_{mid} \leq 1,2 \text{ s}$$

donde:

$$RT_{mid} = \frac{RT(500 \text{ Hz}) + RT(1 \text{ kHz})}{2}$$

^(*) Las expresiones matemáticas correspondientes a todos los parámetros definidos en este apartado se detallan en el apéndice 2

El margen de valores recomendado para cada volumen considerado se muestra en la figura 4.24 del apartado 4.7.1.

El diseño de teatros con valores de RT_{mid} claramente fuera del margen anterior resulta totalmente desaconsejable. Si dicho valor es demasiado elevado ($RT_{mid} > 1,5$ s), la sala resultará excesivamente “viva” para su utilización como teatro y, en cambio, probablemente adecuada para actividades musicales. Por contra, un RT_{mid} inferior a 0,5 s dará lugar a salas excesivamente “secas”, con la consiguiente falta de confort acústico y de nivel sonoro, en especial en los puntos más alejados del escenario, a pesar de que la inteligibilidad será con toda probabilidad correcta.

Por otro lado, es conveniente que el RT se mantenga lo más constante posible con la frecuencia, especialmente a bajas frecuencias (bandas de octava centradas en 125 Hz y 250 Hz), ya que cualquier aumento a baja frecuencia empeora el grado de inteligibilidad de la palabra en la sala. Por otra parte, a partir de la banda de octava centrada en 2 kHz, existe una disminución inevitable de los valores de RT debida a la atenuación producida por el aire. Dicha disminución es especialmente notoria cuando se trata de recintos grandes.

A modo de ejemplo, en la figura 4.19 se representa la gráfica de valores recomendados de RT en función de la frecuencia, para un teatro con un valor de $RT_{mid} = 1$ s.

Los criterios anteriores difieren sustancialmente de los establecidos en el diseño de salas de conciertos, ya que en dicho caso los valores de RT_{mid} recomendados son mucho mayores y, además, los valores de RT a bajas frecuencias deben ser más elevados que los correspondientes a frecuencias medias (apartado 5.2.1). Ello es indicativo de la imposibilidad de utilizar de forma óptima como sala de conciertos un recinto originalmente diseñado para actividades teatrales.

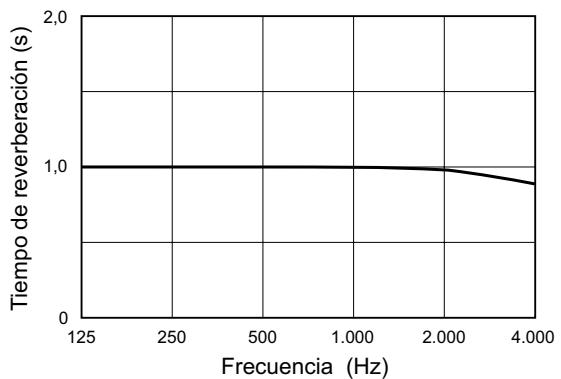


Fig. 4.19 Valores recomendados del tiempo de reverberación en función de la frecuencia para un teatro con un valor de $RT_{mid} = 1$ s

4.4.2 Invariancia del tiempo de reverberación con la escenografía

En los teatros de proscenio, el cumplimiento del objetivo definido en el apartado anterior mediante la correcta elección del volumen, las formas y los materiales a utilizar como revestimientos de la sala puede verse alterado por los cambios de absorción acústica asociados a la escenografía empleada en cada representación.

Es el caso, por ejemplo, del Teatro Nacional de Munich (Alemania), donde la modificación de los tiempos de reverberación de la sala, debida al hecho de pasar de una escenografía muy absorbente a otra poco absorbente, es notoria (figura 4.20).

Resulta, pues, necesario establecer como objetivo que los valores de los tiempos de reverberación de la sala sean independientes de la escenografía utilizada en cada representación.

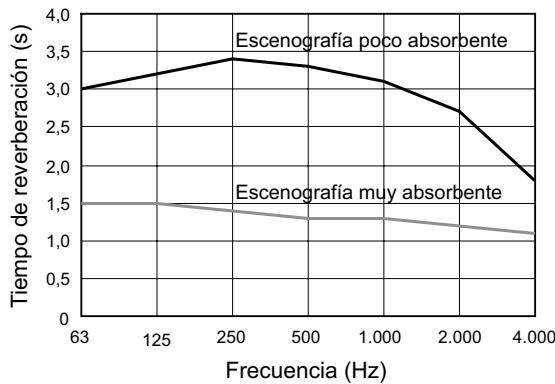


Fig. 4.20 Variación de los tiempos de reverberación del Teatro Nacional de Munich (Alemania) al pasar de una escenografía muy absorbente a otra poco absorbente

4.4.3 Parámetros asociados a las primeras reflexiones

Como se ha mencionado en el apartado 4.3, la existencia de primeras reflexiones en un punto cualquiera de una sala destinada a actividades teatrales produce en el mismo un aumento de inteligibilidad y de sonoridad.

Habitualmente, se utilizan los siguientes tres parámetros para cuantificar el peso específico de las primeras reflexiones en cada punto de una sala:

- Claridad de la voz (C_{50})
- Definición (D)
- Relación de primeras reflexiones (ERR)

Su formulación e interpretación es similar, puesto que los tres se definen como una relación energética, cuyo numerador es coincidente. Se trata de la energía sonora de la señal útil (sonido directo + primeras reflexiones). Lógicamente, cuanto mayor sea el valor de cualquiera de los tres parámetros, más elevada será la inteligibilidad y la sonoridad en el punto considerado. A continuación se definen dichos parámetros.

4.4.3.1 Claridad de la voz (C_{50})

La claridad de la voz C_{50} se define como la relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluye el sonido directo y las primeras reflexiones) y la que le llega después de los primeros 50 ms. Se calcula en cada banda de frecuencias entre 125 Hz y 4 kHz. El C_{50} se expresa en escala logarítmica:

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

Según L.G. Marshall, el valor representativo de C_{50} se calcula como media aritmética ponderada de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz, y recibe el nombre de “speech average”. Los factores de ponderación son: 15%, 25%, 35% y 25%, respectivamente, de acuerdo con la contribución estadística aproximada de cada banda a la inteligibilidad de la palabra (apartado 1.13.1):

$$C_{50} \text{ (“speech average”)} = 0,15 \cdot C_{50} \text{ (500 Hz)} + 0,25 \cdot C_{50} \text{ (1 kHz)} + \\ + 0,35 \cdot C_{50} \text{ (2 kHz)} + 0,25 \cdot C_{50} \text{ (4 kHz)}$$

El valor recomendado de C_{50} (“speech average”) correspondiente a cada punto de una sala ocupada debe verificar:

$$C_{50} \text{ (“speech average”)} > 2 \text{ dB}$$

Cuanto más elevado sea dicho valor, mejor será la inteligibilidad de la palabra y la sonoridad en el punto considerado.

4.4.3.2 Definición (D)

Según Thiele, la definición D (del alemán “Deutlichkeit”) es la relación entre la energía que llega al oyente dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluye el sonido directo y las primeras reflexiones) y la energía total recibida por el mismo. Se calcula en cada banda de frecuencias entre 125 Hz y 4 kHz:

$$D = \frac{\text{Energía hasta } 50 \text{ ms}}{\text{Energía total}}$$

El valor de dicho parámetro para cada punto de una sala ocupada, y en cada banda de frecuencias, debe cumplir:

$$D > 0,50$$

Cuanto más elevado sea dicho valor, mejor será la inteligibilidad de la palabra y la sonoridad en el punto considerado de la sala.

El valor de D varía en función de la posición del actor respecto a la sala. La situación óptima se da cuando se sitúa frontalmente, y va empeorando a medida que realiza una rotación. El diseño de un recinto destinado a la palabra ha de encaminarse hacia la obtención de la máxima invariabilidad de este parámetro con independencia de la posición del actor en el escenario.

Por otra parte, el conocimiento del valor de la claridad de la voz C_{50} en una banda cualquiera permite calcular de forma inmediata el valor de la definición D en dicha banda, y viceversa. La fórmula pertinente, obtenida directamente de las definiciones de ambos parámetros, es la que sigue:

$$D = \frac{1}{1 + 10^{-\frac{C_{50}}{10}}}$$

4.4.3.3 Relación de primeras reflexiones (ERR)

Según Barron, la relación de primeras reflexiones ERR (“Early Reflection Ratio”) se define como la relación entre la energía que llega al oyente dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluye el sonido directo y las primeras reflexiones) y la energía correspondiente al sonido directo:

$$ERR = \frac{\text{Energía hasta } 50 \text{ ms}}{\text{Energía del sonido directo}}$$

Este parámetro, complementario de la claridad de la voz C_{50} y de la definición D, tiene una interpretación física muy sencilla: indica el número de primeras reflexiones existentes en un punto determinado de la sala. Por ejemplo, cuando $ERR = 2$, se puede interpretar que existe únicamente una primera reflexión de igual energía que la correspondiente al sonido directo.

A la hora de definir las formas de un recinto, conviene fijar como objetivo la obtención de unos valores de ERR lo más constantes posible en todos sus puntos, con la excepción de los más próximos al escenario. Habitualmente, a dichos puntos les corresponden unos valores de ERR relativamente bajos debido a la poca influencia de las superficies reflectantes en las zonas cercanas a los actores. Desde un punto de vista práctico, este hecho carece de importancia, dado que la inteligibilidad de la palabra siempre es correcta a causa de dicha proximidad.

Los valores medios de ERR correspondientes a una serie de teatros existentes estudiados por Barron en los cuales la inteligibilidad es correcta se hallan dentro del siguiente margen:

$$2 \leq ERR \leq 6$$

En dichos recintos, la variación del valor medio de ERR con la rotación de la fuente sonora es muy pequeña.

Por otra parte, los valores de ERR son prácticamente independientes del grado de ocupación de la sala.

4.4.4 Parámetros asociados a la inteligibilidad de la palabra

Si bien los tres parámetros definidos en el apartado 4.4.3 están relacionados con la comprensión del mensaje oral, existen otros dos que sirven para cuantificar de forma más precisa el grado de inteligibilidad de la palabra. Se trata de:

- %ALCons
- STI/RASTI

Ambos parámetros se han definido en el apartado 1.15.9. Se recomienda que la inteligibilidad de la palabra en cualquier punto de un teatro ocupado sea, como mínimo, “buena”. Por consiguiente, debe cumplirse:

$$\% \text{ALCons} \leq 5\% \quad (\text{STI}/\text{RASTI} \geq 0,65)$$

4.4.5 Sonoridad (S)

La sonoridad S (“Speech sound level”) es indicativa del grado de amplificación que produce un recinto sobre el mensaje oral emitido.

Según Barron, la sonoridad S en un punto cualquiera de una sala se define como la diferencia entre el nivel medio de presión sonora existente en el mismo producido por un actor situado sobre el escenario, y el nivel medio de referencia de 39 dB. Este valor de referencia corresponde al nivel de presión sonora (promediado en el espacio) que produciría dicha persona al aire libre a una distancia de 10 m.

Debido a que ambos niveles medios se obtienen promediando los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz, resulta práctico representarla por S_{mid} .

Se recomienda que los valores de S_{mid} en todos los puntos de la sala ocupada verifiquen la siguiente condición mínima:

$$S_{\text{mid}} \geq 0 \text{ dB}$$

Ello significa que, en cualquier punto de la sala, el nivel medio de presión sonora no deberá ser nunca inferior al obtenido a una distancia de 10 m en el espacio libre.

Ahora bien, según mediciones llevadas a cabo por Barron en diferentes teatros existentes donde la sonoridad es óptima, los valores de S_{mid} oscilan entre:

$$4 \leq S_{\text{mid}} \leq 8 \text{ dB}, \text{ para una orientación frontal del actor}$$

$$2 \leq S_{\text{mid}} \leq 6 \text{ dB}, \text{ para una orientación lateral del actor}$$

Por lo tanto, los valores de S_{mid} deberán hallarse preferentemente dentro de dichos márgenes.

4.4.6 Condiciones y situación óptima del actor (teatros de proscenio)

En cuanto a las condiciones acústicas óptimas para el actor, existe poca literatura al respecto, probablemente porque su grado de tolerancia ante la adversidad es muy elevado. No obstante, sin lugar a dudas, todos los actores desean tener una cierta realimentación de la sala en forma de primeras reflexiones y de una ligera reverberación. Su ausencia obliga indefectiblemente al actor a elevar el tono de su voz, lo cual constituye el problema más habitual con el que se encuentra cuando actúa al aire libre.

Por otra parte, en un teatro de proscenio, la posibilidad de suspender paneles reflectan-

tes por detrás del actor con objeto de reforzar su voz es remota, puesto que dicho espacio posterior está reservado para los diferentes elementos escenográficos.

Por lo que se refiere a la situación del actor en un teatro de este tipo, cuando éste se coloca en la boca del escenario mirando hacia el público, la fracción de energía radiada por el mismo hacia la sala es del orden de un 72%, mientras que el 28% restante de la energía es dirigida hacia el interior de la caja de escenario. Si, como es habitual, la absorción acústica de dicha caja es elevada, el mencionado 28% de energía será prácticamente absorbido por la caja y, en consecuencia, su contribución al sonido reverberante de la sala será nula. Ello resultará beneficioso para el grado de inteligibilidad de la palabra obtenido en la sala en comparación con el que se obtendría en el supuesto de que dicha energía retornase a la sala. Por contra, la sonoridad será inferior.

En el caso de que el actor se sitúe lateralmente, los porcentajes pasan a ser de un 50%. Esta situación es claramente más desfavorable que la anterior, debido a la considerable disminución de energía dirigida hacia la sala susceptible de ser aprovechada en forma de sonido directo y de primeras reflexiones hacia el público. La consecuencia inmediata es la disminución de inteligibilidad y de sonoridad en la práctica totalidad de puntos del recinto.

Resulta, pues, evidente que la colocación óptima del actor en el escenario de un teatro de proscenio, desde el punto de vista de los objetivos acústicos establecidos para la sala, es mirando hacia el público. De todas maneras, partiendo de la base de que ello no es posible de una forma continuada a lo largo de una representación, conviene diseñar paneles reflectantes laterales al nivel del proscenio para paliar las mencionadas deficiencias (apartado 4.7.5.3).

4.5 Posibles anomalías asociadas a teatros

4.5.1 Coloración de la voz y falsa localización de la fuente sonora

La sala no debe producir ninguna coloración de la voz del actor, es decir, no debe existir ningún realce o atenuación manifiesta de las frecuencias que componen su espectro. Sin embargo, si las superficies del falso techo o las paredes laterales de la sala, diseñadas con objeto de producir primeras reflexiones sobre la zona de público, son planas, completamente lisas y de grandes dimensiones, el sonido resultante de la combinación entre el sonido directo y el sonido reflejado por ellas puede adquirir una cierta tonalidad metálica. Dicha anomalía, aunque no produce una pérdida de inteligibilidad de la palabra, puede dar lugar a una manifiesta molestia para los espectadores situados en las zonas donde se reciben dichas reflexiones.

Por otra parte, la existencia de tales superficies también puede originar un efecto de falsa localización de la fuente sonora (apartados 1.15.3 y 2.3.1.1)

4.5.2 Ecos y focalizaciones del sonido

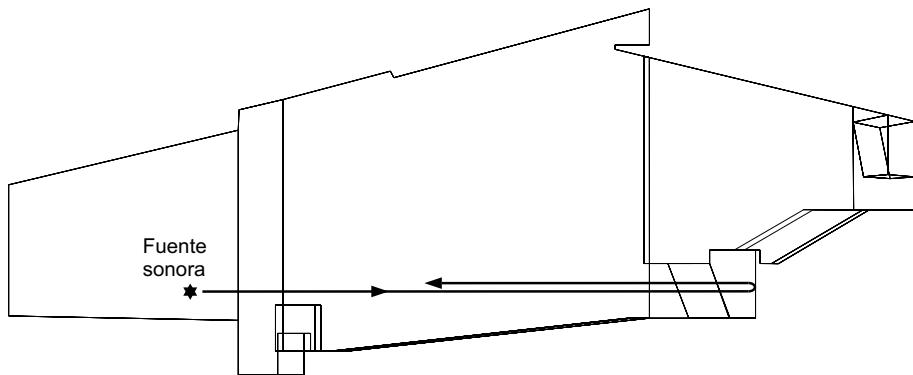
Uno de los objetivos fundamentales en el diseño de un teatro es evitar la aparición de ecos, focalizaciones del sonido y eco flotante. Todas estas anomalías, definidas en los apartados 1.15.3, 2.3.1.2 y 1.15.4, respectivamente, son totalmente perniciosas tanto para los actores como para los espectadores.

4.5.2.1 Ecos

A continuación se presentan dos formas geométricas habituales que pueden dar lugar a la aparición de ecos.

a) Pared posterior reflectante

Aparición de eco en el escenario, siempre y cuando la distancia entre el mismo y dicha pared sea superior a 8,5 m, ya que en tal caso la reflexión generada llega con un retardo superior a 50 ms (figura 4.21). Obviamente, para que dicha anomalía aparezca debe ocurrir que la fuente sonora se halle a la misma altura que la pared conflictiva.



188

Fig. 4.21 Aparición de eco en el escenario producido por una pared posterior reflectante

b) Techo y pared posterior formando un ángulo de 90°

El hecho de que ambas superficies, techo y pared, formen un ángulo recto hace que la reflexión de segundo orden generada tenga siempre la misma dirección, aunque sentido contrario, que el rayo incidente proveniente del escenario. Es el denominado reflector de esquina (“corner reflector”). La aparición de eco tiene lugar en el caso de que ambas superficies sean reflectantes y que la distancia entre la pared posterior y el escenario sea, igualmente, superior a 8,5 m (figura 4.22).

En cualquiera de las situaciones anteriores, los ecos se ponen especialmente de manifiesto cuando el tiempo de reverberación de la sala es más bien corto.

Por otro lado, según pudieron constatar Cremer y Müller (1.982), la predicción de si una determinada reflexión será percibida como un eco no es, en absoluto, trivial. Además, la refinada capacidad de localización de un sonido característica del oído humano puede ser empleada, involuntariamente, para captar un eco. En efecto, si bien en primera instan-

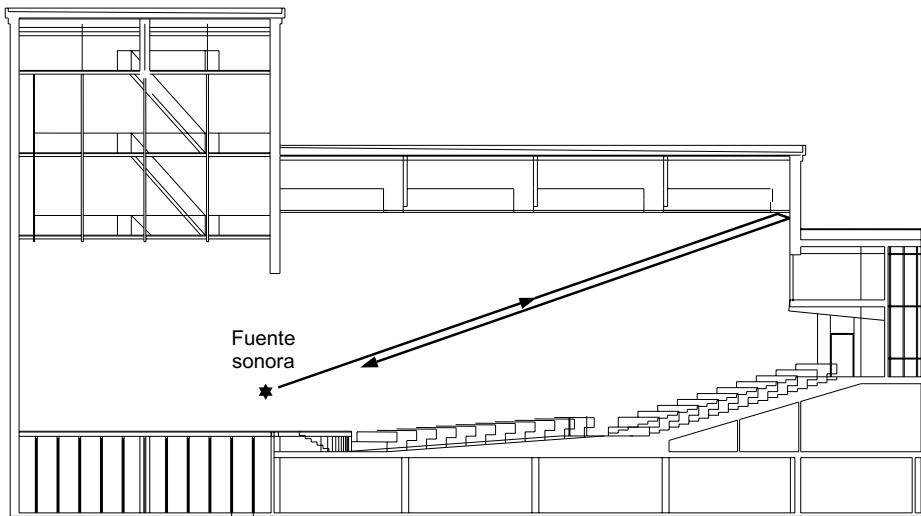


Fig. 4.22 Aparición de eco en el escenario debido a la existencia de un reflector de esquina

cia es posible no percibir un eco, una vez detectado puede ocurrir que sea imposible ignorarlo.

El parámetro empleado para detectar la presencia de un eco en un punto cualquiera de una sala se denomina criterio de ecos EC (“Echo Criterion”). Su definición se halla en el apéndice 2.

El valor de EC correspondiente a cualquier punto de un teatro, en la banda de frecuencias de 1 kHz, debe cumplir:

$$\text{EC} < 1$$

El hecho de que se cumpla dicho criterio en cada punto considerado asegura que el porcentaje de espectadores que percibirían un eco en el mismo sería, como máximo, de un 50%. Cuanto más bajo sea el valor de EC, menor será el citado porcentaje.

4.5.2.2 Focalizaciones del sonido

Las focalizaciones se producen cuando la superficie generadora de reflexiones tiene una forma cóncava que concentra la energía reflejada hacia una zona concreta de la sala ocupada por el público o bien hacia el escenario.

Es el caso de los recintos típicos del siglo XIX, de techos abovedados o en forma de cúpula. También es habitual en aquellas salas cuya pared posterior en forma de sector circular presenta su centro de curvatura en el escenario o en determinadas filas de platea. En la figura 4.23 se muestra un ejemplo de focalización del sonido.

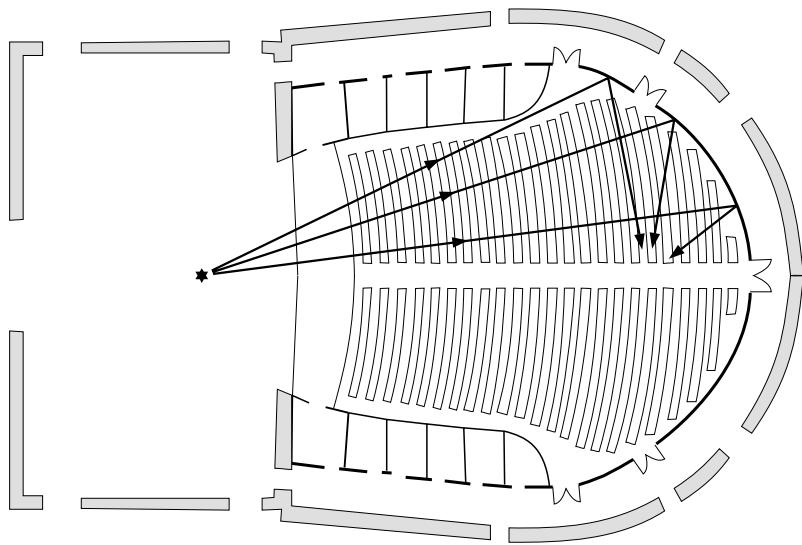


Fig. 4.23 Focalización del sonido en la zona posterior de platea producida por una pared posterior cóncava

4.5.3 Curvas NC

190

Según se ha visto en el apartado 1.12, la evaluación del grado de molestia que un determinado ruido ambiental provoca sobre un espectador se hace por comparación de los niveles de ruido existentes en la sala, para cada banda de octava comprendida entre los 63 Hz y los 8 kHz, con un conjunto de curvas de referencia denominadas NC (“Noise Criteria”).

El ruido de fondo puede ser debido tanto a ruidos interiores del recinto (por ejemplo, el causado por el sistema de climatización) como a ruidos exteriores (por ejemplo, el ruido de tráfico).

Las curvas NC son, además, utilizadas para establecer los niveles máximos recomendados para diferentes tipos de espacios en función de su uso.

Se dice que un recinto cumple una determinada especificación NC (por ejemplo: NC-15, NC-20, etc.) cuando los niveles de ruido de fondo en el mismo, medidos por bandas de octava, están por debajo de la curva NC correspondiente, para todas las frecuencias comprendidas entre 63 Hz y 8 kHz.

La curva NC recomendada para teatros es la NC-15, si bien también se llega a admitir hasta la NC-25.

4.6 Resumen de los valores recomendados de los parámetros acústicos asociados a teatros

Como resumen de todo lo expuesto en el apartado 4.4, en la tabla se muestran los valores recomendados de los parámetros acústicos definidos.

PARÁMETRO ACÚSTICO	VALOR RECOMENDADO
Tiempo de reverberación medio RT_{mid} (500 Hz - 1 kHz), sala ocupada	$0,7 \leq RT_{mid} \leq 1,2$ s
Claridad de la voz C_{50} (“speech average”), sala ocupada	$C_{50} > 2$ dB
Definición D (de 125 Hz a 4 kHz), sala ocupada	$D > 0,50$
Relación de primeras reflexiones ERR, sala vacía u ocupada	$2 \leq ERR \leq 6$
% ALCons, sala ocupada	% ALCons $\leq 5\%$
STI/RASTI, sala ocupada	$STI/RASTI \geq 0,65$
Sonoridad media S_{mid} (500 Hz - 2 kHz), sala ocupada	$4 \leq S_{mid} \leq 8$ dB (orientación frontal actor) $2 \leq S_{mid} \leq 6$ dB (orientación lateral actor)

Tabla 4.1 Valores recomendados de los parámetros acústicos asociados a teatros

4.7 Criterios generales de diseño

Una vez descrita de forma sintética la evolución histórica de los recintos destinados a actividades teatrales y definidos los objetivos acústicos relacionados con los mismos, en este apartado se dan unos criterios generales de diseño de este tipo de salas.

4.7.1 Relación entre volumen, número de asientos y tiempo de reverberación medio

Desde un punto de vista práctico, la relación entre el volumen (V) y el número de asientos (N) de un teatro debe estar situada, aproximadamente, entre:

$$4 \leq \frac{V}{N} \leq 6$$

es decir, es preciso disponer de 4 a 6 m³ por asiento.

Por consiguiente, una vez fijado el número de asientos, es posible calcular de forma inmediata el volumen requerido. A partir de dicho volumen, se puede determinar el tiempo de reverberación medio RT_{mid} (500 Hz - 1 kHz) recomendado para la sala ocupada, a través de la gráfica de la figura 4.24.

Por otra parte, para conseguir unas condiciones acústicas óptimas en los teatros de proscenio, es conveniente no sobrepasar la cifra de las 1.500 localidades. En tal caso extremo, el volumen óptimo oscila entre 6.000 y 9.000 m³ y el tiempo de reverberación medio RT_{mid} recomendado para la sala ocupada se sitúa en torno a 1,1 - 1,2 s. Para un teatro de capacidad media (en torno a las 500 localidades), el volumen adecuado se halla entre 2.000 y 3.000 m³, mientras que el RT_{mid} para la sala ocupada está situado alrededor de 1 s.

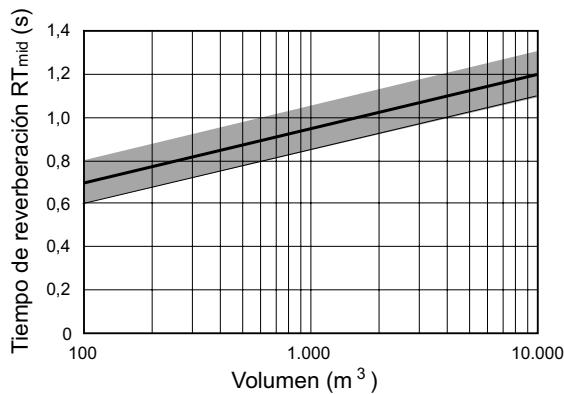


Fig. 4.24 Margen de valores recomendados de RT_{mid} en función del volumen del recinto (sala ocupada)

Finalmente, cabe señalar que el volumen asociado a teatros es por lo general sustancialmente menor que el correspondiente a salas de conciertos de música sinfónica, ya que en este último caso suele estar comprendido entre 10.000 y 30.000 m^3 (capítulo 5).

4.7.2 Visuales

192

Uno de los objetivos prioritarios en un teatro o en una sala de conciertos es que el sonido directo que llega a cada espectador no sea obstruido por los espectadores situados delante suyo. Este requerimiento se cumple si existe una buena visibilidad del escenario.

El diseño de las visuales en una sala se basa en la siguiente consideración: los ojos se hallan, como promedio, 100 mm por debajo de la parte más elevada de la cabeza. Por lo tanto, la inclinación del suelo debe ser tal que permita el paso de la visual por encima de la cabeza del espectador situado en la fila inmediatamente anterior (figura 4.25).

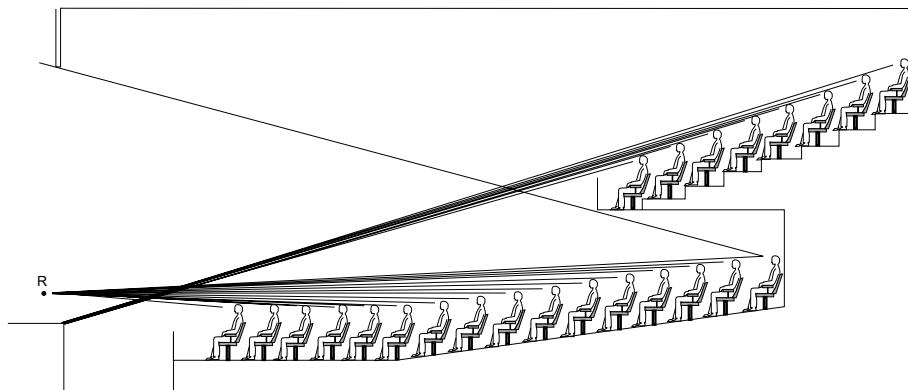


Fig. 4.25 Diseño de visuales (R es el punto de referencia)

La ubicación del punto de referencia R en el escenario condiciona el resultado final. Habitualmente, para los asientos de platea R se suele situar a una altura entre 0,6 y 0,9 m del suelo correspondiente a la parte anterior del escenario, mientras que para las localidades del anfiteatro se sitúa directamente sobre el suelo de dicha zona.

Este criterio da lugar a una inclinación del suelo de la sala en forma de línea curva de manera que la pendiente aumenta progresivamente. Idealmente, para conseguir que el ángulo de visión ε en cualquier punto de la sala sea constante, suponiendo que la fuente sonora S está ubicada en un punto concreto del escenario, es preciso que el perfil del suelo verifique la siguiente expresión analítica (figura 4.26):

$$\phi = \varepsilon \ln(r/r_0)$$

donde:

ϕ = ángulo formado por la línea de unión entre la fuente sonora S y un punto P de la fila de asientos considerada, y la línea de unión entre dicha fuente y el punto de inicio O de la pendiente

ε = ángulo de visión

\ln = logaritmo neperiano

r = distancia de la fuente S al punto P

r_0 = distancia de la fuente S al punto de inicio O

La curva generada a través de dicha expresión se denomina espiral logarítmica.

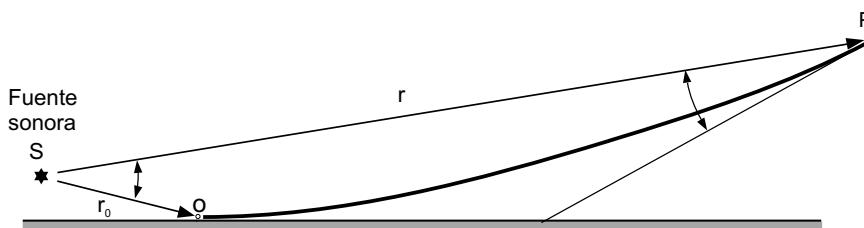


Fig. 4.26 Curva teórica necesaria para conseguir un ángulo de visión ε constante

Según se observa en el gráfico anterior, el ángulo de visión ε coincide con el ángulo de incidencia del sonido directo.

En la práctica, la anterior línea curva teórica se aproxima por dos o más rectas con diferentes pendientes, debido a que la normativa vigente impide la utilización de escalones de altura progresivamente creciente.

De todas formas, conviene tener presente que entre los requerimientos visuales y acústicos existe una diferencia básica: si el ángulo de visión es adecuado, no se puede conseguir ninguna mejora de visuales por el hecho de aumentar el valor de ε . En cambio, un cierto incremento de ε produce unas condiciones de escucha más favorables. En concreto, para atenuar el efecto "seat dip" producido por una incidencia rasante (apartado 2.2.7) es preciso dar una

inclinación al suelo hasta conseguir que el ángulo formado por el rayo directo y el plano del público sea mayor que 15° (27%).

En cuanto a la pendiente del anfiteatro, existe un valor máximo permitido por razones de seguridad, contemplado en la legislación vigente de cada país. Dicho valor está situado alrededor de los 35° .

4.7.3 Anfiteatros y balcones

El motivo principal del diseño de anfiteatros y balcones en teatros y salas de conciertos es el de aumentar su aforo sin que ello suponga tener que incrementar de forma excesiva la distancia entre el escenario y los espectadores más alejados del mismo. El arquitecto deberá elegir entre un único anfiteatro grande o bien varios más pequeños. Sea cual sea su elección, se hallará ante la problemática que se expone seguidamente.

En cuanto a la cantidad de primeras reflexiones generadas en la zona situada debajo de un anfiteatro o balcón, resulta que es prácticamente invariante. En efecto, la mayor parte de reflexiones laterales no se ve afectada, mientras que la existencia de la pared posterior compensa la ausencia de otras reflexiones que han quedado anuladas.

Por contra, la cantidad de reflexiones procedentes de la parte superior de la sala disminuye sustancialmente, lo que conlleva una disminución del sonido reverberante en dicha zona. Además, a medida que el anfiteatro se hace más profundo y/o la boca de la abertura entre éste y el nivel inferior de la sala resulta más estrecha, el ángulo de llegada del sonido reverberante, y en consecuencia la energía asociada al mismo, es progresivamente menor (figura 4.27).

Si bien esta circunstancia es desfavorable para la audición de música (apartado 5.5.5), en el caso de un teatro, la disminución del sonido reverberante en dicha zona lleva asociada un aumento de la claridad de la voz (C_{50}) y de la definición (D). Por lo tanto, la existencia de anfiteatros o balcones relativamente profundos en un teatro es del todo aceptable, siempre y cuando se respeten las condiciones de buena visibilidad desde todos sus puntos.

Sin duda, los mencionados incrementos de C_{50} y D justifican la gran profusión de anfiteatros y balcones con profundidades significativas en los teatros de proscenio construidos en el siglo XIX.

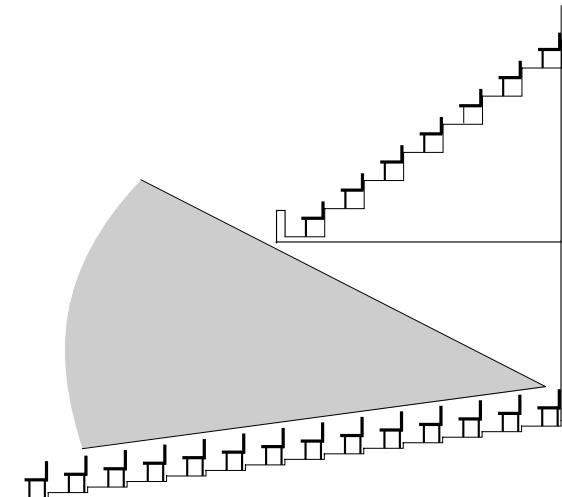


Fig. 4.27 Sección longitudinal de una sala mostrando el limitado ángulo de llegada del sonido reverberante en la zona situada debajo de un anfiteatro

Sin embargo, si la profundidad es excesiva existe el riesgo de que la sonoridad (S) en la zona situada debajo de un anfiteatro o balcón disminuya de forma apreciable, llegando a situarse por debajo del valor mínimo recomendado. Una manera de contrarrestar, en parte, tal efecto consiste en generar nuevas primeras reflexiones hacia los espectadores. Ello se puede conseguir inclinando adecuadamente el techo de dicha zona, y también dando una forma de abanico invertido a las paredes laterales traseras.

De todas formas, Barron propone el siguiente límite práctico a respetar: la profundidad D de la zona situada debajo de un anfiteatro o balcón perteneciente a un teatro no debe ser superior a 2,5 veces la altura H de la abertura asociada. En la figura 4.28 se representa dicho criterio de forma gráfica.

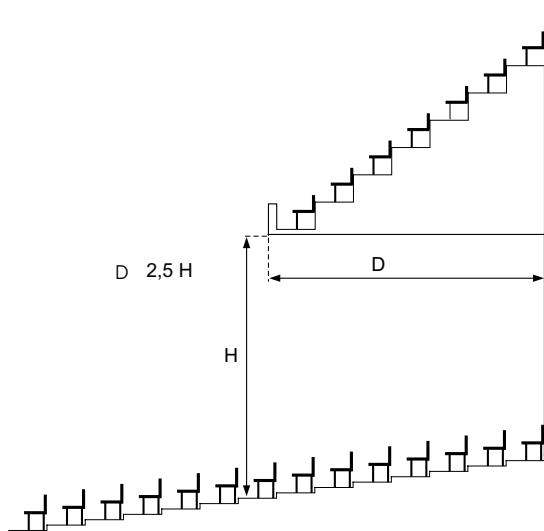


Fig. 4.28 Criterio práctico de máxima profundidad D de la zona situada debajo de un anfiteatro o balcón en un teatro (según Barron)

4.7.4 Procedimiento para la obtención del tiempo de reverberación RT_{mid} deseado

Una vez determinado el volumen necesario de la sala, según lo expuesto en el apartado 4.7.1, es preciso definir qué superficies de la misma deberán ser tratadas y con qué materiales absorbentes y/o elementos resonadores con objeto de conseguir el RT_{mid} recomendado para la sala ocupada, así como una máxima invariabilidad en los valores del tiempo de reverberación en función de la frecuencia.

Una posible manera de proceder es la siguiente:

- En primer lugar, hay que tener presente que el elemento que siempre presenta una absorción acústica destacada es la silla. Dicha absorción depende del porcentaje de tapizado del tipo de silla elegido: cuanto mayor sea, más elevada será la absorción que presente.

Cuando el arquitecto, o en su caso la propiedad, proponga un determinado modelo de silla basándose en criterios estéticos, económicos y/o funcionales, será necesario solicitar del fabricante los coeficientes de absorción acústica, tanto de la silla vacía como ocupada, medidos en un laboratorio homologado.

En el poco deseable caso de no poder disponer de dichos coeficientes, se podrán utilizar los valores de los nuevos coeficientes publicados recientemente por Beranek (1.996) y detallados en el apartado 2.2.6.

- A partir de dichos coeficientes, y suponiendo inicialmente que todos los materiales que se emplean como acabados son acústicamente reflectantes, se calcularán los valores de

RT para la sala ocupada, correspondientes a las bandas de octava situadas entre 125 Hz y 4 kHz. Dichos cálculos se realizarán mediante la fórmula de Sabine completa, definida en el apartado 2.2.2:

$$RT = \frac{0,161 V}{A_{tot} + 4 mV} \text{ (en s)}$$

donde:

V = volumen del teatro (en m^3)

$A_{tot} = \sum_i S_i \alpha_i + A_s$ = absorción total del teatro (en sabins)

S_i = superficie “i”

α_i = coeficiente de absorción de la superficie “i”

A_s = absorción total de las sillas (en sabins), definida en el apartado 2.2.6

4mV = absorción producida por el aire (en sabins)

Hay que tener presente que en dicho cálculo intervienen todas las superficies límite de la sala, incluyendo la superficie de la boca del escenario (en el caso de los teatros de proscenio). Ello presupone que, a efectos de cálculo, la caja de escenario no forma parte del volumen de la sala. Para que dicha suposición sea correcta, es preciso reducir la altura de dicha boca mediante, por ejemplo, la colocación del telón cortafuegos en la posición más baja posible. Habitualmente, a la superficie de la boca del escenario se le suelen asignar unos coeficientes de absorción representativos de la absorción producida por toda la caja de escenario. En la tabla 4.2 se muestran unos valores estimativos de tales coeficientes de absorción, extrapolados a partir de valores dados por Knudsen y Harris.

FRECUENCIA (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Boca del escenario	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55

Tabla 4.2 Valores estimativos de los coeficientes de absorción asociados a la boca del escenario de un teatro de proscenio

- c) Una vez calculados los diferentes valores de RT, se hallará el valor de RT_{mid} y se comprobará el grado de variación existente de los valores de RT en función de la frecuencia. En la circunstancia poco probable de que el valor de RT_{mid} se aproxime suficientemente al valor recomendado y de que la variación de RT sea mínima, no será preciso añadir más absorción que la estrictamente debida a las sillas y a la boca del escenario, es decir, todas las paredes y el techo podrán tener un acabado a base de materiales reflectantes, según se ha considerado como punto de partida. En caso contrario, se deberá proceder como se expone a continuación.
- d) Para obtener el valor de RT_{mid} recomendado, así como unos valores de RT lo suficientemente constantes con la frecuencia, se colocarán materiales absorbentes y/o elementos resonadores sobre determinadas superficies del recinto, siendo estos últimos especialmente útiles para la disminución del RT a bajas frecuencias. Las zonas óptimas para

la colocación de elementos absorbentes son las partes superiores de las paredes laterales, la pared o paredes posteriores y, si es necesario, los laterales del techo o falso techo.

El resto de superficies deberán ser tratadas con materiales reflectantes, tipo madera o cartón-yeso, adheridos perfectamente a las mismas, o incluso puede ser suficiente utilizar como acabado un enlucido de yeso o similar. De esta manera, dichas superficies resultarán útiles para generar primeras reflexiones hacia el público (apartado 4.7.5). Hay que tener presente que, por ejemplo, una madera delgada colocada a una cierta distancia de la pared o del techo actúa como un resonador de membrana, y no como un material reflectante, con una frecuencia de máxima absorción situada en la zona de frecuencias bajas.

Existe otra posible manera de proceder, consistente en definir en primera instancia los materiales que se deberán utilizar como acabados de las paredes y del techo y, posteriormente, establecer los coeficientes de absorción más idóneos para las sillas, obviamente con unos determinados márgenes de tolerancia.

Ahora bien, en la práctica, la elección de los revestimientos más adecuados para las diferentes superficies de la sala no siempre garantiza la obtención de los tiempos de reverberación recomendados. Ello es debido a los posibles cambios de absorción acústica asociados a la diferente escenografía empleada en cada representación, tal como se ha comentado en el apartado 4.4.2. Dichos cambios suponen una modificación de los coeficientes de absorción asociados a la boca del escenario.

Con objeto de independizar la absorción equivalente de la boca del escenario, y por lo tanto los valores de los tiempos de reverberación de la sala con respecto a la escenografía empleada en cada caso, es conveniente revestir preferentemente las partes superiores de las paredes de la caja de escenario con materiales absorbentes. De esta manera se conseguirá aumentar la absorción propia de la caja y, en consecuencia, disminuir la influencia de cada escenografía sobre las características acústicas de la caja.

Una vez definidos todos los materiales utilizados como acabados de la sala y la absorción equivalente de la boca del escenario, es posible determinar la inteligibilidad de la palabra en cualquier punto del recinto mediante el cálculo del %ALCons a partir, o bien de las expresiones detalladas en el apartado 1.15.9, o bien de las expuestas en el apéndice 2. Se recomienda hacer los cálculos en la banda de frecuencias centrada en 2 kHz, al tratarse de la banda de máxima contribución a la inteligibilidad.

Por último, señalar que los procedimientos de cálculo expuestos anteriormente son aproximados, pues están basados en la fórmula clásica de Sabine. Para obtener unos resultados más exactos es indispensable hacer uso de un programa de simulación acústica (capítulo 7).

4.7.5 Criterios para la generación de primeras reflexiones

El hecho de elegir los materiales más apropiados a fin de obtener los valores recomendados del tiempo de reverberación para cada recinto objeto de estudio tampoco garantiza una inteligibilidad de la palabra y una sonoridad óptimas en todos los puntos del mismo. Es preciso, además, evitar la aparición de ecos y focalizaciones del sonido (apartado 4.7.10) y, además, incrementar la señal útil recibida en cada punto.

Como se ha mencionado en repetidas ocasiones, dicha señal útil está formada por el sonido directo y el conjunto de primeras reflexiones. La generación de primeras reflexiones dirigidas hacia las diversas zonas de público se consigue mediante el diseño de superficies reflectoras con una adecuada orientación, siguiendo los principios de la acústica geométrica. A continuación se describen una serie de posibles ubicaciones de dichos reflectores.

4.7.5.1 Parte superior de la sala

Los elementos reflectores pueden situarse en la parte superior de la sala, a modo de falso techo, o bien en forma de plafones suspendidos del techo. En ocasiones, esta disposición puede llegar a ser motivo de conflicto, puesto que es en esa zona donde se instala una parte importante de los equipos de iluminación del escenario. En la figura 4.29 se muestra un ejemplo de un falso techo con las formas adecuadas para proporcionar primeras reflexiones a la zona de público.

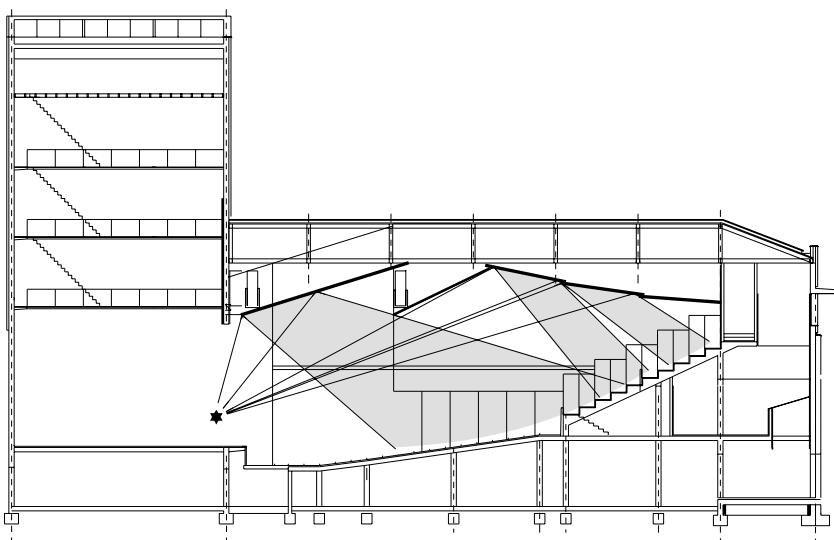


Fig. 4.29 Falso techo generador de primeras reflexiones sobre la zona de público (sección longitudinal)

En las figuras 4.30 y 4.31 se presenta otro ejemplo de generación de primeras reflexiones, en este caso mediante un conjunto de reflectores suspendidos del techo.

Como se observa en la figura 4.30, los reflectores R1 y R2 proporcionan primeras reflexiones a la zona de platea, mientras que el reflector R3 se encarga de proporcionarlas al primer y segundo anfiteatro.

A modo de ejemplo, en la figura 4.32 se presentan los mapas de niveles de campo reflejado, en la banda de 2 kHz, debidos a los reflectores R1 y R2, respectivamente. Los mapas se han obtenido considerando exclusivamente reflexiones de primer orden.

Según se puede apreciar, cada reflector proporciona primeras reflexiones a una zona diferente de platea.

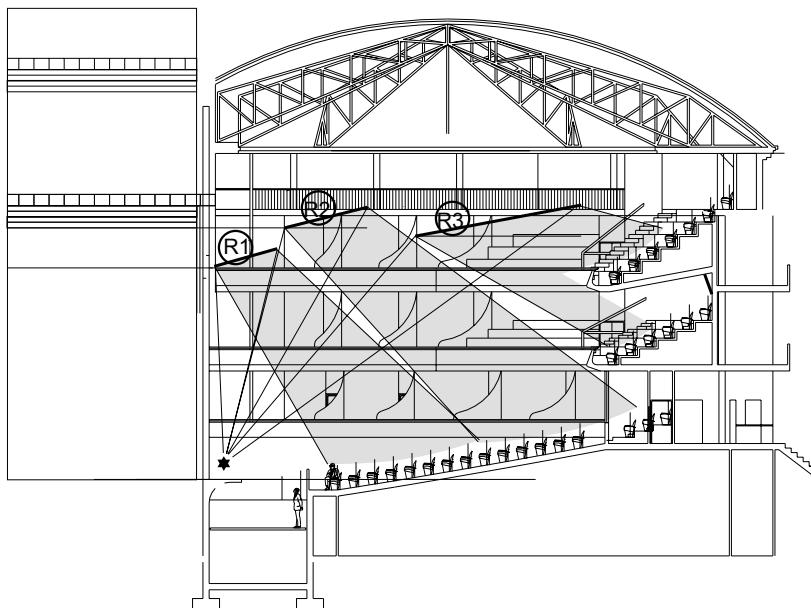


Fig. 4.30 Reflectores de madera lisa diseñados para generar primeras reflexiones sobre las diferentes zonas de público (sección longitudinal en perspectiva)

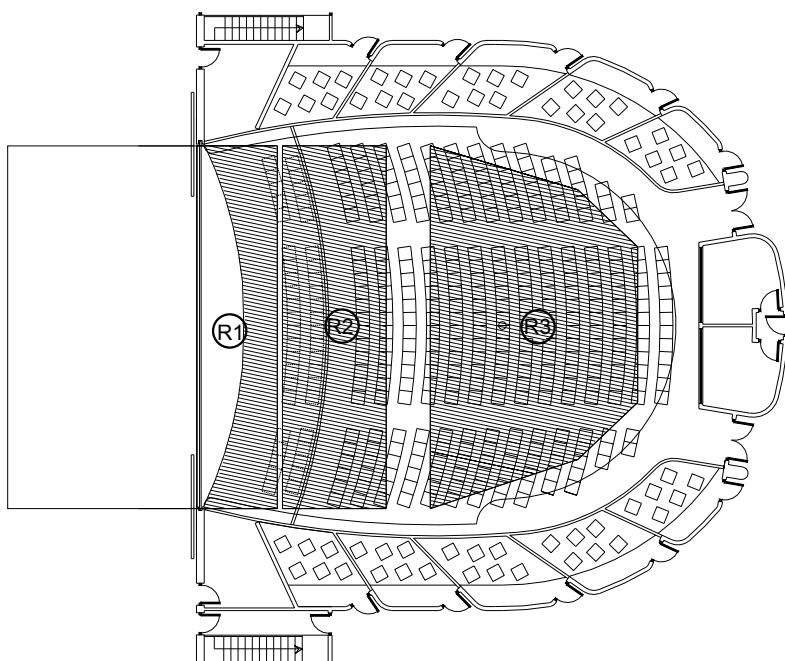


Fig. 4.31 Reflectores de madera lisa diseñados para generar primeras reflexiones sobre las diferentes zonas de público (planta)

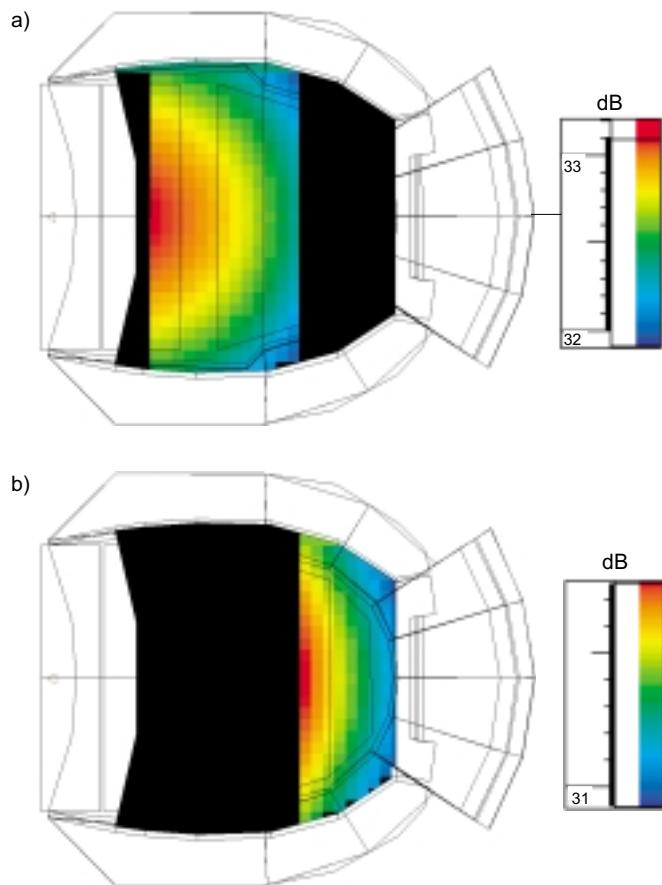


Fig. 4.32 Mapas de niveles de campo reflejado en la platea debidos a: a) reflector R1; b) reflector R2 (reflexiones de primer orden y banda de 2 kHz)

Un criterio adicional a tener en cuenta siempre que sea posible hace referencia a la generación del máximo número de primeras reflexiones en la zona posterior de la sala, ya que es allí donde el sonido directo es más débil. La manera de lograr este objetivo consiste en diseñar, en principio, dos tramos del falso techo o bien dos plafones suspendidos del techo con la inclinación apropiada para proporcionar primeras reflexiones a dicha zona.

4.7.5.2 Paredes laterales de la sala

Como complemento (y a veces incluso como alternativa) a la generación de primeras reflexiones provenientes del techo, es posible generar este tipo de reflexiones dando las formas más adecuadas a las paredes laterales de la sala. En este caso, las primeras reflexiones generadas son laterales.

En las figuras 4.33 y 4.34 se muestra un conjunto de reflectores laterales específicamente diseñados con objeto de proporcionar primeras reflexiones a la zona de público.

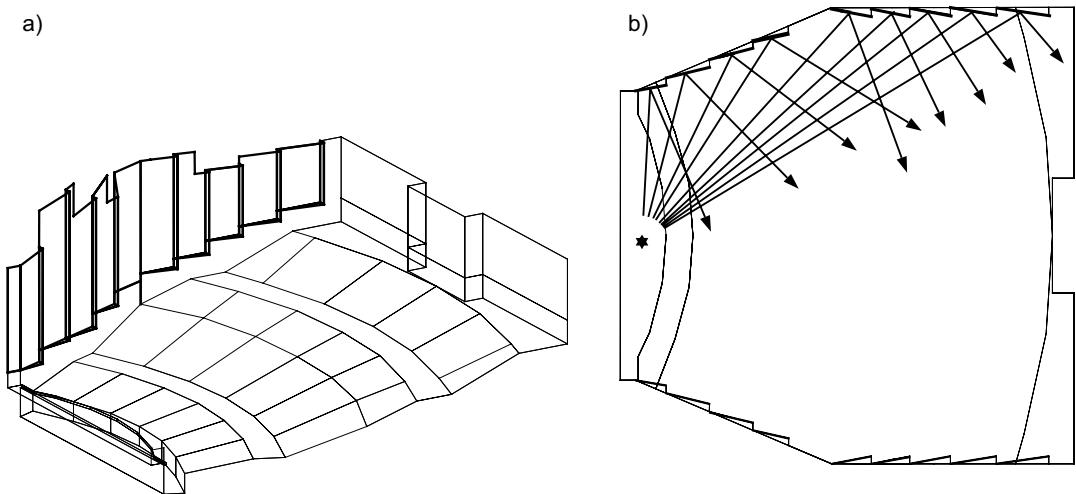


Fig. 4.33 Reflectores laterales generadores de primeras reflexiones hacia la zona de público (Gran Teatro Imperial, Parque Temático Port Aventura, Tarragona, España): a) perspectiva; b) planta



Fig. 4.34 Vista parcial de los reflectores laterales del Gran Teatro Imperial, Parque Temático Port Aventura (Tarragona, España)

En este punto, conviene destacar la diferencia sustancial existente en relación con el diseño de salas de conciertos. Como se expondrá ampliamente en el capítulo 5, en los recintos destinados a música sinfónica es condición “sine qua non” que exista una gran cantidad de primeras reflexiones laterales a fin de conseguir una impresión espacial óptima. En el caso de teatros, la existencia de dicho tipo de primeras reflexiones sólo es imprescindible si se prevé un uso multifuncional de la sala (teatro y música).

4.7.5.3 Zonas laterales del proscenio

Otra posible manera de generar primeras reflexiones está indisolublemente ligada a los teatros de proscenio. Estos teatros permiten el diseño de superficies reflectantes laterales inmediatamente por delante del proscenio. Dichas superficies son muy útiles para generar primeras reflexiones en los momentos en que el actor cambia de posición en el escenario, dejando de situarse frontalmente hacia el público. De esta manera, se consigue minimizar el efecto negativo de la disminución de la energía del sonido directo en la sala debido a las características direccionales de la voz humana.

A continuación se presenta un ejemplo ilustrativo de la disminución de señal útil, y por tanto de inteligibilidad de la palabra, en un teatro sin reflectores laterales a nivel de proscenio. En concreto, se representa la evolución de la definición (D) en función de la distancia a la fuente sonora para dos posiciones del actor en el escenario: frontal y lateral (figura 4.35).

Según se puede observar, existe una clara disminución de los valores del parámetro D cuando el actor se sitúa lateralmente. Por otro lado, en ambos casos, la definición D es máxima en los puntos situados cerca del escenario debido al predominio del sonido directo, y disminuye a medida que el punto considerado se aleja de la fuente sonora.

4.7.5.4 Pared posterior de la sala

El último diseño relacionado con la generación de primeras reflexiones mediante la intervención de algunas de las paredes de la sala consiste en dar la inclinación adecuada a la pared posterior de la misma, o bien, aprovechar las reflexiones de segundo orden generadas por el techo y dicha pared. Este diseño es alternativo o complementario al expuesto en el apartado 4.7.5.1 en relación con la generación de primeras reflexiones en la zona posterior del recinto.

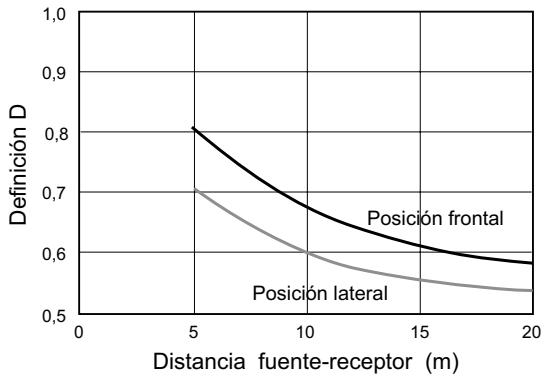


Fig. 4.35 Representación de la definición D, en función de la distancia fuente-receptor, para una posición frontal del actor y para una posición lateral

Finalmente, cabe señalar que también resulta especialmente importante la generación del máximo número posible de primeras reflexiones hacia la audiencia en aquellos teatros donde el actor se halla a menudo de espaldas a diferentes zonas de público, como por ejemplo en los teatros circulares (“in the round”) descritos en el apartado 4.3.5. Como se ha comentado en el mismo, las reflexiones pueden ser proporcionadas por paneles suspendidos del techo, o bien, por las paredes perimetrales que delimitan la sala.

4.7.6 Perfil teórico óptimo

A la hora de establecer el perfil teóricamente óptimo de un teatro, de nuevo es necesario recordar que la voz humana es directiva. A partir de las características direccionales de la voz en las bandas de 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz representadas en la figura 1.24, es posible hallar la correspondiente curva de nivel de presión sonora constante correspondiente a la voz humana en el espacio libre (figura 4.36).

Siguiendo con la premisa de que el sonido reverberante se puede interpretar como una de las componentes del ruido inherente a un recinto cerrado, y suponiendo que su energía se mantiene constante (según predice la teoría clásica expuesta en el apartado 1.15.7), el mencionado perfil óptimo coincidiría con la curva anterior. Ello es debido a que en los puntos situados sobre dicha curva se cumple que:

$$L_D - L_R = \text{constante}$$

donde:

$$\begin{aligned} L_D &= \text{nivel de campo directo} \\ L_R &= \text{nivel de campo reverberante} \\ (L_R &= \text{constante}) \end{aligned}$$

y, por lo tanto, la inteligibilidad de la palabra también lo es (apartado 1.15.9).

Lógicamente, la máxima distancia para la cual la inteligibilidad sería correcta se hallaría sobre el eje longitudinal central de la sala, suponiendo que el actor estuviese situado de cara a la misma. Su valor dependería, en cada caso, de la energía asociada a las primeras reflexiones y de la energía correspondiente al sonido reverberante (es decir, del tiempo de reverberación). La primera aumentaría dicha distancia, mientras que la segunda produciría justamente el efecto contrario.

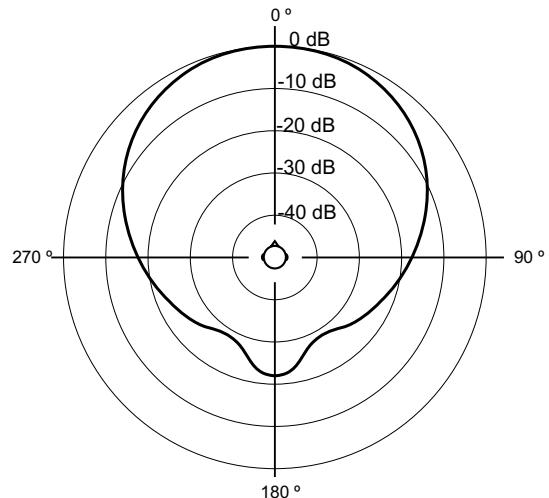


Fig. 4.36 Curva de nivel de presión sonora constante correspondiente a una persona situada al aire libre

Por ejemplo, suponiendo un teatro con un volumen de 5.000 m^3 , un tiempo de reverberación medio RT_{mid} de 1 s y un valor de ERR de 3 (energía de las primeras reflexiones doble que la correspondiente al sonido directo), el perfil óptimo teórico sería el representado en la figura 4.37.

Según se puede observar, la distancia máxima es de unos 22 m.

Ahora bien, la evolución de la energía del sonido reverberante difiere de la prevista por la teoría clásica, según se expone a continuación.

A partir de numerosas mediciones llevadas a cabo en diversos teatros y salas de conciertos, Barron y Lee (1.988) constataron que dicha energía, y por lo tanto el nivel de campo reverberante L_R , disminuye con la distancia a la fuente sonora, lo que ha dado lugar a una nueva teoría revisada.

En la figura 4.38 se muestra un promedio de los valores medidos de dicho nivel en función de la distancia a la fuente, y se compara con el nivel constante previsto por la teoría clásica. Asimismo, y también a efectos de comparación, se representa la evolución del nivel de campo directo.

El efecto inmediato producido por tal disminución del sonido reverberante es el de aumentar la mencionada distancia máxima sobre el eje longitudinal de la sala. En la figura 4.39 se observa el nuevo perfil óptimo correspondiente al ejemplo anterior, comparado con el perfil obtenido a partir de la teoría clásica.

Según se puede ver, el nuevo perfil tiende a ser circular, con el centro situado ligeramente por delante del actor, mientras que la máxima distancia sobre el eje longitudinal se ha incrementado, pasando a ser de 30 m. Curiosamente, dicho perfil coincide con el perfil correspondiente al Gran Teatro de Burdeos (Francia), construido en 1.780 (figura 4.40).

Ahora bien, el mencionado perfil óptimo, menos alargado que el correspondiente a los teatros en forma de herradura, presenta los inconvenientes descritos a continuación.

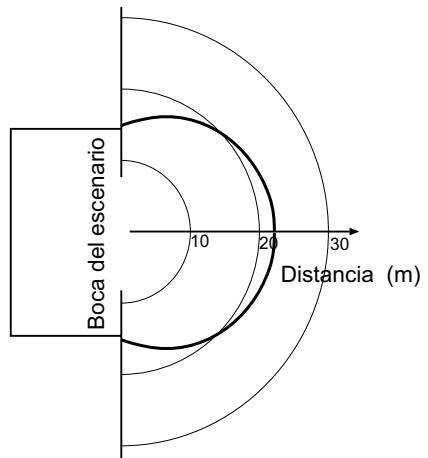


Fig. 4.37 Perfil teórico óptimo, según la teoría clásica, de un teatro de $V = 5.000 \text{ m}^3$, $RT_{\text{mid}} = 1 \text{ s}$ y $ERR = 3$

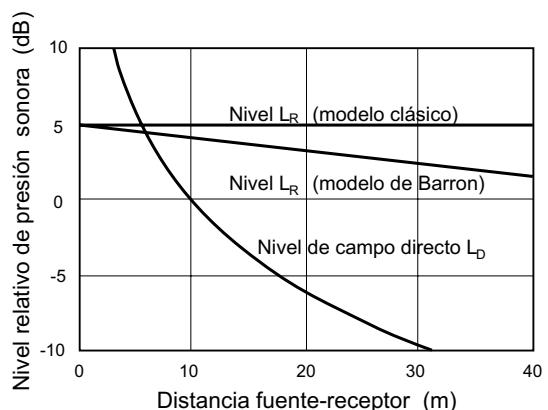


Fig. 4.38 Componentes del campo sonoro (teoría clásica y teoría revisada de Barron)

Su forma cuasi-circular impide la visión de una gran parte del escenario a los espectadores situados en ambos extremos laterales de la sala. De hecho, la perdida de visión de los laterales posteriores del escenario tiene lugar en toda la zona de espectadores situada a una distancia del eje central de la sala superior al valor D_{\max} de la figura 4.41 (D_{\max} = distancia entre el eje central y el límite de la boca del escenario).

En los teatros de proscenio modernos, se suele admitir una inclinación máxima de las paredes laterales de la sala de 30° , según se indica en dicha figura. A pesar del cumplimiento de dicha recomendación, los espectadores situados en la zona A no verán la parte del escenario indicada con la letra "a".

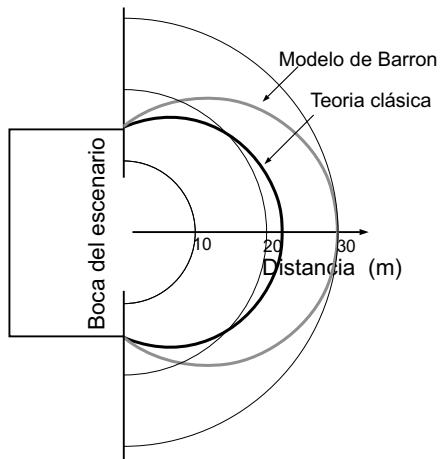


Fig. 4.39 Perfiles teóricos óptimos de un teatro de $V = 5.000 \text{ m}^3$, $RT_{\text{mid}} = 1 \text{ s}$ y $ERR = 3$, según la teoría clásica y la teoría revisada de Barron

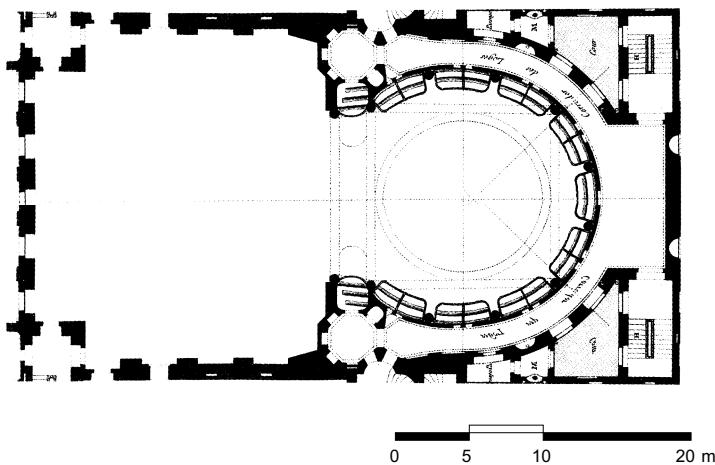


Fig. 4.40 Gran Teatro de Burdeos, Francia (planta)

En los teatros pertenecientes a la época del Barroco, este ángulo debía ser incluso menor debido a la tendencia a utilizar escenarios de gran profundidad con objeto de conseguir perspectivas muy marcadas.

La forma quasi-circular da lugar a la existencia de paredes cóncavas que propician la aparición de focalizaciones del sonido, del todo inaceptables por la pérdida de inteligibilidad que originan.

La forma referida es únicamente válida en el caso de que el actor esté situado de cara al público (0°). Si se coloca lateralmente (90°), el perfil óptimo gira con él. Esta circunstancia se produce para cualquier perfil considerado. De todas maneras, en los teatros de proscenio, la disminución de inteligibilidad y de sonoridad causada por un giro del actor puede ser, en parte, compensada mediante la colocación de paneles reflectantes en los laterales de la boca del escenario, según se ha comentado en el apartado 4.7.5.3.

Los tres inconvenientes expuestos desaconsejan el diseño de un teatro ciñéndose estrictamente a este perfil. No obstante, conviene recordar que existe un perfil teórico óptimo distinto para cada combinación entre el número de primeras reflexiones y el valor del tiempo de reverberación, y que, en cada caso, dicho perfil indica los límites dentro de los cuales la inteligibilidad de la palabra es correcta. Por lo tanto, cualquier perfil elegido para la sala que esté contenido dentro del perfil teórico óptimo, y que además no presente los dos primeros inconvenientes descritos con anterioridad, resultará apropiado desde el punto de vista de una correcta inteligibilidad de la palabra.

4.7.7 Distancia máxima recomendada

En la tabla 4.3 se indican las distancias máximas aproximadas, según Barron, para las cuales se conseguirá una correcta inteligibilidad de la palabra, en función del valor del parámetro ERR (indicativo de la energía de primeras reflexiones, apartado 4.4.3) y para tres ángulos diferentes del actor con respecto al espectador (0° , 90° y 150°). Las hipótesis de partida son las siguientes:

- Energía del sonido reverberante baja
- Definición: $D = 0,50$
- Sonoridad media: $S_{mid} = 0 \text{ dB}$

Según se puede observar, la distancia máxima varía ostensiblemente en función del valor de ERR. Concretamente, para un ángulo de 0° se pasa de 20 m (para $ERR = 1$) a 44,7 m (para $ERR = 5$). De aquí el papel decisivo que juegan las primeras reflexiones en el diseño de teatros. También cabe resaltar la gran disminución de las distancias máximas cuando el actor deja de situarse frontalmente hacia la sala debido a la directividad de la voz humana.

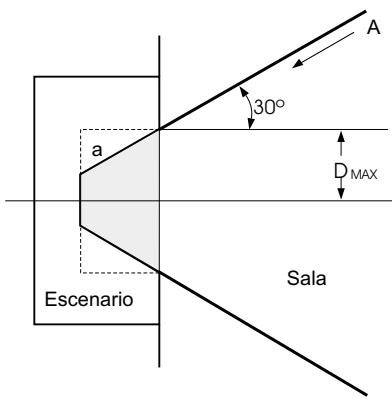


Fig. 4.41 Inclinación máxima de las paredes laterales recomendada para los teatros de proscenio modernos

ERR	ÁNGULO ACTOR-ESPECTADOR = 0°	ÁNGULO ACTOR-ESPECTADOR = 90°	ÁNGULO ACTOR-ESPECTADOR = 150°
1	20,0 m	13,0 m	8,9 m
2	28,3 m	18,4 m	12,8 m
3	34,6 m	22,6 m	15,5 m
4	40,0 m	26,1 m	17,9 m
5	44,7 m	29,2 m	20,0 m

Tabla 4.3 Distancias límite para una correcta inteligibilidad en teatros (según Barron)

Ahora bien, la hipótesis de baja energía del sonido reverberante es equivalente a suponer que los valores de tiempo de reverberación, y en particular el de RT_{mid} , están muy por debajo de los recomendados. Ello resulta totalmente desaconsejable, especialmente si $RT_{mid} < 0,5$ s, ya que daría lugar a salas excesivamente “secas” y a una falta de confort acústico (apartado 4.4.1).

En el caso de que los valores de RT sean óptimos, se recomienda que el espectador más alejado del escenario se halle, como máximo, a una distancia de 20 m del mismo. Tal como se ha comentado en el apartado 4.7.3, a fin de respetar dicho criterio y a la vez aumentar el aforo del teatro, en la práctica se suelen diseñar anfiteatros y/o balcones ubicados en uno o más pisos por encima de la platea.

4.7.8 Criterios para conseguir una sonoridad óptima

Tal como se ha visto en el apartado 4.4.5, la sonoridad S es un parámetro indicativo del grado de amplificación producido por la sala sobre el mensaje oral emitido. El valor de dicho parámetro en cada punto se obtiene a partir de la contribución energética del:

- Sonido directo
- Primeras reflexiones
- Sonido reverberante

Obviamente, la energía correspondiente al sonido directo, aunque es un elemento integrante de la sonoridad, no guarda ninguna relación con la sala. Por consiguiente, su aportación no es indicativa del mencionado grado de amplificación. Es, pues, la energía asociada a las primeras reflexiones y al sonido reverberante la que marca la diferencia en cuanto a los niveles de presión sonora obtenidos en la sala en relación con los que se obtendrían en el espacio libre.

Por lo que se refiere a las primeras reflexiones, en el apartado 4.7.5 se han dado unos criterios básicos para su generación. Según se ha comentado, la existencia de primeras reflexiones en un punto cualquiera de la sala, no sólo produce un aumento de sonoridad, sino que también contribuye a un incremento de la inteligibilidad de la palabra.

En cuanto a la energía asociada al sonido reverberante, ésta produce dos efectos contrapuestos. Por una parte, contribuye a un aumento de sonoridad, pero por otra, limita la máxima distancia para la cual la inteligibilidad es correcta. De hecho, tal como se ha visto en el

apartado 4.3, el sonido reverberante constituye una de las dos componentes del ruido de fondo asociado a un recinto cerrado.

Se trata, por lo tanto, de llegar a una solución de compromiso de manera que el sonido reverberante contribuya a un incremento de sonoridad, sin que produzca una disminución significativa de inteligibilidad. Ello se consigue, en cada caso, eligiendo los materiales adecuados para los acabados de la sala, a fin de lograr que los valores del tiempo de reverberación coincidan con los recomendados (apartado 4.7.1).

Por otro lado, a partir de la teoría revisada de Barron, se puede concluir que la sonoridad disminuye a medida que el punto considerado se aleja del escenario. En concreto, en los puntos situados en la parte posterior de una sala, dicha teoría predice una sonoridad del orden de 2 a 4 dB inferior a la prevista por la teoría clásica.

4.7.9 Criterios para prevenir o eliminar la coloración de la voz o una falsa localización de la fuente sonora

Para evitar cualquiera de dichas anomalías, es recomendable no diseñar superficies reflectantes planas de grandes dimensiones tanto en el techo como en las paredes. Si por algún motivo no es posible reducir las dimensiones de las mismas, es conveniente darles una cierta convexidad. En la práctica, el radio de curvatura no debe ser inferior a unos 5 m ya que, para radios menores, la superficie considerada dejaría de cumplir su función de generación de primeras reflexiones hacia una zona concreta de público, convirtiéndose en un elemento difusor del sonido (apartado 2.4.1).

4.7.10 Criterios para prevenir o eliminar ecos y focalizaciones del sonido

4.7.10.1 Ecos

Las posibles soluciones para prevenir o cancelar ecos son las siguientes (figura 4.42):

- Colocar material absorbente sobre las superficies conflictivas. El material puede protegerse con una superficie acústicamente transparente (figura 4.42a). En cualquier caso, conviene evitar la utilización de grandes cantidades de absorción, ya que ello podría suponer una disminución del tiempo de reverberación y de la sonoridad. Como norma práctica, el porcentaje de superficie tratada para evitar la aparición de esta anomalía no debe ser superior al 10% de la superficie total de la sala.
- Dar una forma convexa a las superficies conflictivas o bien incorporar elementos convexos sobre las mismas (figura 4.42b). Si se trata de superficies que actúan a modo de reflectores, es preciso respetar el criterio de que el radio de curvatura no sea inferior a, aproximadamente, 5 m. Para cualquier otro tipo de superficies, no existe limitación alguna en cuanto al valor de dicho radio de curvatura. A diferencia de lo que ocurre en las salas de conciertos (capítulo 5), la creación de sonido difuso en un teatro, al dar un radio de curvatura inferior a 5 m a la superficie en cuestión, no redunda en beneficio de la calidad acústica de la sala.

- Reorientar las superficies conflictivas o bien incorporar un elemento adicional con la adecuada inclinación, a fin de redirigir el sonido reflejado hacia otras zonas no problemáticas (figura 4.42c).

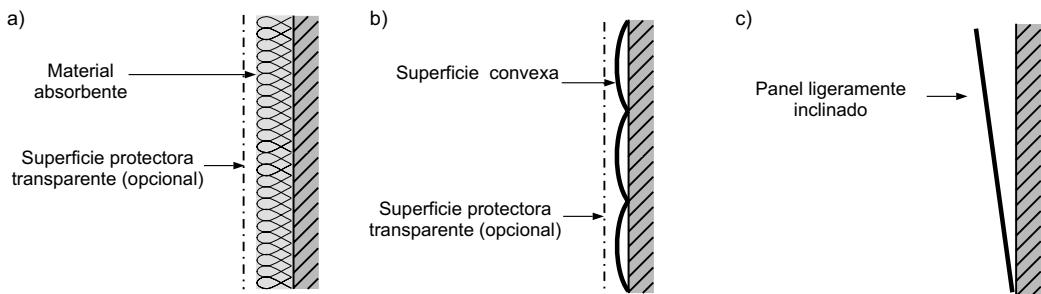


Fig. 4.42 Posibles soluciones para prevenir o eliminar ecos: a) mediante la colocación de material absorbente; b) mediante un cambio a forma convexa; c) mediante la incorporación de una superficie inclinada

4.7.10.2 Focalizaciones del sonido

209

Si las focalizaciones son producidas por alguna de las paredes de la sala, las posibles soluciones para atenuar o cancelar dicho efecto son equivalentes a las expuestas previamente en relación con la aparición de ecos.

En el caso de que la superficie problemática sea el techo de la sala, la solución más práctica consiste en colocar material absorbente por debajo del mismo.

4.7.10.3 Eco flotante

Para prevenir la aparición de eco flotante, es preciso evitar la existencia de grandes paredes paralelas reflectantes en cualquier zona de la sala, dando una pequeña inclinación (del orden de 5°) a una de ellas. Otra posible solución, aunque menos efectiva, consiste en aplicar un tratamiento absorbente o de difusión del sonido, al menos sobre una de las dos paredes problemáticas.

A modo de ejemplo, en la figura 4.43a se observa la curva energía-tiempo correspondiente a un punto de una sala en el que aparece eco flotante. En la figura 4.43b se presenta la correspondiente curva, una vez tratada acústicamente una de las dos paredes conflictivas. Finalmente, en la figura 4.43c se observa la pertinente curva después de tratar las dos paredes.

Según se observa, al tratar las paredes se produce una evidente atenuación de la energía asociada a las reflexiones conflictivas.

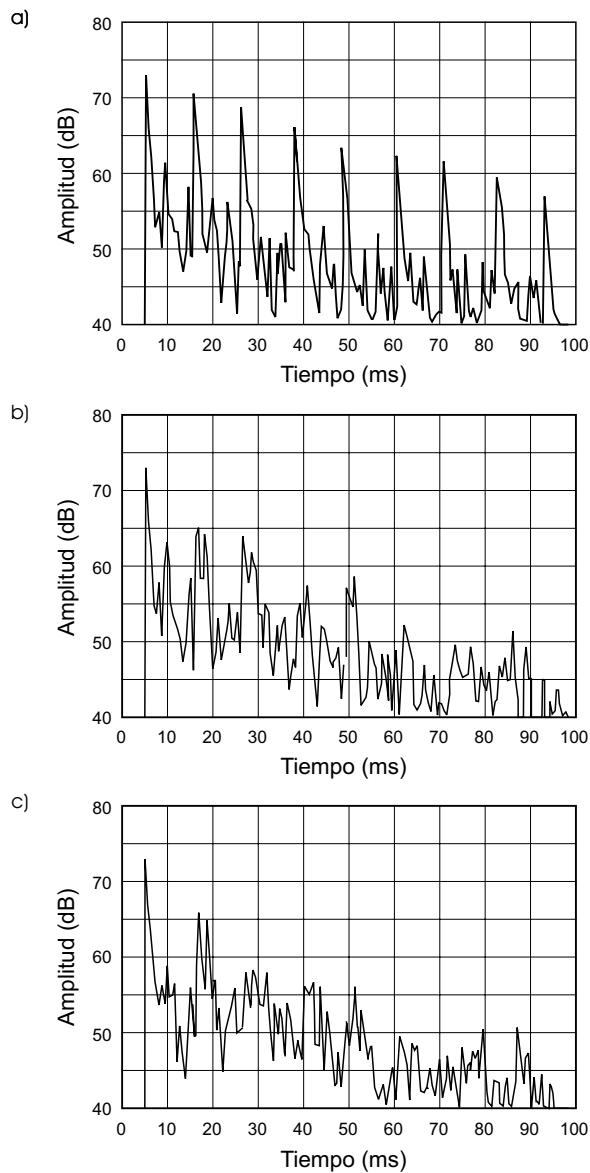


Fig. 4.43 Curvas energía-tiempo ilustrativas de la existencia de eco flotante en un punto dado y de su progresiva eliminación: a) eco flotante claramente manifiesto; b) eco flotante muy atenuado; c) eco flotante cancelado

4.8 Resumen de los criterios generales de diseño de teatros

Como resumen de todo lo expuesto en este capítulo, seguidamente se destacan aquellos criterios más relevantes a la hora de diseñar un recinto destinado a actividades teatrales.

Ante todo, conviene tener presente que el objetivo fundamental que se pretende conseguir es que la inteligibilidad de la palabra sea óptima en todos los puntos de la sala. Si además el recinto es cerrado, se plantea un objetivo adicional consistente en lograr que la sonoridad se halle por encima de un valor mínimo recomendado. Dicho objetivo es más difícil de cumplir en la parte posterior de la sala, ya que es en dicha zona donde el sonido directo es más débil.

Este planteamiento elemental no guarda ninguna relación con el correspondiente al diseño de una sala de conciertos, puesto que en tal caso es preciso tener en consideración múltiples factores, todos ellos determinantes de la calidad acústica final de la sala (capítulo 5).

Por otra parte, si el recinto considerado es pequeño, la obtención de una correcta inteligibilidad de la palabra habitualmente no suele representar ningún problema, siempre y cuando el tiempo de reverberación sea el adecuado. En tal caso, la forma de la sala desempeña un papel secundario.

Por contra, si el recinto es de tamaño medio o grande, normalmente no basta con cumplir el requerimiento relativo al tiempo de reverberación, sino que es imprescindible generar el máximo número de primeras reflexiones útiles hacia la zona de público.

4.8.1 Parámetros acústicos básicos

A continuación se indican los parámetros acústicos básicos que es preciso tener en cuenta en el diseño de un teatro. Dichos parámetros se han definido en el apartado 4.4.

- Tiempo de reverberación medio RT_{mid} (500 Hz - 1 kHz), sala ocupada
- Claridad de la voz C_{50} (“speech average”), sala ocupada
- Definición D (de 125 Hz a 4 kHz), sala ocupada
- %ALCons, sala ocupada
- STI/RASTI, sala ocupada
- Sonoridad media S_{mid} (500 Hz - 2 kHz), sala ocupada

211

4.8.2 Volumen de la sala y número de asientos

Desde un punto de vista práctico, la relación entre el volumen (V) y el número de asientos (N) de un teatro deberá hallarse, aproximadamente, entre:

$$4 \leq \frac{V}{N} \leq 6$$

Es preciso, pues, reservar de 4 a 6 m^3 por asiento.

Por otra parte, para conseguir unas condiciones acústicas óptimas en los teatros de proscenio es conveniente no sobrepasar la cifra de las 1.500 localidades. En tal caso, el volumen óptimo se halla entre 6.000 y 9.000 m^3 .

Para un teatro de capacidad media (en torno a las 500 localidades), el volumen adecuado se encuentra entre 2.000 y 3.000 m^3 .

4.8.3 Visuales

Uno de los objetivos prioritarios en un teatro es que el sonido directo que llega a cada espectador no sea obstruido por los espectadores situados delante suyo. Este requerimiento generalmente se cumple si existe una buena visibilidad del escenario.

El diseño de la visuales en una sala se basa en la siguiente consideración: los ojos se hallan, como promedio, 100 mm por debajo de la parte más elevada de la cabeza. Por lo tanto, la inclinación del suelo debe ser tal que permita el paso de la visual por encima de la cabeza del espectador situado en la fila inmediatamente anterior.

En cuanto a la pendiente del anfiteatro, existe un valor máximo permitido por razones de seguridad contemplado en la legislación vigente de cada país y que se sitúa alrededor de los 35°.

4.8.4 Anfiteatros y balcones

Con objeto de evitar una disminución apreciable de sonoridad en la zona situada debajo de un anfiteatro o balcón, Barron propone el siguiente criterio práctico a seguir: la profundidad D de la zona situada debajo de un anfiteatro o balcón no debe ser superior a 2,5 veces la altura H de la abertura asociada:

$$D \leq 2,5 H$$

4.8.5 Materiales recomendados

Como criterio general, se colocarán materiales absorbentes sobre las partes superiores de las paredes laterales y, si es necesario, sobre la pared posterior y los laterales del techo o falso techo. El resto de superficies deberán ser cubiertas con materiales reflectantes, tipo madera o cartón-yeso, perfectamente adheridos a las mismas. En ocasiones, puede resultar suficiente utilizar como acabado un enlucido de yeso o similar.

Con ello se pretende obtener un tiempo de reverberación medio RT_{mid} de la sala ocupada del orden de 1 s, si bien su valor exacto dependerá, en cada caso, del volumen de la misma.

Como, además, se pretende que el tiempo de reverberación no aumente a bajas frecuencias, a veces resultará necesario alternar el uso de materiales absorbentes con elementos resonadores, cuya principal característica es precisamente la de absorber energía sonora a dichas frecuencias bajas.

4.8.6 Generación de primeras reflexiones

La existencia de primeras reflexiones en la zona de público produce un aumento de la inteligibilidad de la palabra y de la sonoridad.

La generación de primeras reflexiones se podrá conseguir mediante el diseño de superficies reflectoras con una adecuada orientación de acuerdo con la acústica geométrica. Dichas superficies se situarán en la parte superior de la sala, a modo de falso techo o en forma de

paneles suspendidos del techo. Como complemento (y a veces como alternativa) a la generación de primeras reflexiones desde el techo, es posible diseñar las partes inferiores de las paredes laterales de la sala con una forma tal que produzcan primeras reflexiones hacia el público.

Un criterio adicional a tener en cuenta siempre que sea posible hace referencia a la generación del máximo número de primeras reflexiones en la zona posterior de la sala, ya que es en ella donde el sonido directo es más débil. Una manera de lograr este objetivo consiste en diseñar dos tramos del falso techo (o bien dos paneles suspendidos del techo) con la inclinación apropiada para proporcionar primeras reflexiones a dicha zona. Una forma alternativa de conseguirlo es inclinar adecuadamente la pared posterior o bien aprovechar las reflexiones de segundo orden generadas por el techo y dicha pared.

Otro posible diseño está indisolublemente ligado a los teatros de proscenio. Estos teatros permiten el diseño de superficies reflectantes laterales inmediatamente por delante del proscenio. Dichas superficies son muy útiles para generar primeras reflexiones en los momentos en que el actor cambia de posición en el escenario, dejando de situarse frontalmente hacia el público. De esta manera, se consigue minimizar el efecto negativo de la disminución de la energía del sonido directo en la sala debido a las características direccionales de la voz humana.

4.8.7 Perfil teórico óptimo

El perfil teórico óptimo de un teatro tiende a ser circular. Se establece a partir de las características direccionales de la voz humana y depende de la cantidad de primeras reflexiones y del tiempo de reverberación de la sala. De todas maneras, dicho perfil se desaconseja debido a:

- Falta de visión de una gran parte del escenario por parte de los espectadores situados en los dos extremos laterales de la sala.
- Existencia de paredes cóncavas que propician la aparición de focalizaciones del sonido causantes de una pérdida de inteligibilidad.
- Forma únicamente válida en el caso de que el actor esté situado de cara al público. Si cambia de posición, el perfil gira con él (esta circunstancia se produce para cualquier perfil considerado).

No obstante, el mencionado perfil sirve de referencia, ya que indica los límites dentro de los cuales la inteligibilidad es correcta para cada combinación entre el número de primeras reflexiones y el tiempo de reverberación. Cualquier perfil elegido para la sala que esté contenido dentro del perfil óptimo y que, además, no presente los dos primeros inconvenientes expuestos anteriormente resultará ser apropiado desde el punto de vista de la obtención de una correcta inteligibilidad de la palabra.

4.8.8 Distancia máxima recomendada

Por regla general, se recomienda que el espectador más alejado del escenario se halle, como máximo, a una distancia de 20 m del mismo. A fin de respetar dicho criterio, y a la vez aumentar el aforo del teatro, en la práctica se suelen diseñar anfiteatros y/o balcones ubicados en uno o más pisos por encima de la platea.

4.8.9 Sonoridad

La sonoridad en un punto cualquiera de una sala aumenta a medida que el número de primeras reflexiones existentes en el mismo es mayor.

Por otra parte, la sonoridad también aumenta con el tiempo de reverberación de la sala. De todas formas, un incremento demasiado elevado del tiempo de reverberación produce una disminución significativa de inteligibilidad.

Con objeto de que la sonoridad sea máxima, sin que ello suponga una pérdida excesiva de inteligibilidad, es preciso llegar a una solución de compromiso. Se trata de elegir, en cada caso, los materiales adecuados para los acabados de la sala, a fin de que los valores del tiempo de reverberación coincidan con los recomendados.

En cualquier caso, la sonoridad siempre disminuye a medida que el punto considerado se aleja del escenario, con independencia del diseño realizado.

4.8.10 Condiciones acústicas óptimas para el actor

Sin duda, los actores desean tener una cierta realimentación de la sala en forma de primeras reflexiones y de una ligera reverberación. Su ausencia, indefectiblemente, les obliga a elevar el tono de su voz, lo cual constituye el problema habitual que se encuentran cuando actúan al aire libre.

214

4.8.11 Prevención o eliminación de la coloración de la voz, de una falsa localización de la fuente sonora y de ecos y focalizaciones del sonido

La coloración de la voz y la falsa localización de la fuente sonora se pueden prevenir evitando el diseño de superficies reflectantes planas de grandes dimensiones.

Si por algún motivo no es posible reducir las dimensiones de las mismas, es conveniente darles una cierta convexidad. En la práctica, el radio de curvatura no debe ser inferior a unos 5 m. Dicha atenuación también es efectiva para eliminar ecos y focalizaciones del sonido. Otras posibles soluciones para prevenir o eliminar ecos y focalizaciones son:

- Colocación de material absorbente sobre las superficies conflictivas. En todos los casos conviene evitar la utilización de grandes cantidades de absorción, ya que ello podría suponer una disminución del tiempo de reverberación y de la sonoridad. Como norma práctica, el porcentaje de superficie tratada con objeto de atenuar los efectos de dichas anomalías no debe ser superior al 10% de la superficie total de la sala.

- Reorientar las superficies conflictivas o bien incorporar un elemento adicional con la adecuada inclinación a fin de redirigir el sonido reflejado hacia otras zonas no problemáticas.

En cuanto al eco flotante, la solución evidente para prevenir su aparición consiste en evitar la existencia de grandes paredes paralelas reflectantes en cualquier zona de la sala. En el caso de tratarse de paredes paralelas ya existentes, una pequeña inclinación (del orden de 5°) de una de ellas habitualmente resuelve el problema. Otra solución alternativa, aunque menos efectiva, consiste en aplicar un tratamiento absorbente o de difusión del sonido, al menos sobre una de las dos partes problemáticas.

4.9 Ejemplo práctico de diseño. Teatro de la Casa de la Cultura, Tres Cantos (Madrid, España)

Arquitecto: Servicios técnicos de la Comunidad Autónoma de Madrid
Estudio acústico: Audioscan, ingeniería del sonido

4.9.1 Descripción del espacio

El Teatro de la Casa de la Cultura de Tres Cantos (Madrid, España) tiene un volumen de aproximadamente 3.600 m^3 (sin la caja de escenario), una superficie acústica efectiva de audiencia de 271 m^2 y una superficie útil de escenario de 132 m^2 (figura 4.44).



Fig. 4.44 Teatro de la Casa de la Cultura, Tres Cantos (Madrid, España)

4.9.2 Objetivos acústicos

- RT_{mid} (sala ocupada): entre 1 y 1,2 s
- C_{50} “speech average” (sala ocupada) > 2 dB
- D (sala ocupada) $> 0,50$
- %ALCons (sala ocupada) $\leq 5\%$
- RASTI (sala ocupada) $\geq 0,65$
- S_{mid} (sala ocupada): entre 4 y 8 dB, para una orientación frontal del actor entre 2 y 6 dB, para una orientación lateral del actor
- Ausencia de ecos y focalizaciones del sonido

4.9.3 Materiales utilizados como acabados del recinto

En la tabla 4.4 se proporciona la información relativa a los materiales y revestimientos utilizados como acabados del Teatro que influyen directamente en la obtención de los tiempos de reverberación y primeras reflexiones deseados, mientras que en la figura 4.45 se observan los reflectores diseñados.

SUPERFICIE	MATERIAL
Suelo de platea, palcos y anfiteatro	Sillas con un bajo porcentaje de superficie tapizada
Paredes laterales y posteriores Superficie en diente de sierra bajo el anfiteatro (figura 4.45) Paredes colaterales a la boca del escenario Paredes del foso de orquesta Reflectores suspendidos del techo (figura 4.45)	Tablero de madera lisa de 12,5 mm de espesor y 14 Kg/m ² de densidad
Falso techo (figura 4.45) Superficie sobre la boca del escenario	Panel de madera de 12,5 mm de espesor y 14 Kg/m ² de densidad, perforado en un 5% mediante agujeros de 5 mm de diámetro separados 20 mm, montado con cámara de aire ≥ 200 mm rellena de lana de roca de 40 mm y 70 Kg/m ³
Suelo del foso de orquesta	Madera
Ventana sala de control	Cristal
Paredes laterales y techo de los palcos	Yeso enlucido
Pared posterior de los palcos	Cortinas fruncidas al 180% y de 0,45 Kg/m ² de densidad

Tabla 4.4 Información relativa a los materiales y revestimientos empleados

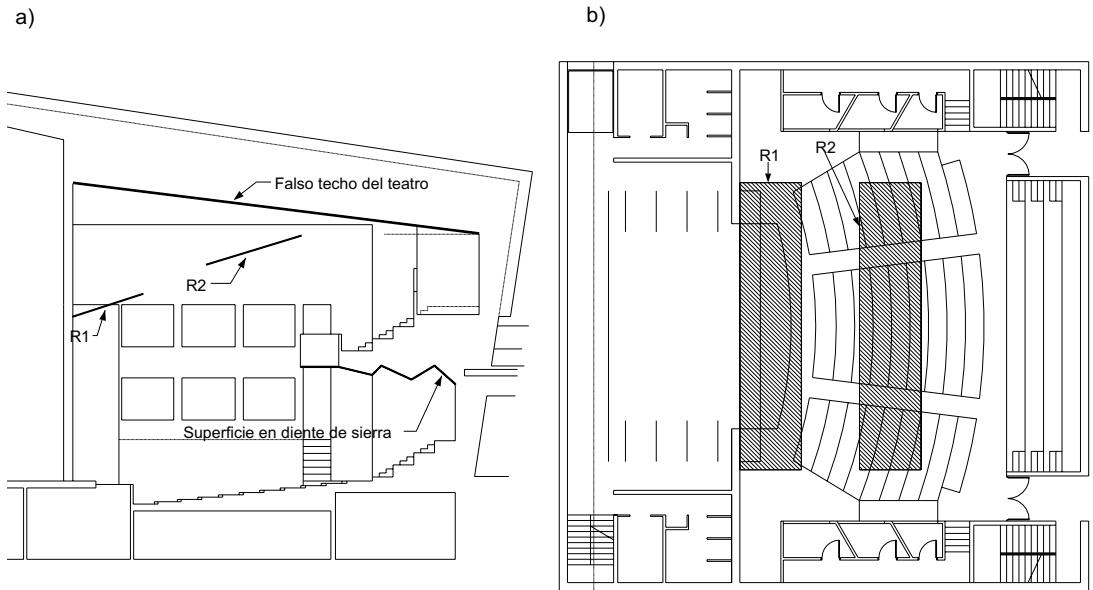


Fig. 4.45 Teatro de la Casa de la Cultura de Tres Cantos: a) vista en alzado de los reflectores suspendidos del techo, de la superficie en diente de sierra bajo el anfiteatro y del falso techo; b) vista en planta de los reflectores suspendidos del techo

4.9.4. Resumen de los resultados de las medidas realizadas y valoración acústica de la sala

Una vez incorporadas las soluciones de acondicionamiento acústico anteriormente expuestas, se llevaron a cabo una serie de medidas para verificar que los valores de los parámetros acústicos se correspondían con los objetivos marcados inicialmente.

Las medidas se efectuaron en los puntos del Teatro indicados en la figura 4.46. En todos los puntos de medida, el micrófono se situó a una altura de 1,2 m respecto al suelo.

La fuente sonora se situó en los siguientes puntos del escenario (figura 4.46):

- A: sobre el eje longitudinal del recinto, a una distancia de 2 m de la boca del escenario y a una altura de 1,5 m respecto al suelo del mismo
- B: sobre el eje longitudinal del recinto, a una distancia de 5 m de la boca del escenario y a una altura de 1,5 m respecto al suelo del mismo

Los resultados obtenidos son los siguientes:

4.9.4.1 Tiempo de reverberación (RT)

En la figura 4.47 se representan los valores medios de RT, para cada una de las bandas de octava situadas entre 125 Hz y 4 kHz, correspondientes a la sala vacía y a la sala ocupada. Los primeros se han calculado como media aritmética de todos los valores de RT medidos, mientras que los segundos se han obtenido a partir de una serie de cálculos teóricos basados en estudios realizados por Barron.

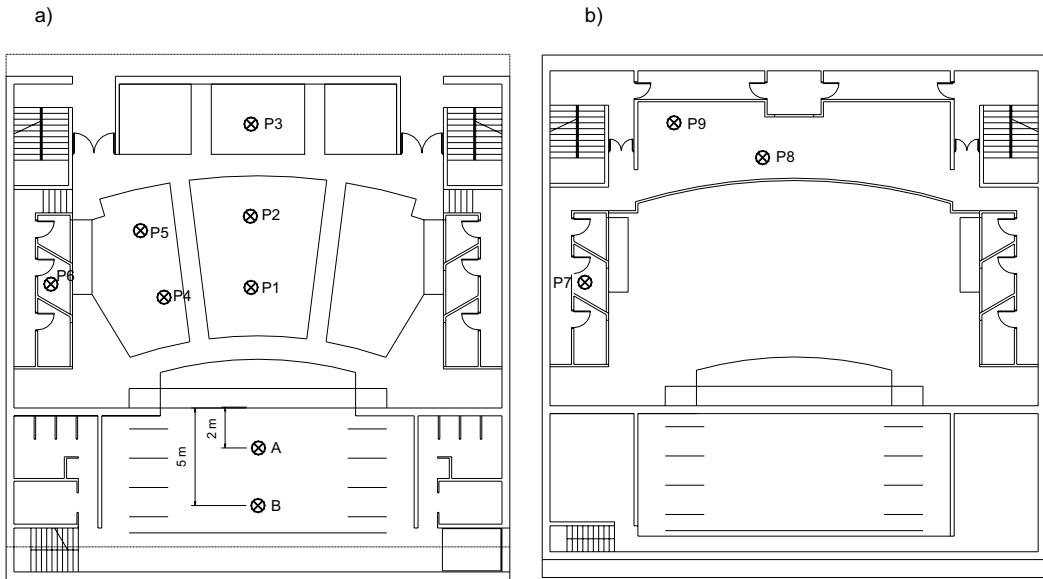


Fig. 4.46 Teatro de la Casa de la Cultura de Tres Cantos: ubicación de los puntos de medida y de la fuente sonora: a) planta baja; b) anfiteatro

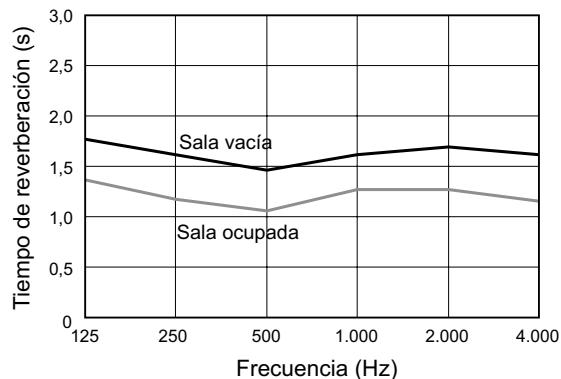


Fig. 4.47 Valores medios de los tiempos de reverberación correspondientes a la sala vacía y a la sala ocupada

El valor de RT_{mid} correspondiente a la sala ocupada es:

$$RT_{mid} = 1,19 \text{ s}$$

Este valor se halla dentro del margen de valores fijado como objetivo (entre 1 y 1,2 s) y, por tanto, es correcto para actividades de tipo teatral.

4.9.4.2 Claridad de la voz (C_{50})

En la figura 4.48 se representan los valores medios de C_{50} , para cada una de las bandas de octava situadas entre 500 Hz y 4 kHz, correspondientes a la sala vacía y a la sala ocupada. Los primeros se han calculado como media aritmética de todos los valores de C_{50} medidos, mientras que los segundos se han obtenido a partir de una serie de cálculos teóricos basados en estudios realizados por Barron.

El valor medio ponderado de C_{50} correspondiente a la sala ocupada es:

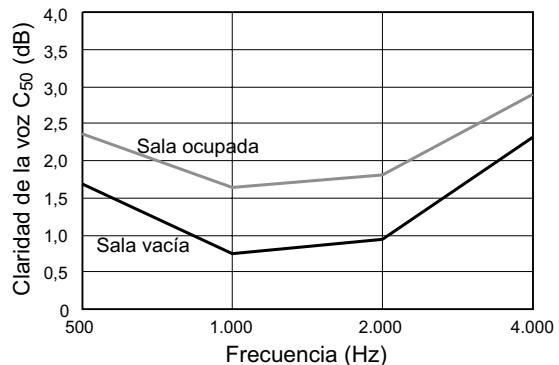


Fig. 4.48 Valores medios de C_{50} correspondientes a la sala vacía y a la sala ocupada

$$C_{50} (\text{"speech average"}) = 2,1 \text{ dB}$$

Este valor se halla por encima del valor mínimo recomendado de 2 dB, lo cual es indicativo de que la inteligibilidad de la palabra y la sonoridad son correctas.

4.9.4.3 Definición (D)

En la figura 4.49 se representan los valores medios de D, para cada una de las bandas de octava situadas entre 125 Hz y 4 kHz, correspondientes a la sala vacía y a la sala ocupada. Los primeros se han calculado como media aritmética de todos los valores de D medidos, mientras que los segundos se han obtenido a partir de una serie de cálculos teóricos basados en estudios realizados por Barron.

Como se puede observar, todos los valores se hallan por encima del valor mínimo recomendado de 0,50. Ello corrobora lo expuesto en el apartado anterior.

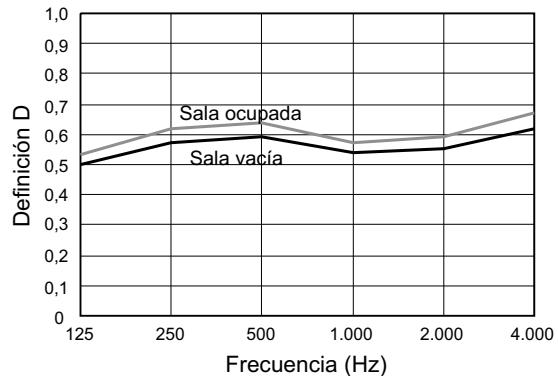


Fig. 4.49 Valores medios de D correspondientes a la sala vacía y a la sala ocupada

4.9.4.4 Inteligibilidad de la palabra (RASTI y %ALCons)

La medida de este parámetro se efectuó en los nueve puntos indicados en la figura 4.46 con la fuente sonora situada en la posición A. En la tabla 4.5 se indican los valores de RASTI medidos.

PUNTO DE MEDIDA	RASTI
P1	0,68
P2	0,59
P3	0,59
P4	0,56
P5	0,58
P6	0,55
P7	0,52
P8	0,59
P9	0,64

Tabla 4.5 Valores RASTI medidos (sala vacía)

El valor medio de RASTI correspondiente a la sala vacía es de 0,59 (%ALCons de 7%).

Los valores medios correspondientes a la sala ocupada, obtenidos mediante simulación informática, son:

220

$$\begin{aligned} \text{RASTI} &= 0,67 \\ \% \text{ALCons} &= 4,6\% \end{aligned}$$

El valor medio de RASTI es superior al valor mínimo recomendado de 0,65, y el valor medio de %ALCons es inferior al máximo recomendado del 5%. Por consiguiente, la inteligibilidad de la palabra es “buena”.

4.9.4.5 Sonoridad (S)

La medida de este parámetro se efectuó en los nueve puntos mencionados con la fuente sonora situada en la posición A.

En la tabla 4.6 se indican los valores de sonoridad media S_{mid} correspondientes a cada punto de medida, para una orientación frontal (0°) y para una orientación lateral (90°) del actor. Asimismo, se muestran los valores de S_{mid} suponiendo que la sala está ocupada (S_{mid}^o).

Para una orientación frontal del actor (0°), el valor medio de S_{mid}^o es de 6,8 dB y, por consiguiente, se halla dentro del margen fijado como objetivo (entre 4 y 8 dB).

Al considerar una orientación lateral del actor (90°), el valor medio global es de 4,6 dB y, por lo tanto, también se encuentra dentro del margen recomendado (entre 2 y 6 dB).

En consecuencia, el grado de amplificación producido por la sala es óptimo.

SONORIDAD MEDIA, EN dB	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
$S_{\text{mid}} (0^\circ)$	10,2	8,8	8,5	8,2	8,2	6,8	6,2	6,5	6,5
$S_{\text{mid}} (90^\circ)$	7,2	6,5	6,2	5,2	6,2	5,2	3,8	3,8	5,5
$S_{\text{mid}}^{\circ} (0^\circ)$	9,2	7,9	7,6	7,2	7,2	5,9	5,2	5,6	5,6
$S_{\text{mid}}^{\circ} (90^\circ)$	6,2	5,6	5,2	4,2	5,2	4,2	2,9	2,9	4,6

Tabla 4.6 Valores de S_{mid} y de S_{mid}° para 0° y 90°

4.9.4.6 Ecos y focalizaciones del sonido

A partir del análisis de las curvas energía-tiempo medidas en diferentes puntos de la sala, se ha llegado a la conclusión de que no existen ecos ni focalizaciones del sonido destacables.

Diseño acústico de salas de conciertos

5.1 Introducción

El diseño de salas destinadas a la interpretación musical es, sin lugar a dudas, el más complejo desde el punto de vista acústico. No existen fórmulas magistrales cuya utilización permita garantizar, a priori, la calidad acústica de un recinto. Además, en un sentido estricto, cada tipo de música requiere un recinto con unas características acústicas específicas y diferenciadas.

La dificultad se ve acrecentada por la falta de un lenguaje común y universal entre los diferentes colectivos involucrados: músicos, críticos musicales y consultores acústicos.

A lo largo de las últimas décadas se han hecho importantes esfuerzos encaminados a relacionar las valoraciones subjetivas sobre la calidad acústica de una sala con una serie de parámetros objetivos (físicamente medibles). Aunque en la actualidad todavía nos hallemos lejos de conseguir una perfecta correspondencia entre lo subjetivo y lo objetivo, el progreso en este sentido es notorio. Además, la mayoría de parámetros pueden ser calculados en la fase de diseño mediante programas informáticos de simulación acústica, y también pueden ser medidos una vez construido el recinto.

Por otra parte, el margen de valores recomendados para cada parámetro no se ha establecido como fruto de profundos estudios matemáticos, sino que se ha fijado siguiendo un proceso totalmente empírico. Tal proceso ha consistido en analizar un numeroso conjunto de salas de conciertos de todo el mundo y en determinar los valores de sus parámetros acústicos más representativos. Los valores correspondientes a aquellos recintos considerados unánimemente como excelentes desde un punto de vista acústico han sido los elegidos como patrón para el diseño de nuevas salas.

El éxito en el diseño no radica sólo en lograr que tales valores se hallen dentro del margen deseado, sino en que ello ocurra en todos los puntos de la sala, es decir, en que exista una uniformidad del sonido. Cuántas veces hemos escuchado afirmaciones, o incluso vivido experiencias personales, relacionadas con la existencia de zonas “muertas” o con una acústica “deficiente” en una sala cuyo comportamiento global es valorado como correcto.

5.2 Objetivos acústicos asociados a salas de conciertos. Parámetros básicos^(*)

5.2.1 Grado de reverberación

5.2.1.1 Tiempo de reverberación (RT)

Como se ha visto en el apartado 1.15.8, el tiempo de reverberación RT se define como el tiempo que transcurre desde que el foco emisor se detiene hasta que el nivel de presión sonora cae 60 dB. En general, el RT depende de la frecuencia.

Según Barron, la valoración subjetiva del RT se denomina “reverberancia” e indica el grado de reverberación percibido en la sala. También se corresponde con la denominación coloquial de “viveza” de la sala.

Según Beranek, considerando volúmenes entre, aproximadamente, 10.000 y 30.000 m³, el valor medio de los RT correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1 kHz de una sala de conciertos totalmente ocupada y destinada a un amplio repertorio de música sinfónica debe estar comprendido entre:

$$1,8 \leq RT_{mid} \leq 2 \text{ s}$$

donde:

$$RT_{mid} = \frac{RT(500 \text{ Hz}) + RT(1 \text{ kHz})}{2}$$

224

En cambio, en el caso de considerar una sala destinada exclusivamente a la interpretación de música correspondiente a los períodos Barroco (1.600-1.750) y Clásico (1.750-1.820), el valor de RT_{mid} es algo inferior, situándose entre 1,6 y 1,8 s.

Para música de cámara, el valor óptimo se halla entre 1,3 y 1,7 s, mientras que para ópera se encuentra entre 1,2 y 1,5 s (La Scala de Milán: 1,2 s; Staatsoper de Viena: 1,3 s).

En la tabla 5.1 se resumen los márgenes mencionados.

TIPO DE MÚSICA	RT _{mid} (s)
Música sinfónica	1,8 – 2,0
Música barroca y clásica	1,6 – 1,8
Música de cámara	1,3 – 1,7
Ópera	1,2 – 1,5

Tabla 5.1 Márgenes de valores recomendados de RT_{mid} para diferentes tipos de música

En la tabla 5.2 se muestran los valores de RT en función de la frecuencia (desde la banda de 125 Hz hasta la banda de 4 kHz) correspondientes a salas de conciertos de reconocido prestigio a nivel internacional.

^(*) Las expresiones matemáticas correspondientes a todos los parámetros definidos en este apartado se detallan en el apéndice 2

SALAS DE CONCIERTOS	RT (s)					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Amsterdam, Concertgebouw	2,2	2,15	2,05	1,95	1,8	1,55
Boston, Symphony Hall	1,95	1,85	1,85	1,85	1,65	1,3
Viena, Musikvereinssaal	2,25	2,18	2,04	1,96	1,8	1,62
Basilea, Stadt-Casino	2,2	2	1,8	1,75	1,6	1,5
Berlin, Konzerthaus (Schauspielhaus)	2,2	2,1	2	2	1,8	1,6
Cardiff, St. David's Hall	1,88	1,97	1,96	1,96	1,8	1,56
Costa Mesa, Segerstrom Hall	2,23	1,89	1,62	1,57	1,44	1,16
Nueva York, Carnegie Hall	2,3	1,8	1,8	1,8	1,6	1,6
Tokio, Hamarikyu Asahi	1,63	1,57	1,65	1,8	1,74	1,58
Zurich, Grösser Tonhallesaal	2,5	2,4	2,15	1,95	1,75	1,62

Tabla 5.2 Valores de los tiempos de reverberación correspondientes a salas de conciertos de reconocido prestigio mundial

5.2.1.2 Calidez acústica (BR) y brillo (Br)

225

El RT está relacionado no sólo con la viveza acústica de una sala, sino también con la calidez y brillo de la misma.

Se dice que una sala tiene calidez acústica (o timbre, según Wilkens) si presenta una buena respuesta a frecuencias bajas. La palabra calidez representa, pues, la riqueza de graves, la suavidad y la melosidad de la música en la sala.

Como medida objetiva de la calidez se suele utilizar el parámetro BR (“Bass Ratio”). Se define como la relación entre la suma de los tiempos de reverberación RT a frecuencias bajas (125 Hz y 250 Hz) y la suma de los RT correspondientes a frecuencias medias (500 Hz y 1 kHz).

Según Beranek, el margen de valores recomendados de BR para una sala de conciertos destinada a música sinfónica y totalmente ocupada es:

$$1,10 \leq BR \leq 1,25 \text{ (si } RT_{mid} = 2,2 \text{ s)}$$

$$1,10 \leq BR \leq 1,45 \text{ (si } RT_{mid} = 1,8 \text{ s)}$$

Para salas con valores de RT_{mid} comprendidos entre 1,8 y 2,2 s, el valor máximo recomendado de BR se halla por interpolación.

A título de ejemplo, en la figura 5.1 se muestra el margen de valores posibles de RT a 125 y 250 Hz que garantizan un valor adecuado de BR, en el supuesto de que el recinto considerado tenga un $RT_{mid} = 2$ s.

Por otra parte, el término brillante se ha elegido como indicativo de que el sonido en la sala es claro y rico en armónicos. Por definición, el brillo Br de una sala es la relación entre la suma de los tiempos de reverberación RT a frecuencias altas (2 kHz y 4 kHz) y la suma de los RT correspondientes a frecuencias medias (500 Hz y 1 kHz).

Beranek recomienda que el valor de Br para salas totalmente ocupadas verifique:

$$Br \geq 0,87$$

No obstante, conviene tener presente que el brillo no será, por lo general, mayor que 1. Ello se debe a la pérdida de energía de las ondas sonoras al propagarse a través del aire causada por la fricción existente entre sus partículas. Dicha inevitable absorción tiene lugar a partir de la frecuencia de 2 kHz, aumenta con la frecuencia y también aumenta a medida que la humedad relativa disminuye (apartado 2.2.2). Excepcionalmente, el sonido de una sala puede llegar a ser excesivamente brillante en el caso de que se utilice de forma incorrecta un sistema electrónico de amplificación del sonido.

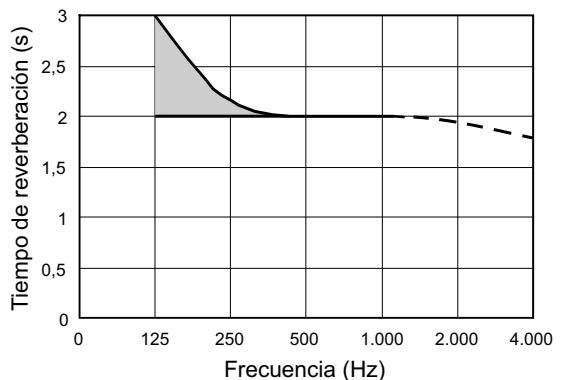


Fig. 5.1 Margen posible de valores de RT que garantizan un BR adecuado ($RT_{mid} = 2$ s)

5.2.1.3 “Early Decay Time” (EDT)

El EDT se define como seis veces el tiempo que transcurre desde que el foco emisor deja de radiar hasta que el nivel de presión sonora cae 10 dB (figura 5.2).

Al igual que en el caso del RT, el EDT varía en función de la frecuencia.

Según se ha visto en el apartado 1.15.6, el decaimiento teórico de la energía sonora en una sala sigue una evolución exponencial, que se traduce en una línea recta al pasar a escala semilogarítmica. Dicho decaimiento se produciría solamente en el caso hipotético de que existiese una perfecta difusión del sonido en el recinto producida por una geometría regular del mismo y por una distribución homogénea y uniforme de los materiales utilizados como revestimientos. En tal caso, el valor de EDT coincidiría con el de RT.

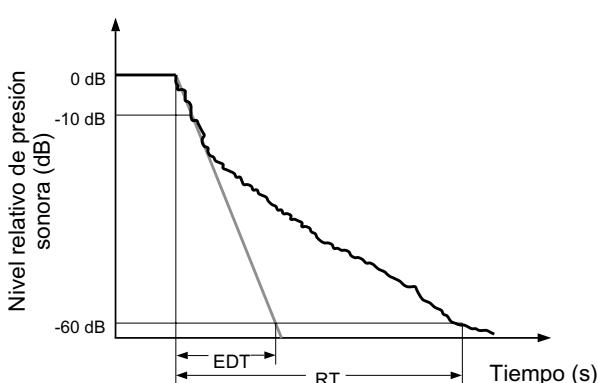


Fig. 5.2 Relación entre EDT y RT

En la práctica, sin embargo, la curva de decaimiento energético puede presentar en distintos puntos de la sala una doble pendiente como consecuen-

cia de una falta de difusión perfecta. Ello implica que el correspondiente valor de EDT puede ser significativamente diferente que el de RT.

En la figura 5.3 se observan dos ecogramas asociados a dos puntos de una sala. El primero corresponde a un punto en el cual se produce una importante concentración de reflexiones (entre los 70 ms y los 180 ms), mientras que el segundo pertenece a otro punto donde la concentración es mucho menor.

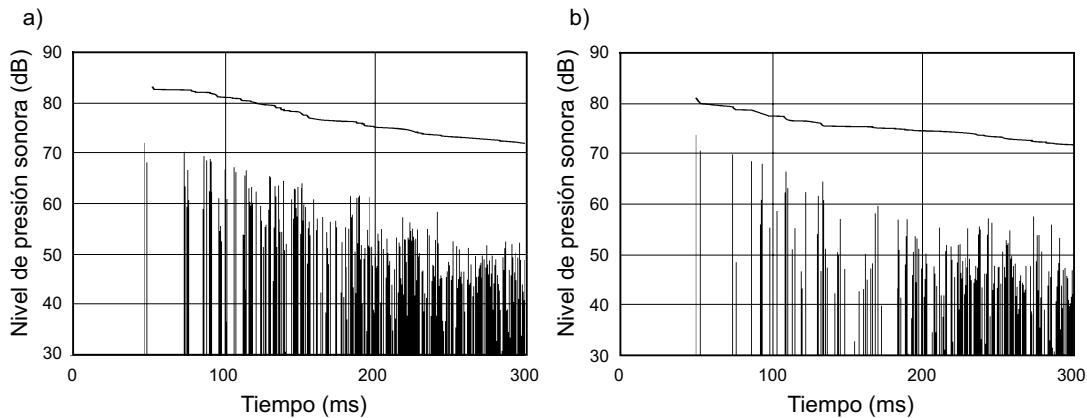


Fig. 5.3 Ecogramas correspondientes a: a) punto con gran concentración de reflexiones entre 70 y 180 ms;
b) punto con menor concentración de reflexiones en dicho intervalo temporal

A partir de dichos ecogramas se puede llegar a comprobar que el valor de EDT correspondiente al punto de mayor concentración de reflexiones es claramente inferior.

Por otra parte, la curva de decaimiento energético sonoro también puede presentar una doble pendiente cuando el punto en consideración pertenece a una zona del recinto de características acústicas sensiblemente diferentes a las del resto. Es el caso de aquellos palcos que presentan pequeñas aberturas hacia la sala y que disponen de elementos con un elevado grado de absorción como, por ejemplo, sillas con un alto porcentaje de superficie tapizada y cortinas de alta densidad. Al observar la curva de decaimiento asociada, se detecta una primera caída más rápida de energía correspondiente al ritmo de disminución propio de dicho espacio (zona claramente apagada), seguida de una disminución más lenta asociada al resto de la sala. La consecuencia evidente es que el valor de EDT en el palco es apreciablemente inferior al valor de RT.

El EDT está más relacionado con la impresión subjetiva de viveza que el RT, utilizado tradicionalmente. Esto significa que, en todos aquellos puntos de una sala con un EDT significativamente menor que el RT, la sala resultará, desde un punto de vista subjetivo, más apagada de lo que se deduciría del valor de RT.

Con objeto de garantizar una buena difusión del sonido en una sala ocupada, es preciso que el valor medio de los EDT correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1 kHz sea del mismo orden que RT_{mid} :

$$EDT_{mid} \approx RT_{mid}$$

5.2.2 Sonoridad (G)

La sonoridad G se corresponde con el grado de amplificación producido por la sala. Depende de la distancia del oyente al escenario, de la energía asociada a las primeras reflexiones, de la superficie ocupada por el público y del nivel de campo reverberante.

Según Lehmann, la sonoridad G (“strength factor”) se define como la diferencia entre el nivel total de presión sonora L_p producido por una fuente omnidireccional en un determinado punto de una sala y el nivel de presión sonora producido por la misma fuente situada en campo libre y medido a una distancia de 10 m (denominado nivel de referencia).

Ambos niveles se miden por bandas de frecuencias de octava (entre 125 Hz y 4 kHz) y aplicando la misma potencia a la fuente sonora. El nivel de referencia en cada banda de frecuencias es de 69 dB SPL.

Beranek recomienda que el valor de G para la sala vacía, obtenido como promedio de los correspondientes a las bandas de octava centradas en 500 Hz y 1 kHz, esté situado entre:

$$4 \leq G_{\text{mid}} \leq 5,5 \text{ dB}$$

5.2.3 “Initial-Time-Delay Gap” (t_I)

El “Initial-Time-Delay Gap” t_I se corresponde con la impresión subjetiva de “intimidad acústica”. Beranek asocia la valoración de intimidad acústica con la sensación que tiene el oyente de escuchar la música en un espacio de dimensiones más reducidas que las dimensiones reales de la sala.

Barron, en cambio, utiliza el término de intimidad acústica para denominar el grado de conexión o identificación entre el oyente y la orquesta, es decir, si el oyente se siente inmerso o, por contra, distante de la música que está escuchando. Para dicho investigador, el grado de intimidad acústica está más relacionado con la sonoridad G de la sala que con el t_I .

El t_I correspondiente a un punto cualquiera de una sala se define como el intervalo de tiempo (en milisegundos) existente entre la llegada del sonido directo procedente del escenario y la primera reflexión significativa que llega al mismo.

Según Beranek, el valor recomendado de este parámetro en el centro de la platea debe verificar:

$$t_I \leq 20 \text{ ms}$$

La obtención de valores superiores a 35 ms representa generalmente una reducción significativa de la calidad acústica de una sala.

La razón principal por la cual Beranek elige el centro de la platea como punto representativo del t_I de la sala es que los valores correspondientes a puntos cercanos a las paredes o a los frontales de los anfiteatros o palcos son siempre cortos y, por tanto, no resultan útiles para juzgar el grado de intimidad acústica de un recinto.

En la figura 5.4 se presenta una curva de decaimiento energético en la cual se destaca la llegada del sonido directo y de la primera reflexión significativa.

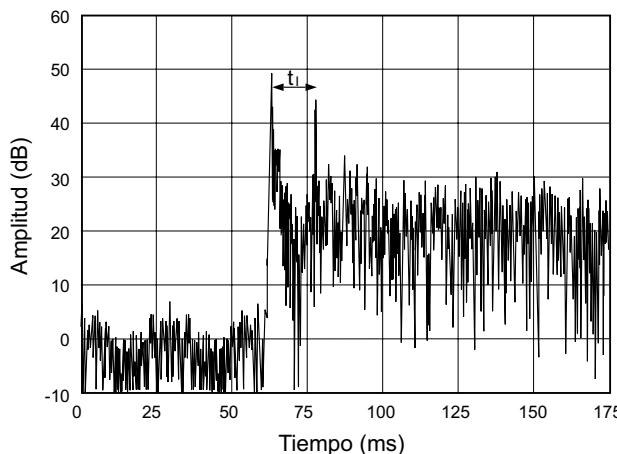


Fig. 5.4 Curva de decaimiento energético destacando la llegada del sonido directo y de la primera reflexión significativa

Se observa que, en este caso, el valor de t_l es de 15 ms.

5.2.4 Relaciones energéticas (ELR): C_t , C_{t0} , C_x

Con el fin de estudiar las características del sonido reflejado en una sala, así como su relación con el sonido directo, se utilizan una serie de parámetros que expresan relaciones energéticas ELR (“Early to Late Ratios”) y que dependen del tiempo. Dichos parámetros son: C_t , C_{t0} y C_x .

Se define C_t como la relación entre la energía que llega a un oyente dentro de los primeros t segundos desde la llegada del sonido directo (incluye el sonido directo), y la energía que le llega con posterioridad. El C_t se expresa en escala logarítmica (dB), y para música se suele utilizar el valor medio de los correspondientes a las bandas de 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz:

$$C_t(t) = \frac{\text{Energía hasta el instante } t}{\text{Energía a partir del instante } t} \text{ (en dB)}$$

El valor de C_t para $t = 80$ ms se corresponde con el parámetro C_{80} , definido en el siguiente apartado.

Análogamente, se define C_{t0} como el valor de C_t , una vez excluida la energía correspondiente al sonido directo:

$$C_{t0}(t) = \frac{\text{Energía hasta el instante } t \text{ (excluyendo el sonido directo)}}{\text{Energía a partir del instante } t} \text{ (en dB)}$$

La evolución de C_{t0} en función del tiempo permite estudiar de forma exclusiva el comportamiento del sonido reflejado, sin la influencia del sonido directo. La diferencia entre las evoluciones temporales de C_t y C_{t0} da una indicación de la importancia relativa del sonido directo en un punto cualquiera de una sala.

Por otra parte, C_x es el equivalente teórico del valor C_{t0} , y corresponde al caso de un campo sonoro totalmente difuso.

Finalmente, la curva obtenida como resultado de la diferencia $C_{t0} - C_x$ indica el grado de difusión del sonido en cada punto del recinto de la siguiente forma:

- Si $C_{t0} - C_x > 0$ dB → existencia de primeras reflexiones significativas
- Si $C_{t0} - C_x \approx 0$ dB → comportamiento del sonido equivalente al caso teórico de decaimiento energético puramente exponencial. Óptima difusión del sonido
- Si $C_{t0} - C_x < 0$ dB → ausencia de primeras reflexiones significativas

A título de ejemplo, en la figura 5.5 se muestran 4 conjuntos de curvas C_t , C_{t0} , C_x y $C_{t0} - C_x$, para instantes de tiempo comprendidos entre 20 y 200 ms, correspondientes a las tres situaciones anteriores y a un punto alejado del escenario.

El código de colores utilizado es el siguiente:

- Negro: corresponde a la curva C_t (ELR incluyendo el sonido directo)
- Rojo: corresponde a la curva C_{t0} (ELR excluyendo el sonido directo)
- Verde: corresponde a la curva C_x (ELR teórico sin considerar el sonido directo)
- Azul: corresponde a la diferencia $C_{t0} - C_x$

Como era de esperar, las curvas C_t y C_{t0} correspondientes a un punto alejado del escenario (figura 5.5d) prácticamente se superponen, ya que la energía de campo directo en el mismo es despreciable.

Cabe señalar que, a diferencia de lo que sucede con otros parámetros, no existen valores recomendados de C_t y C_{t0} . Más bien, todas las curvas anteriores son útiles para comprobar cómo se comporta el sonido, desde el punto de vista energético, en los distintos puntos de una sala.

5.2.5 Claridad musical (C_{80})

La claridad musical C_{80} indica el grado de separación entre los diferentes sonidos individuales integrantes de una composición musical.

Según Cremer, el C_{80} se define como la relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo y la que le llega después de los primeros 80 ms, calculada en cada banda de frecuencias entre 125 Hz y 4 kHz. El C_{80} se expresa en escala logarítmica (dB):

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

La elección del intervalo temporal de 80 ms se debe a que, cuando se trata de música, las reflexiones que llegan al oyente dentro de dicho intervalo son integradas por el oído junto con el sonido directo y, por tanto, contribuyen a aumentar la claridad musical. Constituyen, pues, las denominadas primeras reflexiones.

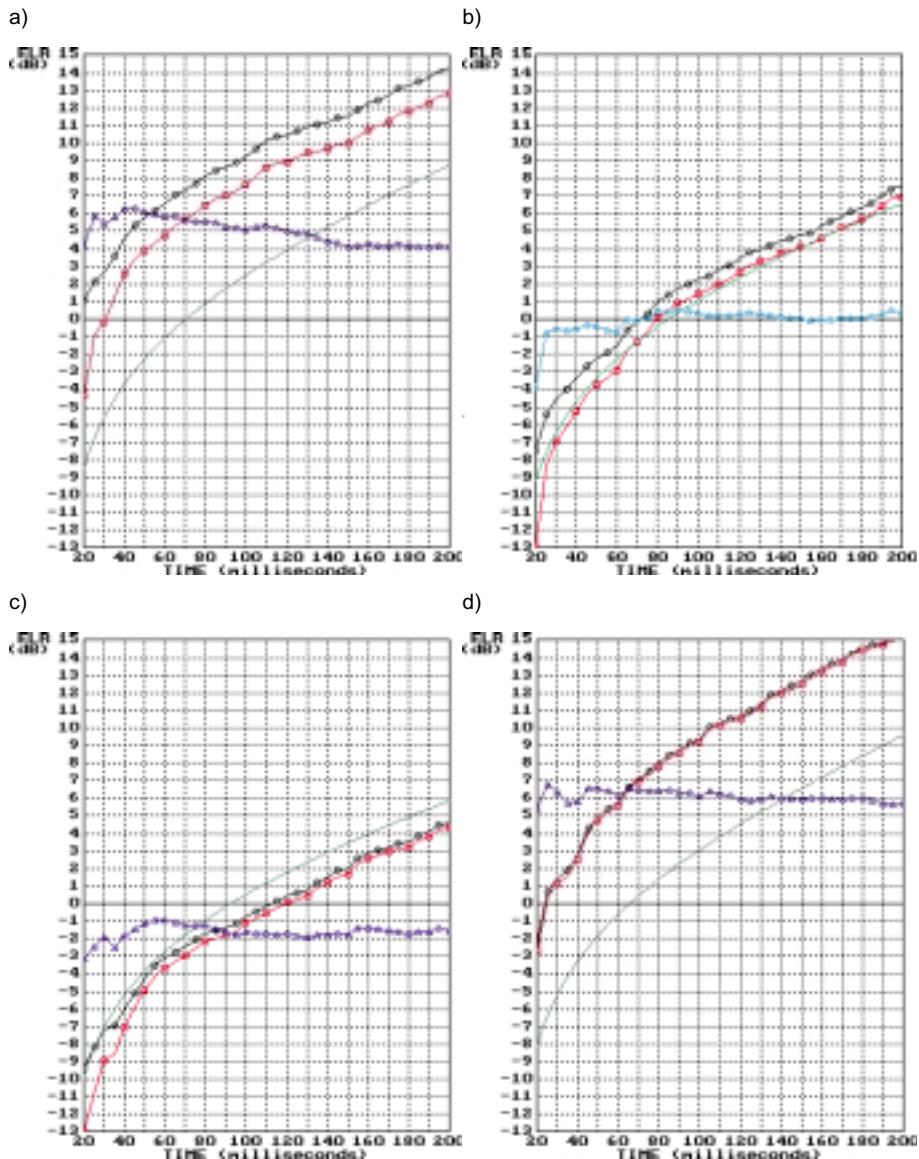


Fig. 5.5 Relaciones energéticas ELR correspondientes a: a) punto en el cual existen primeras reflexiones destacadas; b) punto con óptima difusión del sonido; c) punto en el cual se detecta una falta de primeras reflexiones; d) punto alejado del escenario

Beranek recomienda para la sala vacía que el valor medio de los C_{80} correspondientes a las bandas de 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz (denominado “music average”) se sitúe preferentemente entre:

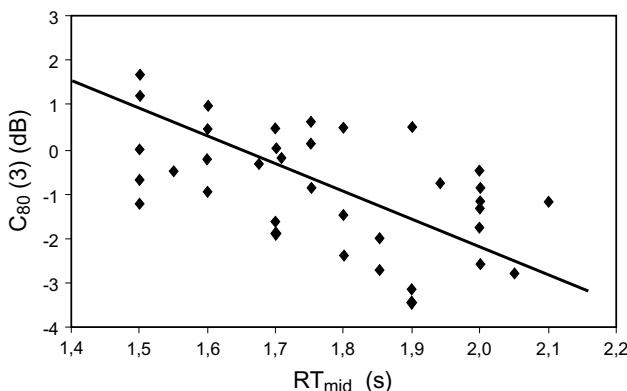
$$-4 \leq C_{80}(3) \leq 0 \text{ dB}$$

En todos los casos deben evitarse valores de $C_{80}(3)$ superiores a +1 dB.

Por su parte, L.G. Marshall propone el siguiente margen de variación para salas ocupadas:

$$-2 \leq C_{80}(3) \leq +2 \text{ dB}$$

La claridad musical no sólo depende de la relación energética que da origen a su definición, sino que también es función de una serie de factores puramente musicales, así como de la habilidad y virtuosismo de los intérpretes.



232

Fig. 5.6 Valores de $C_{80}(3)$ (sala vacía) y de RT_{mid} (sala ocupada) medidos en 36 salas de conciertos (según Beranek)

Finalmente, cabe destacar el hecho de que el $C_{80}(3)$ no es un parámetro estadísticamente independiente, sino que está altamente relacionado con el tiempo de reverberación RT . Tal dependencia se pone de manifiesto en la gráfica de la figura 5.6, donde se representan los valores de $C_{80}(3)$ (sala vacía) y RT_{mid} (sala ocupada) medidos por Beranek en 36 salas de conciertos.

Según se observa, el valor de $C_{80}(3)$ disminuye a medida que el valor de RT_{mid} aumenta (sala más viva).

5.2.6 Curva de energía reflejada acumulada (RECC)

Según Toyota, la curva RECC (“Reflective Energy Cumulative Curve”) da una indicación de cómo se acumula la energía reflejada a lo largo del tiempo en un determinado punto de una sala, y permite detectar cualquier anomalía que en él se pueda producir.

Se define como la energía que llega a un oyente dentro de los primeros t segundos desde la llegada del sonido directo, excluyendo la energía asociada al mismo. La curva RECC se representa en escala logarítmica (dB):

$$\text{RECC}(t) = \text{Energía hasta el instante } t \text{ (excluyendo el sonido directo)} \text{ (en dB)}$$

La banda de frecuencias considerada va desde 250 Hz hasta 2.000 Hz. Para valores de t inferiores a aproximadamente 100 ms, el valor de RECC se corresponde con la energía asociada a las primeras reflexiones.

A título de ejemplo, en la figura 5.7 se muestran las curvas RECC correspondientes a un punto situado en el centro de una sala, para dos ubicaciones diferentes A y B de la fuente sonora sobre el escenario. Dichas ubicaciones corresponden a dos puntos situados sobre el eje longitudinal del escenario, a una distancia de 2 m y 4 m, respectivamente, de la parte más próxima al público. El intervalo temporal considerado va desde 10 hasta 100 ms.

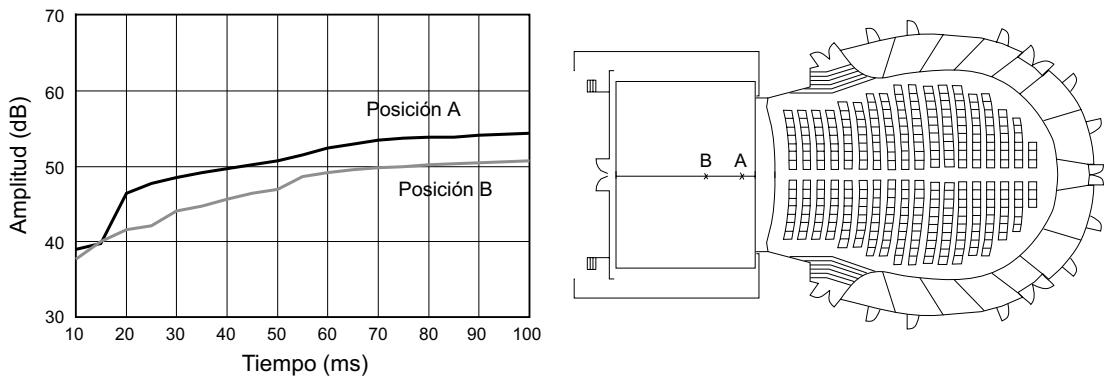


Fig. 5.7 Curvas RECC en un punto central de una sala correspondientes a las posiciones A y B de la fuente sonora sobre el escenario

Según se observa, al pasar la fuente sonora de la posición A a la B se produce una disminución de energía reflejada como consecuencia del adentramiento de la fuente sonora en el escenario.

Al igual que sucede con los parámetros energéticos ELR (apartado 5.2.4), no existen valores recomendados de RECC.

5.2.7 Textura

233

La textura es la impresión subjetiva del sonido percibido por un oyente en un punto cualquiera de una sala producida por la forma en que las primeras reflexiones llegan a sus oídos. Una buena textura exige una gran cantidad de primeras reflexiones dentro de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo, una distribución uniforme de las mismas y la ausencia total de reflexiones discretas de nivel elevado. Para que, efectivamente, exista un gran número de primeras reflexiones es preciso que el “Initial-Time-Delay Gap” t_i (apartado 5.2.3) sea suficientemente corto.

Hasta el momento, no existe ningún sistema de medida de la textura. Por lo tanto, el grado de textura en un punto de una sala sólo se puede establecer a partir de una inspección visual de la correspondiente curva de decaimiento energético.

5.2.8 Espacialidad del sonido: amplitud aparente de la fuente sonora (ASW)

En la audición musical, la amplitud aparente de la fuente sonora ASW (“Apparent Source Width”) se asocia con la sensación de que el sonido que llega del escenario proviene de una fuente de mayor amplitud que la correspondiente a la orquesta real.

La ASW constituye uno de los dos componentes básicos de la denominada espacialidad o impresión espacial del sonido.

Cuanto mayor sea la ASW, mayor será la impresión espacial del sonido y mejor resultará la valoración subjetiva de la calidad acústica de la sala.

Según A. H. Marshall y Barron, la ASW aumenta con el número de primeras reflexiones que inciden lateralmente sobre el oyente. Ello es debido a que el oído las suma con el sonido directo, con lo cual la localización de la fuente tiende a ser ambigua.

Por otra parte, la existencia de primeras reflexiones laterales importantes hace que aumente el grado de disimilitud entre los sonidos que llegan a los dos oídos, tanto por la diferencia entre los caminos recorridos como por el obstáculo que representa la presencia de la cabeza (figura 5.8). Cuanto mayor sea la diferencia entre ambos sonidos, mayor será la ASW.

Existen dos parámetros que permiten cuantificar el grado de ASW. Se trata de la denominada eficiencia lateral (LF), relacionada con la energía de primeras reflexiones laterales, y de la llamada correlación cruzada interaural ($IACC_E$), asociada al grado de disimilitud entre las primeras reflexiones que llegan a ambos oídos. A continuación se definen dichos parámetros.

5.2.8.1 Eficiencia lateral (LF)

234

Según A. H. Marshall, la eficiencia lateral LF (“Lateral energy Fraction”) se define como la relación entre la energía que llega lateralmente al oyente dentro de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo (se excluye el sonido directo) y la energía recibida en todas las direcciones en dicho intervalo de tiempo:

$$LF = \frac{\text{Energía lateral hasta } 80 \text{ ms (excluyendo el sonido directo)}}{\text{Energía total hasta } 80 \text{ ms}}$$

Habitualmente se utiliza el valor medio de los LF correspondientes a las bandas de frecuencias de octava comprendidas entre 125 Hz y 1 kHz. Se representa por LF_{E4} :

$$LF_{E4} = \frac{LF(125 \text{ Hz}) + LF(250 \text{ Hz}) + LF(500 \text{ Hz}) + LF(1 \text{ kHz})}{4}$$

El valor de LF_{E4} para la sala vacía debe cumplir:

$$LF_{E4} \geq 0,19$$

Cuanto más elevado sea el valor de LF_{E4} , mayor será la ASW y, por consiguiente, el grado de espacialidad del sonido.

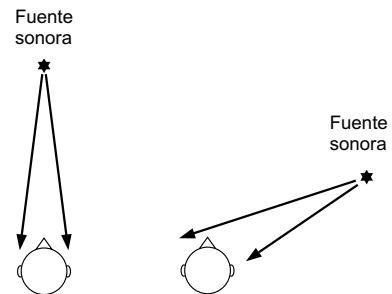


Fig. 5.8 Grado de disimilitud entre los sonidos que llegan a ambos oídos en función del ángulo de llegada: a) incidencia frontal (sonidos muy parecidos); b) incidencia lateral (sonidos diferentes)

5.2.8.2 Correlación cruzada interaural (IACC_E)

En general, la correlación cruzada interaural IACC (“InterAural Cross-Correlation”) se define como la correlación entre los sonidos que llegan a ambos oídos, y es indicativa del grado de similitud existente entre las dos señales. Si son iguales, el IACC valdrá 1, mientras que si son señales aleatorias independientes, el IACC será 0:

$$0 \leq \text{IACC} \leq 1$$

Cuando se trata de una sala existente, la medida asociada al cálculo del parámetro IACC es binaural (doble) y se lleva a cabo a partir del registro de las señales captadas por dos micrófonos colocados en las orejas de una cabeza artificial (“dummy head”), según se observa en la figura 5.9.



Fig. 5.9 Cabeza artificial utilizada para mediciones binaurales y detalle de una oreja con un micrófono colocado en su interior (Georg Neumann GmbH, representada por Telco Electronics, S.A.)

Hidaka define dos IACC: el IACC_E (donde el subíndice E es la inicial de la palabra “Early”), correspondiente a los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo, y el IACC_L (donde L es la inicial de la palabra “Late”), que se calcula a partir de los 80 ms hasta 1 s.

Por otro lado, Okano ha comprobado mediante una serie de experimentos de laboratorio que las bandas de frecuencias más representativas son las centradas en 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz. De aquí surgen las definiciones de IACC_{E3} e IACC_{L3}, como los promedios de los valores de IACC_E e IACC_L, respectivamente, en dichas tres bandas.

Desde el punto de vista de la amplitud aparente de la fuente ASW, el IACC_{E3} es el que resulta de interés.

El IACC_{E3} permite cuantificar el grado de disimilitud entre las informaciones sonoras que llegan a ambos oídos, dentro de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo. Cuanto más diferentes sean, menor será el valor de IACC_{E3}. Habitualmente se suele utilizar el valor (1-IACC_{E3}), puesto que un aumento del mismo significa una mayor disimilitud entre ambas señales y una mayor amplitud aparente de la fuente sonora.

Debido a que la importancia de este parámetro ha sido reconocida hace poco tiempo, existen relativamente pocas salas en las que se haya procedido a su medida. De todas formas, se ha podido comprobar que su fiabilidad es estadísticamente elevada, es decir, el valor de $(1-\text{IACC}_{E3})$ medido en cada una de ellas permite separarlas en tres categorías. Dichas categorías coinciden con las establecidas a partir de valoraciones subjetivas sobre su calidad acústica.

En la tabla 5.3 se indican los valores medios de $(1-\text{IACC}_{E3})$ y su correspondencia con dichas categorías, según Beranek.

$(1-\text{IACC}_{E3})$	CATEGORÍA ACÚSTICA DE LAS SALAS
0,66	Excelente
0,55	Muy Buena
0,41	Aceptable/Buena

Tabla 5.3 Correspondencia entre los valores medios del parámetro $(1-\text{IACC}_{E3})$ y la categoría de las salas desde un punto de vista acústico (según Beranek)

En consecuencia, si bien no existe un valor óptimo para $(1-\text{IACC}_{E3})$, Beranek propone para la sala vacía el siguiente valor aproximado:

$$(1-\text{IACC}_{E3}) \approx 0,70$$

El parámetro $(1-\text{IACC}_{E3})$ se corresponde, incluso de forma más precisa que el LF_{E4} , con la amplitud aparente de la fuente sonora ASW. A medida que el valor de $(1-\text{IACC}_{E3})$ aumenta, también lo hace la ASW, o sea, el grado de impresión espacial de la sala.

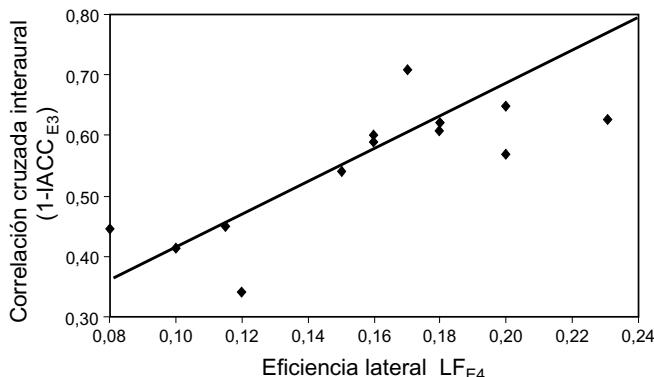


Fig. 5.10 Gráfica de conversión de valores LF_{E4} a $(1-\text{IACC}_{E3})$.

En la figura 5.10 se representa una gráfica que relaciona los valores medidos por Beranek de $(1-\text{IACC}_{E3})$ y de LF_{E4} en diferentes salas de conciertos. La recta trazada y su correlación con los puntos representados parece suficiente para poder convertir, de forma razonable, valores medidos de LF_{E4} a valores de $(1-\text{IACC}_{E3})$.

5.2.9 Espacialidad del sonido: sensación de sonido envolvente (LEV)

La sensación de sonido envolvente, o sensación de sentirse envuelto por el campo sonoro, constituye la segunda componente básica de la espacialidad del sonido. Cuando un sonido es marcadamente envolvente se dice que el grado de LEV (“Listener Envelopment”) es alto.

La condición acústica que favorece esta sensación es que el sonido reverberante llegue a los oídos del oyente por un igual en todas las direcciones, es decir, que el grado de difusión sea elevado. Para ello es necesario que existan destacadas irregularidades y/o relieves en las superficies límite de la sala, o bien cualquier tipo de ornamentación.

Al igual que sucede con la ASW, cuanto mayor sea el grado de LEV, mejor será la valoración subjetiva de la calidad acústica de la sala.

Hasta la fecha, no existe ningún parámetro medible que esté directamente relacionado con el grado de difusión del sonido, es decir, con el grado de LEV.

Actualmente, Bradley y Soulodre están trabajando en el desarrollo de un nuevo parámetro que, según ellos, permitirá cuantificar el grado de LEV en cada punto de una sala. Dicho nuevo parámetro está relacionado con la energía correspondiente a las reflexiones laterales tardías (aquellas que llegan al oyente con un retardo superior a los 80 ms desde la llegada del sonido directo). A diferencia de las primeras reflexiones, las reflexiones tardías no se suman al sonido directo, sino que el sistema auditivo las separa del mismo, tanto temporal como espacialmente. Es por ello que parecen llegar al oyente desde todas las direcciones, por lo cual éste tiene la sensación de estar envuelto por el sonido.

Por otra parte, parece ser que las reflexiones laterales tardías de alto nivel tienden a enmascarar los efectos de las primeras reflexiones laterales. Ello sugiere que el grado de LEV creado por las reflexiones laterales tardías constituye la componente más importante de la impresión espacial del sonido en una sala, incluso en mayor proporción que la amplitud aparente de la fuente sonora ASW.

Es, pues, probable que el éxito en el diseño de una sala de conciertos pase por garantizar la existencia de fuertes reflexiones laterales tardías en todos sus puntos, además del cumplimiento del resto de requerimientos expuestos en este capítulo.

A falta de la definición de este nuevo parámetro, existen los siguientes parámetros relacionados con el mencionado grado de difusión: la correlación cruzada interaural ($IACC_L$), asociada al grado de disimilitud entre las reflexiones tardías que llegan a los dos oídos, y el índice de difusión (SDI), determinado a partir de una inspección ocular de la sala.

A continuación se definen ambos parámetros.

5.2.9.1 Correlación cruzada interaural ($IACC_L$)

En el apartado 5.2.8.2 se han definido el $IACC_L$ y el $IACC_{L3}$.

El $IACC_{L3}$ permite cuantificar el grado de disimilitud entre las informaciones sonoras que llegan a ambos oídos a partir de los 80 ms desde la llegada del sonido directo. Cuanto más diferentes sean, menor será el valor de $IACC_{L3}$. Habitualmente se suele utilizar el valor ($1-IACC_{L3}$).

En principio, el parámetro ($1-IACC_{L3}$) se corresponde con el grado de difusión del sonido y, por tanto, con el grado de LEV.

Sin embargo, a diferencia de lo que sucede con el parámetro $IACC_{E3}$, su fiabilidad es estadísticamente baja, puesto que los valores medios de ($1-IACC_{L3}$) medidos en un conjunto de salas pertenecientes a tres categorías diferentes son muy parecidos entre sí, según se observa en la tabla 5.4.

(1-IACC _{L3})	CATEGORÍA ACÚSTICA DE LAS SALAS
0,88	Excelente
0,87	Muy Buena/Excelente
0,85	Buena

Tabla 5.4 Correspondencia entre los valores medios del parámetro (1-IACC_{L3}) y la categoría de las salas desde un punto de vista acústico (según Beranek)

Por lo tanto, estas pequeñas variaciones lo invalidan como parámetro representativo de la difusión del sonido en una sala. En cambio, si su valor es bajo es posible afirmar que, en general, la sala objeto de estudio presenta una pobre difusión del sonido.

5.2.9.2 Índice de difusión (SDI)

Haan y Fricke han propuesto el denominado índice de difusión SDI (“Surface Diffusivity Index”).

El SDI se determina a través de una inspección visual de la sala con objeto de averiguar el grado de irregularidades de las paredes laterales y del techo.

Dichos investigadores llaman “grado de difusión” a la cantidad de irregularidades de dichas superficies, y asignan diferentes pesos a las mismas. A las superficies con grandes irregularidades les asignan un grado de difusión 1, a las intermedias 0,5, y a las superficies lisas 0 (apartado 5.5.9). Posteriormente, ponderan dichos valores por la superficie asociada en cada caso, los suman, y finalmente dividen el resultado por la superficie total de las paredes laterales y del techo. El valor final obtenido es el SDI, y su margen de variación oscila entre 0 (difusión nula) y 1 (difusión total):

$$0 \leq \text{SDI} \leq 1$$

Cuanto mayor sea el valor de SDI, mayor será el grado de LEV, es decir, la impresión espacial en la sala.

Se ha podido constatar que existe una muy buena correlación entre los valores de SDI determinados de esta forma en distintas salas y la impresión subjetiva de la calidad acústica de las mismas obtenida como fruto de una serie de pruebas de audiencia.

Esta comparación lleva a la interesante conclusión de que el grado de difusión de las paredes laterales y del techo parece ser el principal motivo de las diferencias existentes entre las salas catalogadas como excelentes y las consideradas simplemente como buenas o mediocres.

5.2.10 Objetivos acústicos relacionados con el escenario y la orquesta

Los objetivos acústicos descritos y los parámetros básicos definidos hasta el momento se han centrado exclusivamente en la sala. En este apartado se tratan los correspondientes al escenario y a la orquesta.

5.2.10.1 Soporte objetivo (ST1)

Como parámetro representativo de las condiciones de escucha que experimentan los músicos en el escenario, con o sin concha acústica, se utiliza el denominado soporte objetivo ST1, definido por Gade.

Este parámetro representa la capacidad de los músicos de escucharse a sí mismos y al resto de la orquesta.

El ST1 se define como la relación entre la energía asociada a las primeras reflexiones (entre 20 y 100 ms) proporcionadas por las paredes y el techo del escenario, y la energía recibida en los primeros 20 ms, ambos valores obtenidos a 1 m de distancia de una fuente omnidireccional situada en el escenario. Se expresa en escala logarítmica (dB):

$$ST1 = \frac{\text{Energía entre } 20 \text{ y } 100 \text{ ms}}{\text{Energía hasta } 20 \text{ ms}} \quad (\text{en dB})$$

Habitualmente se utiliza el soporte objetivo medio $ST1_{mid}$. Se define como sigue:

$$ST1_{mid} = \frac{ST1(250 \text{ Hz}) + ST1(500 \text{ Hz}) + ST1(1 \text{ kHz}) + ST1(2 \text{ kHz})}{4}$$

Según Beranek, los valores más favorables de este parámetro son aquellos que se hallan entre:

$$-14 \leq ST1_{mid} \leq -12,5 \text{ dB}$$

La medida de ST1 debe hacerse en condiciones de sala vacía, sin músicos sobre el escenario, pero con todos los elementos que le son propios en su lugar (sillas, atriles, instrumentos de percusión, etc.).

5.2.10.2 Términos relacionados con la orquesta y sus diversas secciones

Beranek define los siguientes términos:

- Balance (“balance”): calidad de la acústica del escenario que hace que exista un equilibrio entre todas las secciones de la orquesta. Ningún grupo instrumental domina sobre el resto. Un balance correcto favorece la interpretación conjunta de solistas, sean vocales o instrumentales, y orquesta.
- Fusión (“blend”): mezcla de los sonidos de los diferentes instrumentos de la orquesta de forma que el oyente los percibe como perfectamente acoplados, sonando como un único cuerpo y no como varias secciones independientes.
- Conjunción (“ensemble”): habilidad de los músicos de tocar al unísono por el hecho de poder escucharse satisfactoriamente.

- Inmediatez de respuesta (“attack”): los músicos deben tener la sensación de que la sala responde de forma inmediata a una nota. La inmediatez de respuesta está relacionada con el retardo con que llegan las primeras reflexiones procedentes de la sala a los oídos de los músicos. Si el retardo es excesivo, las reflexiones serán percibidas como ecos, mientras que si provienen exclusivamente de las paredes más próximas, los músicos no tendrán ninguna percepción de la acústica de la sala.

5.3 Posibles anomalías asociadas a salas de conciertos

5.3.1 Efectos anómalos sobre la calidad tonal

Se dice que la calidad tonal es correcta cuando no existe realce o atenuación manifiesta de ninguna de las frecuencias generadas por la fuente sonora. Una sala de conciertos, al igual que un instrumento musical, debe presentar una calidad tonal óptima. La calidad tonal puede ser alterada de diferentes formas, como por ejemplo, por una vibración de una superficie metálica, o por la presencia delante de un órgano de barras metálicas que entran en resonancia con ciertas notas musicales. La incorporación de pequeñas irregularidades sobre la superficie metálica, o bien, la aplicación de materiales amortiguantes de vibraciones sobre cada barra, pueden mitigar dicha anomalía.

Por otro lado, si las paredes laterales de una sala o las superficies de los paneles reflectantes suspendidos del techo son planas y completamente lisas con objeto de producir primeras reflexiones sobre la zona de público, el sonido reflejado por ellas (y en especial el correspondiente a los violines) puede adquirir una cierta dureza (“glare”). Dicho tipo de coloración tonal es especialmente molesto en el caso de ser producido por grandes superficies reflectantes suspendidas del techo y dispuestas horizontalmente.

5.3.2 Desplazamiento de la fuente sonora (falsa localización)

Otro efecto anómalo percibido en ciertas localidades, incluso de algunas de las mejores salas del mundo, es el denominado desplazamiento de la fuente sonora. Una superficie reflectante específica puede concentrar una excesiva cantidad de energía hacia una determinada zona de la audiencia. Los espectadores allí situados podrán llegar a percibir el sonido como procedente exclusivamente de dicha superficie. La fuente sonora se habrá virtualmente “desplazado” y, por tanto, tendrá lugar una falsa localización de la misma (apartado 1.15.3).

5.3.3 Ecos y focalizaciones del sonido

Uno de los objetivos fundamentales en el diseño de una sala de conciertos es evitar la aparición de ecos, focalizaciones del sonido (apartado 2.3.1.2) y eco flotante (apartado 1.15.4).

En una sala de conciertos, el eco es toda aquella reflexión de nivel significativo que alcanza al oyente en un instante de tiempo superior a los 80 ms desde la llegada del sonido

directo. El eco resulta totalmente pernicioso tanto para los músicos como para los espectadores.

Al igual que sucede en los teatros (apartado 4.5.2), los ecos suelen ser debidos a la existencia de una pared posterior reflectante, o bien a la presencia de un reflector de esquina. La diferencia respecto a dichos recintos estriba en que, para que efectivamente aparezca un eco, la distancia entre el escenario y la superficie conflictiva debe ser superior a 13,8 m, ya que en tal caso la reflexión generada llegará con un retardo superior a los 80 ms.

Por lo que al criterio de ecos se refiere (ver definición en el apéndice 2), el valor de EC asociado a un punto cualquiera de una sala de conciertos, obtenido como promedio de los valores correspondientes a las bandas de 1 kHz y 2 kHz, debe cumplir:

$$EC < 1,80$$

El hecho de que se cumpla dicho criterio en cada punto considerado asegura que el porcentaje de espectadores que percibirían un eco en el mismo sería, como máximo, de un 50%. Cuanto más bajo sea el valor de EC, menor será el citado porcentaje.

5.3.4 Galería de los susurros

Galería de los susurros (“Whispering Gallery”) es la denominación inglesa dada a una superficie reflectante en forma circular o abovedada (figura 5.11).

Los rayos sonoros emitidos por una fuente situada en el punto A, y comprendidos dentro del ángulo α , quedan confinados dentro del anillo limitado por los radios R y $R\cos\alpha$, es decir, se produce una concentración del sonido en todos los puntos situados dentro del mismo.

Este fenómeno puede dar origen a una anomalía importante en el caso de que el escenario de una sala de conciertos tenga una forma semicircular ya que, por ejemplo, el sonido producido por un instrumento situado en el punto A será percibido de forma destacada en el punto B, y viceversa. Ello dará lugar a una falta de conjunción entre los músicos.

Por lo tanto, esta forma de escenario es totalmente desaconsejable, a no ser que exista alguna discontinuidad en la zona anular que evite la propagación de los rayos sonoros a lo largo de la misma.

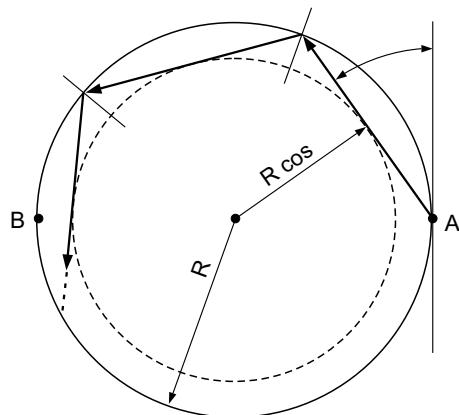


Fig. 5.11 Propagación de los rayos sonoros en una superficie en forma circular

5.3.5 Curvas NC

Según se ha visto en el apartado 1.12, la evaluación objetiva del grado de molestia que un determinado ruido de fondo provoca sobre un espectador se hace por comparación de los niveles de ruido existentes en la sala, para cada banda de octava comprendida entre los 63 Hz y los 8 kHz, con un conjunto de curvas de referencia denominadas NC (“Noise Criteria”).

El ruido de fondo puede ser debido tanto a ruidos interiores del recinto (por ejemplo, el causado por el sistema de climatización) como a ruidos exteriores (por ejemplo, el ruido de tráfico).

Las curvas NC son, además, utilizadas para establecer los niveles máximos recomendados para diferentes tipos de espacios en función de su uso.

Se dice que un recinto cumple una determinada especificación NC cuando los niveles de ruido de fondo en el mismo, medidos por bandas de octava, están por debajo de la curva NC correspondiente, para todas las frecuencias comprendidas entre 63 Hz y 8 kHz.

La curva NC recomendada para salas de conciertos es la NC-15, si bien se suele admitir hasta la NC-25.

El cumplimiento de la especificación NC-15 garantiza unos niveles de ruido de fondo suficientemente bajos como para no perjudicar la audición de un “pianissimo” (ppp en nomenclatura musical), pasaje de la composición musical con el nivel más débil. Por lo tanto, dicho cumplimiento permite aumentar el margen dinámico de la orquesta en la sala, entendiéndose por tal la diferencia entre el nivel de presión sonora correspondiente al pasaje más fuerte y el asociado al pasaje más débil interpretado por la misma.

5.4 Resumen de los valores recomendados de los parámetros acústicos asociados a salas de conciertos

Como resumen de todo lo expuesto en el apartado 5.2, en la tabla 5.5 se muestran los valores recomendados de los parámetros acústicos definidos, así como la valoración subjetiva asociada.

PARÁMETRO ACÚSTICO	VALOR RECOMENDADO	VALORACIÓN SUBJETIVA
Tiempo de reverberación medio RT_{mid} (500 Hz – 1 kHz), sala ocupada	$1,8 \leq RT_{mid} \leq 2$ s	Grado de viveza de la sala
Calidez acústica BR, sala ocupada	$1,10 \leq BR \leq 1,25$ (si $RT_{mid} = 2,2$ s) ^(*) $1,10 \leq BR \leq 1,45$ (si $RT_{mid} = 1,8$ s) ^(*)	Riqueza en sonidos graves, melosidad y suavidad de la música
Brillo Br, sala ocupada	$Br \geq 0,87$	Riqueza en sonidos agudos
“Early Decay Time” medio EDT_{mid} (500 Hz – 1 kHz), sala ocupada	$EDT_{mid} \approx RT_{mid}$	Grado de viveza de la sala
Sonoridad media G_{mid} (500 Hz – 1 kHz), sala vacía	$4 \leq G_{mid} \leq 5,5$ dB	Grado de amplificación producido por la sala

PARÁMETRO ACÚSTICO	VALOR RECOMENDADO	VALORACIÓN SUBJETIVA
“Initial-Time-Delay Gap” t_i (centro platea)	$t_i \leq 20$ ms	Intimidad acústica (sensación subjetiva de volumen de la sala; grado de identificación con la orquesta)
Claridad musical media (“music average”) $C_{80}(3)$ (500 Hz – 2 kHz)	$-4 \leq C_{80}(3) \leq 0$ dB, sala vacía $-2 \leq C_{80}(3) \leq +2$ dB, sala ocupada	Grado de separación entre los diferentes sonidos individuales integrantes de una composición musical
Eficiencia lateral media LF_{E4} (125 Hz – 1 kHz), sala vacía	$LF_{E4} \geq 0,19$	Impresión espacial del sonido (amplitud aparente de la fuente sonora)
Correlación cruzada interaural (1-IACC _{E3}) (500 Hz – 2 kHz), sala vacía	$(1-IACC_{E3}) \approx 0,70$	Impresión espacial del sonido (amplitud aparente de la fuente sonora)
Índice de difusión SDI	$SDI \rightarrow 1$	Impresión espacial del sonido (sensación de envolvente)
Soporte objetivo medio ST1 _{mid} , (250 Hz – 2 kHz), sala vacía y escenario sin músicos, pero con los elementos que le son propios	$-14 \leq ST1_{mid} \leq -12,5$ dB	Capacidad de los músicos de escucharse a sí mismos y al resto de componentes de la orquesta

Tabla 5.5 Valores recomendados de los parámetros acústicos asociados a salas de conciertos y correspondiente valoración subjetiva

(*) Para valores de RT_{mid} entre 1,8 y 2,2 s, el valor máximo recomendado de BR se halla por interpolación

5.5 Criterios generales de diseño

Una vez establecidos los objetivos acústicos relacionados con las salas de conciertos, en este apartado se dan unos criterios generales de diseño de este tipo de salas.

La nomenclatura básica empleada es la siguiente:

- V = Volumen de la sala (en m³)
- N = Número de asientos
- S_s = Superficie real ocupada por las sillas (en m²)
- S_A = Superficie acústica efectiva ocupada por las sillas (en m²), definida en el apartado 2.2.6
- S_o = Superficie del escenario ocupada por la orquesta (en m²)
- S_c = Superficie del escenario ocupada por el coro (en m²)
- S_{tot} (= S_A + S_o + S_c) = Superficie acústica efectiva total (en m²)
- S_s/N: m²/asiento
- V/N: m³/asiento
- V/S_{tot}: m
- N/S_{tot}: m⁻²

5.5.1 Criterios para la elección del volumen y del número de asientos

5.5.1.1 Salas de conciertos existentes. Volumen y número de asientos

Existe la creencia generalizada de que las salas de conciertos con una capacidad inferior a las 2.000 localidades tienen una mejor acústica que las salas grandes con un aforo superior a los 2.500 asientos.

Dicha creencia viene avalada por el hecho de que ocho de las salas mejor valoradas del mundo, desde un punto de vista acústico, tienen una capacidad media de 1.950 localidades y un volumen medio de 17.400 m³, mientras que las cifras correspondientes a ocho de las peor valoradas son de 2.800 espectadores y 21.800 m³, respectivamente.

Por otra parte, existen razones que apoyan la idea de que las salas más pequeñas deberían tener, en principio, mayor calidad acústica que las grandes. Dichas razones se basan en los siguientes hechos: mayor intimidad acústica, distancia más corta entre el espectador más alejado y el escenario, mayor energía asociada a las reflexiones laterales y mayor grado de impresión espacial.

Sin embargo, de lo anterior no se debe extraer la conclusión errónea de que todas las salas grandes son valoradas como acústicamente deficientes. De hecho, existen salas con volúmenes muy grandes que gozan de gran prestigio internacional.

La realidad es que, con los conocimientos actuales sobre acústica, es posible diseñar salas de grandes dimensiones sin menoscabo de su calidad a base de neutralizar sus potenciales efectos negativos mediante ingeniosas construcciones.

En la práctica, la mayor parte de salas de conciertos de música sinfónica del mundo tienen un volumen situado entre los 10.000 y los 30.000 m³, con una media del orden de los 20.000 m³.

En cuanto a su capacidad, oscila entre las 1.000 y las 3.700 localidades, con una media de aproximadamente 2.300 asientos.

Distinguiendo entre salas pertenecientes a Europa occidental y al resto del mundo, se ve claramente que las primeras son más pequeñas y, en consecuencia, su capacidad más reducida. En concreto, las salas europeas más relevantes acomodan audiencias que oscilan entre las 1.000 y las 2.500 personas (media de 1.800), mientras que su volumen medio es de 16.500 m³. En cambio, las salas más prestigiosas del resto del mundo disponen de una capacidad situada entre 1.700 y 3.700 espectadores (media de 2.600), con un volumen medio cercano a los 26.000 m³.

5.5.1.2 Fórmula simplificada para el cálculo del tiempo de reverberación a partir del volumen de la sala y de la superficie acústica efectiva total

Según se ha visto en el apartado 2.2.2, la fórmula de Sabine completa para el cálculo del tiempo de reverberación RT de un sala es:

$$RT = \frac{0,161 V}{A_{tot} + 4mV} \text{ (en s)}$$

donde:

A_{tot} = absorción total de la sala (en sabins)

4mV = absorción producida por el aire (en sabins)

La absorción total A_{tot} se puede descomponer de la siguiente forma:

$$A_{tot} = S_{tot} \alpha_S + S_R \alpha_R + \sum_i S_{mi} \alpha_{mi}$$

donde:

S_{tot} = superficie acústica efectiva total (en m^2)

α_S = coeficiente de absorción de las sillas

S_R = superficie restante no absorbente (en m^2)

α_R = coeficiente medio de absorción residual

S_{mi} = superficie correspondiente a un posible material absorbente adicional "i" (en m^2)

α_{mi} = coeficiente de absorción del posible material absorbente adicional "i"

La anterior descomposición pone claramente de manifiesto que los coeficientes utilizados son coeficientes de absorción unitaria, es decir por m^2 , y no absorción por persona, como se utilizaban antiguamente.

Ello es debido a que Kosten y Beranek comprobaron que, en salas de conciertos grandes, la absorción de las sillas vacías u ocupadas por el público, coro y orquesta aumenta en proporción directa a la superficie que ocupan, casi con total independencia del número de sillas existentes en la misma. Esta afirmación es válida siempre y cuando:

- Las salas presenten un grado de difusión situado dentro de la normalidad
- La densidad $\frac{S_s}{N}$ (m^2 por asiento) esté situada dentro del siguiente margen de valores habituales:

$$0,45 \leq \frac{S_s}{N} \leq 0,79$$

Ahora bien, las sillas constituyen sin lugar a dudas el elemento más absorbente de una sala de conciertos. Su absorción depende del porcentaje de tapizado del tipo de silla elegido; a mayor porcentaje, mayor absorción.

Una vez decidido el modelo de silla a utilizar, es preciso solicitar del fabricante los correspondientes coeficientes de absorción α_s medidos en un laboratorio homologado. En caso de no poder disponer de ellos, es posible hacer uso de los nuevos valores de coeficientes de absorción publicados por Beranek (1.996) y detallados en el apartado 2.2.6. Los nuevos datos se han obtenido a partir de mediciones realizadas en un conjunto de salas existentes.

En cuanto a α_R , Beranek también ha publicado (1.996) los coeficientes medios representativos de la absorción del resto de materiales típicamente utilizados en salas de conciertos. Dichos coeficientes se muestran en la tabla 5.6.

FRECUENCIA (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000
α_R	0,14	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07

Tabla 5.6 Coeficientes medios de absorción residual total α_R

De la comparación entre ambos grupos de coeficientes (tablas 2.3, 2.4 y 5.6) se deduce que, efectivamente, la absorción de las sillas es en todos los casos muy superior a la absorción residual total.

Por lo que se refiere al término $\sum_i S_{mi} \alpha_{mi}$, sólo adquiere un valor distinto de cero cuando en la sala se utiliza una absorción adicional, como por ejemplo la usada para atenuar el efecto de un eco o focalización del sonido. En cualquier caso, su valor deberá ser siempre pequeño. Si ahora se hacen las siguientes hipótesis en el caso de sala ocupada:

- Ausencia de materiales absorbentes adicionales ($\sum_i S_{mi} \alpha_{mi} = 0$)
- El 75% de la absorción total A_{tot} , a frecuencias medias (500 Hz – 1 kHz), es debido a las sillas, orquesta y coro, mientras que el otro 25% se debe al conjunto de superficies restantes de la sala

resulta que:

$$S_{tot}\alpha_S = 0,75 A_{tot}$$

246

es decir:

$$A_{tot} = 1,33 S_{tot}\alpha_S$$

Como, por definición:

$$A_{tot} = S_{tot}\alpha_S + S_R\alpha_R$$

se tiene que $S_R\alpha_R$ representa el 33% de $S_{tot}\alpha_S$.

Sustituyendo el valor anterior de A_{tot} en la fórmula de Sabine y despreciando el término de la absorción del aire 4mV, se obtiene:

$$RT = \frac{0,161}{1,33\alpha_s} (V/S_{tot})$$

y tomando $\alpha_s = 0,85$ (valor promedio, según Beranek, de los coeficientes de absorción de los tres tipos de sillas a las frecuencias de 500 Hz y 1 kHz, considerándolas ocupadas), resulta que:

$$RT_{mid} = 0,14 (V/S_{tot})$$

Esta simple expresión es de gran utilidad desde un punto de vista práctico, ya que relaciona de forma directa el tiempo de reverberación RT_{mid} de la sala ocupada, con el volumen de la sala y la superficie acústica efectiva total.

En la figura 5.12 se representa la recta asociada a dicha expresión, así como un numeroso conjunto de parejas de valores (RT_{mid} , V/S_{tot}) correspondientes a salas de conciertos existentes.

Según se observa, la fórmula anterior predice razonablemente bien los valores de RT_{mid} hasta, aproximadamente, $V/S_{tot} = 14$. La dispersión existente es debida básicamente a las diferencias en los coeficientes medios de absorción de las sillas.

Para valores de V/S_{tot} situados entre 14 y 19, los valores de RT_{mid} se mantienen prácticamente constantes alrededor de 1,95 s. Una explicación de tal circunstancia puede ser la introducción de materiales absorbentes adicionales con objeto de mantener el tiempo de reverberación cerca de su valor óptimo. Otro motivo de por qué los valores de RT_{mid} no siguen la recta de pendiente 0,14 es que, cuando el volumen aumenta con relación a la superficie total S_{tot} , los valores de $S_R\alpha_R$ representan más de un 33% de $S_{tot}\alpha_S$.

Por otra parte, la determinación de RT_{mid} a partir de la relación V/N en lugar de V/S_{tot} , o sea, a partir del número de asientos N en lugar de la superficie acústica efectiva total S_{tot} , es mucho más inexacta debido a la mayor dispersión de resultados existente en la práctica.

De todas formas, y simplemente a título orientativo, se puede utilizar la siguiente expresión hasta un valor de $V/N = 10$:

$$RT_{mid} = 0,20 \text{ (V/N)}$$

A partir de esta fórmula se deduce que, para obtener valores de RT_{mid} entre 1,8 y 2 s, es preciso disponer de 9 a 10 m^3 por asiento.

Finalmente, cabe indicar que los valores habituales de la relación N/S_{tot} en salas de conciertos existentes oscilan entre 1,1 y 1,7, siendo su valor medio 1,45.

5.5.1.3 Determinación de los valores óptimos del volumen y del número de asientos de una sala. Relación con el tiempo de reverberación y la sonoridad

Si en la fase de diseño se fijan los valores del tiempo de reverberación (RT_{mid}) para la sala ocupada, y de la sonoridad (G_{mid}) para la sala vacía, es posible determinar de forma automática, aunque sólo aproximada, tanto el volumen de la sala (V) como el número de asientos (N). Para ello, basta con hacer uso de las gráficas de las figuras 5.13 y 5.14.

La figura 5.13 muestra una serie de gráficas que permiten calcular el volumen V a partir de los valores de RT_{mid} (sala ocupada) y G_{mid} (sala vacía).

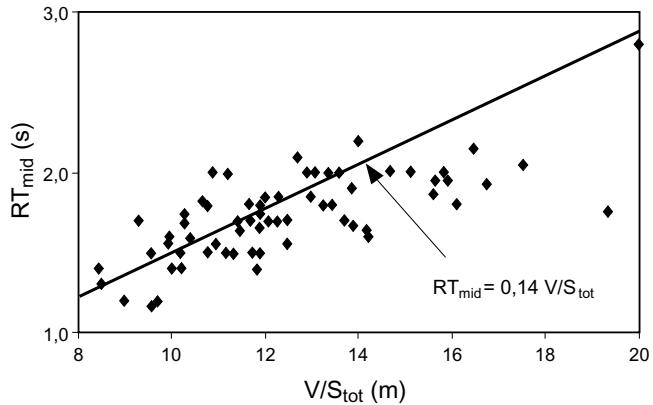


Fig. 5.12 Representación de parejas de valores RT_{mid} y V/S_{tot} correspondientes a salas de conciertos existentes

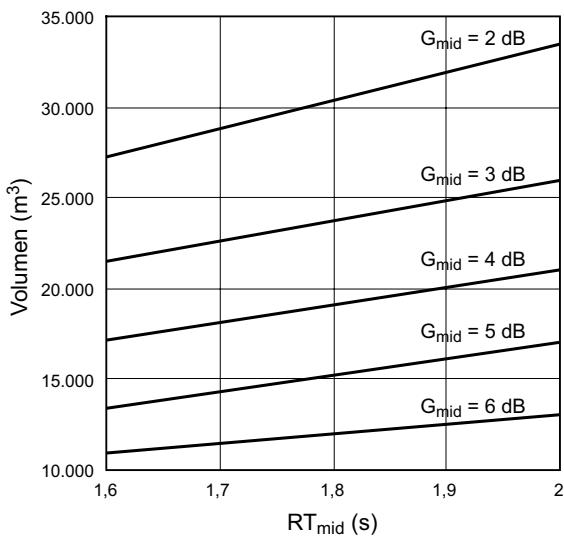


Fig. 5.13 Volumen de la sala en función de RT_{mid} (sala ocupada) y G_{mid} (sala vacía)

De su observación se desprende lo siguiente:

248

- Para un valor de G_{mid} prefijado, cuanto mayor sea el RT_{mid} deseado, también mayor será el volumen V necesario.
- Para un valor de RT_{mid} prefijado, cuanto mayor sea el G_{mid} deseado, menor será el volumen V necesario.

La figura 5.14 muestra, asimismo, una serie de gráficas que permiten calcular la superficie acústica efectiva total S_{tot} a partir del volumen V y del valor de RT_{mid} (sala ocupada). Todas ellas se obtienen a partir de la expresión simplificada deducida en el apartado anterior:

$$RT_{mid} = 0,14 (V/S_{tot})$$

De su observación se desprende lo siguiente:

- Para un valor de RT_{mid} prefijado, cuanto mayor sea el volumen V , mayor será la superficie S_{tot} necesaria.
- Para un volumen V prefijado, cuanto mayor sea el RT_{mid} deseado, menor será la superficie S_{tot} necesaria.

El proceso para determinar V y N es el expuesto a continuación:

- a) Fijar los valores deseados del tiempo de reverberación RT_{mid} (sala ocupada) y de la sonoridad G_{mid} (sala vacía), de acuerdo con lo expuesto en los apartados 5.2.1.1 y 5.2.2, respectivamente.
- b) Hallar el volumen V de la sala haciendo uso de las gráficas de la figura 5.13.

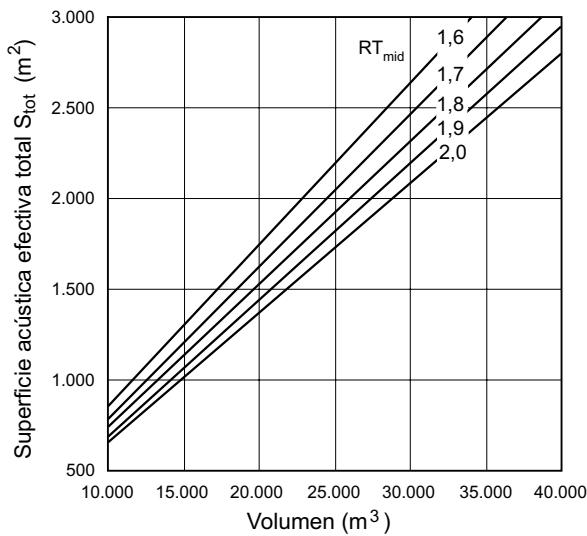


Fig. 5.14 Superficie acústica efectiva total S_{tot} en función del volumen V de la sala y del RT_{mid} (sala ocupada)

- c) Hallar la superficie S_{tot} partiendo del volumen anterior y haciendo uso de las gráficas de la figura 5.14.
- d) Hallar el número de asientos N a partir de la relación N/S_{tot} prefijada (habitualmente 1,45).

249

A título ilustrativo, seguidamente se da un ejemplo numérico práctico.

- a) Valores de RT_{mid} y G_{mid} prefijados:

$$RT_{\text{mid}} = 2,0 \text{ s (sala ocupada)}$$

$$G_{\text{mid}} = 4 \text{ dB (sala vacía)}$$

- b) A partir de la figura 5.13, el valor de V es:

$$V = 21.000 \text{ m}^3$$

- c) A partir de la figura 5.14, el valor de S_{tot} es:

$$S_{\text{tot}} = 1.450 \text{ m}^2$$

- d) A partir de la relación $N/S_{\text{tot}} = 1,45$, el valor de N es:

$$N = 2.100 \text{ asientos}$$

Ahora bien, en muchos casos, el número de asientos viene fijado de antemano. Debido a que no es posible prefijar a la vez RT_{mid} , G_{mid} y N , a continuación se expone una posible manera de proceder, aprovechando el ejemplo numérico anterior.

En el supuesto de que el valor de N deseado sea, por ejemplo:

$$N = 2.500 \text{ asientos}$$

a) Se calcula la nueva superficie S_{tot} necesaria:

$$S_{\text{tot}} = 2.500 / 1,45 = 1.724 \text{ m}^2$$

b) Manteniendo el valor de RT_{mid} deseado ($RT_{\text{mid}} = 2 \text{ s}$), se calcula el nuevo valor de V a partir de la figura 5.14:

$$V = 25.000 \text{ m}^3$$

c) A partir de la figura 5.13, se calcula el nuevo valor de G_{mid} :

$$G_{\text{mid}} = 3,3 \text{ dB}$$

En este caso, la exigencia de disponer de un número mayor de asientos N manteniendo el mismo valor de RT_{mid} , ha supuesto tener que incrementar el volumen V de la sala con la consiguiente disminución de sonoridad G_{mid} .

Si se hubiese optado por mantener el volumen V , la disminución habría sido del tiempo de reverberación ($RT_{\text{mid}} = 1,7 \text{ s}$), lo cual habría provocado la misma disminución de sonoridad.

En cualquier caso, la exigencia de un número mayor de asientos ha hecho que la sonoridad de la sala esté por debajo del margen de valores recomendados.

Por otro lado, de lo que antecede se puede concluir que al fijar S_{tot} , la sonoridad G_{mid} queda automáticamente fijada, de tal forma que un aumento de S_{tot} supone una disminución de sonoridad. De hecho, doblar S_{tot} implica disminuir G_{mid} del orden de 3 dB.

Por lo tanto, en el diseño de una sala de conciertos es extremadamente importante que la superficie S_s ocupada por las sillas sea lo menor posible, ya que dicha superficie es una de las integrantes de S_{tot} . Ésta es la única manera de garantizar la obtención de una sonoridad correcta, o lo que es lo mismo, un valor de G_{mid} dentro del margen recomendado.

Una vez cumplido este requisito, y por lo tanto fijada S_s , es cuando en realidad se está en condiciones de definir el número de asientos N . Dicho valor surge de aplicar el siguiente criterio utilizado en la mayoría de salas de conciertos construidas en las últimas tres décadas:

$$S_s/N \approx 0,50$$

es decir, del orden de $0,5 \text{ m}^2$ por asiento. Por consiguiente:

$$N \approx 2 S_s$$

De todas formas, partiendo del criterio anterior, Barron fija en 3.000 el número máximo recomendado de asientos para una sala de conciertos de música sinfónica.

5.5.2 Criterios para la generación de primeras reflexiones. Formas típicas de salas de conciertos

5.5.2.1 Elipse de retardo constante

La existencia de primeras reflexiones en una sala contribuye a un aumento de la claridad musical (C_{80}), de la sonoridad (G) y, en muchos casos, a una mayor intimidad acústica (t_l menor).

Si, además, dichas reflexiones son laterales, es decir, existe una diferencia de tiempos entre la llegada de las mismas a cada uno de los dos oídos, se produce una mejora del grado de impresión espacial en la sala (apartado 5.2.8).

Este apartado está dedicado a proporcionar unos criterios prácticos consistentes en la definición de las formas más adecuadas de una sala que permitan generar primeras reflexiones laterales, así como a presentar un conjunto de formas típicas de salas de conciertos.

El estudio de la situación y orientación más apropiadas de las superficies de una sala, a fin de obtener una determinada energía de primeras reflexiones en la zona de público, se basa en la acústica geométrica. Suponiendo una cierta ubicación de la fuente sonora F y del receptor R (figura 5.15), cada superficie plana del recinto genera una reflexión especular (ángulo de incidencia = ángulo de reflexión), que llega al receptor con un cierto retardo respecto al sonido directo. Dicho retardo es debido a la diferencia de caminos recorridos por ambos sonidos.

El punto de la superficie donde se produce la reflexión es tangente a una elipse en cuyos focos se hallan la fuente F y el receptor R. Como quiera que una elipse tiene la propiedad de que la suma de las distancias desde sus focos a cualquiera de sus puntos es constante, resulta que cada elipse lleva asociada un cierto retardo también constante (figura 5.16). En tres dimensiones, la correspondiente forma geométrica obtenida mediante una rotación de la elipse se denomina elipsoide.

Teniendo en cuenta que el retardo máximo para que las primeras reflexiones resulten beneficiosas es de 80 ms, y recordando que la velocidad del sonido a una temperatura ambiente de 22°C es de 345 m/s, resulta que la máxima diferencia de caminos entre el sonido directo y el reflejado deberá ser de:

$$d_{\max} = 345 \cdot 0,080 = 27,6 \text{ m}$$

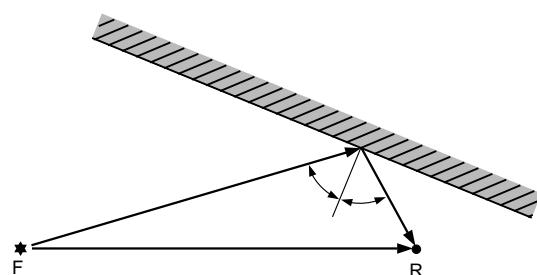


Fig. 5.15 Caminos recorridos por el sonido directo y el sonido reflejado

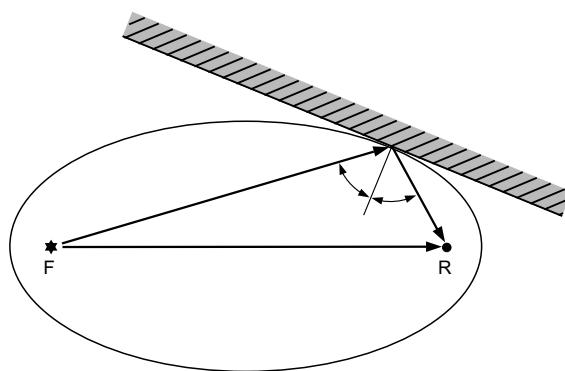


Fig. 5.16 Elipse de retardo constante

Esta distancia es útil para determinar, en primera instancia, la elipse de máximas dimensiones asociada a un determinado punto de una sala.

En el caso de considerar un conjunto de puntos situados sobre el eje longitudinal de la sala, sería necesario utilizar una serie de elipses dispuestas según se indica en la figura 5.17.

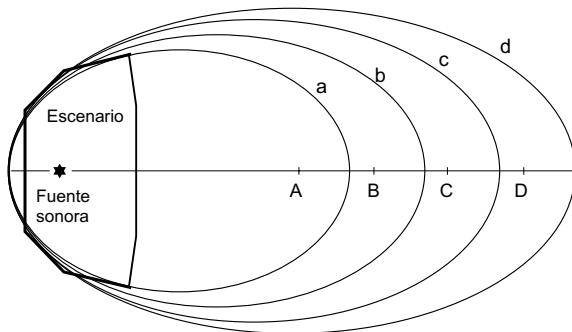


Fig. 5.17 Conjunto de elipses de retardo constante asociadas, una a una, a una serie de puntos situados sobre el eje longitudinal de la sala

De acuerdo con la figura anterior, las superficies tangentes a la elipse "a" proporcionan reflexiones de retardo constante al punto más próximo al escenario (punto A). En cambio, para el punto más alejado D, la correspondiente elipse "d" es mucho mayor.

A continuación se describen algunas de las formas más habituales de salas de conciertos en relación con la generación de primeras reflexiones, y se comentan las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas. En ningún caso se pretende cubrir la totalidad de tipologías, cosa por otra parte extremadamente difícil de llevar a cabo por la variedad y disparidad de formas existentes.

252

5.5.2.2 Tipologías de salas de conciertos

a) Salas en forma de abanico (“fan-shaped halls”)

Características básicas:

- Ausencia de primeras reflexiones laterales en la parte central de la sala (figura 5.18)

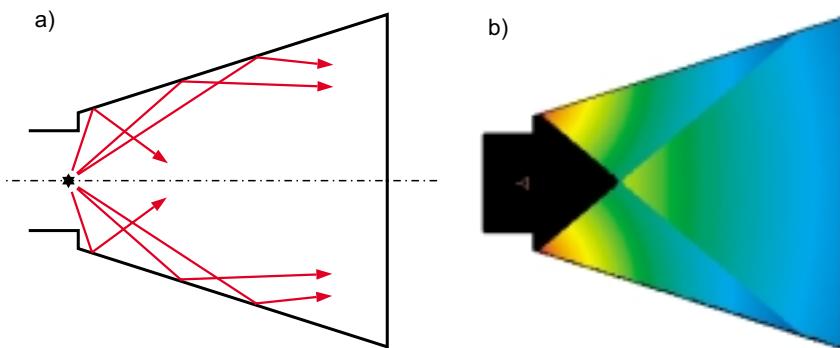


Fig. 5.18 Sala en forma de abanico: a) generación de reflexiones laterales; b) mapa de niveles de presión sonora correspondientes al sonido reflejado por las paredes laterales

- Impresión espacial e intimidad acústica limitadas, especialmente en la parte central de la sala
- Posible existencia de focalizaciones en el caso de que la pared posterior sea cóncava
- A mayor ángulo del abanico, acústica más desfavorable
- Posibilidad de un gran aforo

Ejemplo ilustrativo: Northern Alberta Jubilee Auditorium, Edmonton, Canadá (figura 5.19)



253

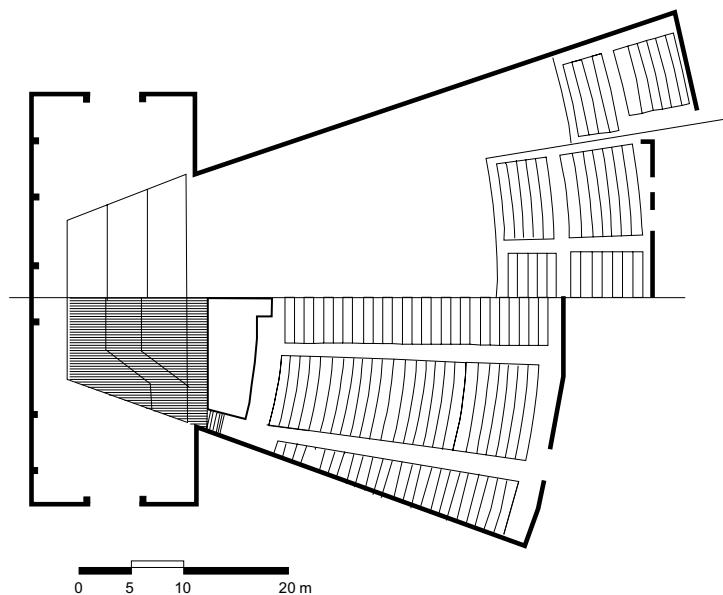


Fig. 5.19 Northern Alberta Jubilee Auditorium (Edmonton, Canadá)

b) Salas de planta rectangular (“shoe-box halls”)

Características básicas:

- Salas relativamente estrechas
- Balcones estrechos
- Gran número de primeras reflexiones laterales debido a la proximidad del público a las paredes (figura 5.20)
- Intimidad acústica elevada
- Generación de reflexiones de segundo orden en la cornisa del techo y, en el caso de que existan balcones, en la parte inferior de los mismos
- Elevado grado de difusión del sonido debido a la existencia de ornamentación y de superficies irregulares
- Buena impresión espacial
- Sonoridad elevada
- Visuales deficientes en algunas localidades, especialmente en las situadas en la zona posterior de platea y en los balcones

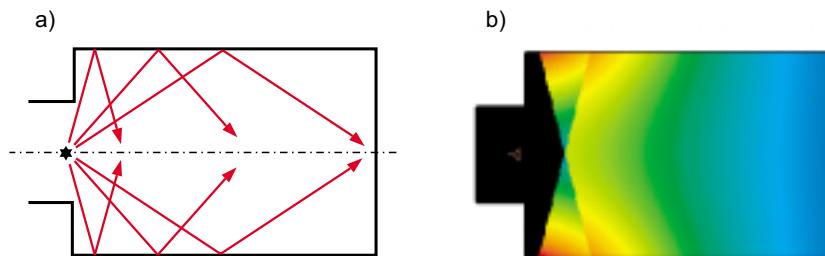


Fig. 5.20 Sala de planta rectangular: a) generación de reflexiones laterales; b) mapa de niveles de presión sonora correspondientes al sonido reflejado por las paredes laterales

Ejemplos ilustrativos:

- Viena Musikvereinssaal, Austria (figura 5.21)
- Amsterdam Concertgebouw, Holanda (figura 5.22)
- Boston Symphony Hall, EE.UU. (figura 5.23)

Estas tres salas son consideradas unánimemente como las mejores del mundo por su excelente acústica.

Sus dimensiones y número de asientos son:

- Viena Musikvereinssaal: • 52,6 m x 19,6 m x 17,7 m
• 1.680 localidades
- Amsterdam Concertgebouw: • 43,0 m x 28,4 m x 17,2 m
• 2.037 localidades
- Boston Symphony Hall: • 48,2 m x 22,8 m x 18,6 m
• 2.625 localidades

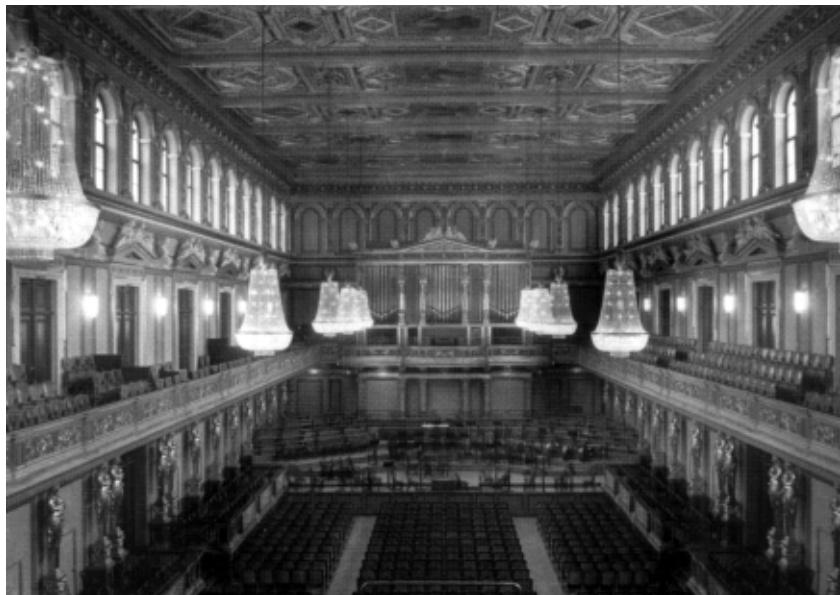


Fig. 5.21 Viena Musikvereinssaal (Austria)



Fig. 5.22 Amsterdam Concertgebouw (Holanda)



Fig. 5.23 Boston Symphony Hall (EE.UU.)

256 c) Salas en forma de abanico invertido (“reverse-splay halls”)

Características básicas:

- Existencia de una gran cantidad de primeras reflexiones laterales (figura 5.24)
 - Impresión espacial elevada
 - Falta de visibilidad desde una buena parte de sus localidades
- Debido a la mencionada falta de visibilidad, no existe ninguna sala diseñada exclusivamente con este perfil.

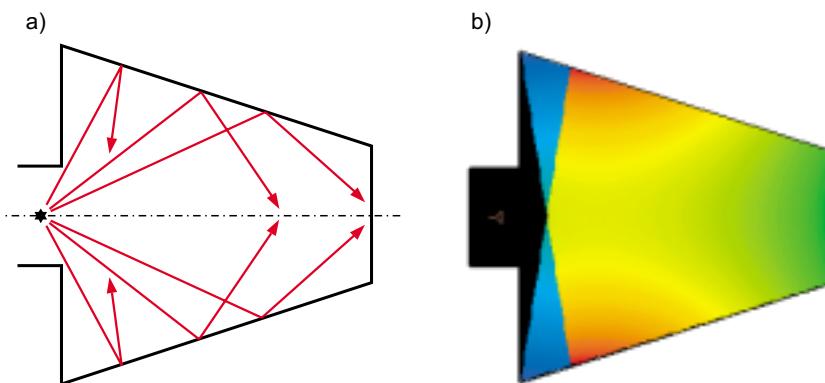


Fig. 5.24 Sala en forma de abanico invertido: a) generación de reflexiones laterales; b) mapa de niveles de presión sonora correspondientes al sonido reflejado por las paredes laterales

d) Salas en forma de hexágono alargado (“elongated hexagon halls”)

Características básicas:

- Perfil obtenido como combinación de los perfiles en forma de abanico y de abanico invertido (figura 5.25)
 - Presentan las ventajas visuales y de aforo de las salas en forma de abanico
 - Presentan las ventajas acústicas del perfil en forma de abanico invertido
- Ejemplo ilustrativo: Bunka Kaikan, Tokio, Japón (figuras 5.26a y 5.26b)

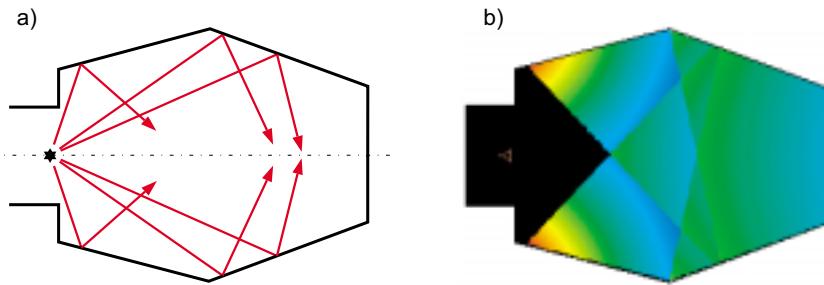


Fig. 5.25 Sala en forma de hexágono alargado: a) generación de reflexiones laterales; b) mapa de niveles de presión sonora correspondientes al sonido reflejado por las paredes laterales



Fig. 5.26a Bunka Kaikan, Tokio, Japón (vista desde la parte posterior de la sala)

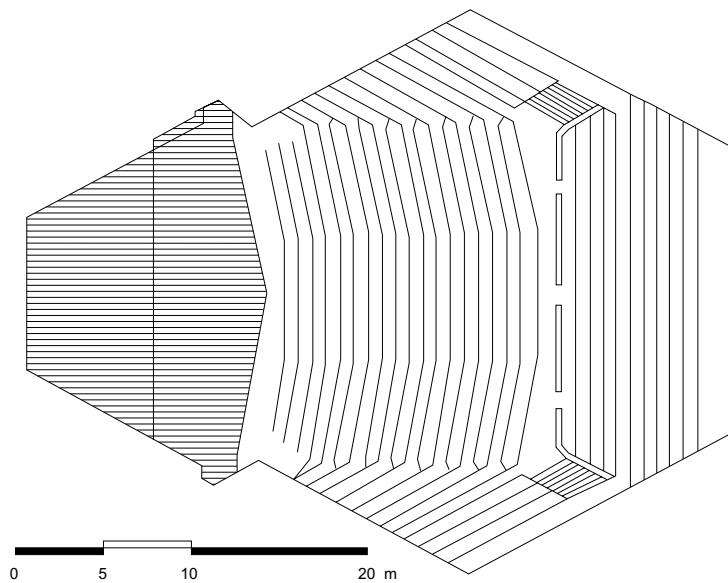


Fig. 5.26b Bunka Kaikan, Tokio, Japón (planta)

258

e) Salas en forma de herradura (“horseshoe halls”)

Características básicas:

- Perfil ampliamente utilizado en teatros y en teatros de ópera (figura 5.27)
- Baja energía asociada a las primeras reflexiones laterales
- Posible existencia de focalizaciones causadas por la concavidad de la pared posterior
- Posibilidad de un gran aforo

Ejemplo ilustrativo: Carnegie Hall, Nueva York, EE.UU. (figura 5.28)

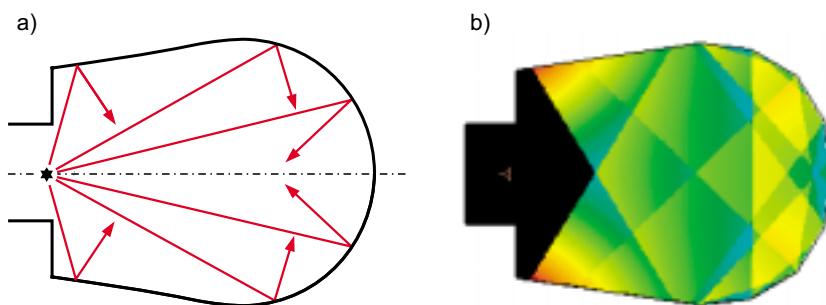


Fig. 5.27 Sala en forma de herradura: a) generación de reflexiones laterales; b) mapa de niveles de presión sonora correspondientes al sonido reflejado por las paredes laterales



Fig. 5.28 Carnegie Hall (Nueva York, EE.UU.)

f) Salas con reflexiones frontales (“directed reflection halls”)

Características básicas:

- Falso techo dividido en varios segmentos con una forma global aproximada a una parábola cilíndrica (forma parecida a la elipse de retardo constante de la figura 5.16)
- Todas las primeras reflexiones son creadas por el falso techo e inciden frontalmente sobre el público
- Sonido reflejado procedente del escenario formando un haz de rayos prácticamente paralelos
- Primeras reflexiones con un retardo uniforme
- Sonoridad uniforme en todos las localidades
- Diseño basado en la ubicación de la fuente sonora en un único punto del escenario (resultado bueno para un conferenciante, pero no para una orquesta)
- Existencia de una fuerte coloración del sonido
- Impresión espacial del sonido pobre
- Ruido producido por el público percibido claramente en el escenario

En la figura 5.29 se presenta un ejemplo de una sala de este tipo y se indican las direcciones de las diferentes reflexiones frontales.

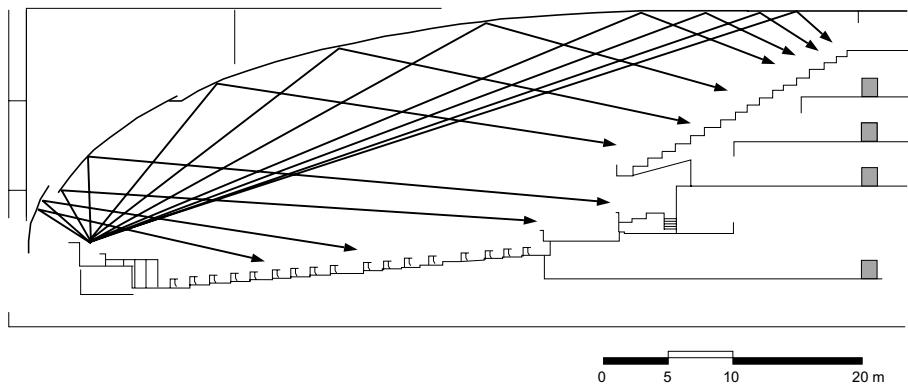


Fig. 5.29 Ejemplo de sala con reflexiones frontales: Sala de la Liga de las Naciones, Ginebra, Suiza (Le Corbusier, 1.927), escala aproximada

Ejemplo ilustrativo: Sala Pléyel, París, Francia (figuras 2.78b y 5.30)

260



Fig. 5.30 Sala Pléyel (París, Francia)

g) Salas con formas hexagonales superpuestas

Características básicas:

- Salas basadas en el modelo de las elipses superpuestas de retardo constante y en las salas en forma de hexágono alargado (figura 5.31)

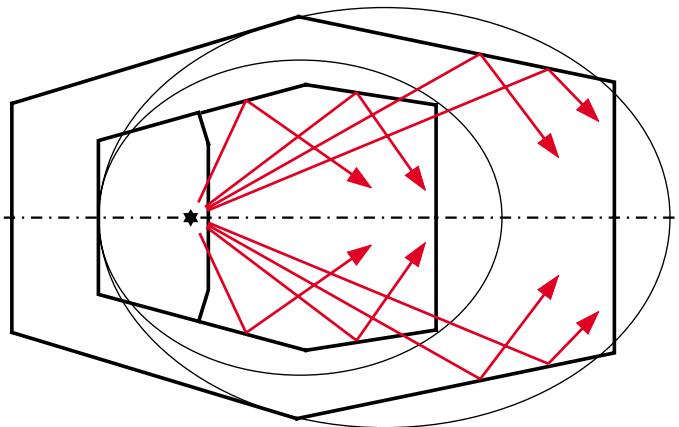


Fig. 5.31 Sala con formas hexagonales superpuestas:
generación de reflexiones laterales

- Distribución del público en dos zonas a diferente nivel
- Nivel inferior, que incluye el escenario y los asientos más próximos al mismo, rodeado por paredes difusoras del sonido en forma de hexágono alargado que proporcionan primeras reflexiones a todos los asientos (equivalente a una pequeña sala de conciertos “interior”)
- Nivel superior, que incluye las localidades más alejadas del escenario, igualmente en forma de hexágono alargado. Primeras reflexiones proporcionadas por el techo y las paredes laterales también difusoras
- Inclinación pronunciada de los asientos, especialmente de los correspondientes al nivel superior
- Retardo de las reflexiones en ambas zonas de la sala aproximadamente igual
- Techo con elementos difusores
- Elevada intimidad acústica (valores bajos de ITDG) en ambos niveles de la sala, incluso en recintos de gran anchura
- Sonido excelente en el escenario y en la sala “interior”
- Mejores visuales que en las salas de forma rectangular

Ejemplo ilustrativo: De Doelen Concert Hall, Rotterdam, Holanda (figura 5.32)



262

Fig. 5.32 De Doelen Concert Hall (Rotterdam, Holanda)

h) Salas con terrazas trapezoidales (“trapezium terraced halls”)

Características básicas:

- Modelo formalizado por Cremer en 1.986
- Público distribuido en diferentes niveles o terrazas siguiendo el modelo de las elipses superpuestas de retardo constante
- Complejo diseño de superficies reflectantes alrededor de las terrazas
- Cada nivel recibe primeras reflexiones producidas por una superficie en forma de abanico invertido debidamente inclinada y situada en el nivel inmediato superior (figura 5.33)
- Buena impresión espacial e intimidad acústica
- Visuales excelentes y diferenciadas desde cada nivel
- Sensación desde las localidades más altas de proximidad al escenario al no dominar la totalidad de los asientos
- Falta de comunicación entre los músicos (necesidad de reflectores adicionales sobre la orquesta)
- Posibilidad de un gran aforo

Ejemplo ilustrativo: Berlin Philharmonie, Alemania (figura 5.34)

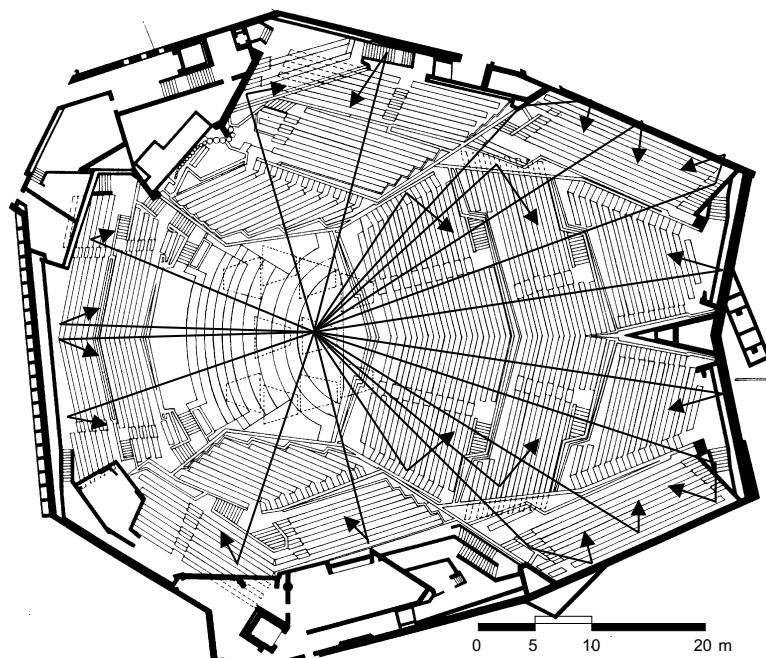


Fig. 5.33 Sala con terrazas trapezoidales: generación de reflexiones laterales (Berlin Philharmonie, Alemania)



Fig. 5.34 Berlin Philharmonie (Alemania)

i) Salas con reflexiones laterales (“lateral directed reflection sequence halls”)

Características básicas:

- Salas con una forma prácticamente elíptica
- Asientos agrupados por zonas. A cada zona se le asignan las siguientes tres superficies reflectantes (figura 5.35) con objeto de crear primeras reflexiones laterales significativas en toda la zona de público:
 - Gran reflector inclinado que crea reflexiones laterales hacia el balcón situado debajo del mismo y hacia la platea. Éste es, sin duda, el elemento más importante de este tipo de salas
 - Barandilla inclinada del correspondiente balcón que proporciona reflexiones laterales a la zona central de platea
 - Parte inferior de dicho balcón que genera reflexiones hacia los asientos situados en la zona lateral de platea
- Intimidad acústica y claridad musical elevadas
- Sensación de reverberación no excesiva (EDT claramente inferior al RT)
- Buenas visuales
- Posibilidad de un gran aforo

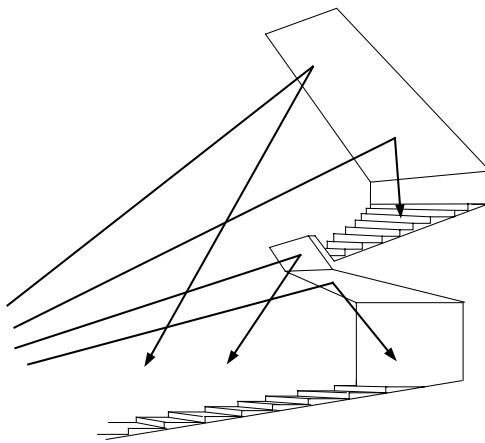


Fig. 5.35 Superficies reflectantes características de una sala con reflexiones laterales

Ejemplo ilustrativo: Christchurch Town Hall, Nueva Zelanda (figura 5.36)

j) Salas con sonido difuso

Características básicas:

- Techo y paredes laterales altamente difusas
- Ausencia de primeras reflexiones significativas
- Sensación de sonido altamente envolvente
- Exceso de absorción



Fig. 5.36 Christchurch Town Hall (Nueva Zelanda)

Ejemplos ilustrativos: Herkulessaal, Munich, Alemania (figura 2.73) y Beethovenhalle, Bonn, Alemania (figura 5.37)

265



Fig. 5.37 Beethovenhalle, Bonn, Alemania (techo cubierto con una densa combinación de semiesferas, pirámides y cilindros truncados, y paredes laterales cubiertas con cilindros verticales)

5.5.2.3 Otros ejemplos de salas de conciertos modernas

a) Sala Sinfónica del Auditorio de Las Palmas, Gran Canaria (España)

Inaugurada en 1.997, la Sala Sinfónica del Auditorio de Las Palmas, del arquitecto Óscar Tusquets, constituye un ejemplo de sala de conciertos que combina tres de las tipologías comentadas anteriormente. Se trata de una sala con forma hexagonal, en la que los espectadores están situados en diferentes niveles, siguiendo la filosofía de las salas con terrazas trapezoidales. No en vano, el asesor acústico en la fase de proyecto fue el famoso consultor alemán Lothar Cremer, introductor de esta tipología y consultor acústico de la Berlin Philharmonie, entre otras muchas salas. Dicha disposición de los asientos permite al público tener visiones muy diferenciadas de la orquesta, en función de su ubicación concreta en la sala. Por otra parte, la sala presenta un elevado grado de difusión del sonido debido a la existencia de los siguientes elementos:

- Techo artesonado con entrantes pronunciados
- Lámpara central a base de elementos puntiagudos
- Grandes nichos en los paramentos laterales

Su volumen es de 19.400 m³ y su capacidad de 1.664 localidades. En las figuras 5.38 y 5.39 se observan sendas vistas panorámicas de la sala.



Fig. 5.38 Sala Sinfónica del Auditorio de Las Palmas de Gran Canaria, España (vista desde la parte posterior de la sala)



Fig. 5.39 Sala Sinfónica del Auditorio de Las Palmas de Gran Canaria, España (vista desde el escenario)

b) Tokyo Opera City Concert Hall (Japón)

Inaugurada en 1.997, esta nueva sala de conciertos fue diseñada por el equipo de arquitectos TAK Associated Architects, con Takahiko Yangisawa al frente. Entre el numeroso equipo de asesores acústicos, se hallaba el prestigioso consultor norteamericano Leo Beranek.

Se trata de una sala de planta rectangular, si bien difiere de las salas clásicas “shoe-box” por el hecho de que el techo tiene una forma de pirámide distorsionada, lo cual constituye sin lugar a dudas un diseño realmente novedoso.

El diseño acústico se hizo mediante la utilización de programas de simulación acústica. Los resultados numéricos obtenidos fueron contrastados con una serie de medidas realizadas en el interior de una maqueta construida a escala 10:1.

Los parámetros acústicos medidos fueron los seis más representativos de la calidad acústica de la sala y que hacen referencia al grado de viveza de la sala, a la riqueza en sonidos graves, al grado de amplificación producido por la misma, a la intimidad acústica, a la impresión espacial del sonido y, finalmente, al grado de difusión existente.

Por otra parte, la utilización del modelo a escala permitió tener en cuenta, con un mayor grado de precisión que con los programas de simulación, el efecto de las sillas tanto ocupadas como vacías.

En la figura 5.40 se presenta una vista panorámica de la sala desde el escenario.



Fig. 5.40 Tokyo Opera City Concert Hall (Japón)

5.5.3 Visuales

Al igual que sucede en un teatro, uno de los objetivos prioritarios en una sala de conciertos es que el sonido directo alcance a cada espectador sin ninguna obstrucción producida por los espectadores situados delante suyo. Dicho objetivo se cumple si existe una buena visibilidad del escenario.

El diseño de visuales se ha expuesto en el apartado 4.7.2.

5.5.4 Incidencia rasante. Efecto “seat dip”

Cuando el sonido generado en el escenario de una sala de conciertos se propaga por encima de la superficie ocupada por las sillas y el ángulo de incidencia es pequeño (incidencia rasante), tiene lugar una absorción de dicho sonido. Ello ocurre tanto si las sillas están ocupadas como si están vacías.

Este efecto llamado “seat dip” se caracteriza por una fuerte absorción a bajas frecuencias, tal como se ha descrito en el apartado 2.2.7.

5.5.5 Anfiteatros y balcones

De la misma forma que ocurre en un teatro, la razón fundamental por la que se utilizan anfiteatros y/o balcones en una sala de conciertos es la de aumentar el número de localidades sin que ello suponga un mayor alejamiento del público respecto al escenario.

Según se ha visto en el apartado 4.7.3, la existencia de anfiteatros y/o balcones lleva asociada una disminución del sonido reverberante en la zona situada debajo de los mismos, al quedar reducida la energía proveniente de la parte superior de la sala.

En términos acústicos, ello se traduce en una disminución tanto del “Early Decay Time” (EDT) como de la sonoridad (G) y, por contra, en un aumento de la claridad musical (C_{80}). Estudios realizados por Barron (1.995) demuestran que el parámetro más representativo de la calidad acústica en dicha zona es el EDT_{mid} (valor medio de los EDT correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1 kHz, según se ha definido en el apartado 5.2.1.3). La disminución de EDT_{mid} significa que la sensación percibida en dicha zona será la de una sala más apagada que en el resto de zonas (sensación de desconexión en relación con la acústica global de la sala).

En cuanto a la sonoridad G, puede ser aumentada generando nuevas primeras reflexiones, bien sea inclinando adecuadamente el techo, o bien dando una forma de abanico invertido a las paredes laterales traseras. Lógicamente, el aumento de primeras reflexiones provocará un incremento adicional de la claridad musical C_{80} y una disminución del EDT_{mid} , es decir, tendrá lugar una nueva reducción de la sensación de viveza.

Como criterio general a seguir, a continuación se transcribe la recomendación hecha por Beranek en 1.962: la profundidad D de la zona situada debajo de un anfiteatro o balcón perteneciente a una sala de conciertos no debe ser superior a la altura H de la abertura asociada. En la figura 5.41 se presenta dicho criterio de forma gráfica.

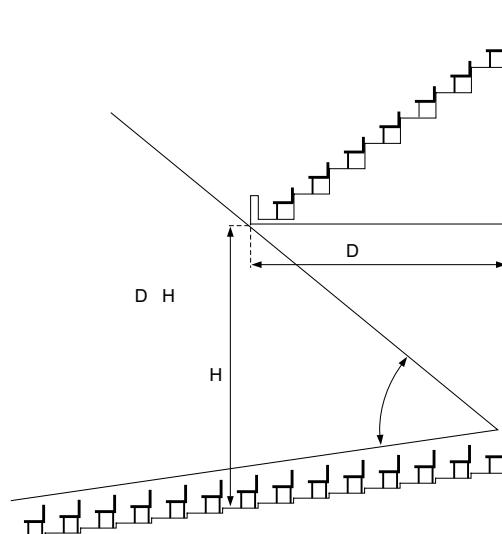


Fig. 5.41 Criterio práctico de máxima profundidad D de la zona situada debajo de un anfiteatro o balcón en una sala de conciertos (según Beranek)

Por su parte Barron, en el citado estudio, relaciona el valor de EDT_{mid} con el ángulo de visibilidad θ mostrado en la figura anterior.

De acuerdo con las conclusiones del mismo, la degradación de la calidad acústica es mayor a medida que disminuye la relación entre el valor de EDT_{mid} en un punto dado de dicha zona y el valor de EDT_{mid} que se obtendría en el mismo punto si no existiese anfiteatro o balcón.

En la figura 5.42 se representa la mencionada relación en función del ángulo de visibilidad θ .

Según se observa, dicha relación disminuye a medida que el ángulo es menor. Como norma práctica, el ángulo no deberá ser nunca inferior a 45° .

Finalmente, cabe señalar que la existencia de varios anfiteatros o balcones supone un incremento del número de pasillos y zonas de acceso a los mismos. Como una parte de dichas superficies se añade a la superficie acústica efectiva total S_{tot} , resulta que la sonoridad G global de la sala se verá ligeramente reducida (apartado 5.5.1.3).

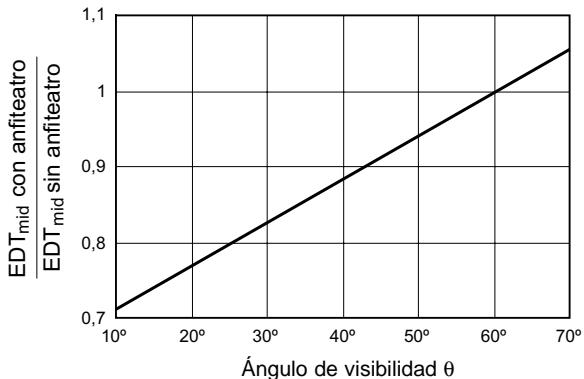


Fig. 5.42 Variación de la relación entre los valores de EDT_{mid} con y sin anfiteatro o balcón, en función del ángulo de visibilidad θ (según Barron)

5.5.6 Materiales recomendados en el diseño de la sala. Relación con la calidez acústica y el brillo

Como criterio general, el único elemento con un grado de absorción acústica apreciable que se debe utilizar en una sala de conciertos son las sillas. Por lo tanto, los materiales recomendados para emplear como acabados deberán ser acústicamente reflectantes, con objeto de evitar una pérdida excesiva tanto de sonidos graves como de agudos, ya que ello supondría a su vez una disminución de la calidez acústica y del brillo de la sala.

Por consiguiente, en la medida de lo posible, deberá evitarse la utilización de cortinajes, mientras que las rejillas de ventilación y demás aberturas deberán limitarse a la mínima expresión. Sólo en casos excepcionales, como por ejemplo para controlar un eco imprevisto, podrán añadirse materiales absorbentes en zonas muy concretas de la sala, siempre y cuando la actuación se lleve a cabo sobre un porcentaje muy pequeño de la superficie total del recinto. En la práctica, el porcentaje de superficie tratada no deberá superar el 10% de la superficie total de la sala.

Desde un punto de vista práctico, conviene seguir las siguientes recomendaciones relativas a los materiales utilizados en la sala a fin de garantizar un contenido de graves adecuado (los materiales recomendados para el escenario se exponen en el apartado 5.5.12):

- Para la construcción de las paredes, es recomendable utilizar uno de los siguientes materiales:
- Hormigón macizo

- Bloques de hormigón pintado o bien revestidos con yeso
 - Ladrillos revestidos con yeso
 - Como acabado de las paredes y del techo de la sala se podrá utilizar madera con un grosor superior a 25 mm y densidad media o alta ($\geq 400 \text{ Kg/m}^3$), a menos que se tenga la certeza de que está perfectamente adherida a cualquiera de los materiales de construcción anteriores. En tal caso, bastará con utilizar una lámina de dicho material sin limitaciones en cuanto al mínimo grosor requerido.
- Conviene tener presente que la madera delgada colocada a una cierta distancia de la pared o techo actúa como un resonador de membrana, con una frecuencia de máxima absorción situada en la zona de las bajas frecuencias.
- En el caso de utilizar alfombras, conviene limitar su uso a los pasillos, elegir gresores pequeños y colocarlas directamente sobre una base sólida.
 - Elegir sillas que no absorban excesivamente las bajas frecuencias. Evitar especialmente la utilización de sillas que presenten una elevada absorción selectiva en la banda centrada en los 250 Hz. Parece ser que dicha absorción excesiva es debida al fenómeno denominado resonancia de “burbuja” (“bubble resonance”). Dicho efecto se produce cuando los acolchados del asiento y del respaldo están revestidos con una cubierta no porosa, como sucede en el caso de acolchados realizados a base de espuma moldeada en frío.

Con objeto de evitar la posibilidad de resonancia de burbuja, antes de proceder a la compra de las sillas es necesario exigir la medida de los coeficientes de absorción de las mismas en un laboratorio homologado. Dicha medición debe hacerse preferentemente con un conjunto de 16 a 20 sillas y se debe llevar a cabo exactamente con los mismos materiales y tapizados de tela finales, incluidos los pertinentes tratamientos químicos. En caso de que aparezca dicha anomalía, el fabricante deberá proceder a efectuar los cambios oportunos hasta eliminarla, y si ello no es posible, será preciso cambiar de modelo.

- En el caso de utilizar sillas con un bajo porcentaje de superficie tapizada es conveniente realizar una serie de perforaciones en la parte inferior del asiento. Con ello se conseguirá reducir las diferencias entre los coeficientes de absorción, a bajas frecuencias, de las sillas vacías y ocupadas.
- En el caso de utilizar difusores de residuo cuadrático QRD sobre una superficie de dimensiones significativas hay que tener presente que cuanto mayor sea la relación entre la máxima profundidad y la anchura de las ranuras, mayor absorción acústica tendrá lugar (apartado 2.4.2.2).

5.5.7 Criterios para conseguir una sonoridad óptima. Máxima distancia recomendada

Según se ha visto en el apartado 5.2.2, la sonoridad G en un punto de una sala depende de la distancia del mismo al escenario, de la energía asociada a las primeras reflexiones, de la superficie acústica efectiva total S_{tot} y del nivel de campo reverberante.

La distancia del oyente al escenario determina el nivel del sonido directo en el punto

donde se encuentra, ya que dicho nivel disminuye 6 dB cada vez que se dobla la distancia a la fuente sonora, al igual que sucede al aire libre (apartado 1.14). A pesar de dicha disminución, el sonido directo es siempre perceptible, ya que es el primero en alcanzar al oyente.

Con objeto de contrarrestar la disminución del sonido directo con la distancia es preciso instalar paneles reflectantes en las paredes laterales y/o en el techo que proporcionen reflexiones hacia el público. Para que sean efectivas, estas reflexiones deben llegar a los espectadores dentro de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo. La existencia de una gran cantidad de primeras reflexiones mejora, asimismo, la claridad musical (C_{80}), el grado de impresión espacial (apartado 5.5.8), la textura del sonido y, en muchos casos, la intimidad acústica (t_i).

En salas de conciertos de forma rectangular, como la Musikvereinssaal de Viena (Austria), la energía asociada a las primeras reflexiones se consigue principalmente con la aportación de las paredes laterales. Sin embargo, en las salas de conciertos modernas que deben acomodar un mayor número de espectadores se suelen utilizar paneles suspendidos. Es el caso, por ejemplo, de la Segerstrom Hall de Costa Mesa (California, EE.UU.), con una capacidad de 2.903 asientos. Esta sala dispone de una serie de plafones, situados en la parte superior de las paredes laterales, dotados de la inclinación adecuada para guiar el sonido de la orquesta a las diferentes áreas de público (figura 5.43). Adicionalmente, las paredes que rodean los distintos niveles existentes en el recinto generan primeras reflexiones laterales hacia los niveles inferiores.

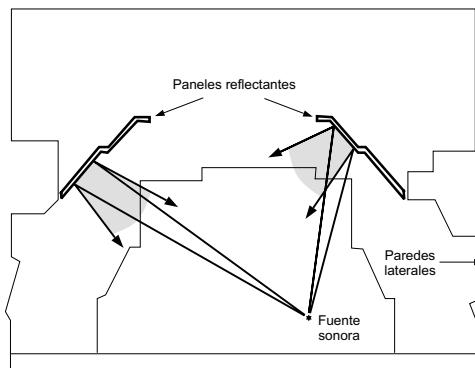


Fig. 5.43 Generación de primeras reflexiones laterales mediante paneles reflectantes inclinados (Segerstrom Hall, Costa Mesa, California, EE.UU.)

La creación de energía lateral asociada a las primeras reflexiones en una sala con terrazas como la anterior aumenta indiscutiblemente la sonoridad de la sala y el grado de impresión espacial, si bien ello no implica que suene de igual forma que una sala de forma rectangular de menor capacidad, como la de Viena (1.680 localidades).

La sonoridad depende, asimismo, de la superficie acústica efectiva total S_{tot} que, a su vez, depende de la superficie ocupada por el público y la orquesta. De acuerdo con lo expuesto en el apartado 5.5.1.3, el criterio a seguir para conseguir una máxima sonoridad es que la superficie ocupada por el público sea lo más pequeña posible, ya que la superficie correspondiente a la orquesta viene predefinida por los condicionantes descritos en el apartado 5.5.12.1 y, además, su contribución a S_{tot} es relativamente baja. Si S_{tot} es pequeña, el volumen V necesario para conseguir el tiempo de reverberación RT deseado también lo será, y ello con-

tribuirá a una mayor sonoridad (mayor energía por persona). Además, el hecho de que las dimensiones de la sala sean razonablemente pequeñas ayuda a que la energía de las primeras reflexiones sea elevada, lo cual también redunda en beneficio de una mayor sonoridad.

Por otra parte, los efectos contrapuestos de la disminución del sonido directo con la distancia y el aumento de nivel producido por las primeras reflexiones y por la existencia de un determinado nivel de campo reverberante dan como resultado una evolución concreta de la sonoridad en función de la distancia. Dicha evolución difiere de la prevista por la teoría clásica, según se comenta a continuación.

Según se ha expuesto en el apartado 4.7.6, a partir de múltiples mediciones llevadas a cabo en una serie de teatros y salas de conciertos, Barron y Lee constataron que el nivel de campo reverberante disminuye a medida que el punto considerado se aleja del escenario. Además, como la distancia crítica (o radio de reverberación, según Barron) en una sala de conciertos de grandes dimensiones es del orden de 5 m, prácticamente la totalidad de espectadores se halla en la zona de campo reverberante. Ello significa que la sonoridad disminuye a medida que el punto considerado se aleja del escenario, incluso en el caso de que existan primeras reflexiones significativas. Además, en los puntos situados en la parte posterior de la sala, la teoría revisada de Barron y Lee predice una sonoridad entre 2 y 4 dB inferior a la prevista por la teoría clásica. Esta diferencia es ciertamente significativa, sobre todo si se tiene en cuenta que el hecho de doblar el número de integrantes de una orquesta conlleva un aumento de sonoridad de sólo 3 dB.

De todas maneras, por regla general, la valoración subjetiva de esta disminución de sonoridad es menos desfavorable de lo que cabría deducir a partir de los valores medidos. Ello se debe a que existe un mecanismo psicológico de compensación del nivel con la distancia: un oyente situado en la parte posterior del recinto probablemente admitirá dicha disminución debido a que la sonoridad existente coincide con sus expectativas de percepción de nivel en dicha zona.

Un criterio a respetar es que ningún espectador situado en la platea debe encontrarse a una distancia del escenario superior a, aproximadamente, 30 m. En los anfiteatros y/o balcones la distancia puede ser mayor, pudiéndose incluso llegar a los 40 m, siempre y cuando las paredes y el techo proporcionen primeras reflexiones importantes al público allí situado. Esta máxima distancia se establece tanto por motivos acústicos como visuales.

Finalmente, cabe comentar que la teoría revisada de Barron y Lee no simplifica, por sí misma, el diseño de salas de conciertos. Sin embargo, sí que resulta útil como referencia de los niveles habituales que se deben esperar en una sala. Si los valores medidos en ciertos puntos de una nueva sala se apartan ostensiblemente de lo que predice la teoría, ello querrá decir que la sonoridad en los mismos será incorrecta. Conviene recordar que, según Barron, una sonoridad insuficiente también es motivo de una intimidad acústica deficiente.

5.5.8 Criterios para conseguir una amplitud aparente de la fuente sonora óptima

De acuerdo con lo expuesto en el apartado 5.2.8, la existencia de primeras reflexiones laterales importantes (LF_{E4} elevado) hace que aumente el grado de disimilitud entre los sonidos que llegan a los dos oídos ($1-IACC_{E3}$ igualmente elevado). Ambos hechos producen un aumento de la amplitud aparente de la fuente sonora ASW y, por tanto, del grado de impresión espacial del sonido en la sala. Por otra parte, y según se ha comentado en los apartados 5.5.2 y

5.5.7, dicho tipo de reflexiones también produce un aumento de claridad musical (C_{80} mayor), de sonoridad (G mayor) y, en muchos casos, de intimidad acústica (t_i menor).

En principio, cualquier superficie de una sala es susceptible de proporcionar primeras reflexiones a alguna zona de público. Ahora bien, Ando demostró mediante una serie de experimentos que llevó a cabo a principios de los 80 que, desde el punto de vista de la impresión espacial del sonido, las primeras reflexiones más importantes son las que llegan a los oídos de los espectadores con un ángulo entre 35° y 75° (respecto al plano vertical que pasa a través suyo y del centro del escenario). Se trata, pues, de primeras reflexiones laterales.

Dicho tipo de reflexiones pueden ser generadas por las barandillas correspondientes a los anfiteatros o balcones, diseñadas con formas específicas a tal fin, por las paredes laterales de las salas con una forma rectangular, o bien, por reflectores especiales colocados sobre las paredes laterales.

Actualmente existen tres tipos de diseños que aseguran una impresión espacial óptima:

- La sala clásica de planta rectangular, relativamente estrecha. Como ya se ha comentado anteriormente, las salas más representativas con una planta de este tipo son las siguientes: Viena Musikvereinssaal, Amsterdam Concertgebouw y Boston Symphony Hall.
- La utilización de paneles reflectantes separados de las paredes laterales y con una inclinación adecuada para generar primeras reflexiones útiles a todas las zonas de público. En ocasiones, y a fin de evitar la aparición de coloraciones tonales, las superficies de dichos paneles se recubren con difusores de residuo cuadrático QRD. Dicha solución se ha adoptado, entre otras, en las siguientes salas: Christchurch Town Hall de Nueva Zelanda, Sala Pléyel de París y Segerstrom Hall de Costa Mesa, California.
- El diseño con terrazas trapezoidales: el público se sitúa en diferentes niveles, a modo de terrazas. Las paredes de cada terraza proporcionan primeras reflexiones laterales a las terrazas adyacentes. Dicha solución se ha adoptado, entre otras, en las siguientes salas: Tokyo Suntory Hall, Segerstrom Hall de Costa Mesa y Berlin Philharmonie Hall (curiosamente, en esta última, el valor de $(1-IACC_{E3})$ es solamente de 0,46, por lo que dicho parámetro predice de forma incorrecta el buen grado de impresión espacial de la sala).

Por otra parte, aunque resulte paradójico, también es posible conseguir una impresión espacial elevada mediante la utilización de muchos reflectores suspendidos del techo. Lógicamente, los valores del parámetro $(1-IACC_{E3})$ obtenidos con esta solución suelen ser habitualmente bajos. Dicha solución se ha adoptado, entre otras, en las siguientes salas: Lenox Tanglewood Music Shed de Massachusetts (EE.UU.), Sala Nezahualcoyotl de Ciudad de Méjico (Méjico) y St. David's Hall de Cardiff (Gran Bretaña).

El diseño de paneles suspendidos del techo es bastante crítico debido a la dificultad que entraña conseguir un equilibrio entre el sonido reverberante y las primeras reflexiones proporcionadas por los mismos. Si la densidad de paneles es demasiado grande, el espacio situado por encima se comportará como una segunda sala acústicamente acoplada a la primera. En cambio, si es demasiado pequeña, su efecto será prácticamente despreciable, ya que la energía reflejada será baja.

Parece ser que la relación más adecuada entre el área de los paneles y el área total del círculo que los engloba se halla alrededor de 0,50. De todas formas, este valor todavía no se puede considerar definitivo.

5.5.9 Criterios para conseguir un sonido envolvente óptimo

La existencia de irregularidades y/o ornamentación en una sala hace que aumente el grado de difusión del sonido en la misma y, por consiguiente, que el sonido sea más envolvente (LEV alto). Ello, a su vez, produce un aumento de la impresión espacial del sonido en la sala. Es el caso de las salas de conciertos clásicas, repletas de molduras decorativas, estatuas y techos artesonados, cuyos últimos exponentes datan de finales del siglo XIX y principios del XX coincidiendo con la llegada del Movimiento Modernista (las salas de Viena, Amsterdam y Boston citadas anteriormente, así como el Palau de la Música Catalana de Barcelona, son un ejemplo).

Con objeto de lograr un elevado grado de difusión, es preciso seguir las siguientes indicaciones:

- Dar la mínima inclinación posible a la superficie ocupada por las sillas de manera que el sonido pueda llegar a todas las paredes.
- En caso de que sean necesarios, diseñar anfiteatros y/o balcones con poca profundidad.
- Incorporar irregularidades, principalmente en las paredes laterales y/o en el techo. En los apartados 2.4 y 5.5.2.2 se han mostrado dos salas con techos altamente difusores.
- Evitar que las partes frontales e inferiores de los anfiteatros y balcones sean planas.

Otra manera de conseguir una óptima difusión es utilizando difusores QRD, difusores MLS, o bien difusores policilíndricos (apartado 2.4.1).

Según se ha mencionado en el apartado 5.2.9, en la actualidad no existe ningún parámetro medible que esté directamente relacionado con el grado de difusión del sonido. Ante tal hecho, el grado de difusión de una sala se puede determinar a través de una inspección visual de la misma con objeto de averiguar el grado de irregularidades existentes en las paredes y en el techo. De dicha inspección, y siguiendo las directrices expuestas en el mencionado apartado, se obtiene el valor del índice de difusión SDI, propuesto por Haan y Fricke.

A continuación se dan unos criterios prácticos con el fin de facilitar la asignación del correspondiente peso a cada superficie (paredes y techo), en función de la cantidad de irregularidades que presente:

a) Difusión alta (peso = 1)

- Techos artesonados sin materiales absorbentes y con entrantes pronunciados (profundidad superior a 10 cm)
- Elementos difusores aleatorios (con una profundidad superior a 5 cm) distribuidos sobre toda la superficie del techo o paredes

Ejemplos de salas consideradas visualmente como altamente difusas: Viena Musikvereinssaal, Boston Symphony Hall, Bonn Beethovenhalle y Salzburg Festspielhaus.

b) Difusión media (peso = 0,5)

- Superficies irregulares del tipo diente de sierra o similar
- Tratamiento decorativo a base de relieves poco pronunciados (con profundidades inferiores a 5 cm)

Ejemplos de salas consideradas visualmente como medianamente difusas: Chicago Orchestra Hall, Copenhague Tivoli Koncertsal, Munich Herkulessaal y Berlin Philharmonie.

c) Difusión baja (peso = 0)

- Grandes superficies lisas y planas (o ligeramente convexas)
- Aplicación de materiales absorbentes sobre un porcentaje elevado de superficies

Ejemplos de salas consideradas visualmente como escasamente difusas: Detroit Ford Auditorium, Sender Freies Berlin Hall y Bristol Colston Hall.

Como conclusión final, destacar la importancia de la existencia de una elevada difusión del sonido en una sala de conciertos a pesar de que, por el momento, no existe ninguna medida objetiva de su efectividad. Ello significa que, al diseñar una nueva sala de conciertos, es preciso prestar especial atención al diseño de irregularidades, principalmente en las paredes laterales y en el techo.

De todas formas, según Barron, la existencia de irregularidades en todas y cada una de las superficies de una sala no garantiza, por sí sola, una calidad acústica final óptima.

5.5.10 Criterios para prevenir o eliminar la coloración tonal

276

Según lo comentado en el apartado 5.3.1, la calidad tonal puede ser alterada de diferentes formas, dando lugar al fenómeno denominado coloración tonal. La coloración tonal más molesta es, sin lugar a dudas, la producida por la presencia de grandes superficies planas y lisas, bien sea en las paredes laterales de la sala, o bien, en forma de paneles reflectantes suspendidos del techo, ya que el sonido reflejado por ellos adquiere una cierta dureza.

La coloración tonal puede ser corregida de una de las siguientes maneras:

- Añadiendo suaves irregularidades a las diferentes superficies consideradas como especialmente conflictivas (en las salas construidas en los siglos XVIII y XIX, tales irregularidades eran proporcionadas por esculturas y ornamentaciones). A modo de ejemplo, en las figuras 5.44 y 5.45 se observan, respectivamente, dos diseños realizados por el Instituto Takenaka para las paredes laterales (bajo el anfiteatro) y para el tornavoz del Hamarikyu Asahi Hall de Tokio (Japón). En este caso, la difusión empieza a la frecuencia de 1.000 Hz y alcanza un máximo a 4.000 Hz.

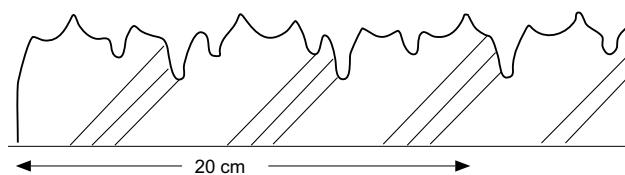


Fig. 5.44 Irregularidades introducidas sobre la superficie de las paredes laterales situadas bajo el anfiteatro del Hamarikyu Asahi Hall, Tokio, Japón (corte transversal)

- Proporcionando una cierta convexidad a las superficies conflictivas. En el caso de paneles reflectantes, se considera que el radio de curvatura mínimo para que sigan actuando como elementos generadores de primeras reflexiones es de 5 m. Obviamente, cuanto menor sea dicho radio, mayor será la zona de cobertura del panel asociado y menor la energía correspondiente a cada reflexión. Para radios menores que 5 m, el reflector se convierte en un difusor policilíndrico (apartado 2.4.1).
- Colocando difusores MLS o QRD sobre las superficies más problemáticas (apartados 2.4.2.1 y 2.4.2.2).

Cualquiera de las actuaciones anteriores también puede ser efectiva para atenuar, y a veces incluso eliminar, ecos y focalizaciones del sonido.

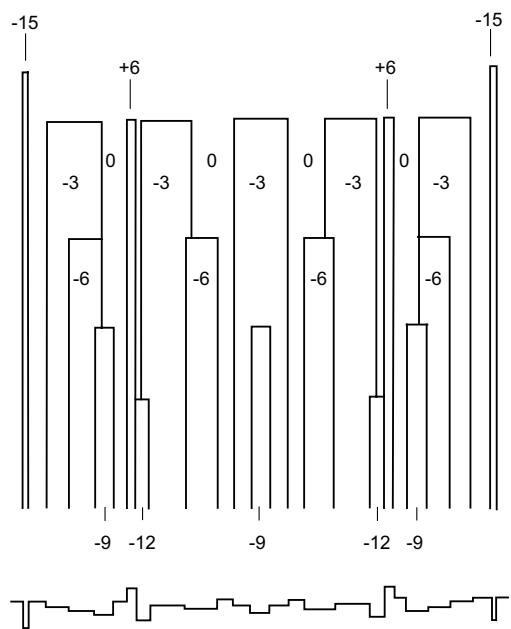


Fig. 5.45 Irregularidades introducidas sobre la superficie del tornavoz del Hamarikyu Asahi Hall (Tokio, Japón)

5.5.11 Criterios para prevenir o eliminar ecos y focalizaciones del sonido

5.5.11.1 Ecos

Además de las actuaciones descritas en el apartado anterior, las posibles soluciones para prevenir o eliminar ecos coinciden con las expuestas en el apartado 4.7.10.1.

5.5.11.2 Focalizaciones del sonido

Las posibles soluciones genéricas para prevenir o eliminar focalizaciones del sonido coinciden con las expuestas en el apartado 4.7.10.2.

Seguidamente se exponen dos conocidos ejemplos de focalizaciones en dos salas famosas a nivel mundial, así como las acciones emprendidas para eliminarlas.

a) Royal Albert Hall, Londres (Gran Bretaña)

Inaugurada en 1.871, esta sala de forma casi elíptica tiene un volumen de 86.650 m³, cuatro veces mayor que la sala más grande perteneciente al grupo de las consideradas como mejores del mundo. Su capacidad es de 5.080 asientos, más 1.000 localidades adicionales de pie (figura 5.46).



Fig. 5.46 Royal Albert Hall (Londres, Gran Bretaña)

Uno de los principales problemas que presentaba dicha sala antes de las modificaciones llevadas a cabo a finales de los 60 eran las intensas focalizaciones sobre la zona de público producidas por la extensa cúpula existente.

Después de diversos intentos más o menos efectivos para solucionar dicha problemática, se vio que no bastaba colocar material absorbente por debajo de la superficie cóncava, sino que resultaba imprescindible suspender del techo un conjunto de 134 difusores convexos o “platillos volantes” (figura 5.47).



Fig. 5.47 Difusores convексos o “platillos volantes” en el Royal Albert Hall (Londres, Gran Bretaña)

Adicionalmente, en la parte superior de los mismos se colocó material absorbente con un doble objetivo: por una parte, uniformizar el tiempo de reverberación con la frecuencia y, por otra, aumentar su propia eficacia mediante la absorción del sonido remanente reflejado por el techo.

Además de eliminar las focalizaciones de forma prácticamente total, la presencia de los difusores sirvió para proporcionar primeras reflexiones a las zonas de público más elevadas y distantes del escenario. Esta actuación, conjuntamente con la incorporación previa (en 1.941) de una serie de reflectores sobre la orquesta para reforzar el sonido en la zona de platea, supuso una sustancial mejora de la uniformidad y de la claridad del sonido en la sala (figura 5.48).

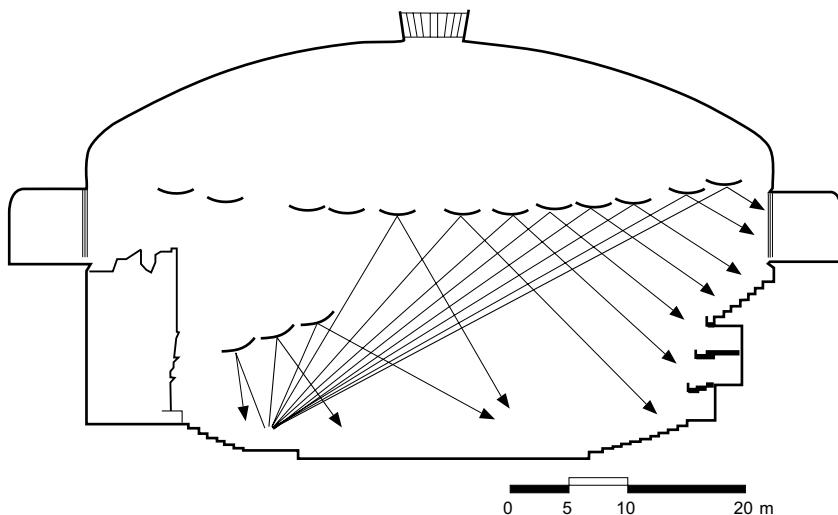


Fig. 5.48 Sección longitudinal del Royal Albert Hall mostrando las reflexiones producidas por los difusores convexas y por los reflectores situados sobre la zona de la orquesta

b) Philharmonic Hall, Nueva York, EE.UU. (actualmente Avery Fisher Hall)

Inaugurada en 1.962, esta sala está indefectiblemente relacionada con el desastre acústico más grande de este siglo. La enorme cantidad de críticas recibidas inmediatamente después de su inauguración dio origen a una serie de modificaciones que fueron acometidas de forma secuencial. Finalmente, y gracias a la generosidad de Avery Fisher, se llevó a cabo una reconstrucción completa del recinto. La nueva sala, denominada Avery Fisher Hall en reconocimiento a su benefactor, abrió sus puertas en 1.976.

Uno de los muchos defectos acústicos que presentaba la sala en un inicio era, precisamente, de focalización del sonido. En efecto, la pared posterior de la sala tenía una forma cóncava, tanto en planta como en sección. Tal circunstancia, junto con la escasa inclinación de la platea, daba lugar a la aparición de ecos en el escenario. Además, la curvatura de las paredes laterales provocaba una ausencia de primeras reflexiones en muchas de las localidades de platea y, asimismo, producía una focalización en la parte posterior de la sala (figura 5.49).

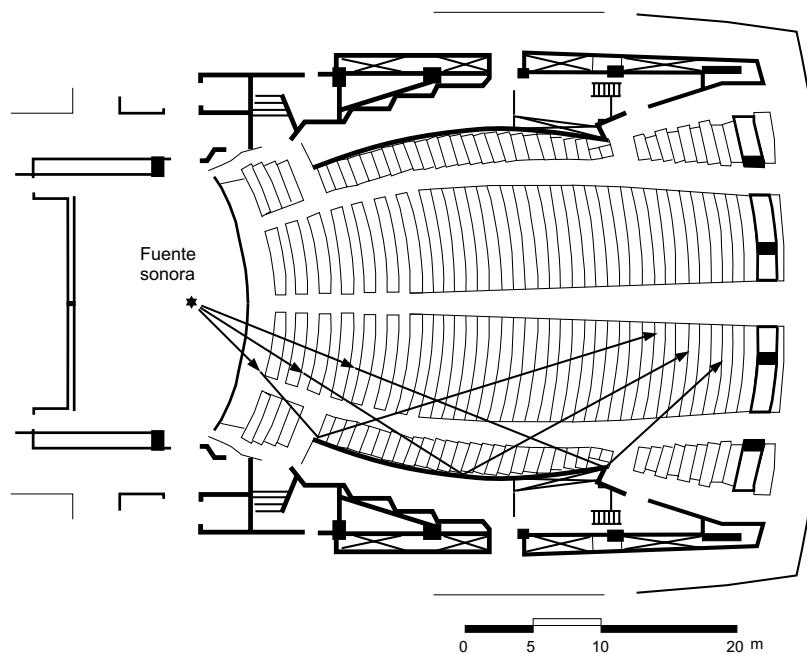


Fig. 5.49 Reflexiones laterales en la zona de platea de la Philharmonic Hall (Nueva York, EE.UU.)

280

En la actualidad, dichas focalizaciones han desaparecido por completo debido a la forma rectangular de la nueva sala (figura 5.50).



Fig. 5.50 Avery Fisher Hall (Nueva York, EE.UU.)

5.5.11.3 Eco flotante

Las posibles soluciones para prevenir o eliminar un eco flotante coinciden con las expuestas en el apartado 4.7.10.3.

5.5.12 Criterios de diseño del escenario

El campo sonoro dentro de la orquesta es extremadamente complejo y, probablemente, imposible de describir con detalle a causa de su dependencia de una serie de factores relacionados entre sí, tales como la orquestación de cada pieza, la directividad y potencia sonora de cada instrumento, la disposición de la orquesta sobre el escenario, la posible utilización de tarimas, el comportamiento acústico de las superficies reflectantes que rodean a los músicos y, también, la acústica de la sala.

A modo de ejemplo, en la figura 5.51 se observa la extrema variabilidad de la directividad de un violín según la frecuencia, a partir de los 500 Hz (según Meyer).

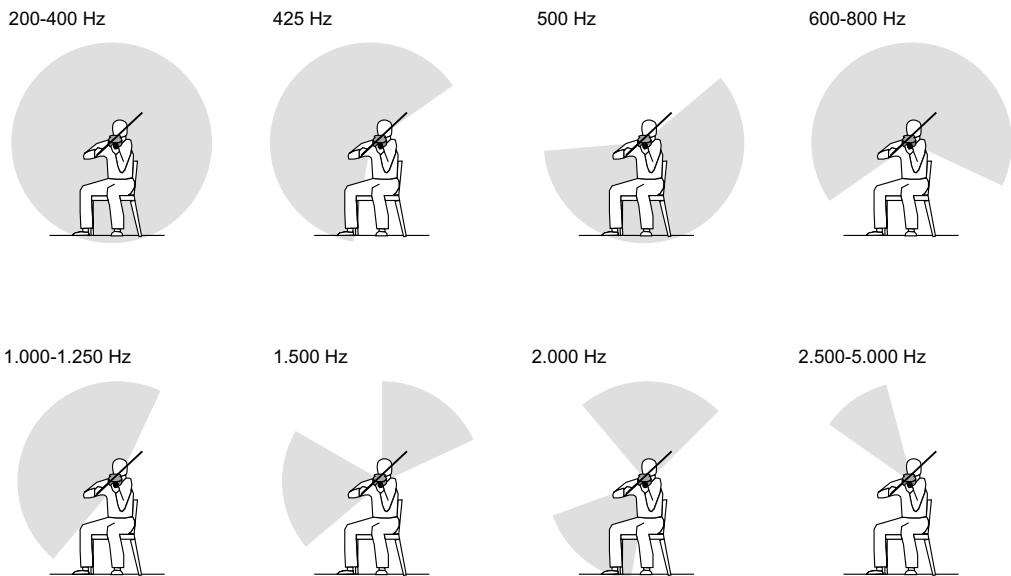


Fig. 5.51 Principales direcciones de radiación de un violín para frecuencias entre 200 Hz y 5.000 Hz (según Meyer)

En cuanto a la potencia sonora, el nivel de potencia radiada por los instrumentos de metal es, en general, 10 dB más elevado que el correspondiente a los instrumentos de viento y éste, a su vez, es del orden de 3 dB superior al asociado a los instrumentos de cuerda.

Otra información complementaria relacionada con la radiación de la orquesta es la siguiente:

- La potencia sonora radiada por una orquesta sinfónica interpretando un “fortissimo” (fff en nomenclatura musical) es de unos 2,5 W (100.000 veces la de la voz humana). Ello equivale a un nivel de presión sonora en el espacio libre de 93 dB SPL a una distancia de 10 m de la fuente sonora, suponiendo que radia omnidireccionalmente.
- El margen dinámico de la orquesta, o diferencia entre el nivel de presión sonora correspondiente al pasaje más fuerte y el asociado al pasaje más débil, es del orden de 60 dB.

Por otra parte, no es hasta principios de los años 80 que las necesidades acústicas de los músicos han sido objeto de investigación sistemática. En la actualidad es posible determinar de forma objetiva la calidad acústica del escenario, desde el punto de vista del músico, mediante la medida del parámetro denominado soporte objetivo ST1 (apartado 5.2.10.1).

Para satisfacer las necesidades de los músicos es preciso diseñar correctamente tanto el escenario como las superficies más próximas al mismo, ya que dichos elementos (que constituyen lo que se denomina “sending end” de la sala) tienen una máxima influencia sobre las dos principales preocupaciones de los músicos: escucharse a sí mismos y al resto de miembros integrantes de la orquesta. De hecho, tales elementos son los encargados de producir un adecuado balance entre las diferentes secciones de la orquesta, así como una correcta fusión entre todos los instrumentos (apartado 5.2.10.2).

Obviamente, las superficies que rodean el escenario pueden ser asimismo utilizadas para proporcionar reflexiones a la zona de público, si bien ésta no es su función primordial.

5.5.12.1 Características del escenario

a) Superficie y forma del escenario

La elección de la superficie del escenario supone un compromiso entre las necesidades acústicas de los músicos y el grado de confort requerido. Al igual que ha ocurrido con el público, la superficie demandada por los músicos por motivos de comodidad ha ido en aumento durante los últimos años. Además, su tendencia habitual es ocupar todo el espacio disponible del escenario y, asimismo, colocarse lo más cerca posible del público.

Sin embargo, el hecho de situarse sobre una gran superficie supone incrementar las distancias entre ellos y, por consiguiente, reducir el grado de comunicación acústica. Gade ha comprobado que, para distancias superiores a 8 m, el retardo del sonido directo (unos 23 ms) puede llegar a reducir la capacidad de interpretación conjunta.

Igualmente, el hecho de desplazarse hacia la zona de público resulta desaconsejable, puesto que ello supone desaprovechar las reflexiones útiles provenientes de la pared posterior y/o el techo del escenario.

Beranek propuso en 1.962 una superficie media de 1,9 m² por músico. Ello significaba disponer de 190 m² para una orquesta de 100 profesores.

Estudios más recientes llevados a cabo por Gade (1.989) recomiendan las superficies netas por músico y tipo de instrumento indicadas en la tabla 5.7.

Violín, viola e instrumentos de viento pequeños	1,25 m ²
Violoncelos e instrumentos de viento de gran tamaño	1,50 m ²
Contrabajo	1,80 m ²
Timbales	10,00 m ²
Otros instrumentos de percusión	20,00 m ²

Tabla 5.7 Superficies netas requeridas por músico y tipo de instrumento (según Gade)

Esto significa que para una orquesta de 100 músicos, el área requerida es del orden de 150 m². Si se sigue el criterio de Beranek y se construye un escenario de 190 m², el espacio sobrante podrá ser utilizado por solistas, por instrumentos de percusión adicionales, o incluso, como zona de paso.

Una posible composición de una orquesta sinfónica de gran tamaño, así como la distribución de los correspondientes instrumentos en el escenario, se indican en la tabla 5.8 y en la figura 5.52, respectivamente.

SECCIÓN DE CUERDA	SECCIÓN DE VIENTO-MADERA	SECCIÓN DE VIENTO-METAL	SECCIÓN DE PERCUSIÓN	OTROS
15 primeros violines	4 flautas	4 trompas (cornos franceses)	4 timbales	2 arpás
16 segundos violines	1 pícolo	3 trompetas	1 bombo	1 piano
13 violas	2 oboes	3 trombones	1 gong	
12 violoncelos	2 cornos ingleses	1 tuba	1 tarola	
8 contrabajos	3 clarinetes	1 cornetín	1 platillos	
	1 clarinete bajo		1 castañuelas	
	2 fagotes		1 triángulo	
	2 contrafagotes		1 xilófono	
			1 campanas tubulares	

Tabla 5.8 Composición de una orquesta sinfónica de gran tamaño

Por lo que al coro se refiere, Gade propone reservar 0,5 m² por cada persona sentada. Por lo tanto, para un coro formado por 100 personas, serán necesarios 50 m² adicionales.

En cuanto a las dimensiones del escenario, no es conveniente que sea ni muy ancho ni muy profundo.

Cuando el escenario es demasiado ancho, los oyentes situados en los dos extremos laterales de la sala reciben el sonido procedente de los instrumentos más alejados con un retardo excesivo en relación con los más cercanos, lo cual puede producir una merma en el grado de fusión percibido. Además, un exceso de anchura puede crear dificultades al director en su cometido de conseguir una buena conjunción entre las diferentes secciones de la orquesta.

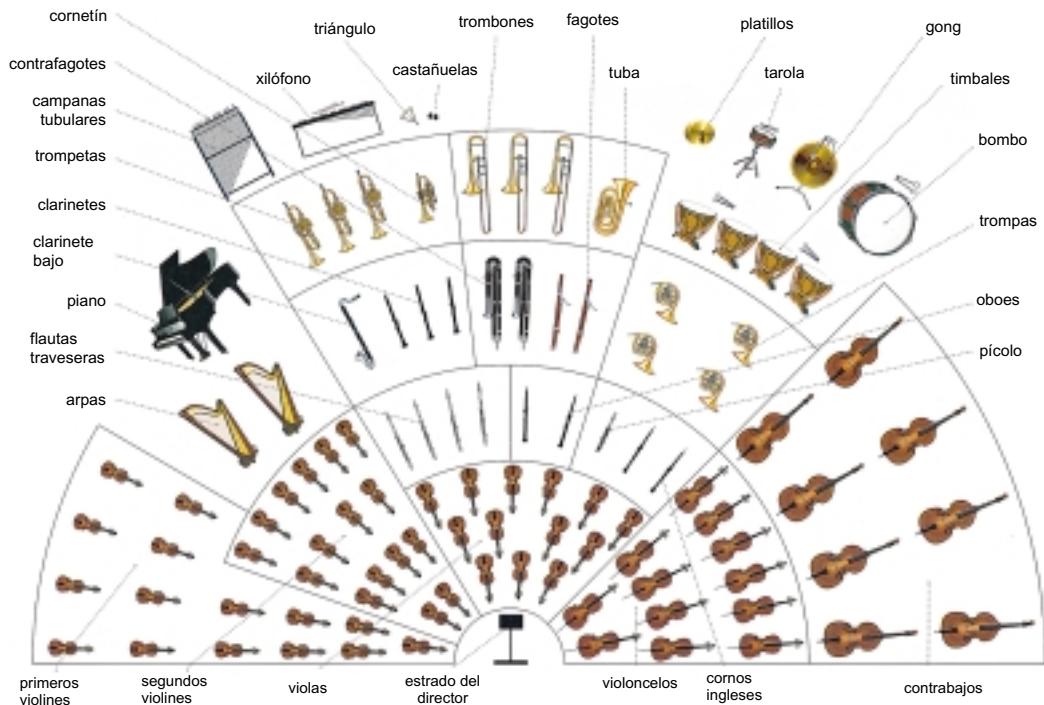


Fig. 5.52 Distribución de los instrumentos correspondientes a una orquesta sinfónica de gran tamaño

Si es demasiado profundo, el sonido de los instrumentos situados en la parte posterior del escenario llega igualmente demasiado retardado a los oyentes con respecto a los que se hallan en la parte delantera.

Con objeto de evitar los inconvenientes mencionados y, a la vez, garantizar un superficie de aproximadamente 190 m², se recomienda que la superficie del escenario para una orquesta de música sinfónica tenga una forma rectangular, con una anchura media máxima del orden de 17 m y una profundidad media de, aproximadamente, 11 m.

Como referencia, la superficie media de los escenarios correspondientes a 28 prestigiosas salas de conciertos a nivel internacional, construidas con posterioridad al año 1.962, es de 203 m², mientras que su profundidad media es de 12,8 m. En cambio, la superficie media de los escenarios correspondientes a las tres salas de conciertos consideradas unanimemente como mejores del mundo (Viena Musikvereinssaal, Amsterdam Concertgebouw y Boston Symphony Hall) construidas antes de 1.901, es de solamente 158 m², y su profundidad de 10,7 m.

En cuanto a la altura del escenario sobre el patio de butacas, ésta debe ser mayor que 0,5 m sin superar los 1,2 m, ya que por encima de dicho valor aparecen problemas de falta de visibilidad de la orquesta, especialmente para todos aquellos espectadores situados en las primeras filas de platea.

Por otro lado, la utilización de tarimas para las últimas filas de músicos es necesaria, a fin de conseguir una buena conjunción entre todos ellos, en especial cuando se trata de grandes orquestas. En efecto, cuando un grupo de músicos situado en la parte posterior del escenario se halla a un nivel más elevado que el resto, el sonido directo emitido por el mismo se propaga más libremente hacia los músicos más distantes, lo cual facilita dicha conjunción. Según se ha comentado anteriormente, una separación superior a 8 m puede llegar a ser problemática, y mucho más si el sonido directo es débil debido a la falta de visión directa entre los músicos. En la tabla 5.9 se indican las anchuras recomendadas para las tarimas.

Instrumentos de viento pequeños e instrumentos de madera	1,25 m
Violoncelos e instrumentos de metal	1,40 m
Timbales e instrumentos de percusión	2,80 m
Persona del coro sentada	0,80 m

Tabla 5.9 Anchuras recomendadas para las tarimas

La altura de las tarimas puede ser relativamente pequeña: del orden de 100 mm para las tarimas correspondientes a los instrumentos de madera, y ligeramente superior en el caso de los instrumentos situados en la parte posterior del escenario.

b) Paredes laterales y posterior del escenario

En el caso de que no exista caja de escenario, y por lo tanto, no se dé la posibilidad de disponer de concha acústica, las paredes situadas alrededor del escenario deben estar orientadas de manera que reflejen energía hacia los músicos. Con el fin de evitar atenuaciones de energía indeseables, es conveniente que las reflexiones generadas no sigan caminos paralelos al suelo. Para ello, se puede dar una inclinación a la parte superior de las paredes o, incluso, colocar balcones alrededor del escenario, a una altura de unos 4 m y con una anchura de 1 m. En este último caso, se generarán reflexiones de segundo orden en el conjunto formado por la parte inferior del balcón y la pared vertical adyacente. Si, además, existen barandillas con una adecuada inclinación hacia la zona de los músicos, también se crearán reflexiones de primer orden.

En ocasiones, el escenario está rodeado de asientos destinados al público. Es el caso, por ejemplo, de la Berlin Philharmonie, del Auditorio Nacional de Madrid y del Auditorio Manuel de Falla de Granada.

Es sabido que en dichos asientos existen problemas acústicos debidos básicamente al efecto de sombra producido por los cuerpos de los músicos. De todas formas, para la mayor parte del público, estas pequeñas imperfecciones acústicas se ven claramente compensadas por la posibilidad de observar de cerca la cara y los movimientos del director.

El único problema acústico destacable se presenta cuando actúan uno o más cantantes junto con la orquesta. Ello se debe a las características direccionales de sus voces, así como a la falta de visión directa de sus caras.

c) Techo del escenario

La superficie más efectiva para proporcionar primeras reflexiones a los músicos es el techo.

La Boston Symphony Hall dispone de caja de escenario, que funciona a modo de concha acústica. La altura media del techo sobre el escenario es de 13 m y su inclinación de 15°. Dicho techo, junto con la parte inferior del órgano de tubos existente, actúan como reflectores de energía hacia la orquesta.

La Viena Musikvereinssaal no tiene caja de escenario pero, en cambio, dispone de un balcón que rodea el escenario y genera intensas primeras reflexiones hacia la orquesta. La altura media del techo sobre los músicos es de 15,2 m y, por tanto, es claramente mayor que la de Boston.

La Amsterdam Concertgebouw es un caso especial, puesto que no dispone ni de caja de escenario ni de balcón perimetral. Además, la presencia de público detrás y a los lados de los músicos significa que estos no reciben soporte de ninguna pared (ello se pone de manifiesto a través del valor extremadamente bajo del parámetro ST1 = -17,8 dB). Por último, la altura media del techo es de 16,8 m, la mayor de las tres. Aparentemente, la falta de soporte no es molesta para la mayor parte de directores.

Por lo general, en las salas que carecen de caja de escenario y de balcones alrededor del escenario, y que disponen de techos elevados, suele ser necesario suspender un conjunto de reflectores sobre el escenario. Para que su efectividad sea máxima, deben colocarse a una altura de unos 6 m, sin superar los 8 m.

En cuanto a sus dimensiones, hay que tener presente que la energía reflejada por una superficie reflectante, a una cierta frecuencia, depende de la relación entre su tamaño y la longitud de onda λ asociada. La reflexión total tiene lugar a altas frecuencias (tamaño $\gg \lambda$), y a medida que la frecuencia disminuye (longitud de onda mayor), también lo hace la cantidad de energía reflejada, ya que se produce un efecto de difracción del sonido (apartado 2.3.1).

Según investigaciones llevadas a cabo por Rindel, parece ser que es preferible utilizar muchos elementos de pequeño tamaño a utilizar pocos y de tamaño mayor. Rindel ha comprobado que, con un grado de perforación del 50 % (porcentaje de la superficie total de reflectores con respecto a la superficie del escenario), es posible reflejar las bajas frecuencias con un conjunto de elementos de superficie igual a 1,5 m², siempre y cuando su colocación sea la adecuada. Esta combinación produce una cobertura uniforme y poca coloración tonal, especialmente si se les da una forma ligeramente convexa.

De todas formas, para garantizar la ausencia total de coloraciones, es aconsejable generar reflexiones desde diferentes superficies (reflectores suspendidos del techo, balcones perimetrales y paredes laterales).

5.5.12.2 Materiales recomendados en la construcción del escenario

a) Suelo del escenario

En general, los músicos prefieren un suelo de madera flexible montada sobre una cavidad de aire porque, según ellos, dicha construcción proporciona un sonido “cálido”. El proceso físi-

co que explica esta sensación ha sido objeto de diversas investigaciones, como las de Askenfeld en 1.986. De hecho, básicamente tienen lugar dos procesos de efectos contrapuestos. Por una parte, el suelo actúa como amplificador de los instrumentos que están en contacto directo con el mismo (contrabajos y violoncelos) y, además, genera una vibración estructural que facilita la comunicación entre los músicos. Por contra, absorbe sonido aéreo de baja frecuencia, ya que actúa como un resonador de membrana (apartado 2.2.5.1).

A pesar de que los estudios realizados hasta el momento no ofrecen resultados concluyentes en favor de un determinado tipo de suelo, parece lógico atender las peticiones de los músicos en el sentido de que puedan disponer de un suelo acústicamente “vivo”. Ello significa utilizar para su construcción un material reflectante, tipo parquet o similar, de poco grosor (de 20 a 25 mm), soportado por unas vigas con la máxima separación posible por motivos de carga.

b) Paredes laterales y posterior del escenario

En caso de que no exista caja de escenario, conviene utilizar madera con un grosor superior a 25 mm y densidad media o alta ($\geq 400 \text{ Kg/m}^3$), a menos que se tenga la certeza de que está perfectamente adherida a una superficie gruesa y lisa de hormigón o ladrillo. En tal caso, bastaría con hacer uso de una lámina delgada de madera. Este criterio coincide con el expuesto en el apartado 5.5.6 en relación con las paredes laterales y el techo de la sala.

Por otra parte, a menudo se recomienda colocar pequeñas cantidades de material absorbente sobre las paredes próximas a los instrumentos de metal y de percusión con objeto de atenuar el elevado nivel sonoro que emiten. Otra forma de controlar su nivel consiste en omitir los reflectores correspondientes a la parte posterior del escenario.

También resulta conveniente dotar a las paredes de un cierto grado de difusión para evitar concentraciones de sonido que podrían ir en detrimento del balance y del grado de conjunción de la orquesta. La difusión se puede conseguir dando formas convexas a las superficies o, de forma más controlada, mediante la utilización de difusores QRD.

5.5.13 Criterios de diseño de la concha acústica

Cuando existe caja de escenario, habitualmente las paredes laterales y techo de la misma no son útiles para crear primeras reflexiones importantes hacia los músicos a causa de la excesiva distancia entre dichas superficies y la orquesta.

Por otra parte, la existencia de la caja va normalmente asociada al carácter plurifuncional de la sala. La presencia de bambalinón, bambalinas, patas y demás elementos propios de la utilización de la sala como teatro dificulta aún más la generación de primeras reflexiones útiles.

En tal caso, es necesario diseñar una estructura desmontable a base de superficies reflectantes y rígidas capaces de generar tales reflexiones. Es la denominada concha acústica (figura 5.53).

La concha acústica debe diseñarse de tal manera que su volumen forme parte del mismo espacio acústico que la sala. Si actúa como un espacio completamente independiente, los

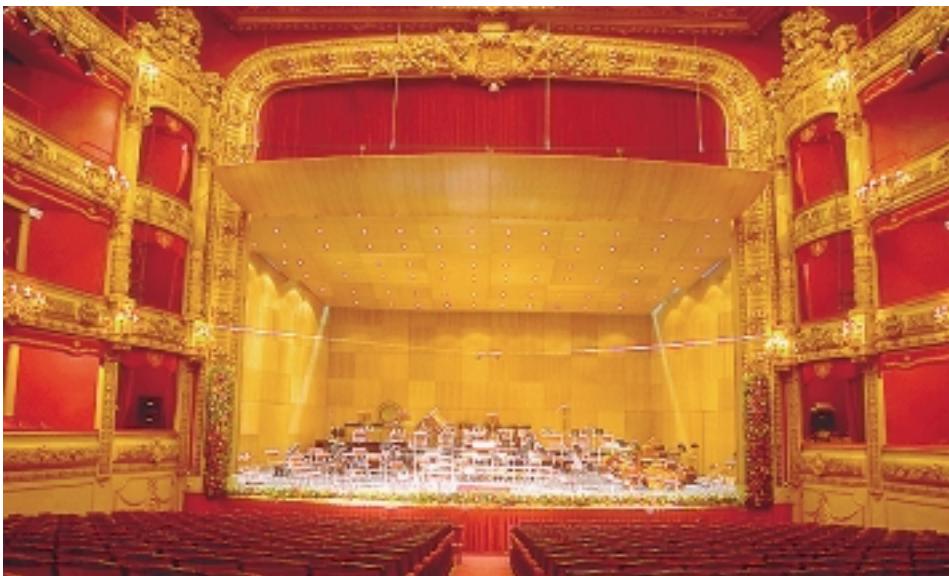


Fig. 5.53 Concha acústica del Teatro Victoria Eugenia (San Sebastián, España)

músicos experimentarán una falta de contacto con la sala. Desde un punto de vista objetivo, el valor de EDT_{mid} en el escenario no debe ser nunca inferior al 70% de los valores correspondientes a la sala.

Por otra parte, una concha demasiado pequeña puede llegar a provocar un exceso de energía de primeras reflexiones, con lo cual los músicos tenderán a tocar de una forma demasiado

suave. Por contra, un exceso de volumen puede suponer un alejamiento de las paredes y del techo de la concha de la zona reservada a los músicos, reduciéndose la efectividad de la misma. Resulta, pues, evidente que en cada caso será preciso alcanzar el punto de equilibrio óptimo.

5.5.13.1 Definición de las formas de la concha acústica

Se recomienda que el diseño de la concha acústica se base en una estructura totalmente modular, de fácil y rápida instalación, tanto para las paredes como para el techo de la misma.

Siempre que sea posible, es conveniente prever diversas configuraciones de montaje con objeto de proporcionar la flexibilidad necesaria para adaptarse a diferentes tamaños de orquesta, optimizando en cada caso la superficie de escenario.

Las tres configuraciones básicas sugeridas corresponden a los siguientes tamaños de orquesta:

- Orquesta sinfónica de gran tamaño: del orden de 100 músicos + coro
- Orquesta sinfónica de tamaño medio: entre 40 y 60 músicos
- Conjuntos de música de cámara o solistas

Si bien las dimensiones concretas asociadas a cada configuración dependerán en cada caso del espacio disponible en la caja de escenario, se recomienda seguir las siguientes indicaciones para todas ellas:

- Las paredes laterales deberán tener forma de abanico de manera que la anchura de la pared posterior sea menor que la abertura correspondiente a la parte más próxima al proscenio (figura 5.54).
- El techo deberá tener, igualmente, una inclinación tal que su altura a nivel de la pared posterior sea menor que la correspondiente a nivel de proscenio.
- Orientativamente, ambas inclinaciones estarán comprendidas entre 10° y 15° . Con ello se conseguirá generar primeras reflexiones útiles para los músicos y también para la zona anterior de platea. Se requerirá el uso de módulos desmontables.
- En todas las configuraciones, el acceso al interior de la concha se realizará a través de los paneles laterales y posteriores plegables de los diferentes módulos.

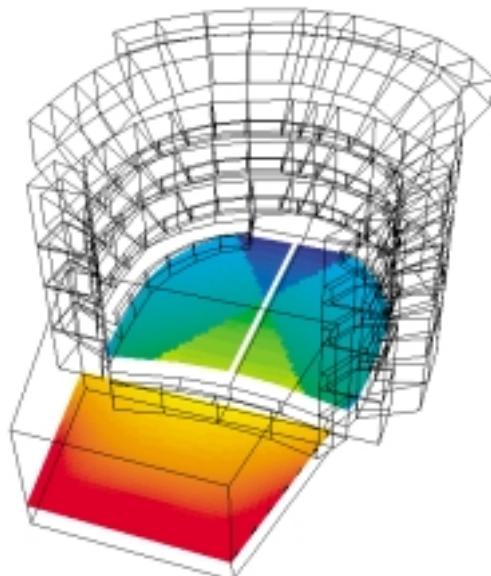


Fig. 5.54 Croquis de la concha acústica del Teatro Victoria Eugenia donde se observa la inclinación de las paredes laterales

5.5.13.2 Estructura de la concha acústica

Si bien existe una gran diversidad de estructuras utilizadas en la construcción de conchas acústicas, a continuación se expone una de las posibles estructuras a modo de ejemplo ilustrativo.

a) Paredes laterales y posterior

Cada una de las paredes de la concha, tanto las laterales como la posterior, estará integrada por un conjunto de módulos independientes. Cada módulo estará basado en una estructura tubular metálica autoportante dotada de ruedas para su transporte y almacenamiento. Estas estructuras deberán estar debidamente contrapesadas de forma que proporcionen la estabilidad y equilibrio necesarios sin necesidad de elementos de soporte adicionales.

Los diferentes módulos se construirán con una tolerancia suficientemente reducida como para obtener un alineamiento correcto entre todos ellos. La unión entre módulos se realizará de forma rígida mediante el uso de abrazaderas o anclajes que garanticen un ajuste hermético.

Cada uno de los módulos de pared estará formado por una torre o estructura central provista de un sistema telescopico que permita abatir la parte superior hasta una altura adecuada para su almacenamiento. La mitad superior de los paneles laterales se plegará hacia delante (sobre la estructura retráctil del elemento central), mientras que la mitad inferior lo hará hacia atrás, sobre la base de dicho elemento.

Este tipo de estructuras tienen un peso bastante grande, lo que hace que su uso quede condicionado a la existencia de un suelo capaz de soportar cargas elevadas. Por otra parte, para facilitar su montaje y almacenamiento es necesario que la superficie sobre la que se apoyen esté correctamente nivelada.

b) Techo

El techo de la concha acústica estará integrado por una serie de paneles modulares. Dichos paneles se suspenderán de las barras escénicas mediante los herrajes y cables apropiados. La disposición de los paneles se adaptará al tipo de configuración utilizada, ya sea para orquesta sinfónica de gran tamaño, orquesta de tamaño medio o conjunto de música de cámara.

Los elementos necesarios para la iluminación del escenario durante los conciertos deberán quedar integrados en la estructura de los diferentes módulos de techo, por lo que deberá realizarse la correspondiente previsión de interconexión entre los módulos, así como las diferentes perforaciones para la instalación de focos.

5.5.13.3 Revestimientos de las superficies interiores de la concha acústica

a) Paneles de madera

A excepción de las zonas en las que se incorporen elementos difusores, según se expone posteriormente, las superficies interiores de la concha acústica estarán revestidas con materiales

muy reflectantes (paneles de madera de abedul o similar) de unos 25 mm de espesor y de una densidad del orden de 20 Kg/m², convenientemente ignifugados con un barniz retardador de llama.

Como ya se ha comentado con anterioridad, la utilización de paneles de densidad y espesor elevados, y su montaje sobre estructuras portantes lo más rígidas posible, es de gran importancia, ya que permite evitar la absorción diafragmática a bajas frecuencias característica del uso de paneles excesivamente ligeros que se comportan como resonadores de membrana. Un exceso de absorción a frecuencias bajas introduce coloraciones no deseadas en el sonido reflejado por las superficies de la concha, provocando un desequilibrio tonal y una falta de calidez acústica.

b) Elementos difusores

La incorporación de elementos difusores en la concha acústica introduce una mejora sustancial en el balance y la fusión entre los diferentes instrumentos de la orquesta. La disposición de estos elementos difusores en el diseño propuesto puede observarse en la figura 5.55.

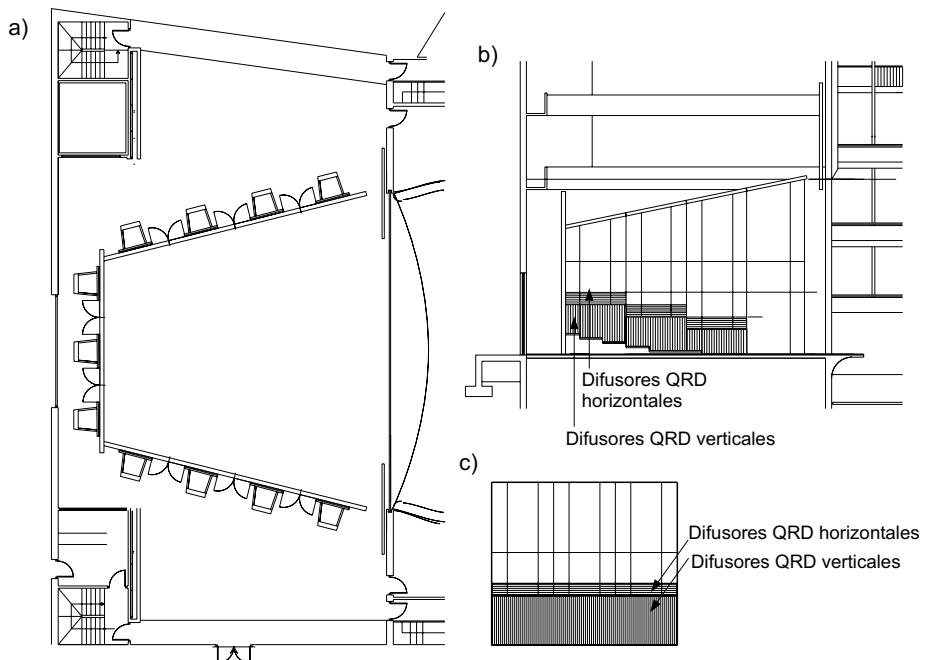


Fig. 5.55 Croquis de una concha acústica para orquestas sinfónicas de gran tamaño con difusores QRD:
a) planta; b) sección longitudinal; c) sección transversal

Los difusores propuestos son del tipo QRD. La incorporación de estos difusores es altamente efectiva cuando se sitúan en la zona posterior de la concha con las ranuras orientadas

verticalmente, puesto que de esta forma gran parte de la energía, que en condiciones normales sería reflejada espectralmente, es dispersada uniformemente en todas las direcciones, contribuyendo a mejorar la comunicación entre los músicos. La altura de estos difusores debe adecuarse a la disposición de las tarimas en el interior de la concha, tal como se observa en el croquis b) de la figura 5.55.

Por encima de los difusores QRD, orientados verticalmente, existe una segunda franja de difusores con las ranuras alineadas en la dirección horizontal. Esta segunda franja cumple la función de proporcionar caminos de reflexión no horizontales entre las secciones de la orquesta, evitando de esta forma la absorción que tiene lugar cuando las reflexiones inciden de forma rasante sobre los músicos.

En la figura 5.56 se presenta una imagen virtual de uno de los conjuntos de difusores QRD utilizados en la concha anterior.



Fig. 5.56 Imagen virtual de uno de los conjuntos de difusores QRD empleados en la concha acústica de la figura 5.55

El diseño de una concha acústica modular permite la adaptabilidad a los distintos tamaños de la orquesta o formación musical, consiguiendo de esta forma que el soporte para los intérpretes sea óptimo en todos los casos. En la figura 5.57 se presenta la concha acústica anterior adaptada para orquestas de tamaño medio y para formaciones de cámara o solistas.

Finalmente, cabe recordar que en la figura 2.84 ya se ha presentado un ejemplo de difusores QRD instalados en el escenario de una sala de conciertos. En concreto, se trata de los QRD de la Joseph Meyerhoff Symphony Hall de Baltimore (EE.UU.).

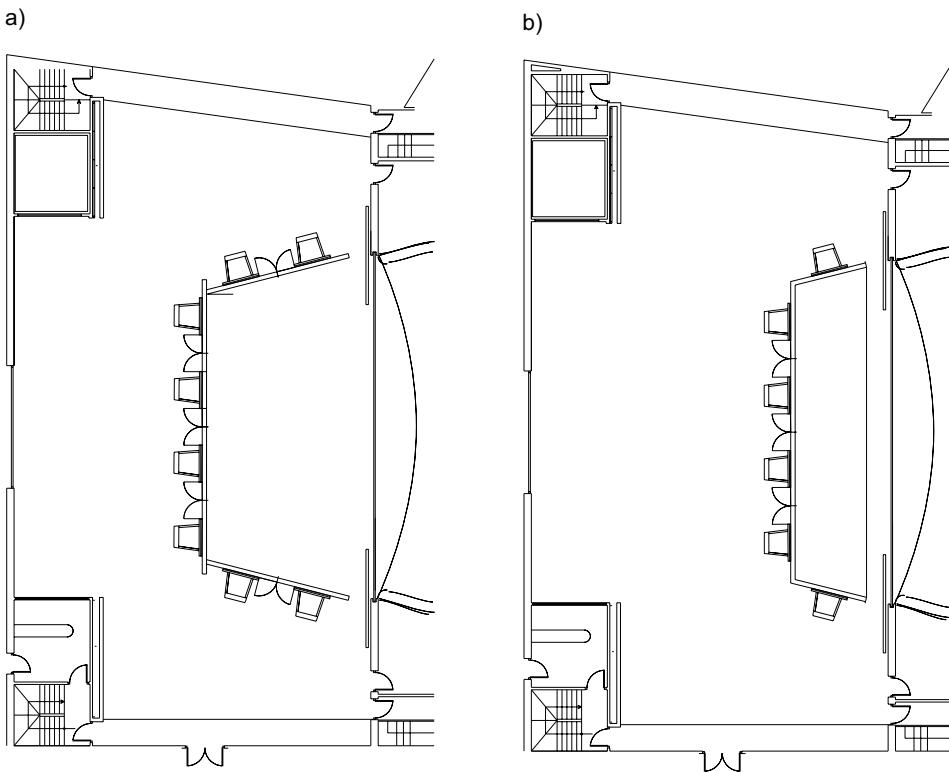


Fig. 5.57 Adaptación de la concha acústica de la figura 5.55 para: a) orquestas de tamaño medio; b) formaciones de cámara o solistas

5.6 Métodos de valoración acústica de salas de conciertos

5.6.1 Valoración objetiva

En las últimas décadas se han desarrollado diferentes métodos encaminados a representar la calidad acústica de una sala de conciertos mediante un único valor numérico. De todos ellos, destaca el propuesto por Ando, en su libro *Concert Hall Acoustics* (1.985). Ello es debido a la buena concordancia existente entre la valoración objetiva de un numeroso conjunto de salas, obtenida como fruto de la aplicación de su método, y la valoración subjetiva de las mismas emitida por un considerable grupo de expertos.

Antes de proceder a la explicación de la adaptación del referido método llevada a cabo por Beranek (1.996), es interesante comentar que Ando considera que los fenómenos acústicos de reverberación, eco y coloración tonal son procesados en el hemisferio izquierdo del cerebro, mientras que la sonoridad y la disimilitud interaural se procesan en el hemisferio derecho. Por otra parte, defiende la teoría, avalada por una dilatada experimentación, de que entre las personas orientales y las occidentales no existe diferencia alguna en el procesado del

sonido a nivel cerebral. Ello contradice la vieja creencia, todavía hoy en día defendida por muchos, de que la diferencia entre la música oriental y la occidental, así como la disparidad entre gustos musicales, se debe a que la música es procesada en hemisferios contrarios del cerebro.

La determinación de la calidad acústica mediante un único valor exige previamente seleccionar los parámetros más representativos de la sala. A través de numerosos experimentos psicoacústicos y acústicos realizados en las últimas décadas, Ando pudo comprobar que, de todos los parámetros definidos en el apartado 5.2, existen cuatro que son estadísticamente independientes, es decir, las variaciones en cada uno de ellos no afecta al resto. Se trata de:

- Correlación cruzada interaural ($1-IACC_{E3}$), sala vacía
- “Initial-Time-Delay Gap” (t_I)
- Sonoridad media (G_{mid}), sala vacía
- “Early Decay Time” medio (EDT_{mid}), sala vacía

El EDT_{mid} (sala vacía) fue elegido como sustitutivo del RT_{mid} (sala ocupada), sabiendo que la diferencia entre ambos en salas existentes con sillas tapizadas oscila entre 0,2 y 0,3 s. Por consiguiente, el margen de valores recomendado es:

$$2 \leq EDT_{mid} \leq 2,3 \text{ s}$$

294 Beranek, por su parte, ha verificado más recientemente que existen dos parámetros más, estadísticamente independientes. Dichos parámetros son:

- “Bass Ratio” (BR), sala ocupada
- Índice de difusión (SDI)

Otra decisión trascendente a la hora de calcular el valor numérico final consiste en dar el peso específico adecuado a cada uno de dichos parámetros. De los estudios realizados, se ha podido comprobar que la ponderación óptima para cada parámetro es la indicada en la tabla 5.10. Asimismo, en dicha tabla aparece la denominación del correspondiente coeficiente asociado.

PARÁMETRO ACÚSTICO	PONDERACIÓN	COEFICIENTE
$(1-IACC_{E3})$	25%	S1
EDT_{mid}	25%	S4
SDI	15%	S6
G_{mid}	15%	S3
t_I	10%	S2
BR	10%	S5

Tabla 5.10 Ponderación y coeficiente asociado a cada uno de los seis parámetros acústicos utilizados para el cálculo del valor representativo de la calidad acústica de una sala de conciertos (según Beranek)

El valor de cada uno de los seis coeficientes se obtiene partiendo del correspondiente valor numérico de cada parámetro y haciendo uso de los gráficos de la figura 5.58.

El valor numérico final S, representativo de la calidad acústica de una sala de conciertos en condiciones de plena ocupación, se obtiene de la siguiente manera:

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6$$

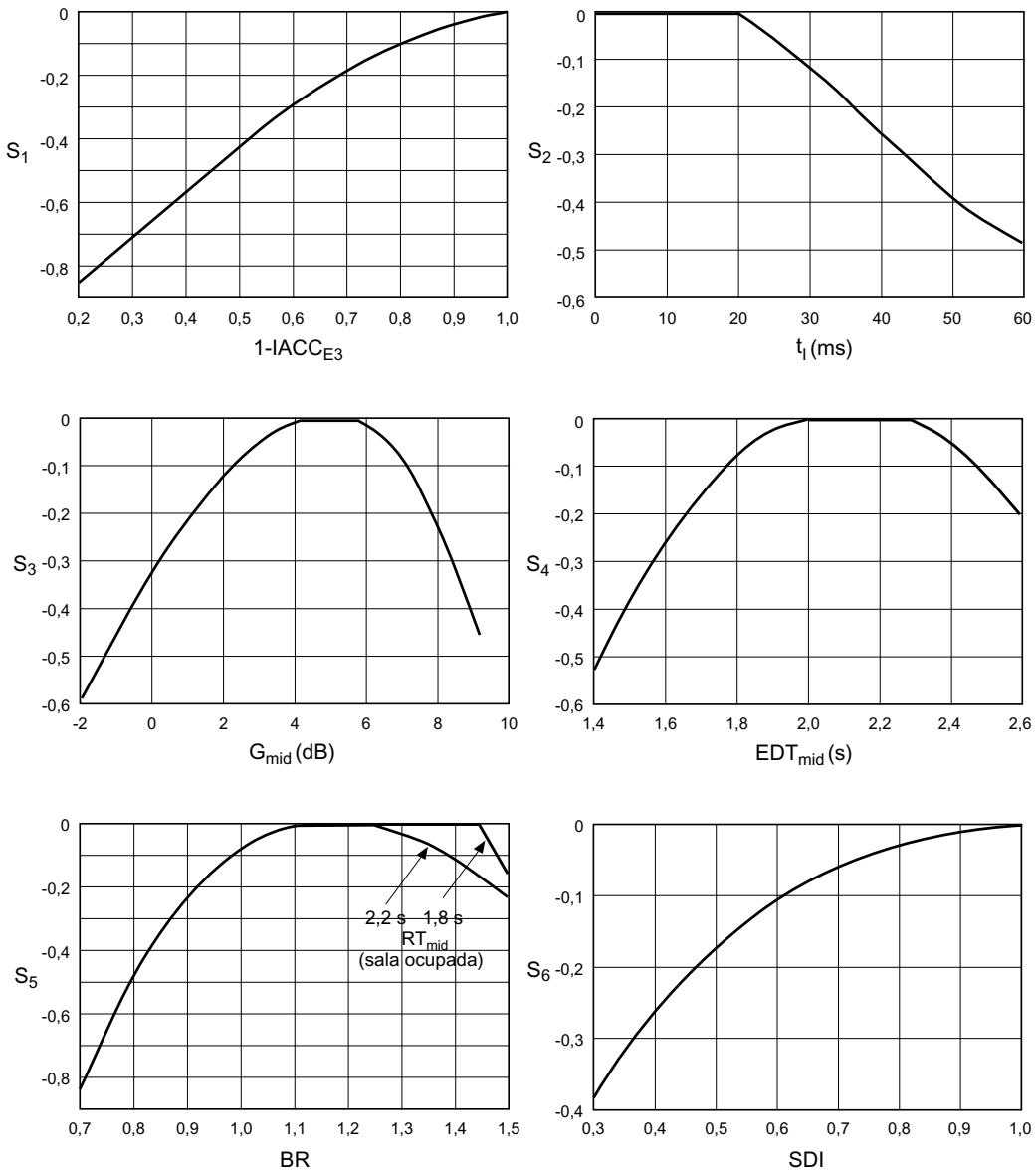


Fig. 5.58 Gráficos para la obtención de los coeficientes asociados a los seis parámetros acústicos estadísticamente independientes

Según se puede observar en los gráficos anteriores, el valor máximo de cada coeficiente es 0. Dicho valor se obtiene cuando el parámetro correspondiente se halla dentro del margen de valores recomendados. Por lo tanto, para una sala óptima desde el punto de vista acústico:

$$S = S_{\max} = 0$$

En general, el valor de S será negativo; cuanto más negativo sea, más desfavorable resultará la valoración de la sala objeto de análisis.

Finalmente, cabe comentar que el citado método presenta diversas limitaciones, de las cuales cabe destacar las siguientes:

- Sólo considera las salas desde el punto de vista del oyente, es decir, no valora las características acústicas del escenario.
- No tiene en cuenta los efectos negativos de posibles ecos, de una falta de uniformidad del sonido en la sala y del ruido de fondo.

5.6.2 Valoración subjetiva

En el apartado anterior se ha expuesto el método desarrollado por Ando, y adaptado por Beranek, para representar la calidad acústica de una sala de conciertos mediante un único valor numérico.

296 La validación del mismo se realizó mediante la comprobación del elevado grado de correlación entre la valoración objetiva de un conjunto de salas, efectuada aplicando dicho método, y la valoración subjetiva de las mismas emitida por numerosos expertos.

Ahora bien, para que dicha valoración subjetiva sea fiable es preciso seguir un proceso totalmente sistematizado. El primer paso consiste en elaborar un cuestionario que recoja todos aquellos aspectos subjetivos considerados como fundamentales para poder emitir un juicio válido. En segundo lugar, es imprescindible elegir un colectivo experto, cuyas opiniones sean merecedoras de una total confianza por parte del investigador. Habitualmente, dicho colectivo está formado por directores de orquesta, músicos profesionales y críticos musicales. Finalmente, es necesario que los integrantes del colectivo escogido se mantengan a lo largo de la experimentación y, además, que respondan siempre al mismo cuestionario.

De los muchos cuestionarios existentes, a continuación se detalla el desarrollado por Barron en 1.993 para su aplicación a un estudio sobre la calidad acústica de una serie de salas de conciertos británicas.

El motivo de tal elección radica en el hecho de que su elaboración está basada en estudios previos realizados en los años 70 y 80 por dos universidades alemanas pioneras en el campo de la investigación acústica y psicoacústica a nivel mundial: la Universidad de Goettingen, encabezada por M. Schroeder, y la Universidad Técnica de Berlín, con L. Cremer a la cabeza.

Sin entrar en detalles sobre las diferencias existentes entre las metodologías de ambas escuelas, sí que es importante señalar que el punto de partida es común para las dos: la utilización de una cabeza artificial (figura 5.9) con sendos micrófonos colocados en los canales

de entrada de cada oído. Las grabaciones así efectuadas permiten reproducir con gran precisión la sensación de escucha en el punto donde originalmente se ha situado la cabeza artificial. Al reproducir, en una cámara anecoica o mediante auriculares, las grabaciones llevadas a cabo en salas de conciertos existentes, es posible estudiar la acústica de las mismas en condiciones de laboratorio, es decir, sin la influencia de factores externos no acústicos. La cámara anecoica es una sala totalmente tratada con material absorbente con objeto de simular las condiciones de espacio libre.

El mencionado cuestionario se detalla en la figura 5.59.

<u>Claridad musical</u>	Sonido Confuso ← → Sonido Claro
<u>Viveza</u>	Sala Apagada ← → Sala Viva
<u>Impresión espacial</u>	Amplia ← → Reducida
<u>Intimidad acústica</u> (identificación con la orquesta)	Elevada ← → Pobre
<u>Sonoridad</u>	Elevada ← → Deficiente
<u>Balance</u>	
Agudos respecto a medios	Débiles ← → Altos
Graves respecto a medios	Débiles ← → Altos
Solistas respecto a orquesta	Débiles ← → Altos
<u>Ruido de fondo</u>	Inaudible / Aceptable / Intolerable
<u>Impresión global</u>	Muy mala / Mala / Mediocre / Aceptable / Buena / Muy Buena / Excelente

Fig. 5.59 Cuestionario desarrollado por Barron para la valoración subjetiva de salas de conciertos británicas

Según se observa, existe un grado de correspondencia elevado entre las impresiones subjetivas integrantes del cuestionario y los parámetros objetivos incluidos en el método de Ando, adaptado por Beranek.

5.7 Resumen de los criterios generales de diseño

A modo de resumen de todo lo expuesto en este capítulo, a continuación se indican aquellos criterios más relevantes que deben tenerse en cuenta a la hora de diseñar una sala de conciertos.

Ante todo, cabe indicar que actualmente existe un consenso a nivel mundial sobre el hecho de que el diseño acústico de una sala de conciertos debe ser afrontado teniendo en cuenta una multiplicidad de factores que resultan determinantes para su calidad final. Se trata, por tanto, de un diseño basado en un enfoque multidimensional. La aproximación unidimensional basada exclusivamente en la obtención del tiempo de reverberación óptimo para la sala se puede considerar, hoy por hoy, totalmente obsoleta.

5.7.1 Parámetros acústicos básicos

A través de investigaciones llevadas a cabo por Ando y Beranek, se ha llegado a la conclusión de que existen seis parámetros acústicos estadísticamente independientes a partir de los cuales es posible representar la calidad acústica de una sala de conciertos mediante un único valor numérico. En la tabla 5.11 se indican dichos parámetros, así como la valoración subjetiva asociada a cada uno de ellos.

PARÁMETRO ACÚSTICO	VALORACIÓN SUBJETIVA
“Early Decay Time” medio EDT_{mid} (*) (500 Hz – 1 kHz), sala vacía	Grado de viveza de la sala
Calidez acústica BR, sala ocupada	Riqueza en sonidos graves, melosidad y suavidad de la música
Sonoridad media G_{mid} (500 Hz – 1 kHz), sala vacía	Grado de amplificación producido por la sala
“Initial-Time-Delay Gap” t_i	Intimidad acústica (sensación subjetiva de volumen de la sala; grado de identificación con la orquesta)
Correlación cruzada interaural (1-IACC _{ES}) (500 Hz – 2 kHz), sala vacía	Impresión espacial del sonido (amplitud aparente de la fuente sonora)
Índice de difusión SDI	Impresión espacial del sonido (sensación de envolvente)

Tabla 5.11 Parámetros acústicos estadísticamente independientes y valoración subjetiva asociada

(*) El EDT_{mid} (sala vacía) está directamente relacionado con el RT_{mid} (sala ocupada)

Huelga decir que, a pesar de que dichos parámetros representan el estado actual de la ciencia de la acústica, es posible que a través de futuras investigaciones se incorporen nuevos parámetros que desempeñen igualmente un papel relevante en la determinación de la calidad acústica de una sala de conciertos.

5.7.2 Volumen de la sala y número de asientos. Relación con el tiempo de reverberación

No se puede dar una cifra óptima en cuanto a volumen y número de asientos de una sala de conciertos.

Ahora bien, a título orientativo, conviene tener presente que:

- La mayor parte de las salas de conciertos de música sinfónica más prestigiosas del mundo tienen un volumen situado entre los 10.000 y los 30.000 m³, con una media del orden de 20.000 m³.
- En cuanto a su capacidad, oscila entre las 1.000 y las 3.700 localidades, con una media del orden de 2.300 asientos. Según Barron, el número máximo de localidades recomendado para una sala de conciertos de música sinfónica se halla alrededor de las 3.000.

- Con objeto de garantizar la obtención de una sonoridad correcta, es preceptivo que la superficie ocupada por el público sea lo menor posible.
- Por razones de confort, en la mayoría de salas construidas en las últimas tres décadas, la relación entre la superficie ocupada por el público y el número de asientos es del orden de 0,5, es decir, 0,5 m² por asiento.
- Una vez fijado el aforo de la sala y la superficie ocupada por las sillas, orquesta y coro, se debe calcular el volumen necesario para que el tiempo de reverberación medio RT_{mid} de la sala ocupada esté situado entre 1,8 y 2 s. La expresión a utilizar para dicho cálculo es la siguiente (apartado 5.5.1.2):

$$RT_{mid} = 0,14 (V/S_{tot})$$

donde:

V = Volumen de la sala (en m³)

S_{tot} = Superficie acústica efectiva total (en m²)

- Al contrario de lo que se creía antiguamente, una vez fijada la superficie ocupada por las sillas, la modificación del número de las mismas no altera las características acústicas de la sala.

5.7.3 Formas de la sala

A pesar de que las salas de conciertos de más renombre internacional son de planta rectangular, existe una gran diversidad de formas que proporcionan un buen resultado acústico. Ello permite afirmar que no existe una única solución arquitectónica que garantice una calidad acústica óptima.

En cualquier caso, la forma de la sala debe garantizar la existencia de primeras reflexiones significativas en todos sus puntos (reflexiones con un retardo de hasta 80 ms desde la llegada del sonido directo) y, en especial, de primeras reflexiones laterales.

La existencia de primeras reflexiones en una sala contribuye a un aumento de la claridad musical (C₈₀), de la sonoridad (G) y, en muchos casos, a una mayor intimidad acústica (t_i). Si además dichas reflexiones son laterales, se produce una mejora del grado de impresión espacial en la sala (amplitud aparente de la fuente sonora mayor). Las reflexiones laterales más importantes son las que llegan a los oídos de los espectadores con un ángulo entre 35° y 75° respecto al plano vertical que pasa a través suyo y del centro del escenario.

A continuación se enumeran tres tipos de diseños que garantizan la existencia de primeras reflexiones laterales significativas:

- Sala estrecha de planta rectangular
- Utilización de paneles reflectantes separados de las paredes laterales y con una inclinación adecuada
- Distribución de los asientos en diversas zonas a diferente nivel, a modo de terrazas trapezoidales

La generación de primeras reflexiones desde el techo mediante la colocación de paneles suspendidos es especialmente crítica, puesto que puede dar lugar a coloraciones tonales.

Aunque sin poder considerarse como un valor definitivo, parece ser que la relación más apropiada entre el área de los paneles y el área total del círculo que los engloba es del orden de 0,5.

5.7.4 Visuales

Uno de los objetivos prioritarios en una sala de conciertos es que el sonido directo que llega a cada espectador no sea obstruido por los espectadores situados delante suyo. Este requerimiento generalmente se cumple si existe una buena visibilidad del escenario.

El diseño de la visuales en una sala se basa en la siguiente consideración: los ojos se hallan en promedio 100 mm por debajo de la parte más elevada de la cabeza. Por lo tanto, la inclinación del suelo debe ser tal que permita el paso de la visual por encima de la cabeza del espectador situado en la fila inmediatamente anterior.

En cuanto a la pendiente del anfiteatro, existe un valor máximo permitido por razones de seguridad contemplado en la legislación vigente de cada país y que se sitúa alrededor de los 35°.

5.7.5 Anfiteatros y balcones

Con objeto de evitar una disminución excesiva del sonido reverberante en la zona situada debajo de los mismos y, por tanto, una sensación de zona demasiado apagada, Beranek propone el siguiente criterio general a seguir: la profundidad D de dicha zona no debe ser superior a la altura H de la abertura asociada: $D \leq H$.

Por su parte, Barron propone el siguiente criterio: el ángulo de visión desde la parte posterior de la zona situada debajo de un anfiteatro o balcón no debe ser inferior a 45°.

5.7.6 Materiales recomendados

Como criterio general, el único elemento con un grado de absorción acústica apreciable que se debe utilizar en una sala de conciertos son las sillas. Por tanto, los materiales recomendados como acabados deben ser acústicamente reflectantes con objeto de evitar una pérdida excesiva tanto de sonidos graves como de agudos, ya que ello supondría a su vez una disminución de calidez acústica y de brillo en la sala.

Para la construcción de las paredes es recomendable utilizar uno de los siguientes materiales:

- Hormigón macizo
- Bloques de hormigón pintados o bien revestidos con yeso
- Ladrillos revestidos con yeso

Como acabado de las paredes y del techo de la sala, se puede utilizar madera con un grosor superior a 25 mm y densidad media o alta ($\geq 400 \text{ Kg/m}^3$), a menos que se tenga la certeza de que está perfectamente adherida a cualquiera de los materiales de construcción ante-

riores. En tal caso, bastará con utilizar una lámina de dicho material sin limitaciones en cuanto a mínimo grosor requerido.

5.7.7 Sonoridad

La sonoridad G, o grado de amplificación del sonido producido por la sala, depende de la distancia del punto considerado al escenario, de la existencia de superficies que generen primeras reflexiones en la zona donde se encuentra dicho punto, de la superficie ocupada principalmente por el público y del nivel de campo reverberante.

A medida que aumenta la mencionada distancia al escenario, el nivel del sonido directo disminuye, al igual que sucede al aire libre. Con objeto de contrarrestar tal disminución y, por lo tanto, conseguir una mayor sonoridad, es preciso disponer de superficies reflectantes que proporcionen energía de primeras reflexiones.

Por otra parte, cuanto menor sea la superficie ocupada por el público, mayor será la sonoridad obtenida en la sala.

5.7.8 Máxima distancia recomendada

Un criterio práctico a respetar es que ningún espectador situado en la platea se encuentre a una distancia del escenario superior a, aproximadamente, 30 m. En los anfiteatros, la distancia puede ser mayor, pudiéndose incluso llegar a los 40 m, siempre y cuando las paredes y el techo generen primeras reflexiones destacadas en dichas zonas. Esta máxima distancia se establece tanto por motivos acústicos como visuales.

301

5.7.9 Prevención o eliminación de coloraciones tonales, ecos y focalizaciones del sonido

La coloración tonal más molesta es la producida por la presencia de grandes superficies planas y lisas, ya que el sonido reflejado por ellas adquiere un cierta dureza.

Tal coloración se puede corregir mediante una de las siguientes actuaciones sobre dichas superficies:

- Añadiendo suaves irregularidades (del orden de 2,5 cm).
- Proporcionando una cierta convexidad o bien incorporando elementos convexos sobre las mismas.
- Colocando difusores MLS o de residuo cuadrático QRD sobre las mismas.

Cualquiera de las actuaciones anteriores también es efectiva para atenuar, y a veces incluso eliminar, ecos y focalizaciones del sonido. En cuanto a dichas anomalías, seguidamente se indican otras posibles soluciones para su prevención o eliminación:

- Colocación de material absorbente sobre las superficies conflictivas, si bien controlando la cantidad utilizada a fin de evitar una disminución del tiempo de reverberación.

Como norma práctica, el porcentaje de superficie tratada no deberá superar el 10% de la superficie total de la sala.

- Reorientación de las superficies conflictivas a fin de redirigir el sonido reflejado hacia otras zonas no problemáticas.

Por lo que se refiere al eco flotante, la solución evidente para prevenir su aparición consiste en evitar la existencia de grandes paredes paralelas reflectantes en cualquier zona de la sala a base de dar una pequeña inclinación (del orden de 5°) a una de ellas. Otra solución alternativa, aunque menos efectiva, consiste en aplicar un tratamiento absorbente o de difusión del sonido, al menos sobre una de las dos paredes conflictivas.

5.7.10 Mejora de la impresión espacial del sonido

En una sala de conciertos es fundamental que exista una gran cantidad de primeras reflexiones laterales, así como un elevado grado de difusión del sonido. La existencia de primeras reflexiones laterales significativas produce un aumento de la amplitud aparente de la orquesta, mientras que un incremento de difusión da lugar a un sonido más envolvente, es decir, a un sonido que llega a los oídos del espectador por igual desde todas las direcciones.

La manera de obtener este tipo de reflexiones se ha expuesto en el apartado 5.5.2.2. En cuanto a la difusión del sonido, se consigue principalmente a base de incorporar irregularidades en el techo y en las paredes laterales de la sala, o bien, colocando sobre las mismas difusores diseñados a tal fin (QRD, MLS o bien difusores policilíndricos).

La existencia tanto de primeras reflexiones laterales como de difusión del sonido en una sala mejora la impresión espacial del sonido en la misma, lo cual incide directamente y de forma favorable sobre la valoración subjetiva de su calidad acústica.

5.7.11 Escenario

Como criterio orientativo, el área requerida para una orquesta de 100 músicos se sitúa entre 150 y 190 m². Sus dimensiones medias máximas aproximadas son: anchura = 17 m y profundidad = 11 m.

En cuanto al coro, Gade propone reservar 0,5 m² por cada persona sentada.

En el caso de que no exista concha acústica, las paredes situadas alrededor del escenario deberán estar orientadas de manera que reflejen energía hacia los músicos. Si el techo es elevado, conviene colocar un conjunto de reflectores suspendidos del mismo a una altura no superior a los 8 m del suelo. Los materiales recomendados son equivalentes a los utilizados en la sala, con la excepción del suelo, donde es conveniente utilizar un material reflectante, tipo parquet, de poco grosor (de 20 a 25 mm).

Si existe concha acústica, se recomienda que su diseño se base en una estructura totalmente modular de fácil y rápida instalación tanto para las paredes como para el techo de la misma. Siempre que sea posible, es conveniente prever diversas configuraciones de montaje con objeto de proporcionar la flexibilidad necesaria para adaptarse a diferentes tamaños de orquesta. Las paredes laterales deberán tener preferentemente forma de abanico de manera

que la pared posterior sea más estrecha que la abertura a nivel de proscenio. Igualmente, el techo deberá tener una inclinación tal que su altura a nivel de la pared posterior sea menor que la correspondiente a nivel de proscenio. Todas las superficies interiores de la concha estarán revestidas con paneles de madera de unos 25 mm de espesor y de una densidad del orden de 20 Kg/m², a excepción de la zona posterior de la concha donde, si es posible, se colocarán elementos difusores del sonido.

En el apéndice 3 se incluye una ficha técnica con información relativa a 66 salas de conciertos de relevancia mundial. Dicha información se ha extraído del libro de L. Beranek *Concert and Opera Halls: How They Sound*, publicado por la *Acoustical Society of America* en 1.996.

5.8 Ejemplo práctico de diseño. Auditorio de Tenerife, Santa Cruz de Tenerife (España)

Arquitecto: Santiago Calatrava

Estudio acústico^(*): Audioscan, ingeniería del sonido

5.8.1 Descripción del espacio (figura 5.60)

- $V \approx 17.800 \text{ m}^3$ ^(**)
- $N \approx 1.716$ asientos
- $S_s \approx 768 \text{ m}^2$
- $S_A \approx 850 \text{ m}^2$
- $S_o + S_c \approx 273 \text{ m}^2$
- $S_{\text{tot}} \approx 1.123 \text{ m}^2$
- $S_s/N = 0,45 \text{ m}^2/\text{asiento}$
- $V/N = 10,37 \text{ m}^3/\text{asiento}$
- $V/S_{\text{tot}} = 15,85 \text{ m}$
- $N/S_{\text{tot}} = 1,53 \text{ m}^{-2}$

303

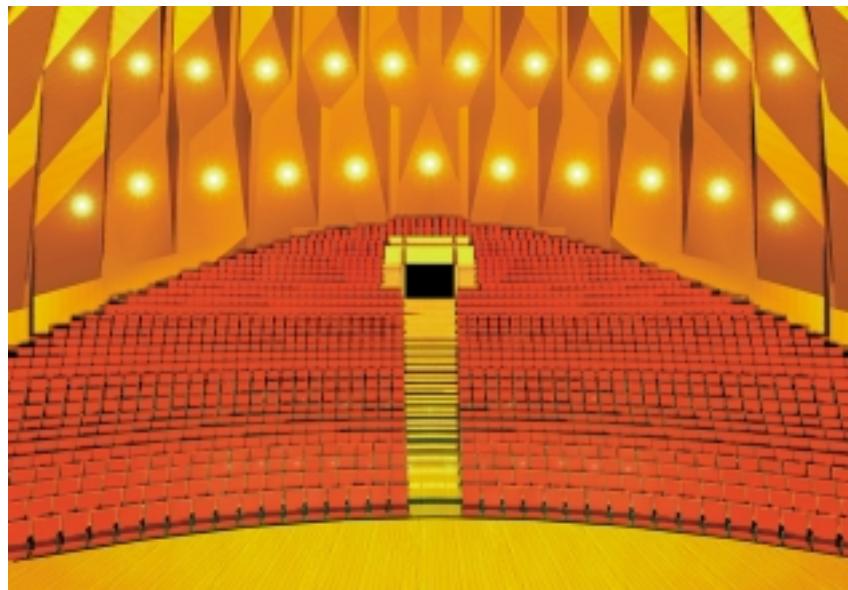
5.8.2 Objetivos acústicos

- RT_{mid} (sala ocupada): entre 1,8 y 2 s
- BR (sala ocupada): entre 1,10 y 1,25 o bien 1,45 (en función del valor de RT_{mid})
- Br (sala ocupada) $\geq 0,87$
- EDT_{mid} (sala ocupada) $\approx RT_{\text{mid}}$
- G_{mid} (sala vacía): entre 4 y 5,5 dB

^(*) Realizado por encargo de la empresa Dragados

^(**)Incluye el volumen estimado de la concha acústica

- $C_{80}(3)$ (sala vacía): entre -4 y 0 dB
- LF_{E4} (sala vacía) $\geq 0,19$
- $EC < 1,80$



304



Fig. 5.60 Imágenes virtuales del Auditorio de Tenerife (Santa Cruz de Tenerife, España)

5.8.3 Materiales utilizados como acabados del recinto

En la tabla 5.12 se relacionan los materiales que aparecen en los planos de carpintería y de acabados de pavimentos pertenecientes al proyecto de ejecución del Auditorio. Dichos materiales, mostrados en la figura 5.61, son los que se han utilizado en las simulaciones acústicas llevadas a cabo.

SUPERFICIE	MATERIAL	COLOR EN CROQUIS
Suelo de la sala	Butacas con un bajo porcentaje de superficie tapizada	rojo
Pasillos de la sala	Tarima de madera de 25 mm	azul
Paredes de la sala	Tablero DM de 20 mm chapado de madera	amarillo
Corona superior e inferior de reflectores	Tablero DM de 20 mm chapado de madera	lila
Paredes y techo de la concha acústica	Tablero DM de 20 mm chapado de madera (hipótesis de partida)	amarillo
Reflector sobre la boca del escenario	Lamas de madera sobre estructura de soporte	verde
Suelo del escenario	Tarima de madera de 40 mm	oliva

Tabla 5.12 Relación de los materiales utilizados en la simulación acústica

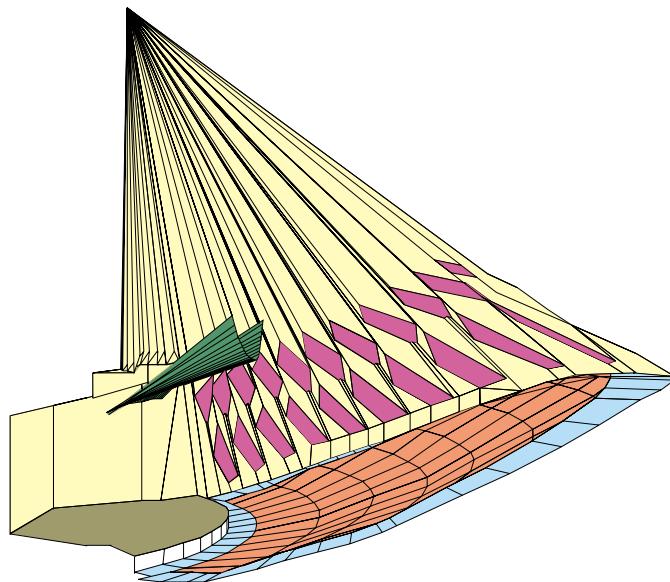


Fig. 5.61 Vista en perspectiva del Auditorio de Tenerife con indicación de los acabados incluidos en el proyecto de ejecución

5.8.4 Resumen de los resultados de la simulación acústica realizada y valoración acústica de la sala

A continuación se describe la situación de los diferentes puntos de cálculo, así como las ubicaciones de la fuente sonora (figura 5.62).

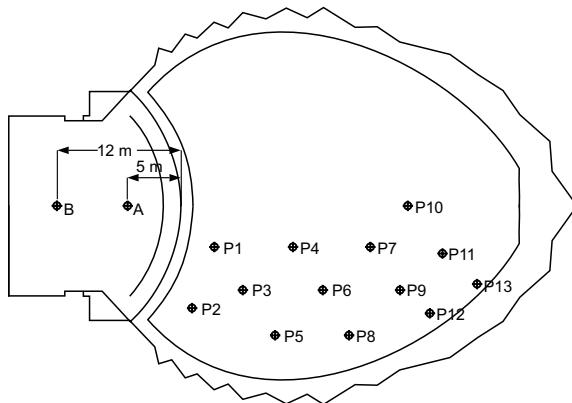


Fig. 5.62 Ubicación de los puntos de cálculo y de la fuente sonora

- 306
- Puntos de cálculo:
 - Número de puntos = 13 (denominados P1 a P13)
 - Altura de los puntos respecto al suelo de la sala = 1,2 m
 - Fuente sonora:
 - Tipo de fuente: omnidireccional
 - Número de puntos de ubicación de la fuente sonora = 2 (denominados A y B)
 - Altura de la fuente respecto al suelo del escenario = 1,5 m
 - Situación de los puntos:
 - A: sobre el eje longitudinal del recinto, a una distancia de 5 metros del límite del escenario más próximo al público
 - B: sobre el eje longitudinal del recinto, a una distancia de 12 metros del límite del escenario más próximo al público. Dicho punto está situado dentro de la concha acústica considerada a efectos de cálculo

Los resultados obtenidos son los siguientes:

5.8.4.1 Tiempo de reverberación (RT)

En la figura 5.63 se representan los valores medios de RT, según las fórmulas de Sabine, Sabine ponderada por reflexiones y Kuttruff ponderada por reflexiones (ver definiciones en el apéndice 2), para cada una de las bandas de octava situadas entre 125 Hz y 4 kHz, correspondientes a la sala ocupada. Estos valores se han obtenido como media aritmética de todos los valores de RT calculados.

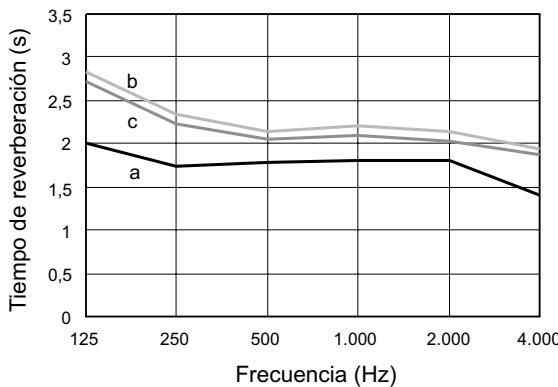


Fig. 5.63 Valores medios de RT correspondientes a la sala ocupada: a) Sabine; b) Sabine ponderada por reflexiones; c) Kuttruff ponderada por reflexiones

En la tabla 5.13 se indican los valores del tiempo de reverberación RT_{mid} correspondientes a la sala ocupada.

FÓRMULA DE CÁLCULO	RT _{mid} (s)
Sabine	1,80
Sabine ponderada por reflexiones	2,17
Kuttruff ponderada por reflexiones	2,06

Tabla 5.13 Tiempos de reverberación RT_{mid} (sala ocupada)

Estos valores se aproximan suficientemente al margen de valores recomendados (entre 1,8 y 2 s). Por lo tanto, desde el punto de vista de la viveza de la sala, el Auditorio resulta adecuado para música sinfónica.

5.8.4.2 Calidez acústica (BR) y brillo (Br)

En las tablas 5.14 y 5.15 se presentan, respectivamente, los valores medios de calidez acústica y brillo, calculados a partir de los valores medios de RT anteriores. Asimismo se indican los correspondientes márgenes de valores recomendados.

Según se observa, la práctica totalidad de valores de calidez acústica (BR) y de brillo (Br) se hallan dentro de los márgenes de valores recomendados, con independencia de las fórmulas utilizadas para su cálculo.

CALIDEZ ACÚSTICA (BR)	BR (CALCULADO)	BR (RECOMENDADO)
Sabine	1,05	1,10 ≤ BR ≤ 1,45
Sabine ponderada por reflexiones	1,19	1,10 ≤ BR ≤ 1,30
Kuttruff ponderada por reflexiones	1,20	1,10 ≤ BR ≤ 1,35

Tabla 5.14 Valores medios de calidez acústica (BR)

BRILLO (Br)	Br (CALCULADO)	Br (RECOMENDADO)
Sabine	0,89	$Br \geq 0,87$
Sabine ponderada por reflexiones	0,93	$Br \geq 0,87$
Kuttruff ponderada por reflexiones	0,94	$Br \geq 0,87$

Tabla 5.15 Valores medios de brillo (Br)

Por lo tanto, el sonido en la sala será rico en bajas frecuencias (graves) y también en altas frecuencias (agudos).

5.8.4.3 “Early Decay Time” (EDT)

El valor medio de los valores de EDT_{mid} correspondiente a la sala ocupada, considerando la fuente sonora ubicada en las posiciones A y B, es:

$$EDT_{mid} = 1,81 \text{ s}$$

Dicho valor es del mismo orden que los diferentes valores de RT_{mid} indicados en el apartado 5.8.4.1. Por lo tanto, el grado de difusión del sonido en la sala es globalmente correcto.

En cuanto al grado de difusión por zonas, en la figura 5.64 se muestra el mapa de valores de EDT correspondientes a la banda de 1 kHz, considerando la sala ocupada y la fuente sonora en la posición A.

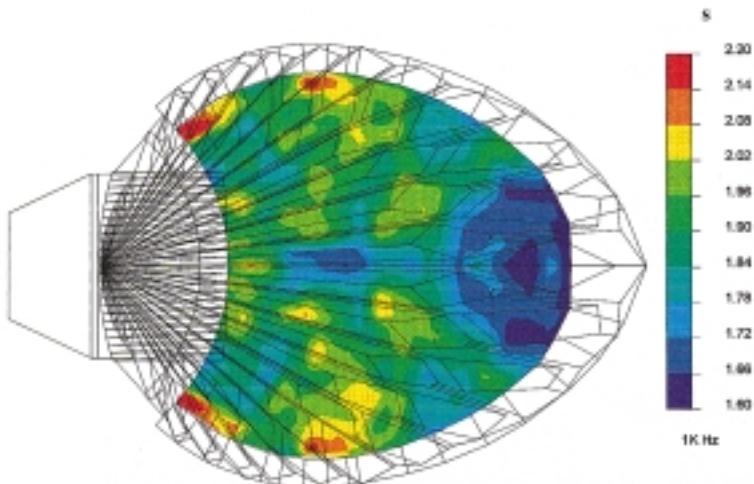


Fig. 5.64 Auditorio de Tenerife: mapa de valores de EDT, banda de 1 kHz (sala ocupada)

De su observación se desprende lo siguiente:

- Aproximadamente en un 85% de puntos, los valores de EDT calculados son como máximo un 10% más bajos que los correspondientes valores de RT. Dichos valores se corresponden con los colores rojo, naranja, amarillo y verde del mapa. Ello es indicativo de que, en dichas zonas, existirá una buena difusión del sonido y de que la “viveza” será la que se desprende de los valores de RT.
- Existe, sin embargo, una zona de la sala que constituye una excepción (zona de color azul del mapa), puesto que los valores correspondientes de EDT son sensiblemente más bajos que los de RT. Se trata de la parte posterior de la sala. Ello es consecuencia de la existencia de una importante concentración de primeras reflexiones en la misma debida a la forma elíptica de la planta. La sensación en dicha zona será la de una sala ligeramente más “apagada” de lo que se deduciría de los valores de RT.

5.8.4.4 Sonoridad (G)

El valor medio de los valores de G_{mid} correspondiente a la sala vacía, considerando la fuente sonora ubicada en las posiciones A y B, es:

$$G_{\text{mid}} = 5 \text{ dB}$$

Dicho valor se halla dentro del margen de valores recomendados (entre 4 y 5,5 dB). Por consiguiente, el grado de amplificación producido por la sala es óptimo.

5.8.4.5 Claridad musical (C_{80})

El valor medio de los valores de $C_{80}(3)$ correspondiente a la sala vacía, considerando la fuente sonora ubicada en las posiciones A y B, es:

$$C_{80}(3) (\text{"music average"}) = 1,65 \text{ dB}$$

Dicho valor se halla ligeramente por encima del margen de valores recomendados (entre -4 y 0 dB). En consecuencia, la claridad musical es ligeramente elevada. El estudio realizado demuestra, como es lógico, que dicho valor aumenta a medida que la fuente sonora se aproxima a las paredes límite de la concha acústica utilizada en la simulación.

5.8.4.6 Eficiencia lateral (LF)

El valor medio de los valores de LF_{E4} correspondiente a la sala vacía, considerando la fuente sonora ubicada en las posiciones A y B, es:

$$LF_{E4} = 0,21$$

Dicho valor se halla por encima del mínimo valor recomendado (0,19). Por lo tanto, la amplitud aparente de la fuente sonora y la impresión espacial del sonido en la sala son correctas.

5.8.4.7 Criterio de ecos (EC)

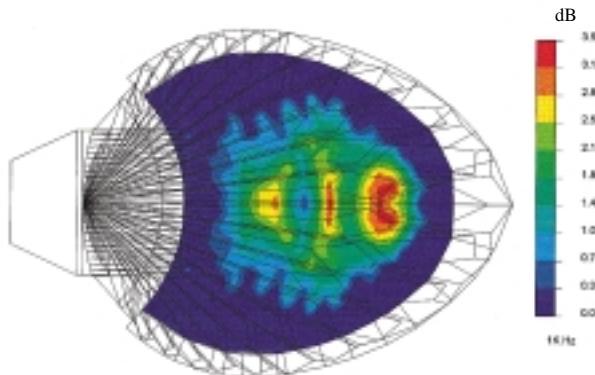
El estudio realizado demuestra que todos los valores de EC están muy por debajo del valor máximo recomendado de 1,80. Ello garantiza que el porcentaje de espectadores con posibilidad de percibir un eco es muy bajo.

5.8.4.8 Análisis del comportamiento de los reflectores

a) Coronas superior e inferior de reflectores

En la figura 5.61 se muestran las dos coronas de reflectores propuestas (de color lila), mientras que en la figura 5.65 se presentan los correspondientes mapas de niveles de campo reflejado en la banda de 1 kHz. Los mapas se han obtenido considerando exclusivamente las reflexiones de primer orden.

a)



b)

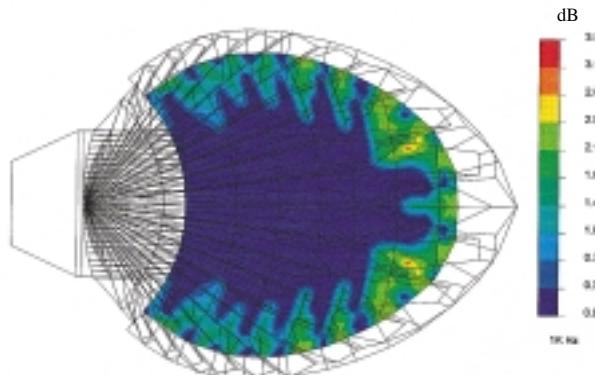


Fig. 5.65 Auditorio de Tenerife: mapas de niveles de campo reflejado debidos a: a) corona superior de reflectores; b) corona inferior de reflectores (reflexiones de primer orden y banda de 1 kHz)

Según se puede observar, los reflectores correspondientes a la corona superior proporcionan primeras reflexiones a la zona central de la sala, mientras que los pertenecientes a la corona inferior se encargan de proporcionarlas a la zona perimetral.

b) Reflector sobre la boca del escenario

Su función es la de proporcionar primeras reflexiones a la zona de público. Debido a su forma convexa la zona de influencia del mismo es muy amplia, aunque los correspondientes niveles de presión sonora son menores que los que se obtendrían si el reflector fuese plano.

En la figura 5.66 se muestran los mapas de niveles de campo reflejado debidos a dicho elemento en la banda de 1 kHz, suponiendo que la fuente sonora está ubicada en las posiciones A y B. Los mapas se han obtenido considerando sólo las reflexiones de primer orden.

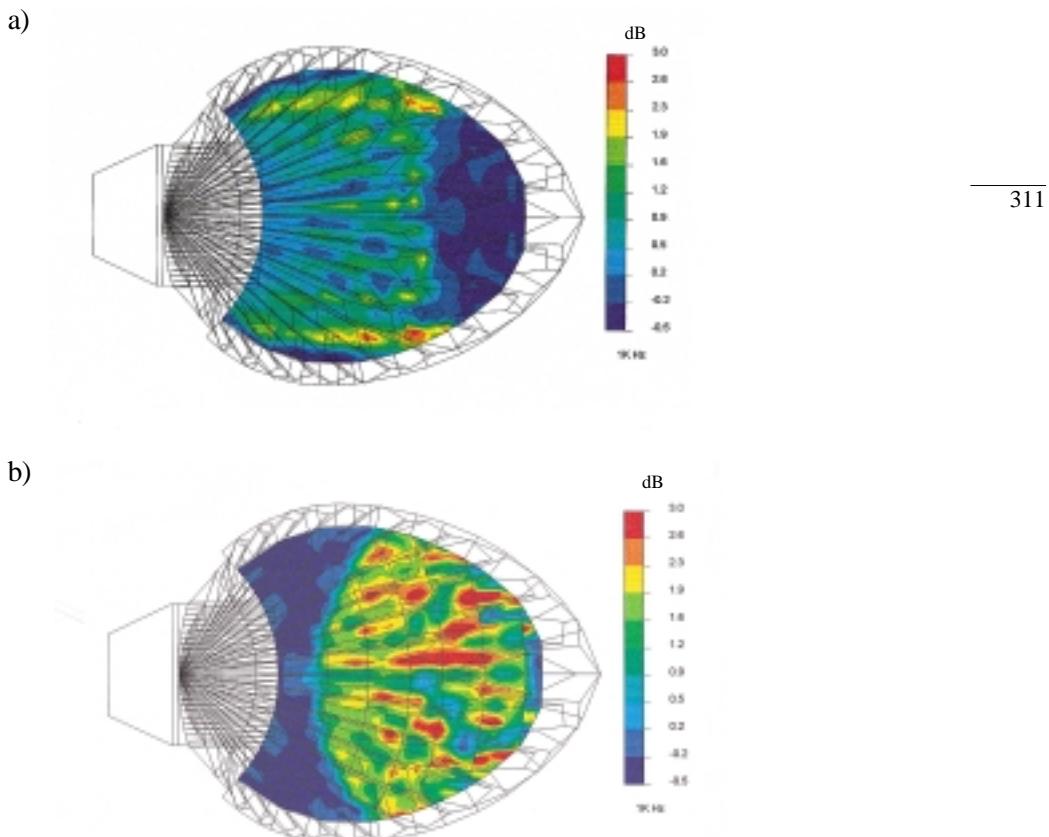


Fig. 5.66 Auditorio de Tenerife: mapas de niveles de campo reflejado debidos al reflector situado sobre la boca del escenario: a) fuente sonora en la posición A; b) fuente sonora en la posición B (reflexiones de primer orden y banda de 1 kHz)

Al pasar la fuente sonora de la posición A a la B, existe un desplazamiento de la zona de influencia de dicho reflector hacia la parte posterior de la sala. En concreto, con la fuente en la posición A, dicha zona de influencia incluye toda la sala, a excepción de su parte posterior. En cambio, cuando la fuente está en la posición B, la zona exenta de reflexiones es la anterior.

6

Acústica variable para espacios multifuncionales

6.1 Introducción

Si bien es cierto que la utilización de un mismo recinto para diferentes tipos de representaciones tuvo su inicio hace ya varios siglos, no es hasta hace relativamente pocos años que se tiene conciencia de la necesidad de diseñar espacios donde sea posible celebrar actos de índole diversa a plena satisfacción de sus usuarios. El hecho de conseguir un cierto grado de versatilidad se está convirtiendo poco a poco en un objetivo básico, ya que la existencia de un recinto para un solo uso es un lujo únicamente asumible en casos excepcionales. Sirva de ejemplo el montaje de una concha acústica en el escenario de un teatro cada vez que se celebra un concierto de música sinfónica con objeto de garantizar unas condiciones acústicas óptimas para los músicos (apartado 5.5.13), o bien, el cubrimiento del foso de orquesta a fin de aprovechar el espacio superior para aumentar el aforo cuando la representación no exige la presencia de músicos en el mismo.

Ahora bien, generalmente ninguno de estos cambios supone una modificación sustancial de las características acústicas del recinto. Desde este punto de vista, la idoneidad de una sala para diferentes usos sólo es posible a través de una acústica variable. Tomando dicha hipótesis como punto de partida, conviene tener presente que para percibir subjetivamente cualquier cambio físico, éste debe ser apreciable. Por ejemplo, la colocación de pequeñas superficies de material absorbente o la modificación de la inclinación de pequeños paneles reflectantes no producen ningún efecto significativo. En la práctica, la manera de constatar si el cambio físico propuesto resulta notorio es a través del conocimiento de los valores del tiempo de reverberación antes y después de la introducción de la pertinente modificación. En consecuencia, el tiempo de reverberación resulta el parámetro más relevante, aunque no único, que se debe tener en cuenta cuando se trabaja con acústica variable.

Por otra parte, el diseño acústico más complejo basado en una acústica variable es el de una sala multiuso pensada para su utilización como teatro y, alternativamente, como sala de conciertos de música sinfónica. Ello es debido a que ambos usos exigen unas condiciones acústicas extremas en cuanto a los valores de los tiempos de reverberación óptimos. En efecto, en la utilización como teatro, el tiempo de reverberación RT_{mid} debe ser del orden de 1 s,

mientras que para música sinfónica tiene que estar situado alrededor de 2 s. La obtención de un tiempo de reverberación bajo incide favorablemente en el grado de inteligibilidad de la palabra, pero, en cambio, no es beneficioso para la música, puesto que la sala resulta excesivamente apagada. Por contra, la disponibilidad de un tiempo de reverberación alto provoca un aumento de la viveza de la sala, a la vez que una disminución apreciable de la inteligibilidad de la palabra.

La mencionada complejidad en el diseño se debe, además, a que existen una serie de criterios de diseño específicos para cada uso, según se ha visto en los capítulos 4 y 5. Por ejemplo, en la utilización como teatro, interesa disponer de una gran cantidad de energía asociada a las primeras reflexiones en comparación con la correspondiente a las reflexiones tardías (cola reverberante), con independencia de la dirección de donde provengan. Sin embargo, en el uso como sala de conciertos, tal relación debe ser menor y, además, las primeras reflexiones deben proceder preferentemente de las paredes laterales con objeto de incrementar la denominada impresión espacial del sonido. Otro ejemplo de dicha disparidad de criterios lo constituye la difusión del sonido: mientras que en la utilización como sala de conciertos es extremadamente importante disponer de un elevado grado de difusión del sonido, en el uso como teatro la difusión es totalmente irrelevante.

En general, se puede afirmar que si mediante una acústica variable es posible hacer un diseño correcto para ambos casos extremos, la sala funcionará de forma igualmente correcta para cualquier otro uso, ya que los condicionantes acústicos son intermedios.

A continuación se exponen los diferentes métodos para conseguir una acústica variable. Todos ellos están basados en la utilización, o bien de elementos físicos variables, o bien de sistemas electrónicos. El objetivo básico perseguido en ambos casos consiste en la modificación adecuada del tiempo de reverberación en función del uso previsto en cada ocasión.

6.2 Acústica variable mediante elementos físicos variables

Partiendo de la fórmula de Sabine para el cálculo del tiempo de reverberación RT, y obviando el término asociado a la absorción producida por el aire, se tiene que:

$$RT = \frac{0,161 V}{A_s + \sum_i S_i \alpha_i} \quad (\text{en s})$$

donde:

V = volumen del recinto (en m^3)

A_s = absorción total de las sillas (en sabins)

$\sum_i S_i \alpha_i$ = absorción adicional (en sabins)

De esta expresión se deduce que, para cambiar el tiempo de reverberación, es preciso modificar el volumen de la sala, la absorción adicional, o bien, utilizar sillas móviles.

En cualquier caso, para que dicho cambio de RT sea mínimamente apreciable es necesaria una modificación de cualquiera de dichos valores, al menos, en un 10%.

6.2.1 Variación del volumen

Básicamente existen cuatro métodos para la obtención de un volumen variable:

- Mediante una partición o mampara móvil vertical
- Mediante un sistema de cierre yertura del falso techo
- Mediante cavidades reverberantes acopladas a la sala
- Mediante paneles móviles suspendidos del techo

6.2.1.1 Partición o mampara móvil vertical

Este sistema permite dividir el recinto inicial en dos subespacios diferenciados, con lo cual no sólo se reduce el tiempo de reverberación de acuerdo con el objetivo previsto, sino que también se obtiene un nuevo espacio susceptible de ser utilizado para otro uso. Lógicamente, la reducción de volumen también supone una disminución de la superficie de público y, por tanto, del número de localidades disponibles.

A menudo, el aislamiento acústico proporcionado por dicha separación es bajo, y ello representa un grave problema cuando se pretenden utilizar simultáneamente los dos subespacios creados. Actualmente, existen en el mercado diferentes modelos de mamparas, cuya característica común es la de presentar un elevado grado de aislamiento acústico. Además, cada modelo proporciona una absorción distinta, lo cual permite elegir el que mejor se adapte en cada diseño específico.

A modo de ejemplo, en las figuras 6.1a y 6.1b se muestran unas mamparas de altas prestaciones acústicas, por lo que a aislamiento y absorción se refiere. Dichas mamparas pueden llegar a tener una altura de hasta 8 m.

Como ejemplo ilustrativo, en las figuras 6.2 y 6.3 se muestra el Veterans' Memorial Auditorium de San Rafael (California, EE.UU.), en las configuraciones de sala de conciertos (2.100 localidades) y de teatro (800 localidades), respectivamente. En cada figura aparece,



Fig. 6.1a Mamparas móviles divisorias de altas prestaciones acústicas (modelos Variflex de Hüppe Form, distribuido por Kingland, S.L.)



Fig. 6.1b Mamparas móviles divisorias de altas prestaciones acústicas
(modelos Variflex de Hüppe Form, distribuido por Kingland, S.L.)

asimismo, la correspondiente representación de reflexiones de primer orden. Obsérvese la existencia de concha acústica únicamente en la primera configuración.

En este recinto, al igual que en otros muchos, las sillas que sólo se utilizan en la configuración de sala de conciertos están montadas sobre una grada retráctil o telescópica que queda completamente oculta en la configuración de teatro.

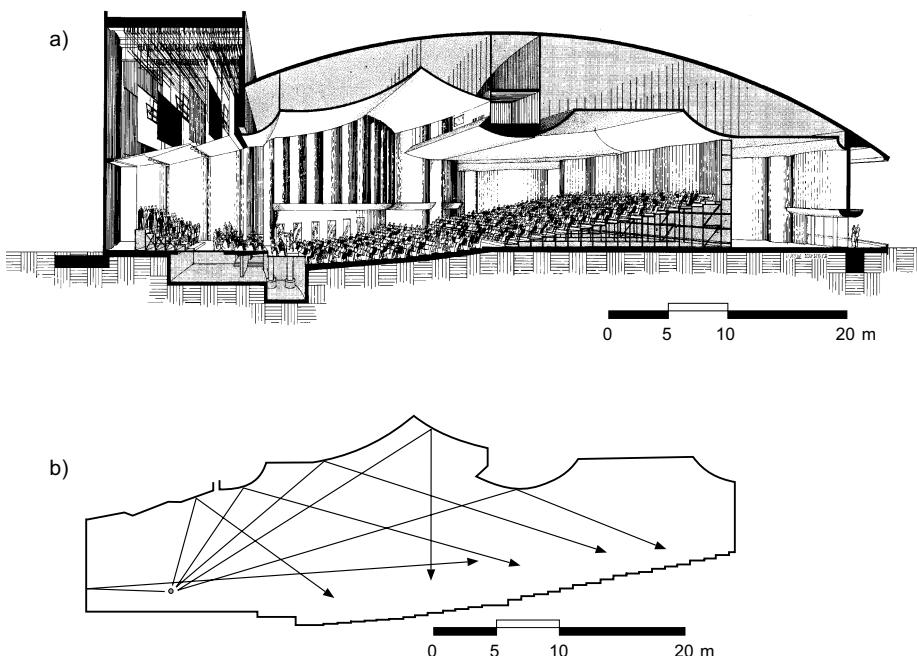


Fig. 6.2 Veterans' Memorial Auditorium, San Rafael (California, EE.UU.):
a) configuración de sala de conciertos; b) representación de reflexiones de primer orden

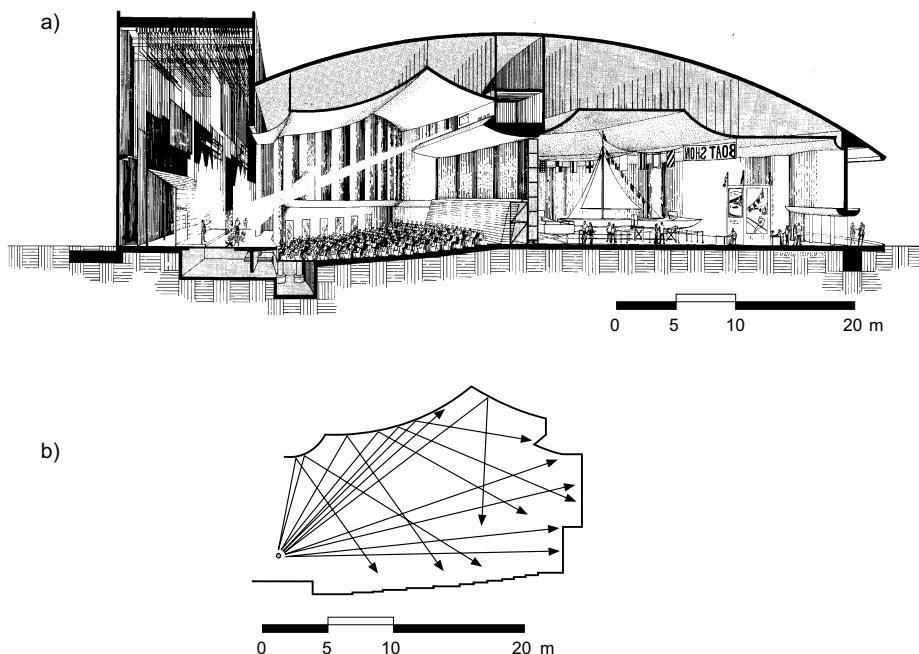


Fig. 6.3 Veterans' Memorial Auditorium, San Rafael (California, EE.UU.):
a) configuración de teatro; b) representación de reflexiones de primer orden

6.2.1.2 Sistema de cierre y apertura del falso techo

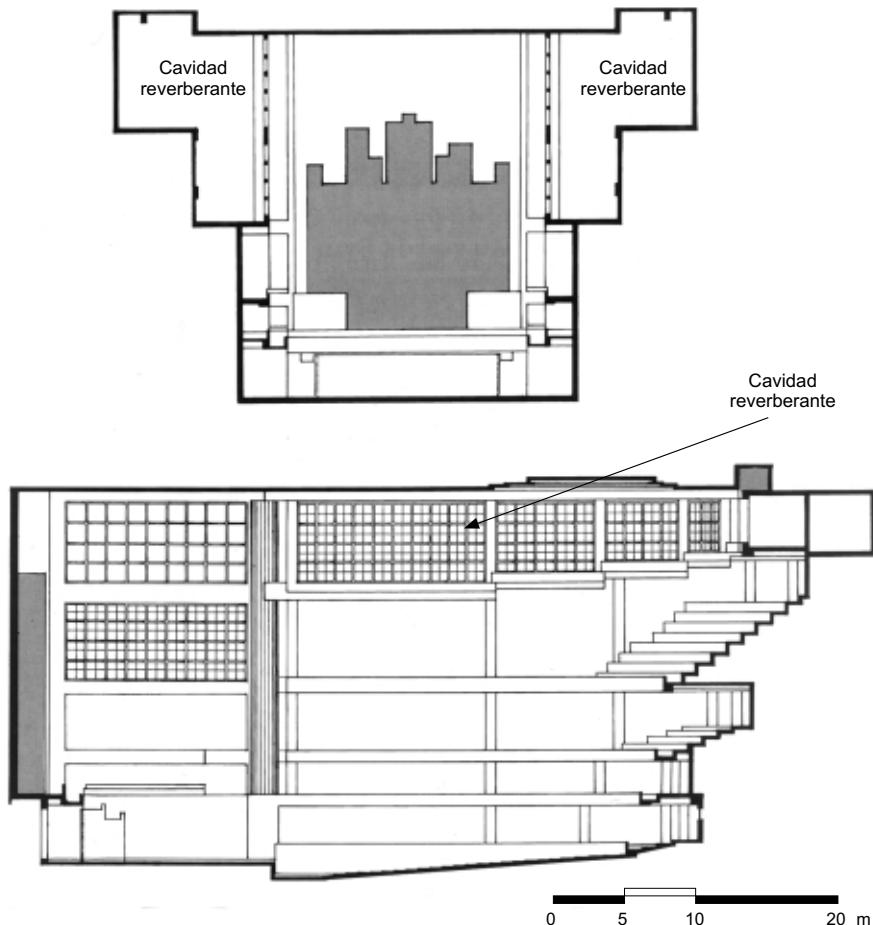
Este sistema permite un acoplamiento entre la cavidad situada por encima del falso techo y la sala principal. Para que sea efectivo es preciso que se cumplan dos condiciones referidas al porcentaje de superficie abierta y a la naturaleza del espacio superior. En cuanto al mencionado porcentaje, la experiencia demuestra que debe ser mayor que un 40%. Por lo que se refiere al espacio superior, es preciso que sea muy reverberante. En el caso de que en dicho espacio existan superficies absorbentes o elementos que actúen como difusores del sonido, es muy probable que el volumen extra no contribuya a un incremento apreciable del tiempo de reverberación. En cualquier caso, la modificación del RT suele ser relativamente pequeña debido a que la cantidad de energía transferida entre ambos espacios es más bien limitada.

6.2.1.3 Cavidades reverberantes acopladas a la sala

Se trata de un sistema parecido al anterior, con la diferencia de que las cavidades acopladas a la sala principal son siempre muy reverberantes y han sido específicamente diseñadas con el propósito de incrementar el volumen total del recinto. Habitualmente, suelen estar situadas en la zona perimetral del mismo y el acoplamiento suele realizarse por medio de un sistema de cierre gobernado por control remoto. Cuando las compuertas de dicho sistema están cerradas,

la sala tiene su propio tiempo de reverberación. En el momento en que se abren tiene lugar un acoplamiento acústico, cuyo efecto se manifiesta en forma de una prolongación del tramo final de la cola reverberante.

A modo de ejemplo, en la figura 6.4 se muestra el Eugene McDermott Concert Hall de Dallas (EE.UU.). Esta sala dispone de unas cavidades reverberantes de 7.200 m^3 , situadas alrededor de la zona perimetral superior de la misma, que pueden ser acopladas al volumen principal.



318

Fig. 6.4 Eugene McDermott Concert Hall (Dallas, EE.UU.): situación de las cavidades reverberantes

Al igual que en el sistema anterior, la cantidad de energía transferida en ambos sentidos es reducida, lo cual significa que el efecto auditivo producido por la variación de volumen es en general poco apreciable. Solamente se percibe un tiempo de reverberación claramente más largo inmediatamente después de escuchar un acorde interrumpido de forma repentina. Además, en ocasiones se tiene la sensación de que el sonido reverberante adicional proviene realmente de fuera de la sala principal. Todo ello, sumado a la complejidad propia del diseño, hace que este sistema sea relativamente poco utilizado en la práctica.

6.2.1.4 Paneles móviles suspendidos del techo

Este sistema está basado en la existencia de paneles suspendidos del techo que se pueden mover. Al desplazar en sentido descendente algunos de ellos, es posible reducir el volumen de la sala y, asimismo, si interesa, eliminar la zona de público más alejada del escenario (habitualmente, los anfiteatros). Este sistema presenta una serie de ventajas e inconvenientes, de los cuales cabe destacar los siguientes:

- Ventaja: la aproximación de los paneles a la zona de público puede resultar altamente beneficiosos para aumentar la energía asociada a las primeras reflexiones, siempre y cuando se dé la inclinación adecuada a cada uno de ellos.
- Inconveniente: el sistema de montaje, de por sí complejo, presenta la dificultad añadida de la necesaria compatibilidad con el sistema de iluminación y, en muchos casos, con las conducciones del sistema de climatización.

A modo de ejemplo ilustrativo, en las figuras 6.5 y 6.6 se muestra el Cain Auditorium de Manhattan (Kansas, EE.UU.) en las configuraciones de sala de conciertos y de teatro, res-

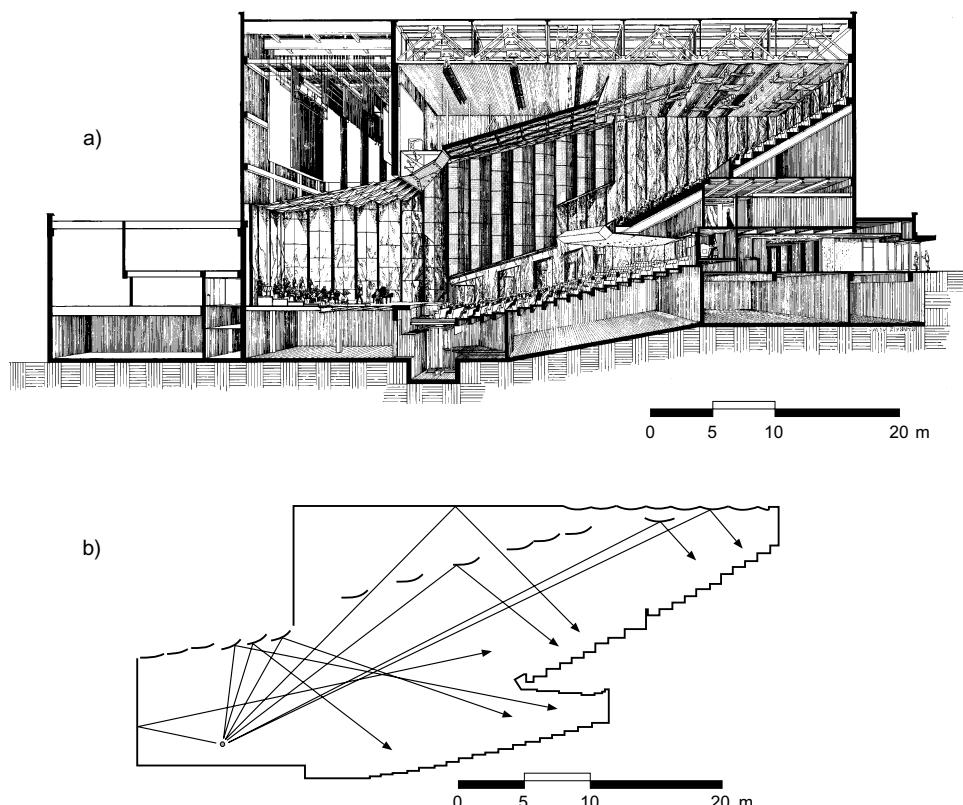


Fig. 6.5 Cain Auditorium, Manhattan (Kansas, EE.UU.): a) configuración de sala de conciertos; b) representación de reflexiones de primer orden

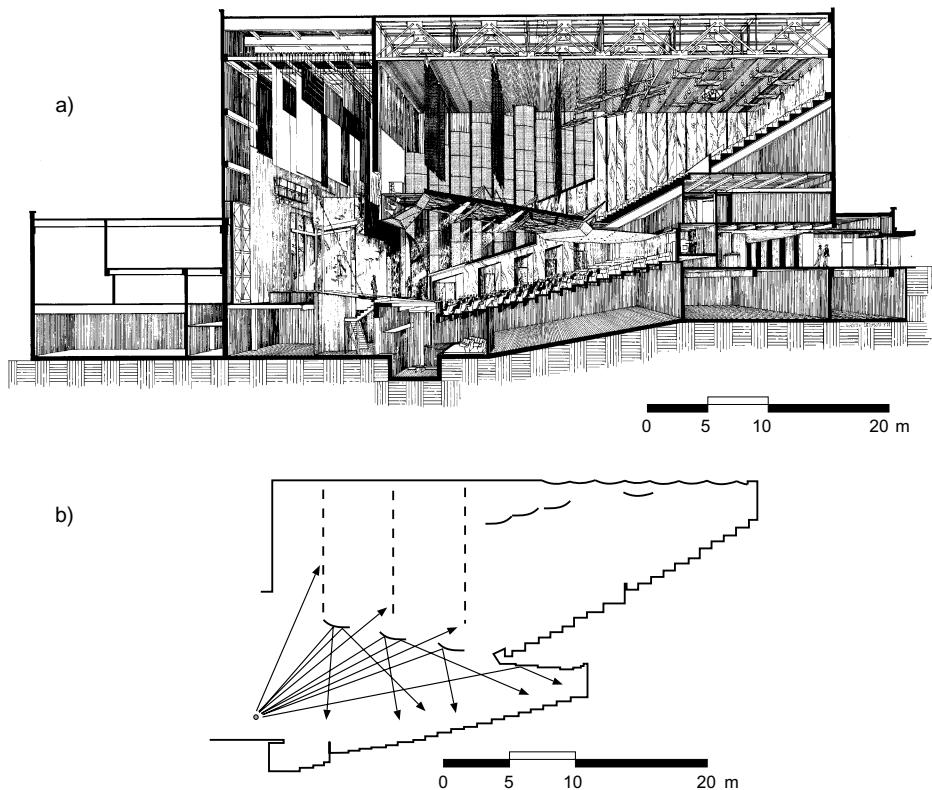


Fig. 6.6 Cain Auditorium, Manhattan (Kansas, EE.UU.): a) configuración de teatro; b) representación de reflexiones de primer orden

pectivamente. En cada figura aparece, asimismo, la correspondiente representación de reflexiones de primer orden.

Al igual que en el ejemplo del apartado 6.2.1.1, se puede ver que sólo existe concha acústica en la configuración de sala de conciertos.

Por otro lado, para que el escenario con concha acústica y la sala actúen realmente como un único espacio acústico en la configuración de sala de conciertos es necesario que la boca del escenario sea lo mayor posible.

En cambio, para la configuración de teatro es aconsejable reducir la altura de la boca del escenario, por ejemplo mediante la colocación del telón cortafuegos en una posición más baja. Ello permite dejar de considerar el volumen de la caja de escenario como parte integrante del volumen de la sala. Esta recomendación se ha llevado a la práctica en el recinto del ejemplo anterior.

6.2.2 Sillas móviles

Las figuras 6.7 y 6.8 muestran dos ejemplos típicos de sillas móviles montadas sobre tribunas telescópicas y sobre guías, respectivamente.

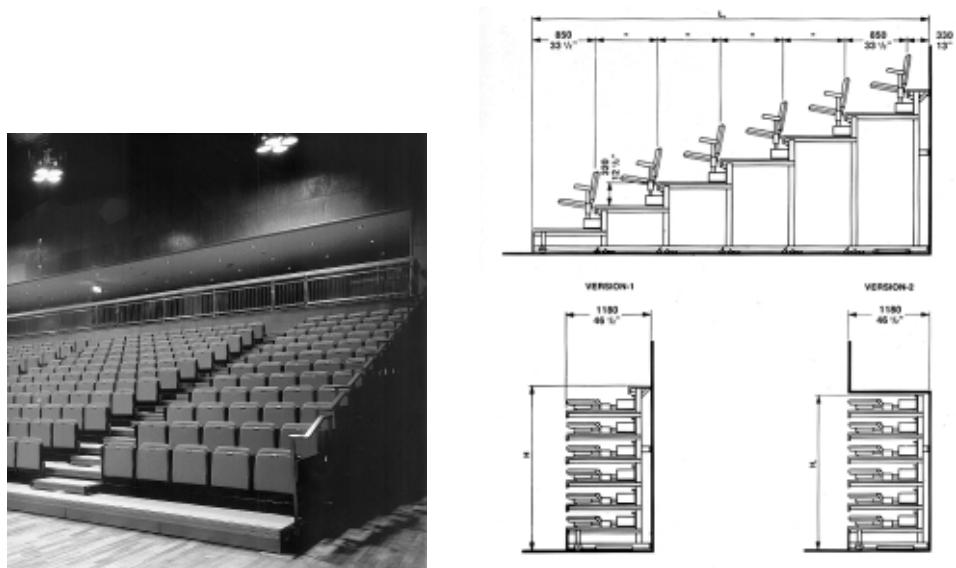


Fig. 6.7 Sistema de tribunas telescopicas instalado en la sala Kotobuki, Japón (System-C de Figueras International Seating, S.A.)



Fig. 6.8 Sistema Mutamut instalado en la sala de conferencias del Palacio de la Mutualité, París, Francia (sillas de la serie Mini Space de Figueras International Seating, S.A.)

La modificación del tiempo de reverberación mediante la utilización de sillas móviles es un sistema en general poco utilizado. Ello se debe fundamentalmente a que, para que dicha modificación sea relevante, es preciso que el porcentaje de superficie tapizada de las sillas sea alto y que, además, la cantidad de sillas retiradas sea importante, lo cual en principio está en contraposición con los intereses de la propiedad de disponer del máximo número de localidades posible. No obstante, existen casos en que dicha opción resulta claramente aconsejable, como, por ejemplo, cuando se pretende utilizar la sala como teatro y, alternativamente, como salón de baile. El uso de tribunas telescopicas es una solución adecuada, puesto que el espacio liberado por las sillas, una vez plegadas las gradas, es aprovechado como pista de baile (apartado 6.2.5). El tiempo de reverberación se ve incrementado no sólo por el hecho de ocultar las sillas tapizadas, sino también por el aumento de volumen que ello conlleva.

6.2.3 Variación de la absorción adicional

El sistema más comúnmente utilizado para obtener un tiempo de reverberación variable está basado en una modificación de absorción, si bien diferente de la proporcionada por la variación de la superficie ocupada por las sillas.

Cuando se trata de salas relativamente pequeñas, dicho sistema es generalmente suficiente para cambiar de una forma perceptible sus características acústicas. A medida que el volumen considerado es mayor, su efectividad se reduce. Ello es debido a que, para conseguir una modificación apreciable de los valores del tiempo de reverberación, es indispensable que la superficie con una absorción variable sea comparable con la superficie ocupada por las sillas.

Seguidamente se describen los métodos más habituales encaminados a la obtención de una absorción adicional variable.

6.2.3.1 Cortinas

La utilización de cortinas por delante de paredes reflectantes permite conseguir una cierta variación del grado de viveza de la sala, siempre y cuando su densidad sea suficientemente elevada (del orden de $0,5 \text{ Kg/m}^2$). En ocasiones, por motivos estéticos, se ocultan detrás de pantallas acústicamente transparentes.

De todas formas, la pobre absorción de las mismas a bajas frecuencias produce un cierto desequilibrio en los nuevos valores de los tiempos de reverberación, ya que la reducción obtenida sólo es apreciable a frecuencias medias y altas. Con objeto de mejorar la absorción en dicha banda de frecuencias bajas, es aconsejable situarlas a la mayor distancia posible de las paredes, procurando además que dicha distancia sea variable (apartado 2.2.4.5).

Las cortinas pueden ser recogidas lateral o verticalmente, y guardadas con un criterio de máxima hermeticidad. Alternativamente, en el caso de que se recojan verticalmente, es posible ocultarlas a través de aberturas practicadas en el falso techo.

Por otro lado, si el recinto considerado dispone de diversos pisos con palcos y estos han sido construidos de manera que exista un espacio libre entre su parte posterior y la pared, se

puede aprovechar dicha zona para colocar las cortinas. Como quiera que el espacio útil es grande, es posible conseguir cambios apreciables del tiempo de reverberación.

A modo de ejemplo, en la figura 6.9 se muestra una sección transversal de una de las torres del Derngate Centre de Northampton (Gran Bretaña), diseñadas siguiendo este criterio.

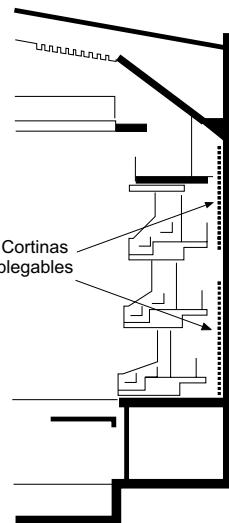


Fig. 6.9 Sección transversal de una de las torres del Derngate Centre (Northampton, Gran Bretaña) con indicación de la ubicación de las cortinas plegables

6.2.3.2 Paneles móviles reflectantes

Este sistema está basado en la instalación de paneles móviles reflectantes por delante de la pared (o paredes) de interés, que se pueden desplazar lateralmente por medio de guías. La pared se reviste al 50% con módulos de material absorbente con una capacidad de absorción lo más elevada posible.

El desplazamiento de dichos paneles deja a la vista, según el grado de reverberación deseado, o bien un determinado número de módulos absorbentes, o bien el tramo de pared de obra revestido con paneles reflectantes. La movilidad de cada panel es independiente de la del resto de paneles, con el fin de que la modificación de los tiempos de reverberación sea continua. De todas formas, la máxima absorción, correspondiente al caso de que queden al descubierto todos los módulos de material absorbente, es relativamente limitada puesto que, en tal caso, continúa existiendo un 50% de superficie de pared cubierta por los paneles móviles reflectantes.

En la figura 6.10 se muestran las dos posiciones extremas de dos paneles móviles montados por delante de una pared tratada con material absorbente en un 50% de superficie.

Según se observa, tanto los paneles móviles como los paneles fijos, que ocupan el 50% de la superficie de la pared, tienen una forma ligeramente convexa a fin de evitar posibles efectos de coloraciones y/o ecos.

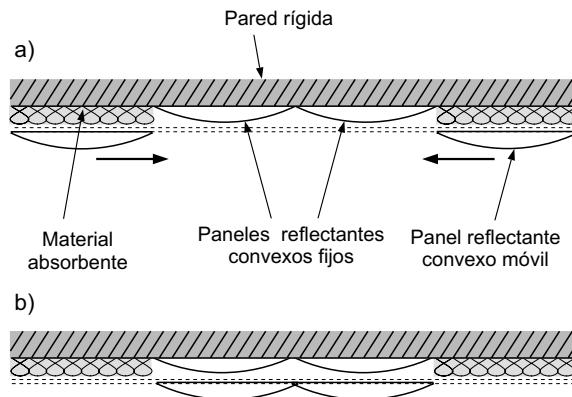


Fig. 6.10 Paneles móviles reflectantes montados delante de una pared tratada, en un 50%, con material absorbente (vista en planta): a) posición de mínima absorción; b) posición de máxima absorción

6.2.3.3 Paneles perforados superpuestos

Este sistema clásico está basado en la utilización de dos paneles reflectantes perforados, uno fijo y otro móvil, colocados por delante de un conjunto de módulos de material absorbente fijados directamente sobre la pared (o paredes) de interés.

Cuando el panel móvil se coloca de manera que los orificios coinciden, se crea un resonador múltiple de cavidad (apartado 2.2.5.4), mientras que cuando se desplaza de forma que los orificios no quedan alineados, el absorbente queda prácticamente aislado de la sala (figura 6.11).

El inconveniente de este sistema es que la variación del tiempo de reverberación en función de la frecuencia es muy poco uniforme, ya que se produce una brusca disminución del

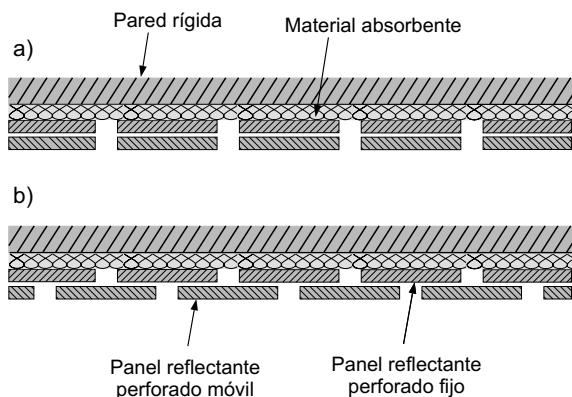


Fig. 6.11 Paneles perforados montados delante de una pared tratada con material absorbente (vista en planta): a) posición de máxima absorción (resonador múltiple de cavidad); b) posición de mínima absorción (orificios no alineados)

misma a la frecuencia de resonancia del resonador. No hay que olvidar que los resonadores son absorbentes selectivos y que presentan una máxima absorción a dicha frecuencia de resonancia.

6.2.3.4 Paneles giratorios

a) Rotación de 180°

Este sistema, también clásico, se basa en la utilización de paneles giratorios con una cara reflectante y otra absorbente que pueden girar hasta 180° y que se colocan sobre la pared (o paredes) de interés. En su posición cerrada ofrecen una superficie vista reflectante, mientras que en su posición abierta dejan al descubierto tanto su cara absorbente como los módulos absorbentes fijos previamente instalados sobre un 50% de la pared (figura 6.12).

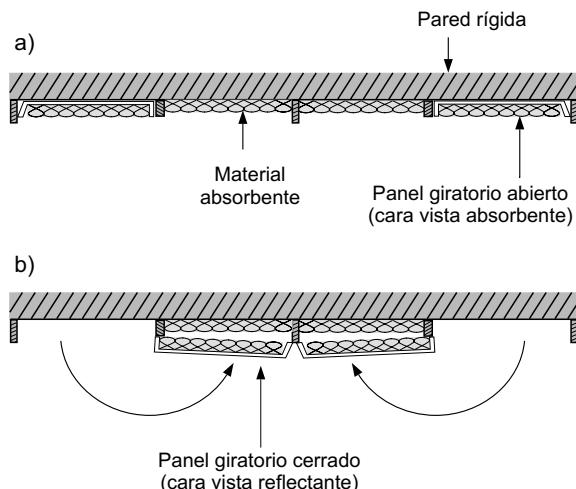


Fig. 6.12 Paneles giratorios, con una cara absorbente y otra reflectante, montados a modo de puertas sobre la pared (vista en planta): a) posición de máxima absorción; b) posición de mínima absorción

La ligera inclinación de los paneles móviles cuando están cerrados contribuye a evitar la posible aparición de coloraciones y/o ecos.

b) Rotación de 90°

Una variante del sistema anterior consiste en la colocación de módulos absorbentes sobre la totalidad de la pared y, asimismo, en el montaje de los paneles giratorios con un sentido de giro alternativo, según se indica en la figura 6.13. En este caso, el ángulo de giro máximo queda limitado a 90°.

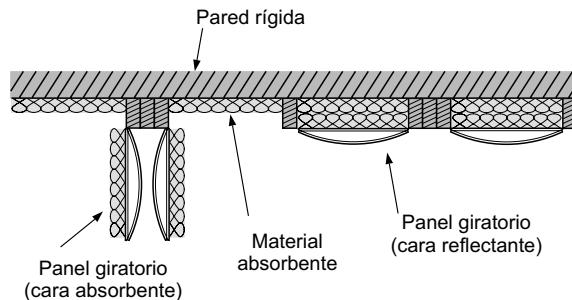


Fig. 6.13 Paneles giratorios, con una cara absorbente y otra reflectante, montados con un sentido de giro alternativo (vista en planta)

Según se puede observar, la cara reflectante de los paneles tiene una forma convexa con objeto de evitar la aparición de posibles coloraciones y/o ecos cuando se hallan en la posición cerrada. Con este sistema es posible conseguir una mayor variación del tiempo de reverberación debido a que la superficie absorbente total es mayor.

c) Rotación de 360°

Otra posibilidad consiste en que los paneles puedan rotar 360° sobre su eje. De esta forma, cuando todas las caras reflectantes están alineadas y situadas del lado del recinto, la absorción es mínima, en tanto que, cuando las caras alineadas son las absorbentes, sucede justo lo contrario.

Basados en esta idea, existen unos prismas giratorios que disponen de una cara absorbente, una reflectante y una difusora. Lógicamente, el uso de un conjunto de estos elementos en una sala le confiere un grado de versatilidad muy elevado, ya que es posible realizar cualquier combinación entre todos ellos. En la figura 6.14 se muestran diferentes combinaciones entre tres de dichos prismas, así como dos prismas comerciales.

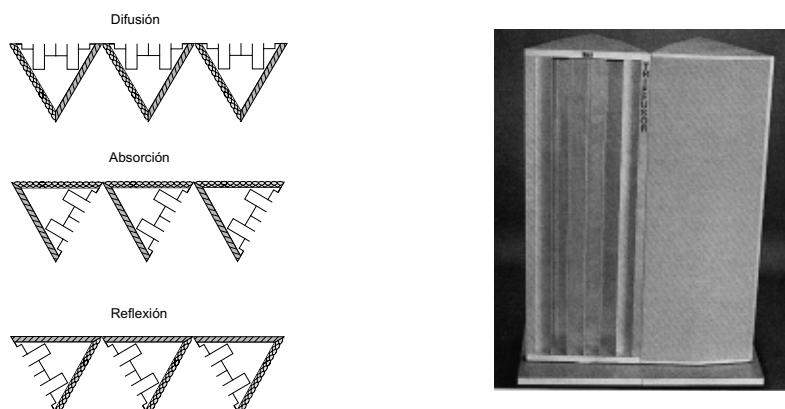


Fig. 6.14 Prismas giratorios: a) diversas combinaciones entre tres prismas diseñados para conseguir una acústica variable; b) prismas comerciales mostrando su cara difusora (izquierda) y su cara absorbente (derecha) (modelo Triffusor de RPG Diffusor Systems, Inc., distribuido por Audio Síntesis, S.L.)

Dicha idea fue utilizada por Peutz en 1.977 en la famosa sala de acústica variable “Espace de Projection” perteneciente al IRCAM (“Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique”) de París (Francia).

6.2.4 Ventajas e inconvenientes de la variación de absorción respecto a la variación de volumen

Los principales inconvenientes que puede llegar a presentar la absorción variable están relacionados con la repercusión que la misma puede tener sobre el nivel de presión sonora y también sobre las primeras reflexiones.

En cuanto al nivel de presión sonora, conviene tener presente que dicho nivel depende de la absorción total en el recinto. A mayor absorción, nivel más bajo. Por lo tanto, en la configuración de teatro, que es cuando la absorción variable es máxima, puede ocurrir que el nivel de presión sonora sea excesivamente bajo, especialmente en el caso de que los tiempos de reverberación obtenidos también lo sean.

Con relación a las primeras reflexiones, la introducción de absorción adicional en la configuración de teatro puede dar lugar a la supresión de una parte importante de energía asociada a las mismas, máxime teniendo presente que generalmente los materiales absorbentes se suelen colocar sobre las paredes laterales, generadoras potenciales de este tipo de reflexiones. Idealmente, el material absorbente debería colocarse de forma que únicamente afectase a las reflexiones tardías, pero en la práctica ello es extremadamente difícil.

Ambos inconvenientes dejan de serlo cuando se utiliza un sistema de megafonía, tanto en la configuración de teatro como en cualquier otra utilización del recinto en condiciones de máxima absorción, como, por ejemplo, sala de conferencias, sala de conciertos de música rock/ popular con sonido amplificado, o cine.

La variación de volumen presenta la ventaja respecto a la absorción variable de que la repercusión de dicha variación sobre el nivel de presión sonora es, en principio, mínima. Por contra, los diferentes sistemas basados exclusivamente en una variación de volumen son complejos, costosos y, en consecuencia, poco utilizados.

A la vista de lo anterior, resulta evidente que la solución óptima para conseguir una acústica variable, tanto desde un punto de vista arquitectónico como acústico, consiste en combinar una variación de volumen con una variación de absorción. Con ello se podrá conseguir un cambio sustancial del tiempo de reverberación sin tener que estar sujeto a las desventajas inherentes a la utilización exclusiva de uno de los dos sistemas.

6.2.5 Ejemplo práctico de diseño. Teatro Orchard (Gran Bretaña)

6.2.5.1 Configuración para teatro o sala de conferencias (figura 6.15)

- Falso techo: cerrado
- Superficie del falso techo vista desde la sala: totalmente reflectante
- Tiempo de reverberación a frecuencias medias (valor estimado): $RT_{mid} = 1\text{ s}$

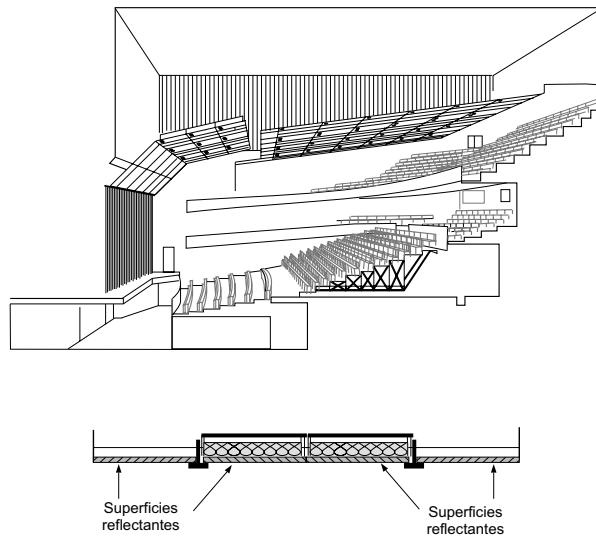


Fig. 6.15 Teatro Orchard: configuración para teatro o sala de conferencias

6.2.5.2 Configuración para música sinfónica (figura 6.16)

328

- Falso techo: abierto en un 50% → incremento de volumen
- Superficie del falso techo vista desde la sala (50% del total): totalmente reflectante
- Tiempo de reverberación a frecuencias medias (valor estimado): $RT_{mid} = 1,5 \text{ s}$

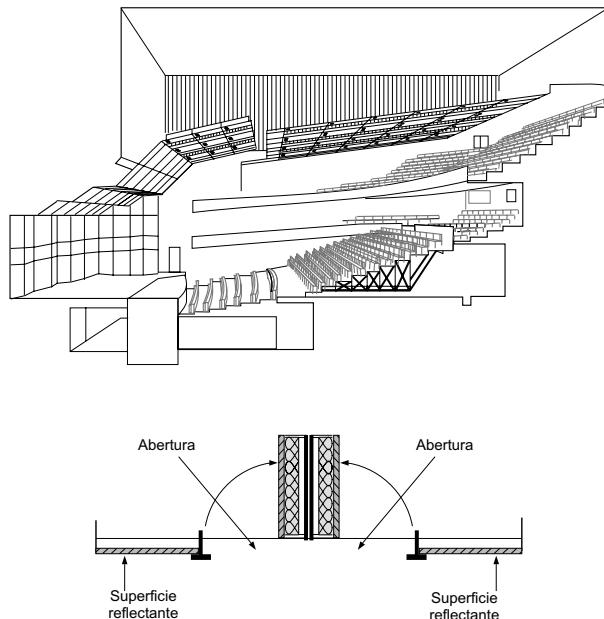
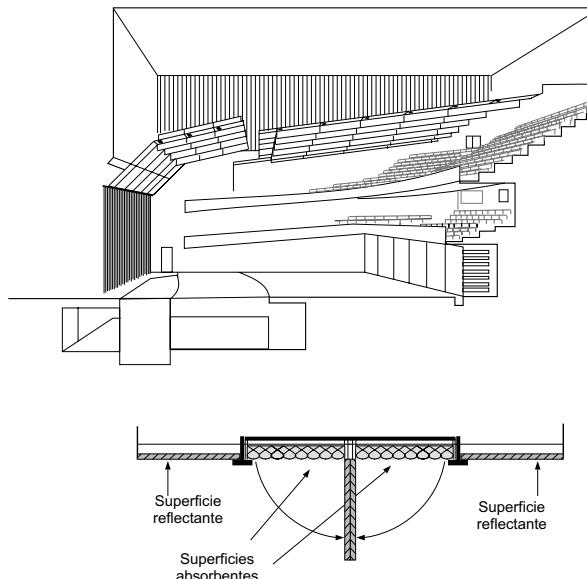


Fig. 6.16 Teatro Orchard: configuración para música sinfónica

6.2.5.3 Configuración para baile o banquetes (figura 6.17)

- Falso techo: cerrado
- Superficie del falso techo vista desde la sala: 50% reflectante y 50% absorbente
- Gradas telescópicas (platea): plegadas
- Tiempo de reverberación a frecuencias medias (valor estimado): $RT_{mid} = 1,3$ s



329

Fig. 6.17 Teatro Orchard: configuración para baile o banquetes

6.3 Acústica variable mediante sistemas electrónicos

El control del tiempo de reverberación puede realizarse de forma electrónica como sistema alternativo a la utilización de elementos físicos variables. En tal caso, el tiempo de reverberación inicial se debe ajustar al valor mínimo deseable y, posteriormente, incrementarse mediante el sistema electrónico elegido.

Así pues, volviendo al ejemplo inicial de una sala multiuso pensada para funcionar como teatro y como sala sinfónica, es aconsejable diseñarla para que su tiempo de reverberación natural sea del orden de 1 s (valor recomendado para teatro), y conseguir un incremento del mismo hasta 2 s (valor recomendado para una sala de conciertos) por medio de la utilización del mencionado sistema electrónico. De esta forma se logrará disponer de una sala adecuada para música, pero con un volumen muy inferior al requerido en caso de no disponer de dicho sistema de acústica variable.

Todos los sistemas electrónicos existentes en la actualidad están basados en el principio que se expone a continuación:

- Captación de la señal sonora mediante micrófonos distribuidos por la sala
- Procesado de las señales eléctricas suministradas por los micrófonos
- Amplificación de dichas señales mediante etapas de potencia (amplificadores)
- Envío de las señales eléctricas amplificadas a una serie de altavoces también distribuidos por la sala
- Radiación de energía sonora por medio de dichos altavoces, que se suma al campo sonoro existente

Las diferencias entre todos ellos estriban en el número y ubicación de los micrófonos y altavoces utilizados, así como en el tipo de procesado de la señal que realizan. Generalmente se colocan de manera que no pueden ser detectados a simple vista.

Los sistemas más conocidos son los siguientes:

- Resonancia Asistida (AR)
- Reverberación de canal múltiple (MCR) o Sistema de Amplificación del Campo Sonoro
- Sistema de Control Acústico (ACS)

330

6.3.1 Resonancia Asistida (AR)

El sistema de Resonancia Asistida AR (“Assisted Resonance”) fue inventado por Parkin con el fin de resolver los problemas de bajo tiempo de reverberación a frecuencias bajas en el Royal Festival Hall de Londres (Gran Bretaña).

El sistema utiliza un elevado número de canales (canal = micrófono + amplificador + altavoz). En la figura 6.18 se muestra el esquema básico de un canal.

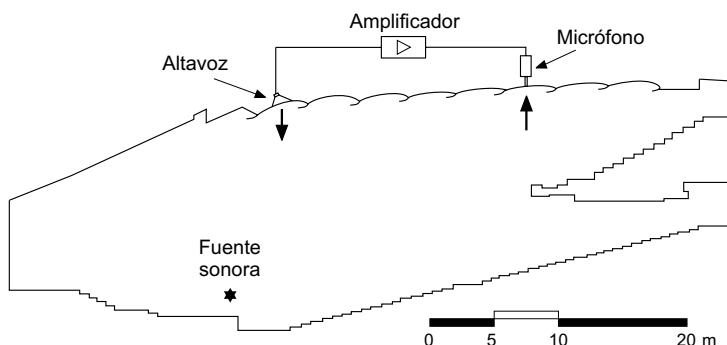


Fig. 6.18 Esquema básico de un canal perteneciente a un sistema de Resonancia Asistida (AR)

Cada micrófono está situado dentro de un resonador simple de cavidad (figura 6.19), por lo que la señal captada por el mismo presenta un máximo a la frecuencia de resonancia de dicho resonador. Por lo tanto, el conjunto de señales obtenidas son señales filtradas, es decir, cada canal opera a una frecuencia diferente.

El sistema es eficiente únicamente a frecuencias situadas por debajo de 2 kHz.

En la figura 6.20 se observan los tiempos de reverberación correspondientes al Royal Festival Hall, con el sistema AR conectado y desconectado. El número de canales utilizado es de 172.

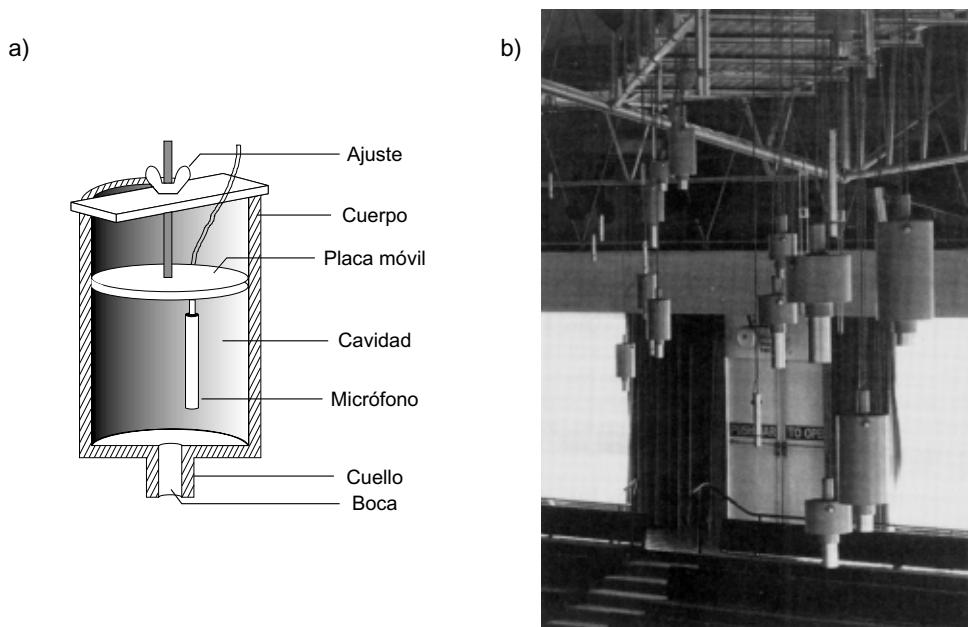


Fig. 6.19 Resonadores simples de cavidad (Helmholtz) con micrófonos en su interior integrantes de un sistema de Resonancia Asistida (AR): a) esquema básico; b) disposición práctica de un conjunto de resonadores

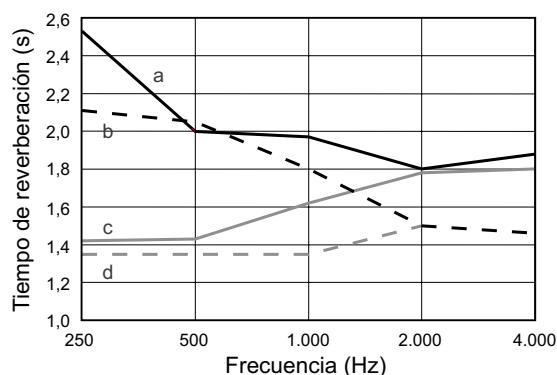


Fig. 6.20 Tiempos de reverberación del Royal Festival Hall de Londres (Gran Bretaña) correspondientes a:

- Resonancia Asistida conectada (sala vacía);
- Resonancia Asistida conectada (sala ocupada);
- Resonancia Asistida desconectada (sala vacía);
- Resonancia Asistida desconectada (sala ocupada)

Según se puede observar, los incrementos del tiempo de reverberación a bajas y medias frecuencias conseguidos al conectar el sistema AR son sustanciales.

6.3.2 Reverberación de canal múltiple (MCR) o Sistema de Amplificación del Campo Sonoro

Este sistema, desarrollado por la empresa Philips, se diferencia del anterior en que los micrófonos se montan directamente sobre las paredes y/o el techo de la sala y, por lo tanto, las señales captadas por los mismos tienen un ancho de banda mucho más amplio. Es por ello que también es efectivo a altas frecuencias. En concreto, funciona correctamente desde 63 Hz hasta 8 kHz.

El sistema está diseñado para producir un aumento de nivel sonoro en lugar de un incremento del tiempo de reverberación. El número de canales imprescindibles para que dicho aumento sea apreciable es elevado. Por ejemplo, para conseguir un incremento del nivel de presión sonora de 3 dB son precisos 100 canales.

Su instalación y ajuste son complejos, al ser necesario incorporar del orden de cuatro filtros electrónicos en cada canal para que el funcionamiento sea óptimo. Su utilización es limitada.

6.3.3 Sistema de Control Acústico (ACS)

332

Este sistema fue desarrollado en la Universidad de Delft (Holanda) a partir de un antiguo sistema denominado “Ambiofonía”. Difiere sustancialmente de los dos anteriores en que es capaz de crear un campo reverberante completamente nuevo. Utiliza un número muy inferior de canales (del orden de 12). Las señales captadas por los micrófonos son procesadas por una unidad de reverberación en lugar de ser directamente filtradas y/o amplificadas. Su coste es apreciablemente inferior al de los dos sistemas anteriores.

6.4 Ventajas e inconvenientes de la utilización de sistemas electrónicos frente al uso de elementos físicos variables

La obtención de una acústica variable mediante la utilización de sistemas electrónicos presenta las siguientes ventajas e inconvenientes con respecto al uso de elementos físicos variables:

6.4.1 Ventajas

- Obtención de tiempos de reverberación más elevados, a igualdad de volumen del recinto
- Obtención de márgenes mayores de variación del tiempo de reverberación
- Sistemas totalmente automatizados y, por lo tanto, de operación sencilla
- Sistemas generalmente menos costosos

6.4.2 Inconvenientes

- Riesgo de que el sonido obtenido sea poco natural
- Riesgo de acoplamiento entre los micrófonos y los altavoces y, por tanto, de aparición de un pitido inadmisible (efecto Larsen)
- Necesidad de un control y mantenimiento permanente a cargo de personal especializado
- Funcionamiento óptimo solamente si la sala está bien diseñada desde un punto de vista acústico

Finalmente, cabe señalar que, si bien es cierto que la utilización de sistemas electrónicos para conseguir una acústica variable no está exenta de inconvenientes, a la hora de diseñar nuevos recintos multiuso existe una clara tendencia a incorporar este tipo de sistemas.

6.5 Comentario final

En el caso de que el diseño de un espacio multiuso mediante acústica variable no sea factible (habitualmente por motivos presupuestarios), no quedará otra alternativa que optar por una solución acústica de compromiso, teniendo presente que no se podrá conseguir una acústica óptima para ningún uso.

De todas formas, antes de proceder a cada diseño concreto, habrá que solicitar al cliente una lista de prioridades en cuanto a los usos previstos. En función del orden pre establecido, dicha lista servirá de base para tomar decisiones en cuanto a volumen, formas y materiales destinados al revestimiento de sus superficies límite.

En el caso de que no sea posible conseguir dicha información durante la fase de diseño, Fasold y Winkler recomiendan que el tiempo de reverberación a frecuencias medias (500 Hz - 1 kHz) para recintos ocupados con un número de localidades entre 800 y 900 esté situado entre 1,3 y 1,4 s.

Como es lógico, cualquier solución de compromiso es mucho más efectiva para salas más bien pequeñas, ya que la inteligibilidad de la palabra siempre es menos conflictiva y la existencia de tiempos de reverberación relativamente cortos para la música, más tolerable.

Diagnosis, simulación acústica de recintos y sistemas de creación de sonido virtual

7.1 Diagnosis acústica de recintos

7.1.1 Introducción

En este apartado se describen, en primer lugar, los protocolos de medida necesarios para llevar a cabo una diagnosis o caracterización acústica de recintos destinados, tanto a la palabra (salas de conferencias y teatros) como a la música (salas de conciertos). En segundo lugar, y a título de ejemplo, se dan los resultados de las medidas efectuadas en un teatro y en una sala de conciertos.

335

Los protocolos expuestos son los que se utilizaron a lo largo del estudio de caracterización acústica de catorce Teatros y Auditorios de Cataluña^(*), realizado durante los años 1.995 y 1.996, mientras que los resultados presentados corresponden a dos de los recintos estudiados. Se trata del Teatro Municipal de Girona y del Palau de la Música Catalana de Barcelona.

7.1.2 Protocolo de medida correspondiente a recintos destinados a la palabra

7.1.2.1 Configuración de medida y parámetros relacionados

a) Configuración de medida

Los elementos que es preciso utilizar son los siguientes:

- Ordenador portátil
- Analizador acústico

^(*) Estudio llevado a cabo conjuntamente por el Grupo de Acústica Aplicada del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones (Universidad Politécnica de Cataluña) y la empresa Audioscan, ingeniería del sonido, por encargo del Departamento de Cultura de la Generalitat de Cataluña

- Caja acústica autoamplificada
- Micrófono omnidireccional (colocado a una altura de 1,2 m respecto al suelo)

La configuración de medida se observa en la figura 7.1.

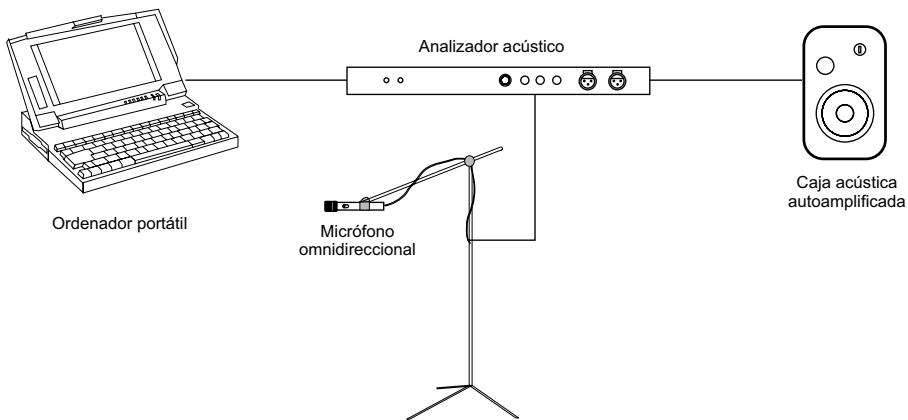


Fig. 7.1 Configuración de medida para recintos destinados a la palabra

336

En la figura 7.2 se muestran los diagramas polares de directividad (en el plano horizontal) de la caja acústica utilizada correspondientes a las bandas de frecuencias de octava centradas en 250 Hz, 1 kHz y 4 kHz.

El motivo de elegir una caja acústica con los diagramas polares anteriores es la similitud de los mismos con los correspondientes a los de la voz humana.

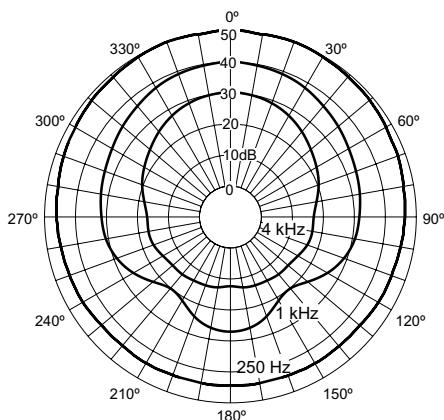


Fig. 7.2 Diagramas polares de directividad de la caja acústica utilizada correspondientes a las bandas de 250 Hz, 1 kHz y 4 kHz

b) Parámetros

Los parámetros relacionados con la configuración de medida anterior son los siguientes:

- Ruido de fondo (NC)
- Tiempo de reverberación (RT)
- Claridad de la voz (C_{50})
- Definición (D)
- Inteligibilidad de la palabra (RASTI)
- Sonoridad (S)

7.1.3 Protocolo de medida correspondiente a recintos destinados a la música

7.1.3.1 Configuración de medida nº1 y parámetros relacionados

a) Configuración de medida nº1: medidas con micrófono omnidireccional

Los elementos que es preciso utilizar son los siguientes:

- Ordenador portátil
- Analizador acústico
- Etapa de potencia
- Caja acústica omnidireccional (dodecaedro)
- Micrófono omnidireccional (colocado a una altura de 1,2 m respecto al suelo)

337

La configuración de medida nº1 se observa en la figura 7.3.

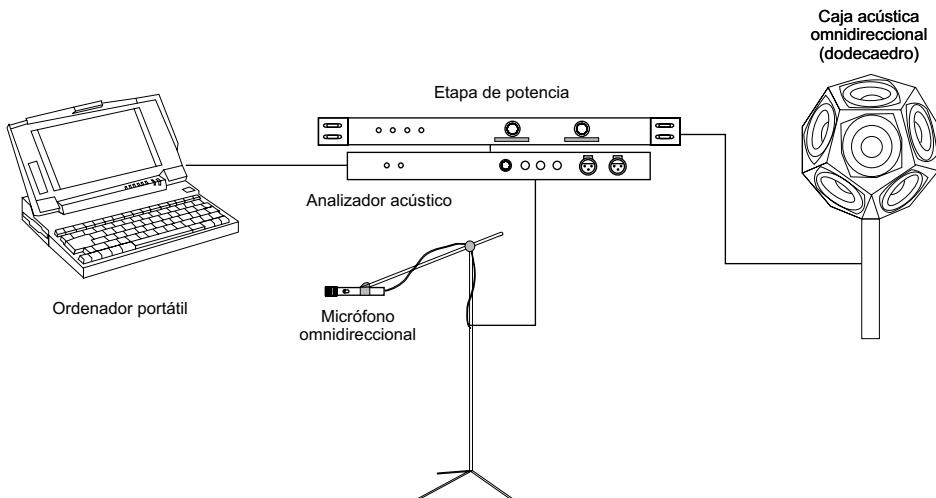


Fig. 7.3 Configuración de medida nº1 para recintos destinados a la música

b) Parámetros

Los parámetros relacionados con la configuración de medida anterior son los siguientes:

- Ruido de fondo (NC)
- Tiempo de reverberación (RT)
- Calidez acústica (BR) y brillo (Br)
- “Early Decay Time” (EDT)
- Sonoridad (G)
- “Initial-Time-Delay Gap” (t_l)
- Relaciones energéticas (ELR): C_t , C_{t0} , C_x , $(C_{t0} - C_x)$
- Claridad musical (C_{80})
- Curva de energía reflejada acumulada (RECC)
- Eficiencia Lateral (LF)
- Soporte Objetivo (ST1)

7.1.3.2 Configuración de medida nº2 y parámetro relacionado**a) Configuración de medida nº2: medidas con micrófono bidireccional**

338

Los elementos que es preciso utilizar coinciden con los de la configuración nº1, exceptuando el micrófono omnidireccional que se sustituye por otro bidireccional.

b) Parámetro

El parámetro relacionado con la configuración de medida anterior es el siguiente:

- Eficiencia Lateral (LF)

7.1.3.3 Configuración de medida nº3 y parámetro relacionado**a) Configuración de medida nº3: medidas con cabeza artificial (“dummy head”)**

Los elementos que es preciso utilizar son los siguientes:

- Ordenador portátil
- Analizador acústico
- Etapa de potencia
- Caja acústica omnidireccional (dodecaedro)
- Cabeza artificial (con un micrófono omnidireccional colocado en la entrada de cada oído)

La configuración de medida nº3 se observa en la figura 7.4.

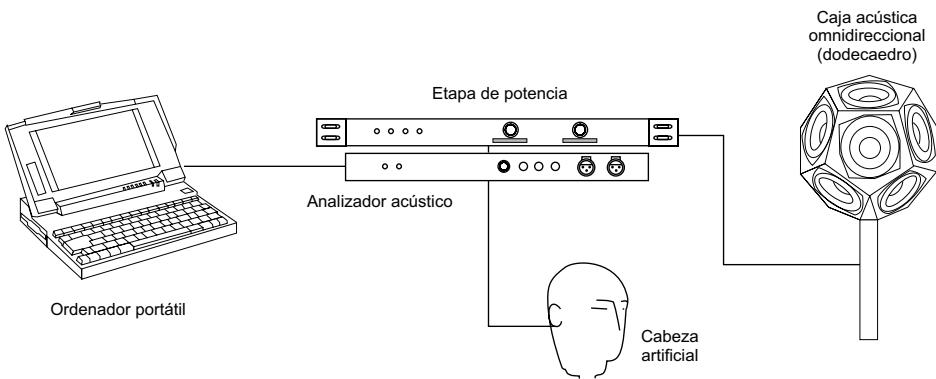


Fig. 7.4 Configuración de medida nº3 para recintos destinados a la música

b) Parámetro

El parámetro relacionado con la configuración de medida anterior es el siguiente:

- Correlación cruzada interaural (IACC)

En la figura 7.5 se observa el dodecaedro utilizado en las medidas.



Fig. 7.5 Dodecaedro utilizado en las medidas

En cuanto a las características direccionales del dodecaedro, en la figura 7.6 se muestran los diagramas polares de directividad en los planos horizontal y vertical correspondientes a las bandas de frecuencias de octava centradas en 250 Hz, 1 kHz y 4 kHz.

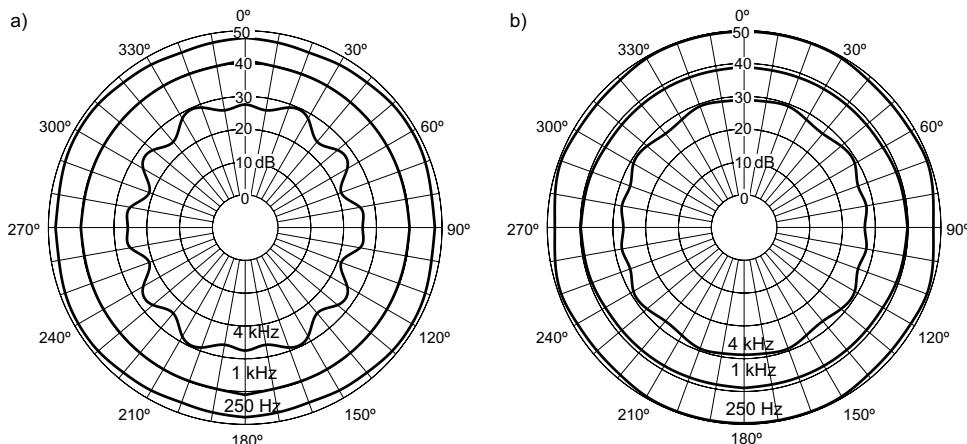


Fig. 7.6 Diagramas polares de directividad del dodecaedro utilizado correspondientes a las bandas de 250 Hz, 1 kHz y 4 kHz: a) plano horizontal; b) plano vertical

340

Se observa que, efectivamente, la radiación de la fuente sonora tiende a ser omnidireccional en todas las bandas de frecuencias de interés.

7.1.4 Ejemplos prácticos de diagnosis acústica

Según se ha comentado en el apartado 7.1.1, los dos ejemplos prácticos de diagnosis acústica, extraídos del estudio de caracterización acústica de catorce Teatros y Auditorios de Cataluña, son los correspondientes al Teatro Municipal de Girona y al Palau de la Música Catalana de Barcelona. Los principales objetivos de dicho estudio fueron los siguientes:

- Efectuar un diagnóstico del comportamiento acústico de los recintos estudiados basado en la interpretación de los valores de los parámetros medidos.
- Sugerir posibles actuaciones a fin de mejorar las condiciones acústicas de las salas estudiadas.

Asimismo, se creó una base de datos de sonido virtual con objeto de poder simular de forma auditiva cualquiera de dichas salas. El sistema de creación de sonido virtual, basado en el programa de simulación acústica AURA (apartado 7.2) y en la unidad de reverberación digital Roland R-880, se describe en el apartado 7.3.4.

Como paso previo a la presentación de los pertinentes resultados, en la tabla 7.1 se da la relación de recintos estudiados, indicando su volumen, número de asientos, años de inauguración y de restauración, y nombre del correspondiente arquitecto o arquitectos.

SALA	VOLUMEN (m ³)	NÚMERO DE ASIENTOS	AÑOS INAUGURACIÓN/ RESTAURACIÓN	ARQUITECTO/S
Teatro Municipal de Olot (Girona)	2.565	544	1.887	Martí Sureda Deulovol (proyecto original)
			1.992	Llorenç Panella Soler (restauración)
Teatro Ateneu de Igualada (Barcelona)	3.790	673	1.900	Pau Salvat Espasa (proyecto original)
			1.995	Jaume Riba Samarra (restauración)
Teatro Fortuny de Reus (Tarragona)	4.800	855	1.882	Francesc Blanch Pons (proyecto original)
			1.988	C.Espinós / Ll.M.Serra / A.Piñol / J.Huguet (restauración)
Teatro Municipal de Girona	4.000	778	1.860	Martí Sureda Deulovol (proyecto original)
			1.992	M.Bosch / M.Nogués (restauración)
Teatro “El Jardí” de Figueres (Girona)	6.254	1.057	1.917	Proyecto original a cargo de un maestro de obras de nombre desconocido
			1.991	G. López-Atalaya / S.Borzone (restauración)
Auditorio de Tortosa (Tarragona)	3.730	681	1.995	Jordi Bonet Armengol
Teatro Metropol de Tarragona	2.090	511	1.910	Josep M ^a Jujol Gibert (proyecto original)
			1.993	Josep A. Llinàs Carmona (restauración)
Teatro “La Passió” de Esparreguera (Barcelona)	8.700	1.758	1.969	Ignasi Puigjaner Bagaria
Teatro Cirvianum de Torelló (Barcelona)	2.540	516	1.994	Ignasi de Solà-Morales Rubió
Teatro Atlántida de Vic (Barcelona)	3.947	919	1.991	Manel Anglada Bayés
Auditorio de Cornellá (Barcelona)	6.118	698	1.995	Jordi Frontons González
Auditorio de Sant Cugat del Vallés (Barcelona)	6.260	788	1.993	R.Artigues / R.Sanabria
Auditorio de Lleida	7.645	750	1.994	R.Artigues / R.Sanabria

SALA	VOLUMEN (m ³)	NÚMERO DE ASIENTOS	AÑOS INAUGURACIÓN/ RESTAURACIÓN	ARQUITECTO/S
Palau de la Música Catalana (Barcelona)	10.490	2.032	1.908	Lluis Domènech Montaner (proyecto original)
			1.989	Òscar Tusquets Guillén (restauración)

Tabla 7.1 Relación de salas caracterizadas dentro del estudio de Teatros y Auditorios de Cataluña

7.1.5 Diagnosis acústica del Teatro Municipal de Girona (España)



Fig. 7.7 Teatro Municipal de Girona (España)

7.1.5.1 Datos de partida

a) Datos geométricos de la sala

- Volumen (sin caja de escenario): 4.000 m³
- Número de asientos: 778
- Superficie útil escenario: 105 m²
- Superficie acústica efectiva audiencia: 460 m²

b) Condiciones de medida

- Sala vacía
- Escenario vacío
- Temperatura: 19°C
- Humedad relativa: 45%

c) Equipamiento de medida

El equipamiento de medida es el expuesto en el protocolo de medidas correspondiente a recintos destinados a la palabra (apartado 7.1.2).

343

d) Puntos de medida

- Puntos de medida en la sala: las medidas se llevaron a cabo en 10 puntos:
P1 a P4: platea
P5 y P6: primera planta
P7 y P8: segunda planta
P9 y P10: tercera planta

Las medidas se realizaron para las siguientes posiciones de la fuente sonora en el escenario:

A: sobre el eje longitudinal de la sala, a una distancia de 2 m de la boca del escenario y a una altura de 1,5 m respecto al suelo del mismo

B: sobre el eje longitudinal de la sala, a una distancia de 6 m de la boca del escenario y a una altura de 1,5 m respecto al suelo del mismo

- Puntos de medida en el escenario: las medidas en el escenario se realizaron en 3 puntos. Para cada punto de medida la fuente sonora se situó a 1 m del mismo y a una altura de 1,5 m respecto al suelo.

7.1.5.2 Resultados de las medidas (resumen)

a) Ruido de fondo. Curvas NC

Los valores medios de los niveles de ruido de fondo medidos en cada banda de octava con el equipo de climatización desconectado se indican en la tabla 7.2 y en la figura 7.8.

FRECUENCIA (Hz)	NIVELES DE RUIDO DE FONDO, EN dB
63	34
125	31
250	28
500	19
1.000	15
2.000	< 10
4.000	< 10
8.000	16

Tabla 7.2 Valores medios de los niveles de ruido de fondo

344

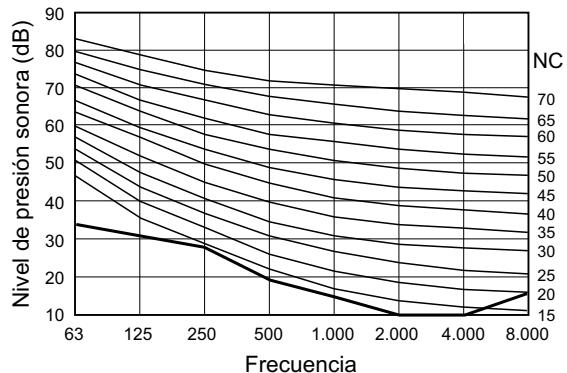


Fig. 7.8 Valores medios de los niveles de ruido de fondo y valores máximos correspondientes a las curvas NC

Los valores medidos se encuentran por debajo de los valores máximos correspondientes a la curva NC-20. Por lo tanto, la curva NC de la sala es la NC-20. Este valor es inferior al valor máximo admisible (NC-25).

b) Tiempo de reverberación (RT)

En la tabla 7.3 y en la figura 7.9 se indican los valores medios de RT para cada una de las bandas de octava situadas entre 125 Hz y 4 kHz, correspondientes a la sala vacía. Estos valores se han obtenido como media aritmética de todos los valores de RT medidos.

En dicha tabla también se muestran los valores medios de RT, suponiendo la sala ocupada (RT_o), para cada una de las bandas de octava situadas entre 125 Hz y 4 kHz. Estos valores se han obtenido a partir de una serie de cálculos teóricos basados en estudios realizados por Barron.

El valor del tiempo de reverberación RT_{mid} correspondiente a la sala ocupada es:

$$RT_{mid}^o = 1,23 \text{ s}$$

Este valor se halla situado prácticamente dentro del margen de valores recomendados para la sala, de acuerdo con su volumen (entre 1 y 1,2 s). Por lo tanto, el grado de viveza de la sala es adecuado para actividades de tipo teatral.

FRECUENCIA (Hz)	RT, EN S	RT _o , EN S
125	1,77	1,64
250	1,54	1,44
500	1,34	1,27
1.000	1,25	1,19
2.000	1,19	1,13
4.000	1,24	1,18

Tabla 7.3 Valores medios de RT (sala vacía) y de RT_o (sala ocupada)

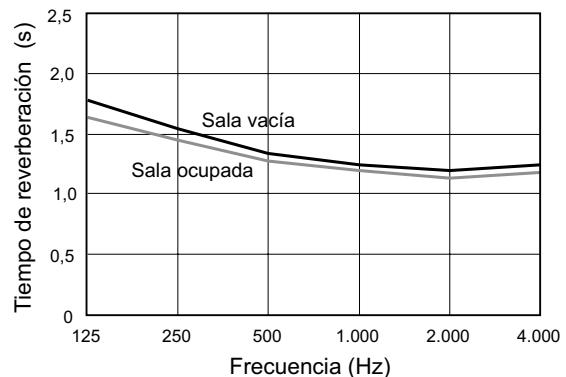


Fig. 7.9 Valores medios de RT (sala vacía) y de RT_o (sala ocupada)

c) Claridad de la voz (C₅₀)

En la tabla 7.4 y en la figura 7.10 se indican los valores medios de C₅₀ para cada una de las bandas de octava situadas entre 500 Hz y 4 kHz, correspondientes a la sala vacía. Estos valores se han obtenido como media aritmética de todos los valores de C₅₀ medidos. Asimismo, se muestran los valores medios de este parámetro, suponiendo que la sala está ocupada (C₅₀^o). Estos valores se han obtenido a partir de una serie de cálculos teóricos basados en estudios realizados por Barron.

FRECUENCIA (Hz)	VALOR MEDIO DE C ₅₀ , EN dB	VALOR MEDIO DE C ₅₀ ^o , EN dB
500	3,25	3,67
1.000	5,34	5,71
2.000	6,04	6,36
4.000	6,80	7,11

Tabla 7.4 Valores medios de C₅₀ (sala vacía) y de C₅₀^o (sala ocupada)

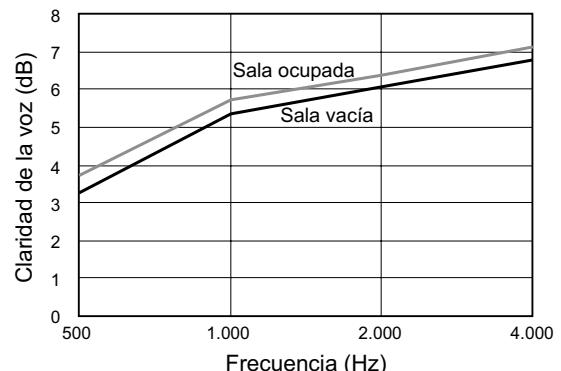


Fig. 7.10 Valores medios de C₅₀ (sala vacía) y de C₅₀^o (sala ocupada)

El valor medio ponderado de la claridad de la voz C₅₀ correspondiente a la sala ocupada es:

$$C_{50}^o \text{ ("speech average")} = 5,98 \text{ dB}$$

Este valor se halla claramente por encima del valor mínimo recomendado de 2 dB, lo cual es indicativo de que la inteligibilidad de la palabra y la sonoridad son correctas.

d) Definición (D)

En la tabla 7.5 y en la figura 7.11 se indican los valores medios de D para cada una de las bandas de octava situadas entre 125 Hz y 4 kHz, correspondientes a la sala vacía. Estos valores se han obtenido como media aritmética de todos los valores de D medidos. Asimismo, se muestran los valores medios de este parámetro, suponiendo que la sala está ocupada (D_o), obtenidos a partir de una serie de cálculos teóricos basados en estudios realizados por Barron.

FRECUENCIA (Hz)	VALOR MEDIO DE D	VALOR MEDIO DE D_o
125	0,52	0,54
250	0,59	0,61
500	0,67	0,69
1.000	0,76	0,77
2.000	0,78	0,79
4.000	0,81	0,82

Tabla 7.5 Valores medios de D (sala vacía) y de D_o (sala ocupada)

346

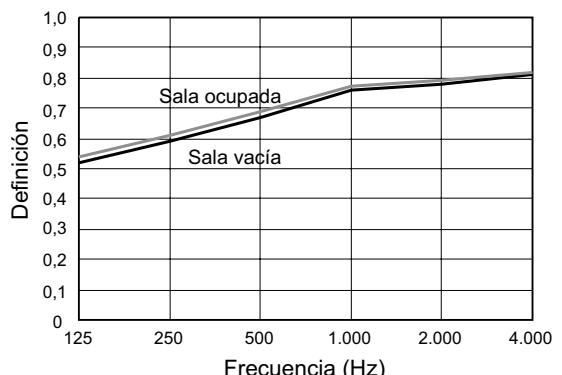


Fig. 7.11 Valores medios de D (sala vacía) y de D_o (sala ocupada)

Según se puede observar, todos los valores se hallan por encima del valor mínimo recomendado de 0,50. Ello corrobora lo expuesto en el punto anterior.

e) Inteligibilidad de la palabra (RASTI)

La medida de este parámetro se efectuó en los diez puntos mencionados (P1 a P10) con la fuente sonora situada en la posición A y la sala vacía.

En la tabla 7.6 se indican los valores de RASTI medidos.

PUNTO DE MEDIDA	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
RASTI	0,76	0,70	0,66	0,67	0,77	0,65	0,70	0,60	0,69	0,61

Tabla 7.6 Valores RASTI medidos (sala vacía)

El valor medio de RASTI para la sala vacía es:

$$\text{RASTI} = 0,68$$

Este valor es superior al valor mínimo recomendado de 0,65. Debido a que la condición de sala vacía es la más desfavorable desde el punto de vista de la inteligibilidad de la palabra, la inteligibilidad en condiciones de sala ocupada será, como mínimo, “buena”.

f) Sonoridad (S)

La medida de este parámetro se efectuó en los diez puntos mencionados (P1 a P10) con la fuente sonora situada en la posición A.

En la tabla 7.7 se indican los valores de S_{mid} , obtenidos como promedio de los correspondientes a las bandas de 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz, para una orientación frontal (0°) y para una orientación lateral (90°) del actor. Asimismo, se muestran los valores de S_{mid} suponiendo que la sala está ocupada (S_{mid}^o).

SONORIDAD MEDIA S_{mid} , en dB	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
$S_{\text{mid}} (0^\circ)$	7,5	5,5	5,2	4,5	5,2	3,2	4,2	2,2	4,2	2,2
$S_{\text{mid}} (90^\circ)$	2,5	2,5	2,2	1,2	0,5	0,5	1,2	0,2	0,8	0,5
$S_{\text{mid}}^o (0^\circ)$	7,1	5,1	4,8	4,1	4,8	2,8	3,8	1,8	3,8	1,8
$S_{\text{mid}}^o (90^\circ)$	2,1	2,1	1,8	0,8	0,1	0,1	0,8	-0,2	0,5	0,1

Tabla 7.7 Valores de S_{mid} y de S_{mid}^o para 0° y 90°

El valor global de S_{mid}^o para una orientación frontal del actor (0°), calculado a partir de la tabla anterior, es:

$$S_{\text{mid}}^o (0^\circ) = 4 \text{ dB}$$

Este valor está dentro del margen recomendado para dicha orientación (entre 4 y 8 dB). Por tanto, la sonoridad global es correcta.

En cuanto al valor global correspondiente a una orientación lateral (90°), es:

$$S_{\text{mid}}^o (90^\circ) = 0,82 \text{ dB}$$

Este valor se halla por debajo del margen de valores recomendados para dicha orientación (entre 2 y 6 dB). En consecuencia, la sonoridad es ligeramente baja.

7.1.5.3 Valoración global de la sala

- La valoración global del recinto como teatro es satisfactoria.
- Los tiempos de reverberación medidos son adecuados para representaciones donde la comprensión de la palabra es fundamental.
- La inteligibilidad de la palabra en todos los puntos de la sala medidos es “buena”.
- Cuando el actor está situado de cara al público, la sonoridad global de la sala es correcta. En cambio, cuando el actor se sitúa lateralmente, la sonoridad global es ligeramente baja.

7.1.5.4 Ficha técnica de la sala

PARÁMETRO ACÚSTICO	VALOR MEDIDO	VALOR RECOMENDADO
Ruido de fondo (NC)	NC-20 ^(*)	\leq NC-25
Tiempo de reverberación medio RT_{mid}° (500 Hz - 1 kHz), sala ocupada	$RT_{\text{mid}}^{\circ} = 1,23 \text{ s}$	$1 \leq RT_{\text{mid}}^{\circ} \leq 1,2 \text{ s}$
Claridad de la voz C_{50}° ("speech average"), sala ocupada	$C_{50}^{\circ} = 5,98 \text{ dB}$	$C_{50}^{\circ} > 2 \text{ dB}$
Definición D_o (de 125 Hz a 4 kHz), sala ocupada	$0,54 \leq D_o \leq 0,82$	$D_o > 0,50$
RASTI _o , sala ocupada	RASTI _o = 0,68	RASTI _o $\geq 0,65$
Sonoridad media S_{mid}° (500 Hz - 2 kHz), sala ocupada Orientación frontal del actor Orientación lateral del actor	$S_{\text{mid}}^{\circ} (0^{\circ}) = 4 \text{ dB}$ $S_{\text{mid}}^{\circ} (90^{\circ}) = 0,82 \text{ dB}$	$4 \leq S_{\text{mid}}^{\circ} (0^{\circ}) \leq 8 \text{ dB}$ $2 \leq S_{\text{mid}}^{\circ} (90^{\circ}) \leq 6 \text{ dB}$

(*) Medida realizada con el sistema de climatización desconectado

7.1.6 Diagnosis acústica del Palau de la Música Catalana, Barcelona (España)

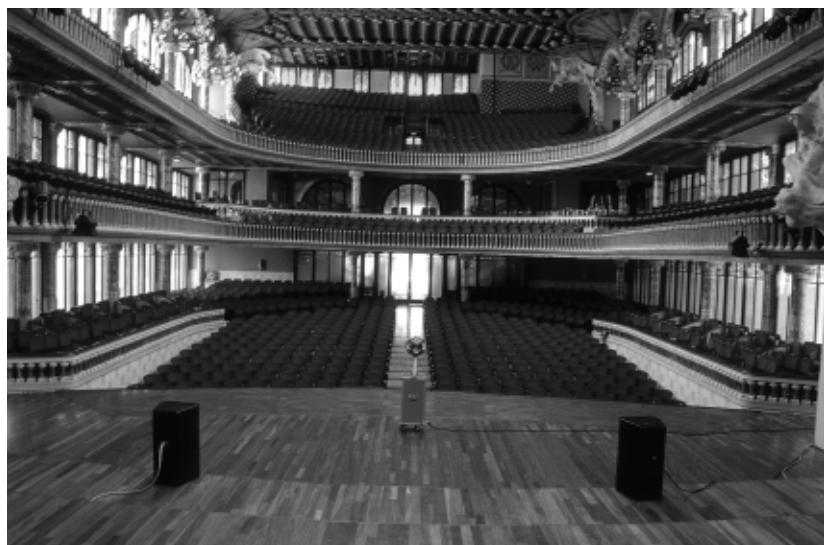


Fig. 7.12a Palau de la Música Catalana, Barcelona, España
(vista desde el escenario)



Fig. 7.12b Palau de la Música Catalana, Barcelona, España (vista desde el primer piso)

7.1.6.1 Datos de partida

a) Datos geométricos de la sala

- Volumen: 10.490 m³
- Número de asientos: 2.032
- Superficie escenario: 226 m²
- Superficie acústica efectiva audiencia: 1.063 m²

b) Condiciones de medida

- Sala vacía
- Escenario sin sillas ni atriles
- Temperatura: 22°C
- Humedad relativa: 41%

c) Equipamiento de medida

El equipamiento de medida es el expuesto en el protocolo de medidas correspondiente a recintos destinados a la música (apartado 7.1.3).

d) Puntos de medida

- Puntos de medida en la sala: las medidas se llevaron a cabo en 15 puntos:
 P1 a P6: platea
 P7 a P10: primer piso
 P11 a P15: segundo piso
 Las medidas se realizaron para las siguientes posiciones del dodecaedro en el escenario:
 A: sobre el eje longitudinal de la sala, a una distancia de 3 m de la boca del escenario
 y a una altura de 1,5 m respecto al suelo del mismo
 B: sobre el eje longitudinal de la sala, a una distancia de 9 m de la boca del escenario
 y a una altura de 1,5 m respecto al suelo del mismo
- Puntos de medida en el escenario: las medidas en el escenario se realizaron en 3 puntos pertenecientes a las zonas ocupadas por los violines, los contrabajos y la sección de metal. Para cada punto de medida, la fuente sonora se situó a 1 m del mismo y a una altura de 1,5 m respecto al suelo.

7.1.6.2 Resultados de las medidas (resumen)

a) Ruido de fondo. Curvas NC

350

Los valores medios de los niveles de ruido de fondo medidos en cada banda de octava con el equipo de climatización desconectado se indican en la tabla 7.8 y en la figura 7.13.

FRECUENCIA (Hz)	NIVELES DE RUIDO DE FONDO, EN dB
63	48
125	43
250	35
500	30
1.000	26
2.000	21
4.000	16
8.000	16

Tabla 7.8 Valores medios de los niveles de ruido de fondo

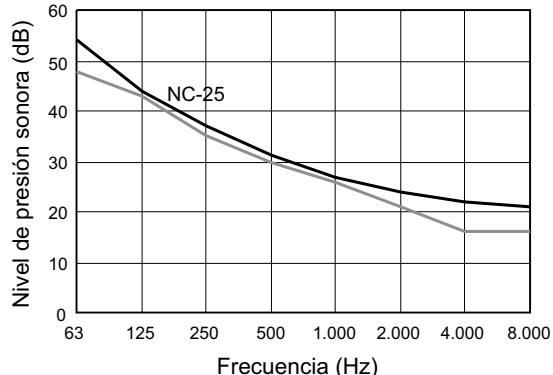


Fig. 7.13 Valores medios de los niveles de ruido de fondo y valores máximos correspondientes a la curva NC-25

Los valores medidos se encuentran por debajo de los valores máximos correspondientes a la curva NC-25. Por lo tanto, la curva NC de la sala es la NC-25. Este valor coincide con el valor máximo admisible (NC-25).

b) Tiempo de reverberación (RT)

En la tabla 7.9 y en la figura 7.14 se indican los valores medios de RT para cada una de las bandas de octava situadas entre 125 Hz y 4 kHz, correspondientes a la sala vacía. Estos valores se han obtenido como media aritmética de todos los valores de RT medidos.

En dicha tabla también se muestran los valores medios de RT, calculados suponiendo la sala ocupada (RT_o), para cada una de las bandas de octava situadas entre 125 Hz y 4 kHz.

FRECUENCIA (Hz)	RT, EN S	RT_o , EN S
125	1,54	1,24
250	1,68	1,29
500	1,76	1,27
1.000	1,64	1,12
2.000	1,45	1,11
4.000	1,45	1,02

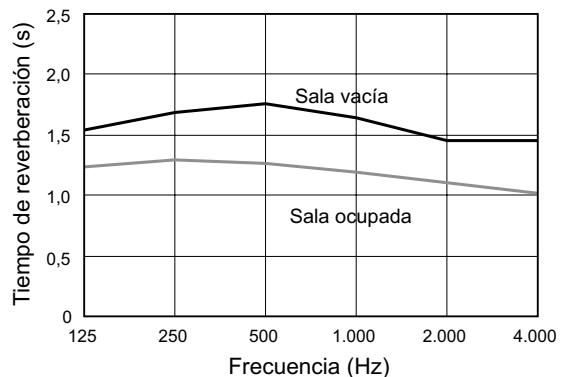


Tabla 7.9 Valores medios de RT (sala vacía) y de RT_o (sala ocupada)

Fig. 7.14 Valores medios de RT (sala vacía) y de RT_o (sala ocupada)

El valor del tiempo de reverberación RT_{mid} para la sala ocupada es:

$$RT_{mid}^o = 1,19 \text{ s}$$

Este valor se halla muy por debajo del margen de valores recomendados para salas destinadas a música sinfónica (entre 1,8 y 2 s). Por lo tanto, la sala resulta excesivamente apagada para este tipo de música.

c) Calidez acústica (BR) y brillo (Br)

Los valores medios de calidez acústica (BR) y brillo (Br) para la sala ocupada son:

$$\begin{aligned} BR &= 1,06 \\ Br &= 0,89 \end{aligned}$$

El valor de BR, aunque ligeramente inferior al valor mínimo recomendado ($BR = 1,10$), puede considerarse adecuado. Por lo tanto, la calidez acústica de la sala es correcta.

El valor de Br es correcto, ya que es superior al valor mínimo recomendado de 0,87. En consecuencia, el sonido en la sala resulta brillante.

d) “Early Decay Time” (EDT)

En la tabla 7.10 y en la figura 7.15 se indican los valores medios de EDT, para cada una de las bandas de octava situadas entre 125 Hz y 4 kHz, correspondientes a la sala vacía. Estos valores se han obtenido como media aritmética de los valores de EDT medidos.

En dicha tabla también se muestran los valores medios de EDT, calculados suponiendo la sala ocupada (EDT_o) y para cada una de las bandas de octava situadas entre 125 Hz y 4 kHz.

FRECUENCIA (Hz)	EDT, EN S	EDT_o , EN S
125	1,45	1,16
250	1,54	1,18
500	1,61	1,16
1.000	1,53	1,04
2.000	1,47	1,12
4.000	1,39	0,97

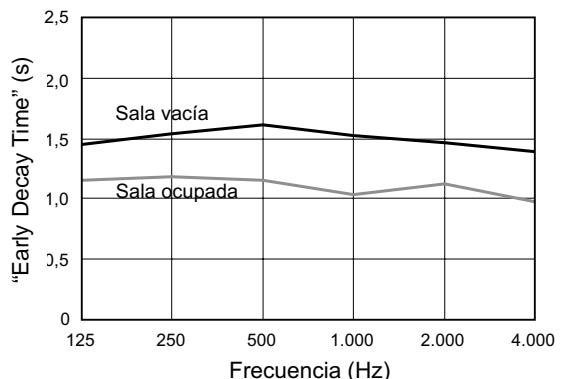


Tabla 7.10 Valores medios de EDT (sala vacía) y de EDT_o (sala ocupada)

Fig. 7.15 Valores medios de EDT (sala vacía) y de EDT_o (sala ocupada)

El valor de EDT_{mid} para la sala ocupada es:

$$EDT_{mid}^o = 1,10 \text{ s}$$

Este valor es del mismo orden que el valor de RT_{mid}^o . Ello es indicativo de que existe una buena difusión del sonido en la sala.

e) Sonoridad (G)

En la tabla 7.11 y en la figura 7.16 se indican los valores medios de G, para cada una de las bandas de octava situadas entre 125 Hz y 4 kHz, correspondientes a la sala vacía. Estos valores se han obtenido como media aritmética de los valores de G medidos.

El valor de la sonoridad G_{mid} correspondiente a la sala vacía es de:

$$G_{mid} = 7,1 \text{ dB}$$

Este valor se halla por encima del margen de valores recomendados (de 4 a 5,5 dB). Por lo tanto, el grado de amplificación producido por la sala es ligeramente superior al considerado como óptimo.

FRECUENCIA	VALOR MEDIO DE G (SALA VACÍA), EN dB
125	7,6
250	7,0
500	7,1
1.000	7,4
2.000	6,9
4.000	6,7

Tabla 7.11 Valores medios de G
(sala vacía)

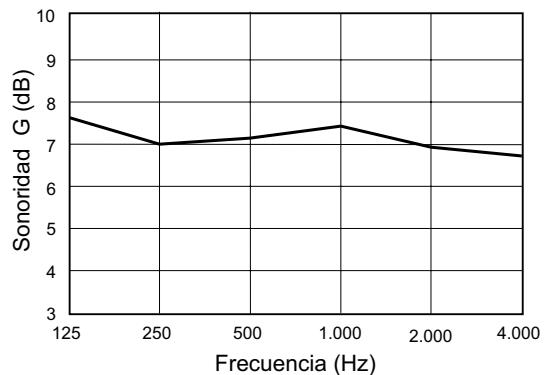


Fig. 7.16 Valores medios de G (sala vacía)

f) “Initial-Time-Delay Gap” (t_l)

En la figura 7.17 se representa la gráfica utilizada para calcular el t_l en un punto central de platea. La banda de frecuencias considerada está comprendida entre 250 Hz y 4 kHz.

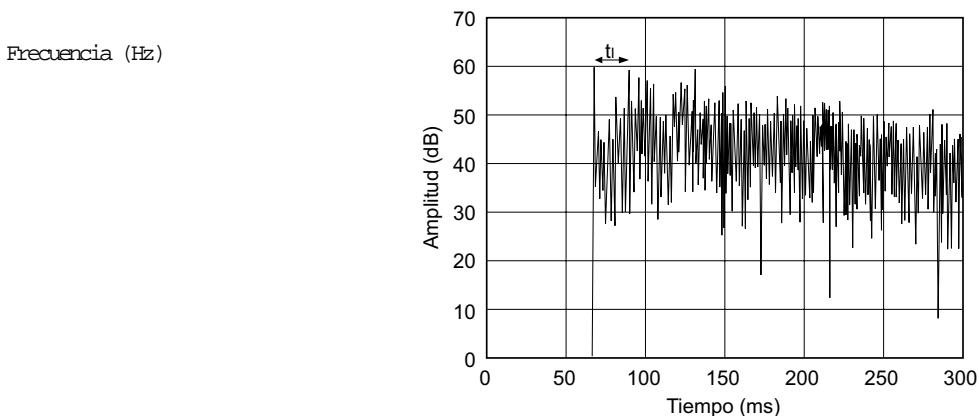


Fig. 7.17 Gráfica utilizada para calcular el t_l en un punto central de platea

El valor de t_l obtenido es:

$$t_l \text{ (punto central de platea)} = 20 \text{ ms}$$

Debido a que dicho valor coincide con el valor máximo recomendado, la intimidad acústica es correcta.

g) Relaciones energéticas (ELR): C_t , C_{t0} , C_x , $(C_{t0} - C_x)$

Las pertinentes medidas se efectuaron en todos los puntos mencionados (P1 a P15) con la fuente sonora en las posiciones A y B.

Todas las curvas se obtuvieron como media de las correspondientes a la bandas de 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz.

En la figura 7.18 se representan las gráficas utilizadas para calcular las relaciones energéticas ELR en un punto central de platea con la fuente sonora ubicada en las posiciones A y B, respectivamente.

El código de colores utilizado es el siguiente:

- Negro: corresponde a la curva C_t (ELR considerando el sonido directo)
- Rojo: corresponde a la curva C_{t0} (ELR sin considerar el sonido directo)
- Verde: corresponde a la curva C_x (ELR teórico sin considerar el sonido directo)
- Azul: corresponde a la diferencia $C_{t0}-C_x$

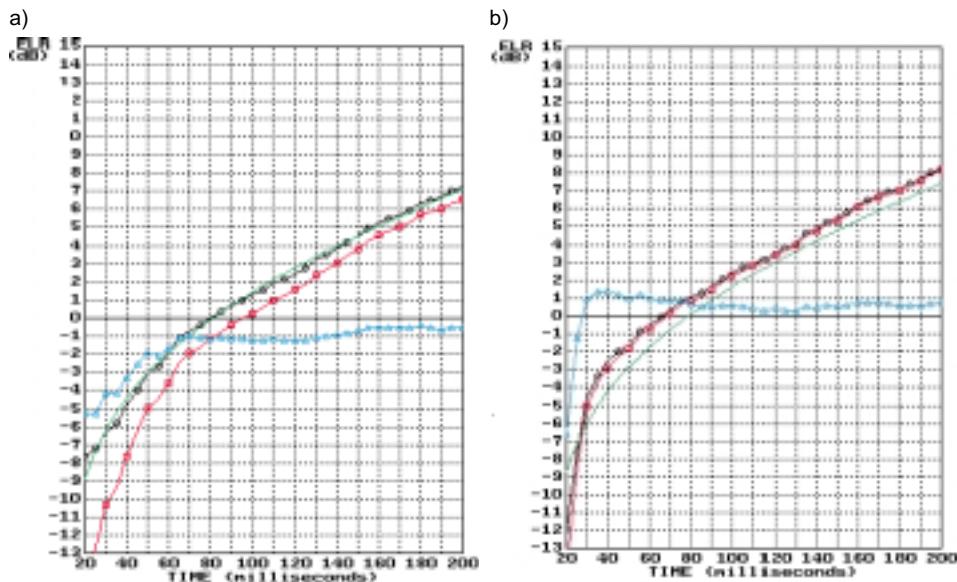


Fig. 7.18 Curvas ELR correspondientes a un punto central de platea:
a) fuente sonora en la posición A; b) fuente sonora en la posición B

De la observación de las dos gráficas anteriores se desprende lo siguiente:

- Al pasar la fuente sonora de la posición A a la B, la influencia del sonido directo disminuye de forma notoria. Además, se produce un aumento apreciable de las primeras reflexiones debido a la proximidad de las paredes del escenario.
- Cuando la fuente sonora está en la posición B, la curva C_{t0} se aproxima a la curva C_x . Ello significa que la relación ELR obtenida es similar a la correspondiente al caso teórico de decaimiento energético puramente exponencial y, por tanto, que existe un grado de difusión óptimo en la sala.

h) Claridad musical (C_{80})

En la tabla 7.12 y en la figura 7.19 se indican los valores medios de C_{80} para cada una de las bandas de octava situadas entre 125 Hz y 4 kHz, correspondientes a la sala vacía. Estos valores se han obtenido como media aritmética de los valores de C_{80} medidos.

FRECUENCIA (Hz)	VALOR MEDIO DE C_{80} (SALA VACÍA), EN dB
125	-1,9
250	-2,1
500	-1,0
1.000	0,2
2.000	0,4
4.000	0,5

Tabla 7.12 Valores medios de C_{80} (sala vacía)

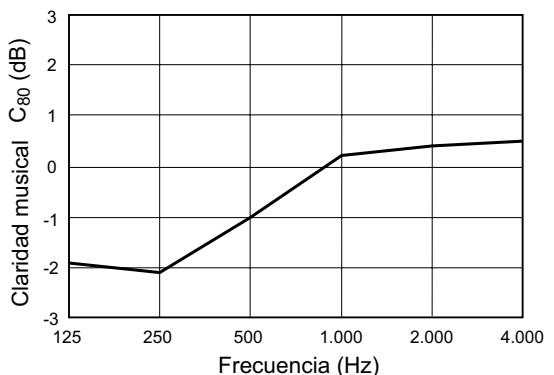


Fig. 7.19 Valores medios de C_{80} (sala vacía)

El valor de la claridad musical $C_{80}(3)$ es:

$$C_{80}(3) (\text{"music average"}) = -0,1 \text{ dB}$$

Este valor se halla dentro del margen de valores recomendados (de - 4 dB a 0 dB). Por lo tanto, el grado de separación entre los diferentes sonidos individuales integrantes de una composición musical es correcto.

i) Curvas de energía reflejada acumulada (RECC)

En la figura 7.20a se representan las curvas RECC correspondientes a los puntos de platea P1 (central) y P6 (lateral) con la fuente sonora en la posición A.

En la figura 7.20b se representan las curvas obtenidas en el punto P1 con la fuente sonora en las posiciones A y B, respectivamente.

De la observación de las dos figuras anteriores se desprende lo siguiente:

- Existencia de un comportamiento diferenciado entre el punto situado sobre el eje longitudinal del recinto (punto P1) y el situado en el lateral (punto P6). Estas diferencias consisten en un aumento de la energía recibida en el punto P6 durante los primeros 40 ms (primeras reflexiones), debido a la proximidad del mismo a las paredes laterales de platea (figura 7.20a).
- El acercamiento de la fuente sonora a la pared posterior del escenario (posición B) se traduce en un aumento de los valores RECC medidos en los puntos situados sobre el eje longitudinal del recinto (figura 7.20b).

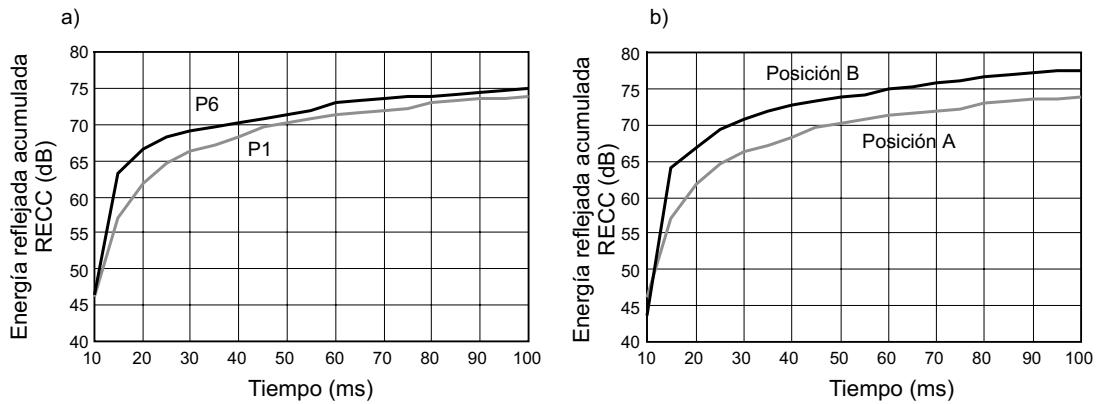


Fig. 7.20 Curvas RECC: a) puntos de platea P1 (central) y P6 (lateral) con la fuente sonora en la posición A (sala vacía); b) punto P1 con la fuente sonora en las posiciones A y B (sala vacía)

j) Eficiencia lateral (LF)

En la tabla 7.13 y en la figura 7.21 se indican los valores medios de LF para cada una de las bandas de octava situadas entre 125 Hz y 1 kHz, para la sala vacía.

FRECUENCIA (Hz)	VALOR MEDIO DE LF (SALA VACÍA)
125	0,16
250	0,21
500	0,26
1.000	0,22

Tabla 7.13 Valores medios de LF (sala vacía)

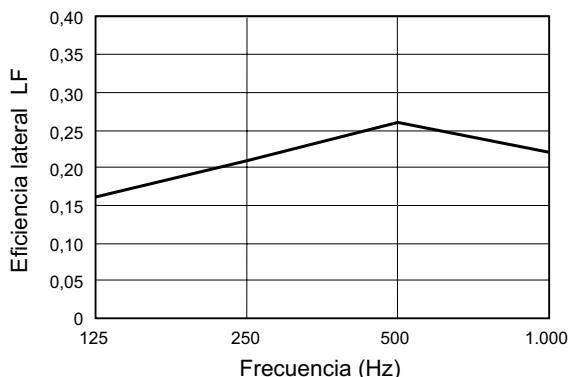


Fig. 7.21 Valores medios de LF (sala vacía)

El valor de la eficiencia lateral LF_{E4} es:

$$LF_{E4} = 0,21$$

Este valor se halla por encima del mínimo valor recomendado de 0,19. Por lo tanto, la amplitud aparente de la fuente sonora es elevada, lo cual implica que la impresión espacial del sonido en la sala es correcta.

k) Correlación cruzada interaural (IACC)

En la tabla 7.14 y en la figura 7.22 se indican los valores medios de $IACC_E$ para cada una de las bandas de octava situadas entre 500 Hz y 4 kHz, para la sala vacía.

FRECUENCIA (Hz)	VALOR MEDIO DE $IACC_E$ (SALA VACÍA)
500	0,44
1.000	0,34
2.000	0,31
4.000	0,33

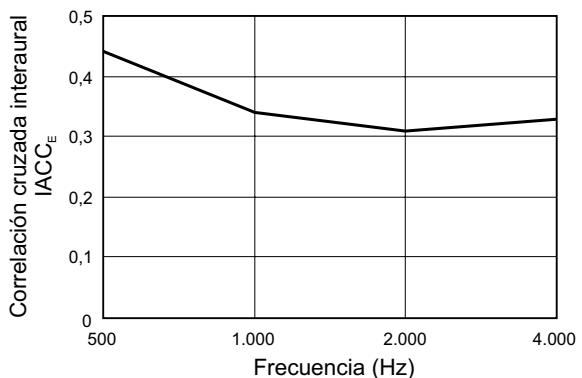


Tabla 7.14 Valores medios de $IACC_E$ (sala vacía)

Fig. 7.22 Valores medios de $IACC_E$ (sala vacía)

El valor de $(1 - IACC_{E3})$ es:

$$(1 - IACC_{E3}) = 0,64$$

Este valor es del mismo orden que el valor recomendado (alrededor de 0,70). Por lo tanto, el grado de disimilitud entre los sonidos que llegan a ambos oídos es elevado, lo cual corrobora el hecho de que la impresión espacial del sonido en la sala es correcta.

l) Soporte objetivo (ST1)

En la tabla 7.15 y en la figura 7.23 se indican los valores medios de ST1, para cada una de las bandas de octava situadas entre 125 Hz y 4 kHz.

FRECUENCIA (Hz)	VALOR MEDIO DE ST1, EN dB
125	-10
250	-10,5
500	-10,7
1.000	-11,2
2.000	-12,2
4.000	-14,4

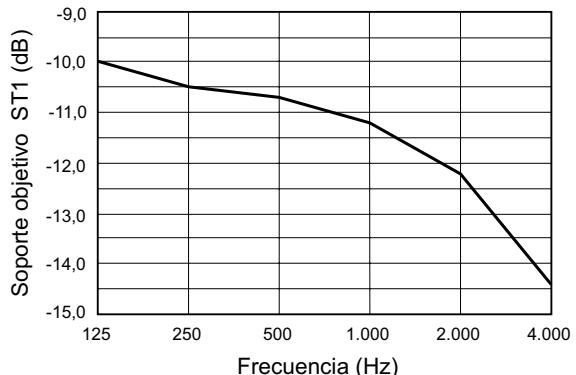


Tabla 7.15 Valores medios de ST1

Fig. 7.23 Valores medios de ST1

El valor del soporte objetivo ST1_{mid} es:

$$ST1_{mid} = -11,2 \text{ dB}$$

Este valor está ligeramente por encima del margen de valores más favorables (de -14 dB a -12,5 dB). De todas formas, puede considerarse que la capacidad de los músicos para escucharse a sí mismos y al resto de la orquesta es correcta (con excepción de la sección de cuerda, que habitualmente se halla fuera de la zona de influencia de las paredes del escenario).

7.1.6.3 Valoración global de la sala

- Los valores del tiempo de reverberación son excesivamente bajos para música sinfónica.
- La calidez acústica y el brillo de la sala son correctos.
- La similitud entre los valores del “Early Decay Time” y del tiempo de reverberación es indicativa de la existencia de una buena difusión del sonido.
- La sonoridad es ligeramente superior a la considerada como óptima.
- La intimidad acústica en la zona central de platea es correcta.
- En las zonas centrales de platea y de los dos pisos, existe un desequilibrio tonal entre los sonidos procedentes de las diferentes secciones de la orquesta. En concreto, las secciones situadas en las zonas más próximas a las paredes del escenario dominan sobre las más alejadas, y especialmente sobre la sección de cuerda.
- La claridad musical y la impresión espacial son correctas.
- La capacidad de los músicos de escucharse a sí mismos y al resto de la orquesta puede considerarse correcta, con excepción de la sección de cuerda. Ello se debe a que dicha sección generalmente se encuentra fuera de la zona de influencia del escenario.

7.1.6.4 Ficha técnica de la sala

PARÁMETRO ACÚSTICO	VALOR MEDIDO	VALOR RECOMENDADO	VALORACIÓN SUBJETIVA
Ruido de fondo NC	NC-25 ^(*)	\leq NC-25	
Tiempo de reverberación medio RT_{mid}^o (500 Hz - 1 kHz), sala ocupada	$RT_{mid}^o = 1,19 \text{ s}$	$1,8 \leq RT_{mid}^o \leq 2,0 \text{ s}$	Sala apagada para música sinfónica
Calidez acústica BR, sala ocupada	$BR = 1,06$	$BR \geq 1,10$	Sonido cálido (rico en graves)
Brillo Br, sala ocupada	$Br = 0,89$	$Br \geq 0,87$	Sonido brillante (rico en agudos)
“Early Decay Time” medio EDT_{mid}^o (500 Hz – 1 kHz), sala ocupada	$EDT_{mid}^o = 1,10 \text{ s}$	$EDT_{mid}^o \approx RT_{mid}^o$	Buena difusión del sonido
Sonoridad media G_{mid} (500 Hz – 1 kHz), sala vacía	$G_{mid} = 7,1 \text{ dB}$	$4 \leq G_{mid} \leq 5,5 \text{ dB}$	Grado de amplificación producido por la sala ligeramente elevado

PARÁMETRO ACÚSTICO	VALOR MEDIDO	VALOR RECOMENDADO	VALORACIÓN SUBJETIVA
“Initial-Time-Delay Gap” t_i (centro platea)	$t_i = 20$ ms	$t_i \leq 20$ ms	Intimidad acústica correcta
Claridad musical media $C_{80}(3)$ (“music average”) (500 Hz – 2 kHz), sala vacía	$C_{80}(3) = -0,1$ dB	$-4 \leq C_{80}(3) \leq 0$ dB	Claridad musical correcta
Eficiencia lateral media LF_{E4} (125 Hz – 1 kHz), sala vacía	$LF_{E4} = 0,21$	$LF_{E4} \geq 0,19$	Amplitud aparente de la fuente sonora elevada (impresión espacial del sonido correcta)
Correlación cruzada interaural (1-IACC _{E3}) (500 Hz – 2 kHz), sala vacía	$(1-IACC_{E3}) = 0,64$	$(1-IACC_{E3}) \approx 0,70$	
Soporte objetivo medio ST1 _{mid} (250 Hz – 2 kHz)	$ST1_{mid} = -11,2$ dB	$-14 \leq ST1_{mid} \leq -12,5$ dB	Capacidad de los músicos de escucharse a sí mismos y al resto de componentes de la orquesta correcta (a excepción de la sección de cuerda)

(*) Medida realizada con el sistema de climatización desconectado

7.2 Simulación acústica de recintos

7.2.1 Introducción

359

Los primeros programas de simulación acústica, aparecidos a principios de los 80, eran muy limitados por lo que a prestaciones se refiere. Los resultados numéricos obtenidos eran únicamente útiles a título orientativo y, además, los cálculos realizados eran muy lentos. El continuo perfeccionamiento de los mismos, así como la mayor capacidad y velocidad de cálculo de los ordenadores, ha permitido disponer en la actualidad de unas herramientas que facilitan enormemente el diseño de cualquier tipo de recintos. Mediante su utilización es posible calcular, con un grado de aproximación elevado y de forma mucho más rápida, todos aquellos parámetros considerados más representativos de la calidad acústica de un recinto cualquiera.

Si bien existen diferentes programas de simulación acústica, el objetivo de este apartado consiste en dar a conocer de forma resumida las posibilidades de cálculo y la potencialidad de este tipo de herramientas a través de la presentación del programa denominado AURA.

7.2.2 Descripción del programa de simulación acústica AURA^(**)

7.2.2.1 Características generales

El programa de simulación acústica AURA, específicamente diseñado pensando en su integración con el sistema de creación de sonido virtual expuesto en el apartado 7.3.4, funciona

(**) Desarrollado conjuntamente por el Grupo de Acústica Aplicada del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones (Universidad Politécnica de Cataluña) y la empresa Audioscan, ingeniería del sonido. Trabajo galardonado con el premio Salvá Campillo al proyecto más original del año 1996 relacionado con el campo de las tecnologías de la información. Dicho premio fue otorgado por la Asociación Catalana de Ingenieros de Telecomunicación

en un ordenador PC con un procesador 80486 o superior, en un entorno de trabajo Windows 3.1 o Windows 95.

El programa permite calcular todos aquellos parámetros objetivos estándar que definen el comportamiento acústico de cualquier tipo de recinto: desde espacios de uso comunitario, pasando por salas destinadas a la palabra y espacios de uso deportivo y plurifuncionales, hasta teatros y salas de conciertos.

El modelo arquitectónico de la sala a analizar puede ser importado en formato DXF, lo cual lo hace compatible con los principales programas CAD de arquitectura existentes en el mercado (AutoCAD, MicroStation, ArchiCAD, etc.). En la figura 7.24 se muestra un ejemplo de modelo arquitectónico de una sala, una vez importado por el programa AURA.

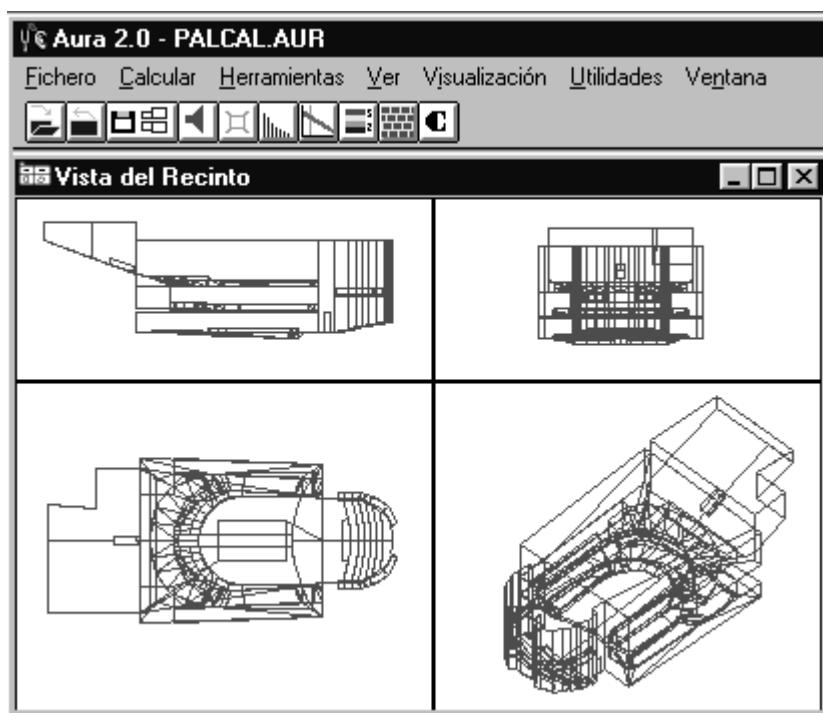


Fig. 7.24 Ejemplo de modelo arquitectónico de una sala importado por el programa AURA (Palau de la Música Catalana, Barcelona)

La información relativa a las características de absorción y difusión de los materiales constructivos utilizados como acabados del recinto objeto de estudio se puede extraer de una extensa base de datos existente en el programa. En caso de que sea necesario, se pueden añadir nuevos materiales a la misma, juntamente con sus coeficientes de absorción y difusión en las bandas de frecuencias de interés (125 Hz - 4 kHz).

Una vez dibujado el modelo arquitectónico de la sala y asignados los materiales correspondientes a las diferentes superficies, el programa AURA calcula los parámetros acústicos representativos de la calidad acústica de la misma, lo cual permite verificar si se hallan dentro de los márgenes de valores recomendados (validación objetiva). En caso negativo, el usu-

rio deberá realizar las oportunas modificaciones de formas y/o acabados hasta conseguir que se cumplan los objetivos inicialmente planteados, en cuyo caso el diseño habrá terminado. Dicho proceso se muestra en la figura 7.25.

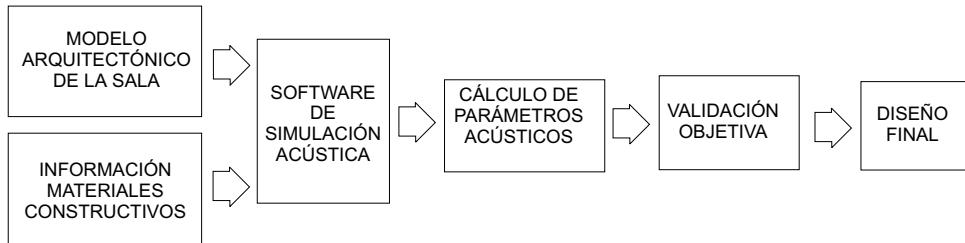


Fig. 7.25 Proceso de simulación acústica de recintos

7.2.2.2 Cálculo de la curva energía-tiempo (ETC)

Para poder calcular la mayor parte de los parámetros acústicos correspondientes a un punto cualquiera de una sala es preciso conocer la evolución de la energía sonora que llega a dicho punto en función del tiempo. La curva representativa de dicha evolución se denomina curva energía-tiempo ETC (“Energy Time Curve”).

En el programa AURA, la curva ETC se obtiene como combinación de la energía asociada a las reflexiones especulares que llegan al receptor, calculadas aplicando criterios de acústica geométrica, y de la parte de la energía difusa radiada por las superficies límite de la sala que atraviesa el receptor. El cálculo puede ser efectuado en cada una las bandas de frecuencias comprendidas entre 125 Hz y 4 kHz.

a) Cálculo de las reflexiones especulares

Las reflexiones especulares, basadas exclusivamente en la acústica geométrica, son calculadas mediante un método híbrido: “beam-tracing” / imágenes. Los caminos válidos de reflexión entre la fuente sonora y el receptor se calculan mediante el método de “beam-tracing” con haces triangulares. Para cada camino válido se determina la imagen correspondiente mediante el método de las imágenes.

A través de este método híbrido es posible eliminar la prueba de visibilidad inherente a los algoritmos de imágenes puros, reduciendo considerablemente el tiempo de cálculo.

El resultado final del cálculo anterior puede ser visualizado en forma de ecograma (figura 7.26). El ecograma es una gráfica donde se representan las sucesivas llegadas, a lo largo del tiempo, de la señal directa proveniente de la fuente sonora y de las diferentes reflexiones especulares, junto con sus correspondientes niveles. El cálculo puede efectuarse en todas las bandas de frecuencias comprendidas entre 125 Hz y 4 kHz. El usuario puede, además, elegir el orden máximo de las reflexiones que desean calcular y visualizar.

Por otra parte, el orden máximo de cálculo de las reflexiones especulares integrantes de la curva ETC es, por defecto, 3. A partir de este orden, el programa considera que toda la energía es difusa.

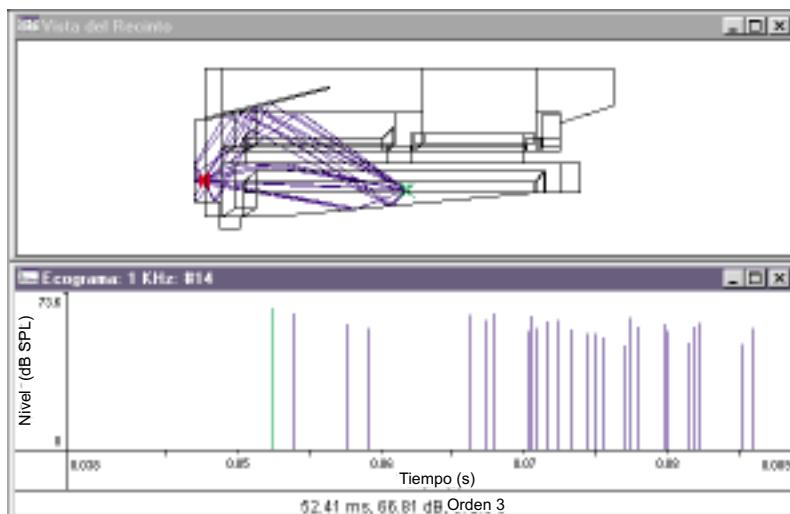


Fig. 7.26 Ejemplo de un ecograma y representación de los rayos sonoros asociados

b) Cálculo de la energía difusa

Cuando una onda sonora incide sobre una superficie cualquiera de la sala, una parte de su energía es absorbida por dicha superficie, mientras que la energía restante es devuelta a la sala. El porcentaje de energía absorbida, en cada banda de frecuencias, depende exclusivamente del coeficiente de absorción acústica del material utilizado como revestimiento de la superficie considerada.

Por otra parte, si dicho material presenta un coeficiente de difusión cero, toda la energía es devuelta a la sala en la dirección de la reflexión especular, siguiendo los principios de la acústica geométrica. En cambio, si el material presenta un cierto grado de difusión, una parte de la energía devuelta es distribuida por todo el espacio, a diferencia del resto de la energía, que sigue siendo reflejada de forma especular. El grado de difusión depende de múltiples factores, entre los que cabe destacar la forma, la textura y el grado de rugosidad del material. Por ejemplo, una superficie altamente difusora del sonido es la zona ocupada por las sillas y por el público.

Una vez asignados los coeficientes de difusión en función de la frecuencia a cada una de las superficies (caras) límite del recinto, el programa AURA calcula la energía difusa, integrante de la curva ETC asociada a un punto cualquiera de la sala, de la siguiente manera:

- Acumulación de la energía difusa en las caras: al realizar el cálculo de la energía especular, se va produciendo la transformación progresiva de dicha energía en difusa. La rapidez de dicha transformación depende de los valores concretos de los coeficientes

de difusión asignados en cada caso. La energía transformada en difusa en cada reflexión se acumula en la correspondiente cara e intervalo temporal.

- Cálculo de los factores de forma: una vez concluida la transformación de la energía especular en difusa, y antes de proceder a la distribución de la misma entre las diferentes superficies del recinto, es preciso determinar los factores de forma. Los factores de forma son unos coeficientes que indican la proporción de energía difusa que pasa de una cara a otra, y dependen exclusivamente de la geometría de la sala. No guardan, por tanto, relación alguna con los coeficientes de absorción y difusión y, lógicamente, no afectan a las reflexiones especulares. Es por ello que, una vez se ha realizado su cálculo, son guardados por el programa para poder ser utilizados en cálculos posteriores sin necesidad de repetir todo su proceso de obtención, lo cual supone un ahorro considerable de tiempo de cálculo. Su cálculo se efectúa partiendo de la hipótesis de que la energía difusa se distribuye entre caras, según la expresión de Lambert.
- Distribución de la energía difusa entre caras: al finalizar el proceso de cálculo de los factores de forma, el programa inicia el proceso de redistribución de la energía difusa entre las caras del recinto. Para determinar la proporción de energía que viaja de una cara a otra, el programa utiliza el correspondiente factor de forma, mientras que para determinar el instante de llegada, calcula el tiempo medio asociado a la propagación del sonido entre las dos caras a partir de la distancia entre los puntos centrales de ambas.
- Cálculo de la energía difusa en el punto receptor: una vez concluido el cálculo de la energía difusa asociada a las diferentes caras del recinto, el programa calcula la energía que va llegando a un receptor cualquiera a partir de la energía difusa radiada por dichas caras, considerando que la emisión es lambertiana.

Finalmente, el programa obtiene la curva ETC, en la banda de frecuencias de interés, asociada a un punto cualquiera de la sala, mediante la suma de la energía correspondiente a las reflexiones especulares y de la energía difusa. En la figura 7.27 se muestra un ejemplo de curva ETC obtenida mediante el programa AURA.

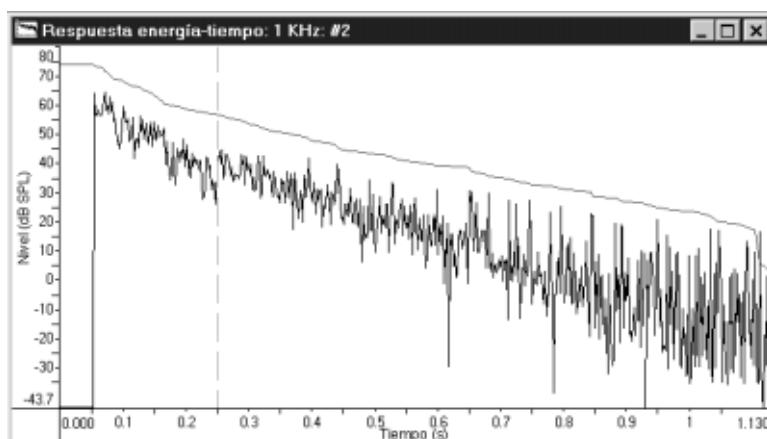


Fig. 7.27 Ejemplo de curva energía-tiempo (ETC) calculada por el programa AURA

La línea verde separa la parte del cálculo en que intervienen las reflexiones especulares y la energía difusa, de la parte calculada únicamente por difusión.

A partir de la curva ETC, el programa calcula los parámetros acústicos más relevantes en el diseño de recintos, tanto los correspondientes a salas destinadas a la palabra (teatros, salas de actos, salas de conferencias) como los asociados a salas de conciertos. Dichos parámetros se detallan en la próximo apartado.

7.2.3 Parámetros calculados por el programa AURA

En la figura 7.28 se observan las diferentes opciones del menú "Calcular" disponibles en el programa AURA.



Fig. 7.28 Opciones de cálculo del programa AURA

A continuación se describen de forma resumida los parámetros más relevantes calculados por el programa AURA asociados a recintos destinados a la palabra (salas de conferencias, teatros), a la música (salas de conciertos), además de aquellos parámetros asociados a ambas tipologías. Los valores de cada parámetro se calculan en las bandas de octava desde 125 Hz hasta 4 kHz.

7.2.3.1 RT60 (tiempo de reverberación RT)

Parámetro de aplicación a cualquier tipo de recinto.

El tiempo de reverberación RT se define como el tiempo (en s) que transcurre desde que el foco emisor se detiene hasta que el nivel de presión sonora cae 60 dB con respecto a su valor inicial.

En la figura 7.29 se indican los nombres de los diferentes métodos de cálculo de este parámetro (9 en total). Las correspondientes expresiones analíticas se hallan en el apéndice 2.

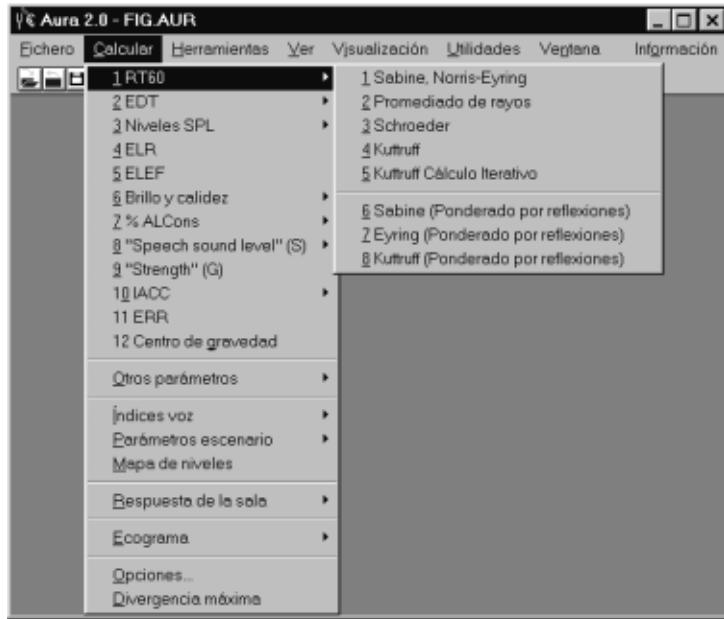


Fig. 7.29 Métodos de cálculo del tiempo de reverberación RT

a) Sabine, Norris-Eyring: cálculos realizados mediante la aplicación de dichas ecuaciones clásicas, que suponen la existencia de un campo sonoro idealmente difuso y homogéneo, así como una distribución uniforme de los materiales absorbentes en la sala. En ambos casos, se contempla la posibilidad de incluir la absorción producida por el aire. Obviamente, los valores obtenidos no dependen de las ubicaciones de la fuente sonora y del receptor.

b) Promediado de rayos: cálculo basado en un proceso aleatorio de lanzamiento de rayos desde el punto donde está situada la fuente sonora, y la posterior observación de su atenuación gradual por efecto de la absorción de las superficies límite y del aire. El RT se obtiene como promedio de las caídas energéticas que han sufrido los diferentes rayos.

Este método proporciona unos valores de RT que dependen exclusivamente de la ubicación de la fuente sonora. Por tanto, tiene en cuenta el efecto de una distribución no uniforme de los materiales absorbentes, pero parte de la hipótesis de que el campo sonoro en el recinto es totalmente homogéneo.

c) Schroeder: cálculo de los valores de RT a partir de la pendiente de decaimiento de la curva obtenida por integración inversa de la curva ETC. Dicha pendiente se halla mediante regresión logarítmica.

Los valores obtenidos con este método dependen de las situaciones de la fuente y del receptor, y son válidos incluso en el caso de campos sonoros no homogéneos y distribuciones no uniformes de los materiales absorbentes en la sala.

d) Kuttruff: cálculo realizado a partir de una expresión mejorada de la fórmula de Norris-Eyring, al considerar la desviación de los coeficientes de absorción de cada superficie respecto a su valor medio.

e) Kuttruff iterativo: cálculo basado en la sustitución del coeficiente medio de absorción en la fórmula de Sabine por otro coeficiente calculado a partir de la ponderación de la energía radiada en estado estacionario por cada una de las caras del recinto. El sistema parte de una distribución uniforme de energías y utiliza los factores de forma para redistribuir dicha energía entre las diferentes caras del recinto. La redistribución de energías se va repitiendo durante diez pasos de forma que, al finalizar el proceso, la distribución de energías se puede aproximar por la existente en régimen estacionario, y se puede calcular el coeficiente medio de absorción considerando qué coeficientes de absorción tienen un peso mayor en la absorción total del recinto.

Para poder calcular el RT por este método es necesario haber calculado previamente una respuesta energética considerando la existencia de difusión.

f) Sabine (ponderada por reflexiones): cálculo realizado aplicando la fórmula clásica de Sabine, con la particularidad de que el libre camino medio y el coeficiente medio de absorción de la sala son determinados, respectivamente, promediando los caminos de las reflexiones y teniendo en cuenta el número de reflexiones que llegan a cada cara.

g) Norris-Eyring (ponderada por reflexiones): cálculo realizado siguiendo los mismos pasos que en el caso anterior, si bien partiendo de la fórmula clásica de Norris-Eyring.

h) Kuttruff (ponderada por reflexiones): cálculo realizado de forma análoga al de Norris-Eyring (ponderada por reflexiones), pero considerando la variancia asociada al libre camino medio.

7.2.3.2 EDT (“Early Decay Time”)

Parámetro de aplicación a cualquier tipo de recinto.

El parámetro EDT se calcula por el método de promediado de rayos, o por el de Schröeder, de forma análoga al cálculo del tiempo de reverberación, si bien utilizando la pendiente correspondiente a los primeros 10 dB de la curva de decaimiento energético, según su definición.

7.2.3.3 Niveles SPL (niveles de presión sonora)

Parámetro de aplicación a cualquier tipo de recinto.

- Cálculo clásico: cálculo basado en la aplicación de las expresiones clásicas y de la acústica estadística para determinar los niveles de presión sonora de campo directo y de campo reverberante.
- Cálculo a partir de la respuesta ETC: cálculo realizado a partir de la integración de la curva ETC correspondiente a cada punto considerado.

7.2.3.4 ELR (relaciones energéticas)

Son de aplicación a cualquier tipo de recinto, aunque se utilizan con más frecuencia en salas de conciertos.

Para calcular las relaciones energéticas ELR (“Early to Late Ratios”) es necesario haber calculado previamente una respuesta energía-tiempo.

Las curvas obtenidas muestran la relación, expresada en dB, entre la energía que llega al receptor dentro de los primeros “t” segundos desde la llegada del sonido directo y la energía que le llega posteriormente.

El programa muestra las curvas C_t y C_{10} , así como los valores de C_{50} (claridad de la voz) y de C_{80} (claridad musical), correspondientes a la banda de frecuencias seleccionada.

7.2.3.5 ELEF (eficiencia lateral LF)

Este parámetro se utiliza exclusivamente en recintos destinados a la música.

Para su cálculo es necesario haber calculado previamente una respuesta energía-tiempo.

Se define como la relación entre la energía de primeras reflexiones que llegan lateralmente al receptor y la energía de primeras reflexiones recibida en todas las direcciones. Este parámetro está relacionado con la amplitud aparente de la fuente sonora (ASW).

7.2.3.6 Brillo (Br) y calidez (BR)

Ambos parámetros se utilizan exclusivamente en recintos destinados a la música.

El brillo (Br) se asocia con la riqueza de agudos en la sala, mientras que la calidez (BR) se asocia con el contenido de sonidos graves.

Existen dos opciones de cálculo:

- Cálculo clásico: los tiempos de reverberación requeridos se calculan mediante la fórmula de Sabine.
- Cálculo a partir de la curva energía-tiempo: los tiempos de reverberación se calculan mediante el método de Schroeder.

7.2.3.7 %ALCons (pérdida de articulación de consonantes)

Parámetro utilizado exclusivamente en recintos destinados a la palabra.

Este parámetro permite cuantificar el grado de inteligibilidad de la palabra. El programa realiza el cálculo en las bandas de 500 Hz, 1 kHz o 2 kHz.

Existen dos opciones de cálculo:

- Cálculo clásico: los tiempos de reverberación requeridos se calculan mediante la fórmula de Sabine.

- Cálculo a partir de la curva energía-tiempo: los tiempos de reverberación se calculan mediante el método de Schroeder.

7.2.3.8 "Speech sound level" (S)

El "speech sound level" o sonoridad (S) es un parámetro usado exclusivamente en recintos destinados a la palabra.

La sonoridad S se define como la diferencia entre el nivel medio (500 Hz - 2 kHz) de presión sonora existente en un determinado punto de una sala producido por un actor situado sobre el escenario, y el nivel medio (promediado en el espacio) producido por la misma persona situada en campo libre medido a una distancia de 10 m (nivel de referencia).

Existen dos opciones de cálculo:

- Cálculo clásico: los tiempos de reverberación requeridos se calculan mediante la fórmula de Sabine.
- Cálculo a partir de la curva energía-tiempo: los tiempos de reverberación se calculan mediante el método de Schroeder.

7.2.3.9 "Strength" (G)

368

El "strength" o sonoridad (G) es un parámetro usado exclusivamente en recintos destinados a la música.

La sonoridad G se define como la diferencia entre el nivel total de presión sonora producido por una fuente omnidireccional en un determinado punto de una sala, y el nivel producido por la misma fuente situada en campo libre medido a una distancia de 10 m (nivel de referencia).

Existen dos opciones de cálculo:

- Cálculo clásico: los tiempos de reverberación requeridos se calculan mediante la fórmula de Sabine.
- Cálculo a partir de la curva energía-tiempo: los tiempos de reverberación se calculan mediante el método de Schroeder.

7.2.3.10 IACC (Correlación cruzada interaural)

Parámetro usado exclusivamente en recintos destinados a la música.

La correlación cruzada interaural IACC ("InterAural Cross-Correlation") se define como la correlación cruzada entre las respuestas impulsionales obtenidas en ambos oídos (apartado 5.2.8.2), e indica el grado de semejanza existente entre ambas señales. Al igual que el LF, este parámetro se corresponde con la amplitud aparente de la fuente sonora (ASW).

El sistema de cálculo del IACC incorporado en el programa está basado en el método de Ando. Dicho método pondera cada una de las reflexiones que llegan a ambos oídos por su nivel, y utiliza un ángulo de incidencia equivalente para determinar cuáles son los coeficientes de correlación asociados a las mismas.

En el programa se ha introducido una modificación adicional para tener en cuenta no sólo la energía correspondiente a las reflexiones especulares, sino también la energía difusa obtenida mediante el cálculo de la respuesta con difusión.

7.2.3.11 ERR (relación de primeras reflexiones)

Parámetro usado exclusivamente en recintos destinados a la palabra.

La relación de primeras reflexiones ERR (“Early Reflection Ratio”) se define como la relación entre la energía que llega al receptor dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo y la energía correspondiente al sonido directo.

Este parámetro es indicativo del número de primeras reflexiones existentes en un punto cualquiera de un recinto y es complementario a la claridad de la voz (C_{50}) y a la definición (D), esta última calculada en la opción “Otros parámetros”.

7.2.3.12 Centro de gravedad (t_s)

369

Parámetro de aplicación a cualquier tipo de recinto.

Según Kürer, el centro de gravedad o tiempo central t_s se define como el momento de primer orden del área situada bajo la curva de decaimiento energético. Dicho parámetro es indicativo de la “distancia” (en ms) desde el origen temporal $t = 0$ hasta el “centro de gravedad” del área de la curva de decaimiento.

Los valores de t_s correspondientes a un decaimiento energético puramente exponencial dependen del tiempo de reverberación. Suponiendo que los valores de RT se hallan situados entre 1 y 2 s, los valores esperados de t_s se encuentran dentro del siguiente margen:

$$72 \leq t_s \leq 144 \text{ ms}$$

Dichos valores teóricos se suelen utilizar como referencia para determinar, en cada caso concreto, la desviación del valor calculado de t_s respecto a los mismos.

El parámetro t_s es indicativo de la nitidez del sonido en puntos específicos de la sala y está altamente relacionado con el EDT. Cuanto mayor sea t_s , menor será la nitidez obtenida en el punto en cuestión. En la práctica, su uso es muy reducido.

7.2.3.13 Otros parámetros

Las opciones correspondientes a “Otros parámetros” se indican en la figura 7.30.



Fig. 7.30 Opciones incluidas dentro de “Otros parámetros”

370

a) C_x

La gráfica C_x muestra la caída energética que se tendría si el decaimiento energético fuera puramente exponencial. La expresión utilizada para su cálculo depende únicamente del tiempo de reverberación asociado a la respuesta energía-tiempo.

La curva C_x es la equivalente teórica a la curva C_{t0} .

b) C_b

La curva C_b , debida a Barron, considera además del tiempo de reverberación de la sala, su volumen V y la distancia r de la fuente al receptor. Es una aproximación mejor que la curva C_x , ya que tiene en cuenta la disminución del nivel de presión sonora que se produce en un recinto cuando el receptor se aleja a la fuente.

La curva C_b se puede considerar la equivalente teórica a la curva C_t .

c) $C_{t0} - C_x$

La diferencia entre las curvas C_{t0} y C_x da una idea sobre la variación de la pendiente de la curva energía-tiempo. Debido a que la curva C_x asume que el campo es perfectamente difuso, cuanto mayor sea esta diferencia, mayor será la componente especular del campo recibido y mayores las variaciones entre el EDT y el RT.

d) $C_t - C_b$

Los parámetros C_t y C_b se hallan relacionados de la misma forma que C_{t0} y C_x . Por lo tanto, su diferencia también da una idea sobre la variación de la pendiente de la curva energía-tiempo, en este caso incluyendo el efecto del sonido directo.

e) RECC (Curva de energía reflejada acumulada)

Curva de mayor utilidad en el estudio de salas destinadas a la música.

La curva RECC (“Reflective Energy Cumulative Curve”) indica cómo se va acumulando la energía reflejada en el receptor a medida que pasa el tiempo. Son de interés los primeros 100 ms, ya que generalmente se corresponden con la energía asociada a las primeras reflexiones.

En la figura 7.31 se observa una curva RECC obtenida con el programa.

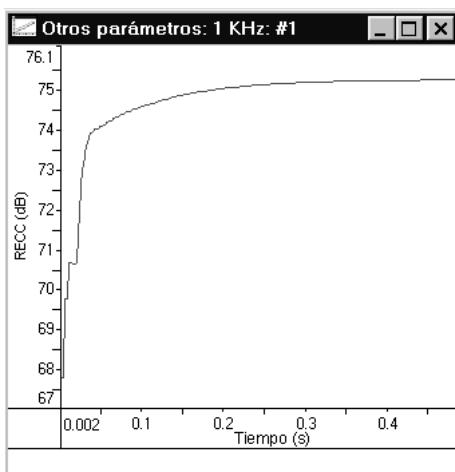


Fig. 7.31 Ejemplo de curva RECC obtenida con el AURA

f) D (definición)

Parámetro de aplicación exclusiva en salas destinadas a la palabra.

La definición D (del alemán “Deutlichkeit”) es la relación entre la energía que llega al receptor durante los primeros 50 ms y la energía total. Este parámetro está relacionado con la inteligibilidad de la palabra y con la sonoridad.

g) Gráficas con sonido directo y C_{t0}

Esta opción muestra la evolución de las relaciones energéticas C_t y C_b , la diferencia ($C_t - C_b$) y C_{t0} .

h) Gráficas sin sonido directo y C_t

Opción parecida a la anterior, si bien mostrando C₁₀, C_x, la diferencia (C₁₀ - C_x) y C_t.

A modo de ejemplo, en la figura 7.32 se muestra un conjunto de curvas ELR calculadas con el programa AURA.

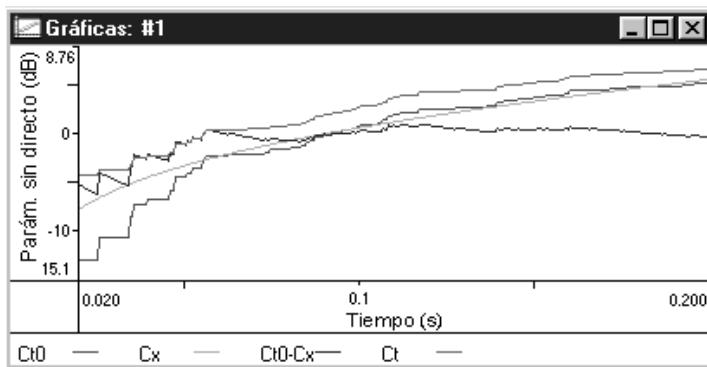


Fig. 7.32 Representación de relaciones energéticas ELR calculadas por el AURA

7.2.3.14 Índices voz

372

De aplicación exclusiva en el caso de recintos destinados a la palabra.

Dentro de esta opción existen 12 posibilidades de cálculo de la inteligibilidad de la palabra mediante los parámetros STI y RASTI, según se indica en la figura 7.33. La explicación pormenorizada de ambos parámetros se halla en el apéndice 2.

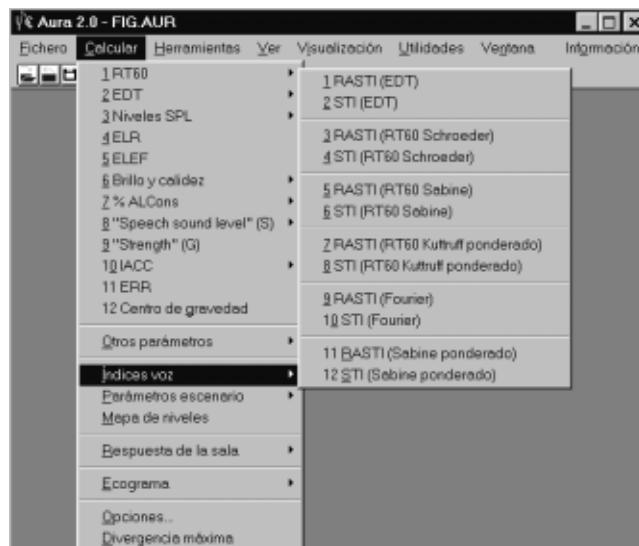


Fig. 7.33 Opciones incluidas dentro de “Índices voz”

Para poder calcular cualquiera de dichos parámetros es necesario haber seleccionado previamente los niveles máximos de ruido de fondo previstos en el recinto.

a) Cálculo del índice STI

El índice STI (“Speech Transmission Index”), definido por Houtgast y Steeneken, permite cuantificar el grado de inteligibilidad de la palabra entre los valores 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad óptima). El STI se calcula a partir de la reducción de los diferentes índices de modulación de la voz debido a la existencia de reverberación y de ruido de fondo en una sala. Existen dos opciones de cálculo:

- Cálculo según Houtgast y Steeneken: el programa puede asignar a la función genérica $f(F_0)$, que aparece en la función de transferencia de modulación MTF, cualquiera de los siguientes valores en función de la opción de cálculo elegida:
 - “Early Decay Time” (EDT)
 - Tiempo de reverberación calculado por el método de Schroeder (RT60 Schroeder)
 - Tiempo de reverberación calculado por la fórmula de Sabine (RT60 Sabine)
 - Tiempo de reverberación calculado por el método de Kuttruff ponderado por reflexiones (RT60 Kuttruff ponderado)
 - Tiempo de reverberación calculado por el método de Sabine ponderado por reflexiones (RT60 Sabine ponderado)
- Cálculo por transformada de Fourier

b) Cálculo del índice RASTI

El índice RASTI (“Rapid Speech Transmission Index”) es una versión simplificada del STI. Por lo tanto, sus valores también oscilan entre 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad óptima).

El programa presenta las mismas opciones de cálculo que en el caso del STI.

7.2.3.15 Parámetros escenario (soporte objetivo ST1)

Parámetro de aplicación exclusiva a recintos destinados a la música.

El soporte objetivo ST1 es la relación entre la energía asociada a las primeras reflexiones (entre 20 y 100 ms) y la energía del sonido directo, ambos valores obtenidos a 1 m de distancia de una fuente omnidireccional situada en el escenario.

Este parámetro es indicativo de la capacidad de los músicos de escucharse a sí mismos y al resto de la orquesta.

7.2.3.16 Mapa de niveles

El mapa de niveles permite observar los valores de una serie de parámetros acústicos de forma gráfica. Los únicos requisitos para realizar el cálculo son haber seleccionado un recinto y haber colocado la fuente sonora en su interior.

En la figura 7.34 se muestra el mapa de niveles de presión sonora (SPL) de un teatro, correspondiente a la banda de frecuencias centrada en 1 kHz.

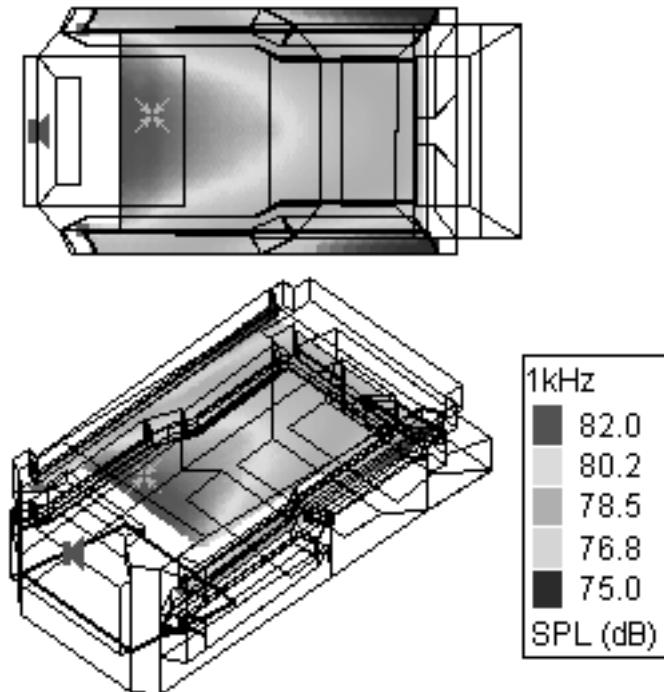


Fig. 7.34 Mapa de niveles de presión sonora obtenido con el programa AURA

La escala de niveles se muestra en una ventana especial creada en el recinto, que indica la relación entre niveles y colores. Dicha relación no es fija, sino que se va ajustando automáticamente en función de los valores del parámetro seleccionado y de la banda de frecuencias elegida de forma que el máximo valor se muestra siempre de color rojo y el mínimo en azul oscuro.

7.2.3.17 Respuesta de la sala

Esta opción permite visualizar la curva de respuesta energía-tiempo (ETC).

El resultado del cálculo se muestra en una ventana gráfica mediante dos curvas: la negra que representa dicha curva de respuesta, y la roja que se obtiene como integración de la curva anterior (figura 7.27).

7.2.3.18 Ecograma

El cálculo del ecograma puede ser limitado por dos criterios que se introducen mediante una caja de diálogo:

- Orden de las reflexiones
- Tiempo máximo de llegada después del sonido directo

El resultado se muestra en una ventana gráfica en la que las líneas verticales indican el nivel asociado a las reflexiones. Se utilizan tres colores: verde (para el rayo directo), rojo (para la reflexión seleccionada) y azul (para el resto de reflexiones).

En la figura 7.35 se muestra un ejemplo de ecograma calculado por el AURA.

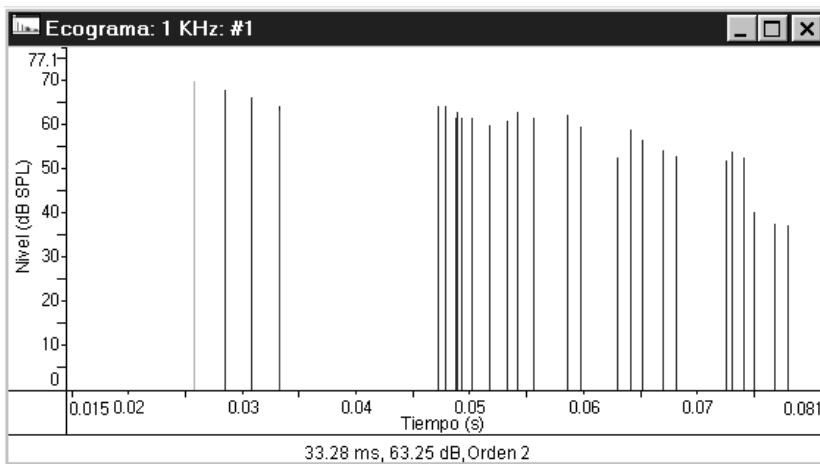


Fig. 7.35 Ecograma calculado por el AURA

7.2.3.19 Opciones “calcular”

Las opciones de cálculo permiten modificar una serie de características comunes a todos los cálculos:

- Atenuación del aire (dependiente de la temperatura y de la humedad relativa)
- Número de rayos lanzados para el cálculo de ecogramas y curvas de respuesta ETC
- Número de rayos lanzados desde cada cara para calcular los factores de forma
- Orden de las reflexiones
- Características del mapa de niveles (separación entre elementos del mapa)

En la figura 7.36 se observa la correspondiente pantalla del AURA.

7.2.3.20 Divergencia máxima

Esta opción se utiliza como criterio para limitar los cálculos de las reflexiones especulares asociadas a los mapas de niveles y a las curvas de respuesta ETC, así como para conseguir que el número de rayos lanzados desde la fuente sonora sea el estrictamente necesario.

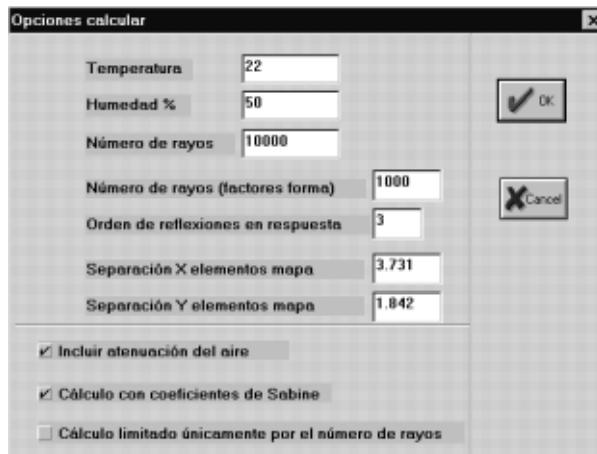


Fig. 7.36 Gráfica correspondiente a la pantalla “Opciones calcular”

7.2.4 Otras opciones del programa

Si bien el programa presenta numerosas opciones dentro de cada menú, en este apartado solamente se describen algunas de ellas, a modo de ejemplos ilustrativos de las prestaciones del mismo.

376

7.2.4.1 Menú “Fichero”

En la figura 7.37 se observan las diferentes opciones del menú “Fichero”.

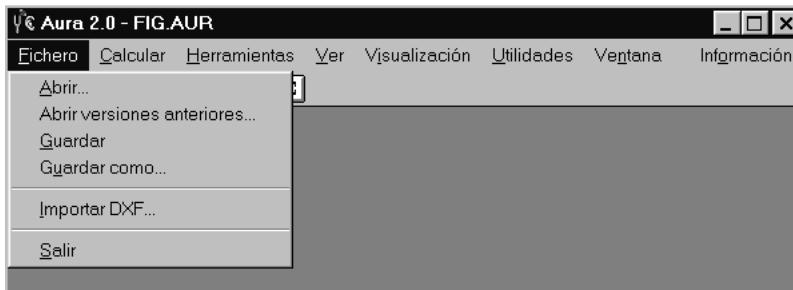


Fig. 7.37 Opciones del menú “Fichero”

Las opciones de este menú permiten lo siguiente:

- Abrir una caja de diálogo para que el usuario seleccione un fichero con cálculos grabados anteriormente.
- Abrir ficheros pertenecientes a versiones anteriores del programa con objeto de garantizar una total compatibilidad.

- Grabar en un fichero todos los datos calculados de un recinto.
- Importar la información gráfica a partir de un fichero en formato DXF.
- Salir del programa. Antes de hacerlo, el programa comprueba si hay cálculos pendientes de grabar o si ha habido cambios en la base de datos de materiales. Si es así, ofrece al usuario la posibilidad de salvar dicha información.

7.2.4.2 Menú “Herramientas”

En la figura 7.38 se observan las diferentes opciones del menú “Herramientas”.

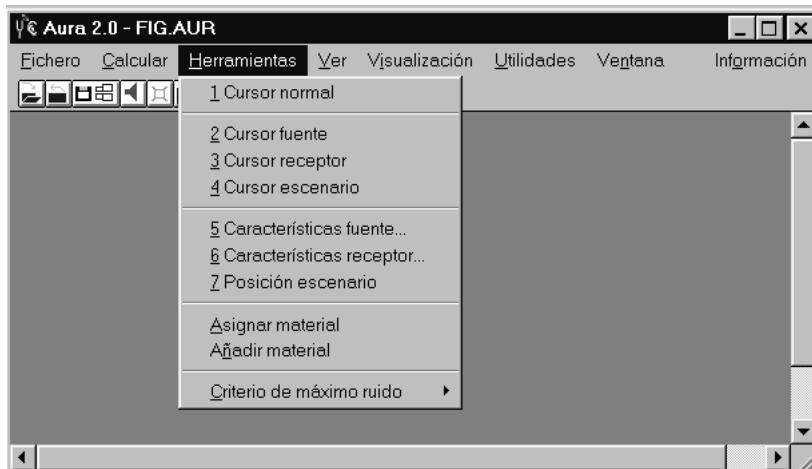


Fig. 7.38 Opciones del menú “Herramientas”

Las opciones correspondientes a los cursores permiten situar de forma visual en el recinto la fuente sonora, el receptor y el escenario. La asignación de las coordenadas es, en cada caso, automática.

Las opciones correspondientes a las características de la fuente y del receptor permiten definir su posición y su orientación. En el caso de la fuente, también es posible asignarle la potencia radiada y una directividad a elegir entre las dos siguientes: omnidireccional (cuando se trata de calcular parámetros relativos a salas de conciertos) y voz humana (si los parámetros a calcular corresponden a teatros o salas de conferencias). En la figura 7.39 se observa la pantalla asociada a la opción “Características fuente”.

Otra opción de este menú es la que hace referencia a la asignación de materiales a las diferentes superficies del recinto. Dicha asignación puede hacerse partiendo de los materiales existentes en la base de datos del programa o bien introduciendo otros nuevos. En concreto, la información que se debe introducir es el nombre del material y los coeficientes de absorción y difusión del mismo en función de la frecuencia.

La última opción de este menú permite introducir los niveles máximos de ruido de fondo esperados en la sala, con el fin de obtener unos valores de inteligibilidad de la palabra (parámetros STI y RASTI) más acordes con las condiciones reales de funcionamiento de la misma.

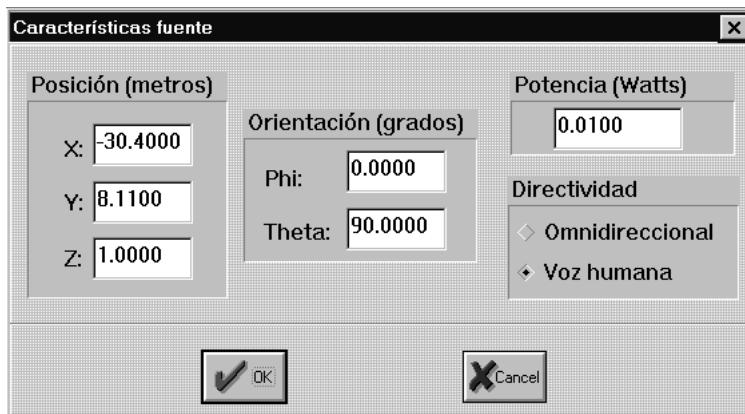


Fig. 7.39 Pantalla asociada a la opción “Características fuente”

El programa permite seleccionar directamente una curva NC o bien introducir manualmente los niveles de ruido en función de la frecuencia.

7.2.4.3 Menú “Ver”

378

En la figura 7.40 se observan las diferentes opciones del menú “Ver”.

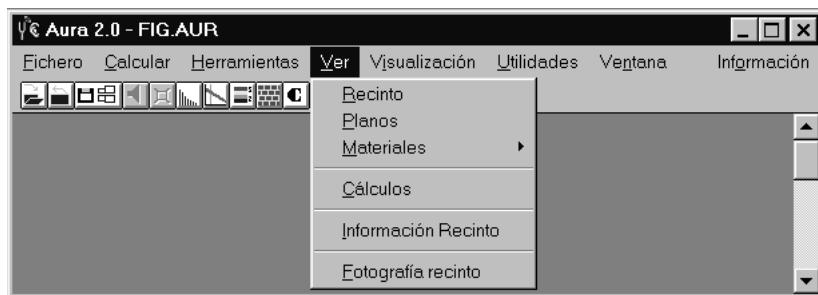


Fig. 7.40 Opciones del menú “Ver”

Las opciones de este menú permiten mostrar:

- Las vistas del recinto mediante tres proyecciones sobre los ejes XY, YZ y ZX, y una perspectiva en tres dimensiones
- Un listado en el que aparecen las superficies del recinto y los materiales asignados a cada una de ellas
- Los materiales integrantes de la base de datos junto con sus coeficientes de absorción y difusión en función de la frecuencia
- Una lista con todos los cálculos realizados hasta el momento (con la posibilidad de visualizar cualquiera de ellos)

- Información sobre el recinto relativa a volumen, superficie total y coeficientes medios de absorción por bandas de octava
- Fotografías del recinto en formato mapa de bits

7.2.4.4 Menú “Visualización”

En la figura 7.41 se observan las diferentes opciones del menú “Visualización”.

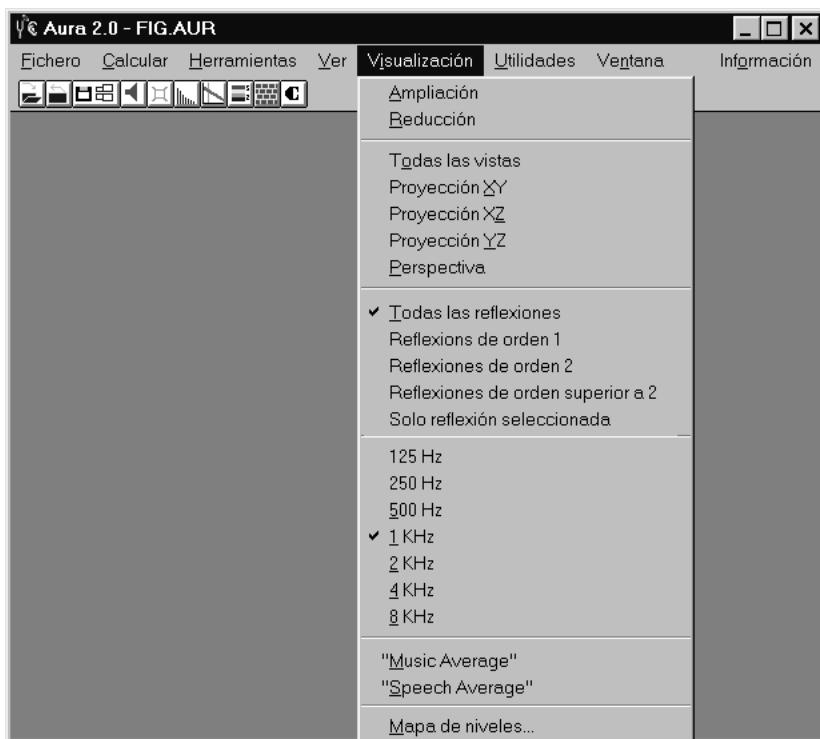


Fig. 7.41 Opciones del menú “Visualización”

Las opciones de este menú permiten mostrar:

- Diferentes visiones ampliadas o reducidas del recinto
- Diferentes vistas simultáneas, una proyección sobre cualquiera de los tres planos, o bien una vista en perspectiva
- Cuando la ventana activa es la de un ecograma, es posible visualizar:
 - Todas las reflexiones calculadas
 - Solamente las reflexiones de orden 1
 - Solamente las reflexiones de orden 2
 - Solamente las reflexiones de orden superior a 2

En los últimos tres casos, se muestra asimismo la reflexión seleccionada. También es posible ver el camino seguido por la reflexión seleccionada en el ecograma. Ello permite observar en qué superficies concretas se ha ido reflejando el rayo sonoro elegido hasta llegar al receptor.

- Los cálculos que se presentan de forma gráfica, en una cualquiera de las bandas de frecuencias entre 125 Hz y 4 kHz. Dichos cálculos son los siguientes:
 - Mapa de niveles
 - Curva energía-tiempo (ETC)
 - Ecograma
 - Curvas de relaciones energéticas (ELR)
 - Todos los cálculos incluidos en la opción “Otros parámetros” del menú “Calcular”
- Las curvas ELR promedio para música (“music average”) y para voz (“speech average”). Esta opción sólo se habilita cuando la ventana activa es la ELR.
- Una ventana de diálogo con el usuario que sirve para seleccionar el grado de resolución con el que se desea visualizar los mapas de niveles. El grado de resolución se establece dividiendo los elementos calculados en el correspondiente mapa en un conjunto de subelementos cuyos niveles se obtienen a partir de la interpolación de los niveles calculados (figura 7.42).



Fig. 7.42 Pantalla correspondiente a la elección del grado de resolución en la visualización de los mapas de niveles

7.2.4.5 Menú “Utilidades”

En la figura 7.43 se observan las diferentes opciones del menú “Utilidades”. Las opciones de este menú permiten lo siguiente:

- Extraer la información calculada por el programa a partir de la curva energía-tiempo y dejarla en formato de texto con objeto de que pueda ser transferida a una unidad de reverberación digital para la creación de sonido virtual (apartado 7.3.4).

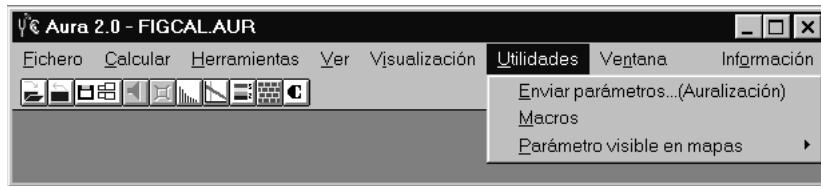


Fig. 7.43 Opciones del menú “Utilidades”

- Elaboración de macros (ficheros de órdenes consecutivas) a fin de automatizar el proceso de cálculo. De esta manera, el usuario puede desentenderse de dicho proceso y consultar los resultados una vez finalizado el mismo.
- Seleccionar el mapa de niveles deseado correspondiente a uno de los siguientes parámetros:
 - Nivel de presión sonora (SPL)
 - “Early Decay Time” (EDT)
 - Claridad musical (C_{80})
 - Eficiencia Lateral (LF o ELEF)
 - Sonoridad (G)
 - Sonoridad (S)
 - Claridad de la voz (C_{50})
 - “Speech Transmission Index” (STI)
 - “Rapid Speech Transmission Index” (RASTI)
 - Definición (D)

7.3 Sistemas de creación de sonido virtual

7.3.1 Introducción

El advenimiento de los sistemas de creación de sonido virtual en la década de los 90 ha supuesto la aparición de un importante complemento a los programas de simulación acústica existentes, así como una apreciable ayuda en el diseño acústico de recintos. En este apartado se describen de forma breve dichos sistemas y se presenta uno en concreto, a modo de ejemplo representativo.

7.3.2 Concepto de “auralización”

“Auralización” es un término introducido en el año 1.990 por Mendel Kleiner, profesor e investigador de la Universidad Tecnológica de Chalmers (Göteborg, Suecia).

Con este término se ha bautizado el proceso a través del cual es posible realizar una escucha, en cualquier punto de un recinto, de un mensaje oral o un pasaje musical, con la particularidad de que ello se lleva a cabo de forma virtual (antes de que dicho recinto se haya

construido o remodelado). La mencionada escucha se puede efectuar mediante altavoces o, preferentemente, por medio de auriculares.

La utilidad fundamental de la auralización se centra en el diseño acústico de un recinto, ya que permite comprobar auditivamente la calidad acústica fruto del diseño llevado a cabo, constituyendo un complemento al estudio teórico realizado mediante el programa de simulación.

La auralización es útil tanto en el análisis de recintos en fase de proyecto como en el de recintos ya existentes. En este último caso, constituye un medio de demostración del efecto auditivo que tendrían diferentes correcciones acústicas, ahorrando consideraciones técnicas a las personas no habituadas al lenguaje propio de la disciplina acústica.

7.3.3 Estructura de los sistemas de auralización

En este apartado se describen de forma resumida dos posibles sistemas de auralización: la auralización por convolución y la auralización mediante una unidad de reverberación digital. Ambos sistemas están basados en el conocimiento previo de la denominada respuesta impulsional $h(t)$, comentada a continuación.

La respuesta impulsional $h(t)$ en un punto cualquiera de un recinto contiene toda la información sobre el campo sonoro en dicho punto. La $h(t)$ depende tanto de la forma y de los materiales utilizados como acabados de la sala como de la posición de la fuente sonora y del receptor. El conocimiento de $h(t)$ permite la obtención de la denominada auralización monoaural.

Ahora bien, con objeto de que la auralización sea lo más real posible, es preciso conocer dos respuestas impulsionales:

- $h_R(t)$ = respuesta impulsional en el oído derecho del receptor
- $h_L(t)$ = respuesta impulsional en el oído izquierdo del receptor

El conocimiento de ambas respuestas posibilita la obtención de la auralización denominada binaural o estéreo.

La determinación de la respuesta impulsional la lleva a cabo el programa de simulación acústica empleado (en el programa AURA, es la curva energía-tiempo ETC).

7.3.3.1 Sistema de auralización por convolución

a) Auralización monoaural

Este sistema calcula la señal auralizada $y(t)$ por convolución de la respuesta impulsional $h(t)$ con cualquier señal de voz o de música $x(t)$ previamente grabada en ambiente anecoico (denominada señal de excitación). Dicha convolución es efectuada por un procesador digital de señal DSP (“Digital Signal Processor”).

En la figura 7.44 se presenta el esquema representativo del mencionado sistema de auralización.

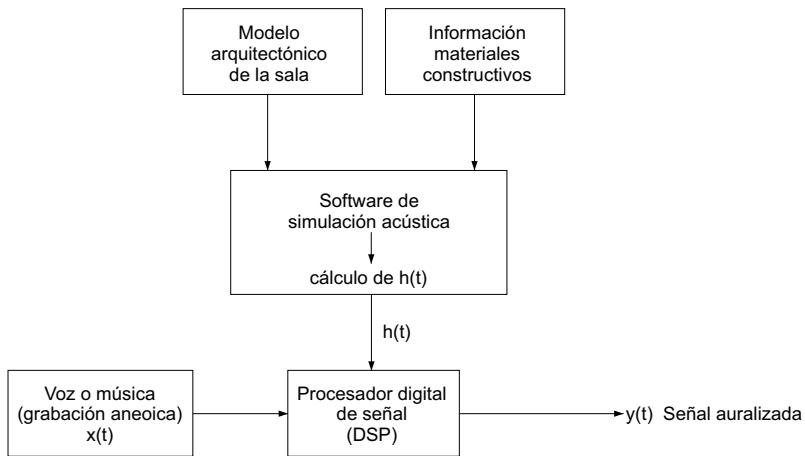


Fig. 7.44 Esquema representativo de un sistema de auralización monoaural por convolución

b) Auralización binaural (estéreo)

En este caso, la señal auralizada tiene dos componentes:

- $y_R(t)$: componente correspondiente al canal derecho
- $y_L(t)$: componente correspondiente al canal izquierdo

383

Cada una de ellas se obtiene por convolución de las respuestas impulsionales $h_R(t)$ y $h_L(t)$, respectivamente, con la señal de excitación $x(t)$.

El esquema representativo de este sistema se muestra en la figura 7.45.

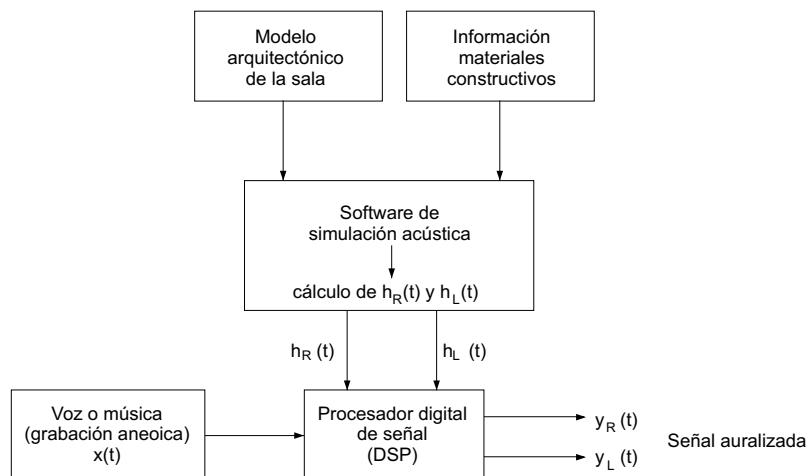


Fig. 7.45 Esquema representativo de un sistema de auralización binaural por convolución

7.3.3.2 Sistema de auralización mediante una unidad de reverberación digital

Al igual que en los sistemas de auralización por convolución, este sistema utiliza como punto de partida la respuesta o respuestas impulsionales calculadas por el correspondiente programa de simulación acústica.

A partir de dichas respuestas, el programa calcula un conjunto de parámetros acústicos representativos del campo sonoro existente en el punto (auralización monoaural) o puntos (auralización binaural) objeto de estudio.

Los valores numéricos de dichos parámetros son utilizados para programar los parámetros internos de una unidad de reverberación digital.

Una vez programada, se aplica a su entrada la misma señal de excitación $x(t)$ comentada anteriormente, obteniendo a su salida la señal auralizada $y(t)$ en versión monoaural o binaural.

En la figura 7.46 se observa el esquema correspondiente a un sistema de auralización binaural basado en una unidad de reverberación digital.

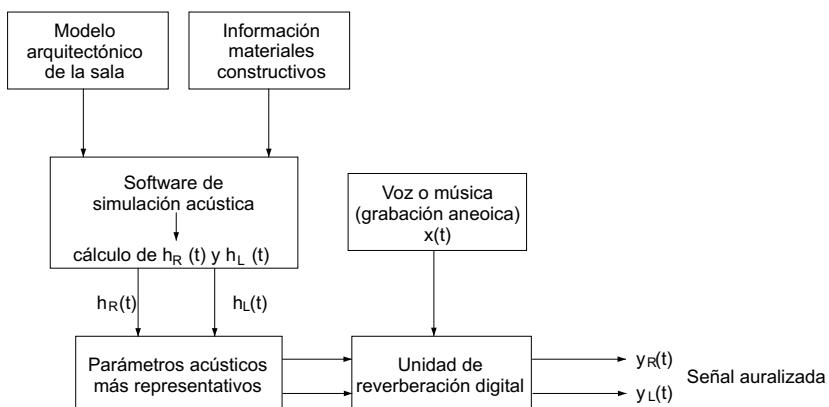


Fig. 7.46 Esquema representativo de un sistema de auralización binaural basado en una unidad de reverberación digital

En el siguiente apartado se describe un sistema de auralización basado en una unidad de reverberación digital específica.

7.3.4 Sistema de auralización basado en la unidad de reverberación digital Roland R-880^(*)

El sistema de auralización basado en la unidad de reverberación digital Roland R-880 funciona conjuntamente con el programa de simulación acústica AURA.

^(*) Desarrollado conjuntamente por el Grupo de Acústica Aplicada del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones (Universidad Politécnica de Cataluña) y la empresa Audioscan, ingeniería del sonido. Trabajo galardonado con el premio Salvá Campillo al proyecto más original del año 1996 relacionado con el campo de las tecnologías de la información. Dicho premio fue otorgado por la Asociación Catalana de Ingenieros de Telecomunicación

El proceso de creación de sonido virtual se divide en las siguientes fases:

- Cálculo de las respuestas impulsionales (curvas energía-tiempo ETC) y obtención de los siguientes parámetros acústicos mediante el programa AURA:
 - Primeras reflexiones más significativas en la banda de 1 kHz:
 - Número de reflexiones = 40 (auralización monoaural)
 - Número de reflexiones = 20 por canal (auralización binaural)
 - Tiempo de reverberación (RT)
 - Claridad musical (C_{80})
 - Claridad de la voz (C_{50})
 - Sonoridad (G)
 - Sonoridad (S)
 - Correlación cruzada interaural (IACC)
- Establecimiento de la correlación entre los parámetros acústicos anteriores y los parámetros internos de la unidad Roland R-880 (figura 7.47).

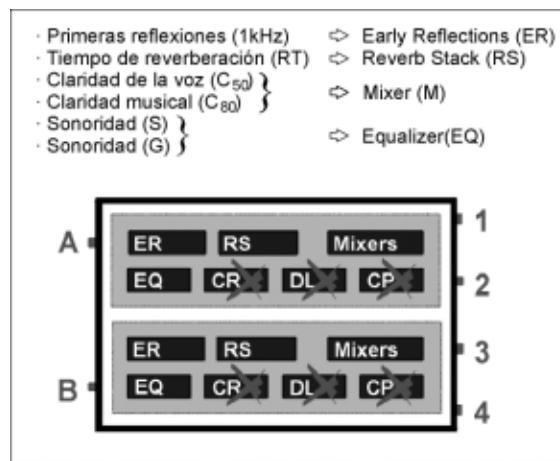


Fig. 7.47 Correlación entre parámetros acústicos y parámetros internos de la unidad R-880

- Envío automático de los valores numéricos de los parámetros acústicos calculados a la unidad de reverberación mediante un protocolo de comunicaciones basado en un sistema exclusivo MIDI, específicamente diseñado con este fin.
- Programación automática de la unidad de reverberación digital R-880.
La programación está basada en dos caminos paralelos independientes: uno de ellos conecta la entrada y la salida de la unidad R-880, y genera el sonido directo. El segundo camino “room only” simula el efecto de la sala mediante una señal que incluye las primeras reflexiones más significativas, en función de su grado de audibilidad, y la cola reverberante. Ambos caminos se unen a la salida mediante un mezclador, y sus niveles relativos son determinados mediante la relación campo directo/campo reverberante (C_{50} o bien C_{80}) calculada por el AURA.

El camino correspondiente al sonido directo no sufre ningún procesado, mientras que la señal correspondiente al “room only” se ajusta mediante un ecualizador. Los ajustes de ecualización se calculan a partir del contenidopectral de las primeras reflexiones programadas.

Los tiempos de reverberación calculados se programan directamente en el módulo de reverberación de la unidad. En la figura 7.48 se representa gráficamente la programación de unos determinados valores de tiempos de reverberación.

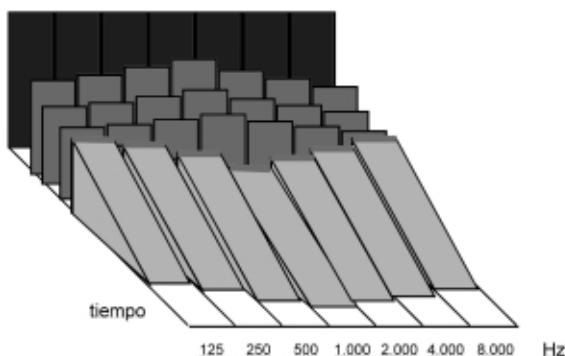


Fig. 7.48 Ejemplo de programación de los tiempos de reverberación

Para realizar la auralización binaural se programan por separado los dos canales de la unidad de reverberación.

En la figura 7.49 se observa un esquema con los diferentes elementos integrantes del sistema de auralización expuesto anteriormente.



Fig. 7.49 Elementos integrantes del sistema de auralización basado en la unidad de reverberación Roland R-880

Apéndice 1

Estudio y diseño de difusores unidimensionales QRD

Como se ha visto en el apartado 2.4.2.2., los difusores unidimensionales QRD (“Quadratic-Residue Diffusor”) consisten en una serie de ranuras paralelas de forma rectangular, de igual anchura y de diferente profundidad, por lo general separadas por unos divisores delgados y rígidos. La profundidad de cada ranura se obtiene a partir de una secuencia matemática prefijada, dando lugar a estructuras repetitivas (periódicas) que producen una dispersión uniforme o difusión del sonido incidente en planos perpendiculares a dichas ranuras y en un determinado margen de frecuencias.

El principio de funcionamiento de este tipo de difusores está basado en el fenómeno de la interferencia entre ondas sonoras. Cuando dos ondas se superponen, las presiones sonoras instantáneas respectivas se suman. Si las ondas son iguales, es decir, tienen la misma amplitud y están en el mismo estado de vibración en cada instante de tiempo, la presión sonora total se dobla. Se dice que tiene lugar un fenómeno de interferencia constructiva. En cambio, si ambas ondas tienen la misma amplitud, pero signo opuesto, la presión resultante es nula, dando lugar a una interferencia destructiva.

La diferencia entre ambos casos extremos se explica por la denominada fase de las ondas sonoras. De forma simple, la fase indica el estado de vibración de una onda sonora en un instante cualquiera. En el primer caso, ambas ondas están en fase (diferencia de fase = 0°), mientras que en el segundo están en oposición de fase (diferencia de fase = 180°). En general, la diferencia de fase entre dos señales de igual frecuencia puede tener cualquier valor situado entre 0° y 360° . En cada caso, la presión sonora resultante tendrá un valor comprendido entre el doble de la correspondiente a una única onda sonora y cero.

En el caso del difusor unidimensional QRD, cuando una onda sonora con una dirección cualquiera incide sobre una de sus ranuras, ésta se propaga por su interior siguiendo un camino paralelo a las paredes de la ranura hasta alcanzar el fondo de la misma. En dicho instante, la onda se refleja y viaja en sentido contrario hasta alcanzar nuevamente el extremo superior de la ranura. La fase de dicha onda depende del camino total recorrido por la misma en el interior de la ranura, es decir de la profundidad de la ranura. Debido a que las ranuras tienen distintas profundidades, la fase de la señal asociada a cada una en el instante de la radiación de la energía sonora incidente también será diferente, lo cual dará lugar a un fenómeno de

interferencia entre todas las ondas que intervienen (figura A1.1)

La distribución de la energía reflejada por el difusor en las diferentes direcciones del espacio depende del tipo de interferencia que tenga lugar, es decir, de la secuencia de valores de las profundidades de las ranuras, bien sea en términos absolutos (en cm), o bien en términos relativos (secuencia adimensional).

La secuencia adimensional de profundidades necesaria para conseguir que dicha distribución de energía reflejada sea lo más uniforme posible en todas las direcciones del espacio y, por lo tanto, que el difusor unidimensional QRD actúe efectivamente como tal, se obtiene a partir de la siguiente expresión generadora:

$$s_n = n^2 \bmod p$$

donde:

p = número primo (3, 7, 11,...)

n = número entero que va desde 0 hasta $p-1$

\bmod = operación matemática módulo, indicativa de que cada valor de s_n se obtiene como el resto o residuo del cociente entre n^2 y p

La secuencia resultante es periódica y de periodo p .

En la tabla A1.1 se presenta el listado de valores de s_n correspondientes a los números primos comprendidos entre $p = 3$ y $p = 23$ (1 periodo).

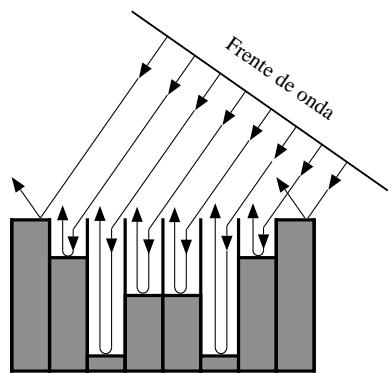


Fig. A1.1 Caminos recorridos por una onda sonora en el interior de las ranuras de un difusor unidimensional QRD

p	n																						
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
3	0	1	1																				
5	0	1	4	4	1																		
7	0	1	4	2	2	4	1																
11	0	1	4	9	5	3	3	5	9	4	1												
13	0	1	4	9	3	12	10	10	12	3	9	4	1										
17	0	1	4	9	16	8	2	15	13	13	15	2	8	16	9	4	1						
19	0	1	4	9	16	6	17	11	7	5	5	7	11	17	6	16	9	4	1				
23	0	1	4	9	16	2	13	3	18	12	8	6	6	8	12	18	3	13	2	16	9	4	1

Tabla A1.1 Secuencias de residuo cuadrático s_n correspondientes a los números primos comprendidos entre $p = 3$ y $p = 23$ (1 periodo)

En la figura A1.2 se muestran los perfiles correspondientes a las secuencias de la tabla A1.1, poniéndose de manifiesto una de las propiedades más relevantes de este tipo de difusores: la simetría. Las líneas delgadas indican la existencia de elementos divisores entre ranuras.

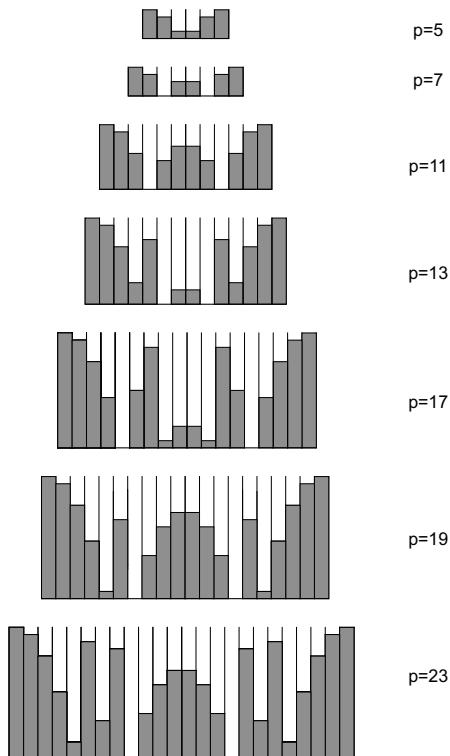


Fig. A1.2 Perfiles asociados a las secuencias de residuo cuadrático s_n correspondientes a los números primos comprendidos entre $p = 5$ y $p = 23$ (1 periodo)

A continuación se plantean dos posibles procedimientos de diseño de un difusor unidimensional QRD y se indican los pasos a seguir en cada caso.

Ante todo, es preciso subrayar que todas las expresiones presentadas a continuación estas basadas en la hipótesis inicial de campo lejano, es decir, en que las distancias fuente sonora-difusor y difusor-receptor son grandes en comparación con la longitud de onda de la frecuencia de trabajo considerada. Esta hipótesis de partida se da en muchas situaciones reales y permite simplificar enormemente el complejo análisis matemático de la difusión.

A.1.1 Procedimiento de diseño nº1

A1.1.1 Objetivos de diseño

Los objetivos de diseño inicialmente establecidos son los siguientes:

- f_{\max} = frecuencia máxima para la cual se desea una óptima difusión
- f_0 = frecuencia de diseño (frecuencia mínima para la cual se desea una óptima difusión)
- m_{\max} = orden o grado de difusión a la frecuencia f_0 (número entero)

En relación con m_{\max} , al fijar su valor se fija el número de direcciones ($2m_{\max} + 1$) para las cuales la energía reflejada tiene el mismo valor. Además, resulta que dicho valor es máximo debido a que se trata de direcciones para las que se produce una interferencia constructiva. Los ángulos asociados a tales direcciones reciben el nombre de ángulos de difusión. Por otra parte, en todas aquellas direcciones próximas a las anteriores también existe radiación de energía. Sin duda, ello contribuye a una mayor difusión del sonido.

A modo de ejemplo, en la figura A1.3 se observa el diagrama de difusión, a la frecuencia de diseño f_0 , correspondiente a un difusor unidimensional QRD de 1 periodo con $p = 13$ y $m_{\max} = 4$.

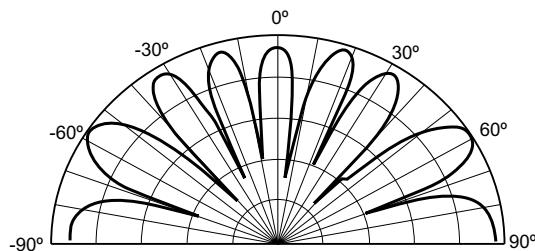


Fig. A1.3 Diagrama de difusión, a la frecuencia de diseño f_0 , correspondiente a un difusor unidimensional QRD de 1 periodo con $p = 13$ y $m_{\max} = 4$

A1.1.2 Determinación de la anchura de las ranuras W

La anchura de las ranuras está ligada exclusivamente a la f_{\max} a través de la siguiente expresión:

$$W = \frac{c}{2f_{\max}} - T$$

donde:

W = anchura de las ranuras (en mm)

c = velocidad de propagación del sonido (en mm/s)

T = espesor de los divisores (en mm)

Según se puede observar, cuanto mayor sea el valor elegido de la frecuencia f_{\max} , más estrechas deberán hacerse las ranuras.

En cuanto al valor de T , éste debe ser lo menor posible a fin de producir una mínima alteración de las propiedades difusoras del elemento, si bien ello no significa que se pueda prescindir de los divisores.

En efecto, los divisores son imprescindibles con objeto de obligar a que cada onda sonora recorra la profundidad total de la correspondiente ranura, quedando así asegurada la validez de la teoría expuesta anteriormente. Sólo en el caso de incidencia perpendicular a la superficie del difusor (ángulo de incidencia = 0°), resulta innecesaria la existencia de divisores.

En la práctica T debe ser, como mínimo, 15 veces menor que W, si bien esta proporción debe ser incrementada a medida que p aumenta. Ello es lógico si se tiene en cuenta que p coincide con el número de ranuras por periodo: cuanto mayor sea p, más separadores existirán por periodo y mayor influencia tendrán en las características de difusión. Por ejemplo, para p = 53 es preciso que T sea del orden de 30 veces menor que W para conseguir una óptima difusión.

Los valores habituales de T se hallan comprendidos entre 1,5 y 5 mm. Los materiales utilizados para su construcción son el aluminio, en el caso de separadores delgados, y la madera cuando se trata de separadores más gruesos. Cuanto más delgados sean los separadores, mayor será la absorción a baja frecuencia.

Por otra parte, la expresión anterior se puede reescribir de la siguiente forma:

$$W + T = \frac{c}{2f_{\max}} = \frac{\lambda_{\min}}{2}$$

De su observación se desprende que la anchura total (ranura + separador) debe ser igual a la mitad de la longitud de onda correspondiente a la máxima frecuencia de difusión. De todas formas, si se pretende que la difusión también sea óptima para una incidencia rasante (dirección de la onda sonora prácticamente paralela a la superficie del difusor), dicha anchura total deberá ser la mitad de la anterior, es decir:

$$W + T = \frac{\lambda_{\min}}{4}$$

A1.1.3 Determinación del número de ranuras por periodo p

Una vez fijados los valores de f_{\max} , f_0 y m_{\max} , el valor de p se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$p = \frac{2 m_{\max} f_{\max}}{f_0}$$

Según se puede ver, cuanto mayor sea el grado de difusión m_{\max} deseado y/o el margen de frecuencias útiles requerido, mayor deberá ser el número de ranuras por periodo p. Otra interpretación es la siguiente: para un determinado margen útil de frecuencias, el hecho de aumentar p produce un aumento del grado de difusión m_{\max} .

A modo de ejemplo, en la figura A1.4 se muestran los diagramas de difusión, a la frecuencia de diseño f_0 , correspondientes a dos difusores formados por 2 periodos con p = 17 y p = 89, respectivamente.

Comparando ambos diagramas, se observa claramente el significativo aumento del número de lóbulos y, por tanto, de ángulos de difusión al pasar de p = 17 a p = 89.

Por otro lado, es preciso tener presente que p debe ser un número primo. En consecuencia, si una vez fijados f_{\max} , f_0 y m_{\max} , el valor obtenido aplicando la expresión anterior no coincide con un número primo, el valor elegido de p deberá ser el del número primo más próximo al calculado y de un valor más elevado.

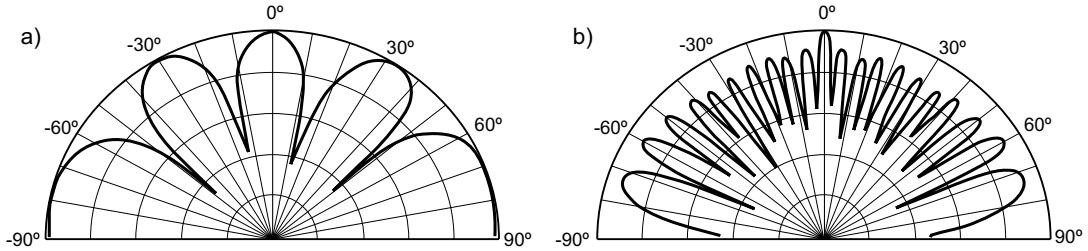


Fig. A1.4 Diagramas de difusión, a la frecuencia de diseño f_0 , correspondientes a 2 períodos de un difusor unidimensional QRD, con: a) $p = 17$; b) $p = 89$

A1.1.4 Determinación de la profundidad de las ranuras d_n

Una vez fijada la frecuencia de diseño f_0 y determinado el valor de p , es posible calcular la profundidad real de cada ranura a partir de la siguiente expresión:

392

$$d_n = \frac{s_n c}{2pf_0} \quad (\text{en cm})$$

donde c se expresa en cm/s, y s_n es la secuencia generadora adimensional definida anteriormente. Por lo tanto, el factor por el cual se debe multiplicar cada valor s_n para obtener el correspondiente valor de d_n es:

$$\frac{c}{2pf_0}$$

Además, al ser s_n periódica y de periodo p , también lo es la secuencia de profundidades d_n .

Por otra parte, la expresión correspondiente a la máxima profundidad $d_n(\max)$ es la siguiente:

$$d_n(\max) = \frac{s_n(\max)c}{2pf_0} \quad (\text{en cm})$$

siendo $s_n(\max)$ el número mayor de la secuencia generadora s_n .

En este punto conviene señalar que, de acuerdo con la expresión anterior, una vez fijado p y por tanto $s_n(\max)$, siempre que se pretenda disminuir la frecuencia f_0 será preciso aumentar la máxima profundidad $d_n(\max)$ de las ranuras.

A1.2 Procedimiento de diseño nº2

A1.2.1 Objetivos de diseño

En este caso, los objetivos inicialmente establecidos son:

- f_{\max} = frecuencia máxima para la cual se desea una óptima difusión
- Obtención de la mínima frecuencia de diseño f_0 posible

Además, se parte de un valor prefijado de la máxima profundidad de las ranuras $d_n(\max)$.

A1.2.2 Determinación de la anchura de las ranuras W

Se sigue el mismo procedimiento anterior.

A1.2.3 Determinación del número de ranuras por periodo p

393

El número de ranuras por periodo será, preferentemente, uno de los dos siguientes:

$$p = 7$$

$$p = 23$$

Seguidamente se expone el motivo de dicha elección.

La expresión correspondiente a la frecuencia f_0 , obtenida de la expuesta en el apartado A1.1.4, es la siguiente:

$$f_0 = \frac{s_n(\max)}{p} \cdot \frac{c}{2d_n(\max)}$$

Por lo tanto, dado que el valor de $d_n(\max)$ está prefijado, se trata de ver para qué valor de p el cociente $s_n(\max)/p$ es mínimo, ya que entonces f_0 también será mínima.

Como cuestión previa, es preciso comentar que, para cada secuencia considerada, $s_n(\max)$ aumenta con p . Para comprobar la veracidad de dicha afirmación basta con observar los valores de las secuencias de la tabla A1.1. Por ejemplo:

para:

$$\begin{aligned} p = 3 &\rightarrow s_n(\max) = 1 \\ p = 13 &\rightarrow s_n(\max) = 12 \\ p = 23 &\rightarrow s_n(\max) = 18 \end{aligned}$$

En cuanto a $s_n(\max)/p$, en la figura A1.5 se muestran los valores de dicho cociente para valores de p comprendidos entre 5 y 43.

Según se puede observar, el valor buscado es $p = 7$, ya que para dicho valor, $s_n(\max)/p$ es mínimo y, por tanto, la frecuencia f_0 también lo es. Sin embargo, el hecho de que tanto p como f_0 tengan valores bajos implica que el grado de difusión no será óptimo. Ello se puede verificar recordando la expresión dada en el apartado A1.1.3:

$$p = \frac{2m_{\max}f_{\max}}{f_0}$$

394

El valor de m_{\max} (orden o grado de difusión) calculado a partir de dicha expresión es, en efecto, relativamente bajo.

Si se pretende conseguir una mayor difusión, es preciso elegir un valor de p más elevado. Ahora bien, si al mismo tiempo se establece como objetivo no incrementar de forma excesiva la frecuencia f_0 , resulta necesario escoger el valor $p = 23$, ya que para dicho valor la curva $s_n(\max)/p$ presenta un mínimo relativo.

Por consiguiente, el valor $p = 7$ se escogerá en el caso de que sea prioritaria la obtención de una frecuencia f_0 mínima, mientras que el valor $p = 23$ se reservará para aquellos casos en que prevalezca el objetivo de conseguir una máxima difusión del sonido, sin incrementar excesivamente el valor de f_0 .

A1.3 Propiedades de los difusores unidimensionales QRD

A1.3.1 Influencia del número de periodos en el grado de difusión del sonido

Como se ha comentado anteriormente, en las direcciones próximas a las de máxima radiación también existe una cierta radiación de energía. Ahora bien, se puede demostrar que cuanto mayor sea el número de periodos considerado, mayor será la concentración de energía alrededor de los ángulos de difusión o de máxima radiación y, por lo tanto, menor el grado de difusión obtenido. En el caso teórico límite de un difusor con un número infinito de periodos, solamente existiría energía reflejada en las direcciones correspondientes a los ángulos de difusión.

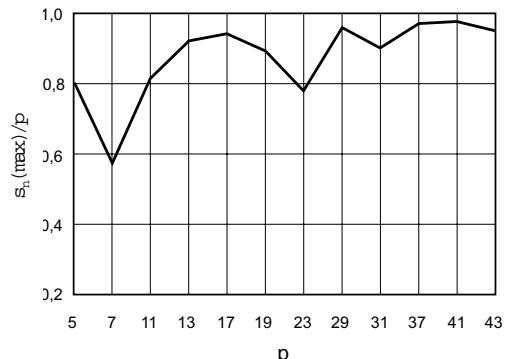


Fig. A1.5 Gráfica de valores de $s_n(\max)/p$ para valores de p comprendidos entre 5 y 43

A modo de ejemplo ilustrativo, en la figura A1.6 se muestran los diagramas de difusión, a la frecuencia de diseño f_0 , correspondientes a un difusor QRD con $p = 17$, suponiendo 2 y 25 periodos, respectivamente.

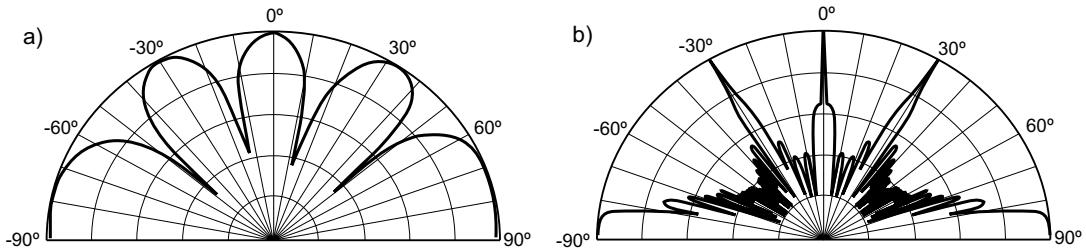


Fig. A1.6 Diagramas de difusión, a la frecuencia de diseño f_0 , correspondientes a un difusor unidimensional QRD con $p = 17$, de longitud: a) 2 períodos; b) 25 períodos

Se observa que, efectivamente, al pasar de 2 a 25 períodos tiene lugar un estrechamiento de los lóbulos de radiación alrededor de los ángulos de difusión y, por consiguiente, la difusión es menor.

De lo anterior se desprende que, para un cierto valor de p , cuanta mayor superficie se precise para proporcionar difusión del sonido en una determinada sala, más períodos serán necesarios y, por lo tanto, menor difusión se podrá conseguir.

A1.3.2 Comportamiento de los difusores en función de la frecuencia

El grado de difusión m_{\max} proporcionado por los difusores a la frecuencia de diseño f_0 se va incrementando a todas las frecuencias múltiplos de f_0 situadas por debajo de la frecuencia f_{\max} . El correspondiente incremento es el siguiente:

$$\text{para : } f = nf_0 \text{ (con } f \leq f_{\max}) \rightarrow m'_{\max} = nm_{\max}$$

donde n es un número entero (1, 2, 3..).

Por ejemplo, si $m_{\max} = 2$, el número de ángulos de difusión a la frecuencia f_0 es:

$$(2m_{\max} + 1) = 5$$

A la frecuencia $2f_0$, dicho número pasará a ser:

$$f = 2f_0 \rightarrow m'_{\max} = 2m_{\max} = 4 \rightarrow (2m'_{\max} + 1) = 9$$

mientras que a la frecuencia $4f_0$:

$$f = 4f_0 \rightarrow m'_{\max} = 4m_{\max} = 8 \rightarrow (2m'_{\max} + 1) = 17$$

En la figura A1.7 se muestran los diagramas de difusión correspondientes a las frecuencias f_0 , $2f_0$ y $4f_0$ de un difusor de 2 períodos y $p = 23$.

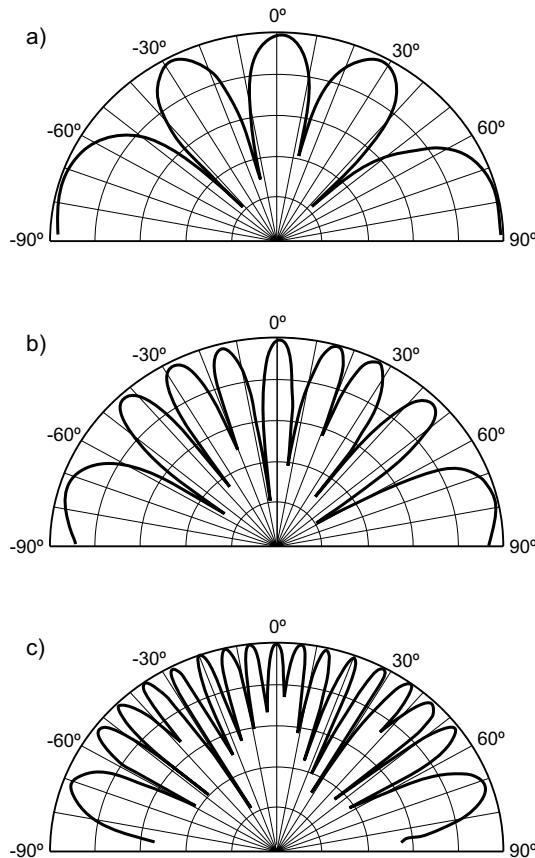


Fig. A1.7 Diagramas de difusión correspondientes a 2 períodos de un difusor unidimensional QRD con $p = 23$, a las frecuencias: a) f_0 ; b) $2f_0$; c) $4f_0$

Se observa que, efectivamente, tiene lugar el mencionado incremento de difusión con la frecuencia.

Afortunadamente, en la práctica, las propiedades de difusión también se mantienen para el resto de frecuencias comprendidas entre f_0 y f_{\max} , aunque no sean múltiplos de f_0 . Tal circunstancia permite garantizar una correcta difusión en todo el margen útil de frecuencias comprendido entre f_0 y f_{\max} .

Por otra parte, si bien los diagramas de difusión se pueden obtener para cualquier frecuencia comprendida dentro de dicho margen útil, en ocasiones resulta conveniente disponer de los diagramas asociados a las bandas de frecuencias de octava situadas dentro del mencionado margen, de la misma manera que se dispone de los coeficientes de absorción de los materiales absorbentes por bandas de octava.

En general, los diagramas así calculados resultan más regulares que los correspondientes a frecuencias individuales, ya que se obtienen como promedio energético de los asociados a las frecuencias comprendidas dentro de cada banda.

A modo de ejemplo, en la figura A1.8 se observan los diagramas de difusión de un difusor unidimensional QRD de 2 periodos y $p = 23$, correspondientes a la banda de frecuencias de octava centrada en 2 kHz y a la frecuencia de 2 kHz, respectivamente. La banda útil del difusor está comprendida entre 1.000 y 5.750 Hz.

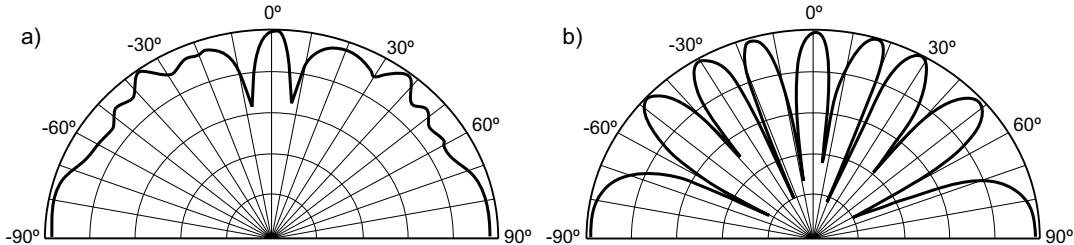


Fig. A1.8 Diagramas de difusión de un difusor unidimensional QRD de 2 periodos y $p = 23$, correspondientes a: a) banda de octava centrada en 2 kHz; b) frecuencia de 2 kHz

Del mismo modo, en la figura A1.9 se observan los diagramas de difusión de un difusor unidimensional QRD de 2 periodos y $p = 23$, correspondientes a la banda de frecuencias de octava centrada en 4 kHz y a la frecuencia de 4 kHz, respectivamente.

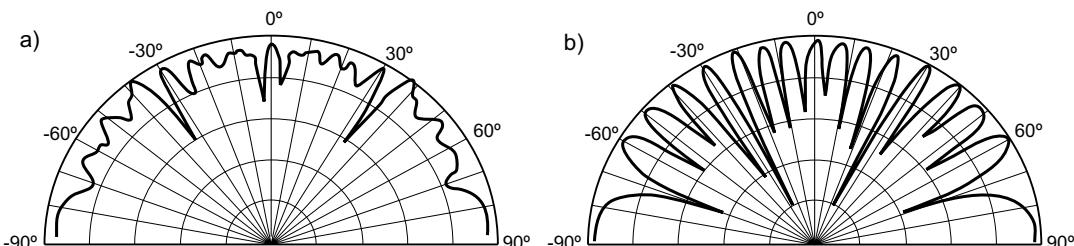


Fig. A1.9 Diagramas de difusión de un difusor unidimensional QRD de 2 periodos y $p = 23$, correspondientes a: a) banda de octava centrada en 4 kHz; b) frecuencia de 4 kHz

En ambos casos resulta evidente la suavización de los diagramas asociados a las dos bandas de octava en comparación con los correspondientes exclusivamente a las frecuencias centrales de cada banda.

A1.3.3 Margen útil de frecuencias

De lo expuesto hasta ahora es posible concluir que el margen de frecuencias dentro del cual la difusión es óptima (entre f_0 y f_{\max}) viene determinado por la relación entre la máxima profundidad $d_n(\max)$ de las ranuras y la anchura W de las mismas:

$$\text{Margen útil de frecuencias} \propto \frac{d_n(\max)}{W}$$

En efecto, la frecuencia más elevada f_{\max} para la cual se produce difusión del sonido aumenta a medida que la anchura W de las ranuras disminuye, en tanto que la más baja f_0 disminuye a medida que aumenta la máxima profundidad $d_n(\max)$.

De todas formas, existe un límite en cuanto al valor máximo de dicha relación, puesto que se ha podido comprobar que las ranuras estrechas y muy profundas producen un exceso de absorción acústica. Dicho límite lleva a que, en la práctica, el margen útil de frecuencias del difusor quede restringido a, aproximadamente, tres octavas, es decir:

$$\frac{f_{\max}}{f_0} \leq 8$$

Fuera de dicho margen el difusor tiende a comportarse como una superficie plana, dando lugar a reflexiones prácticamente especulares.

A1.4 Resumen de los procedimientos de diseño de un difusor unidimensional QRD

398

A1.4.1 Procedimiento de diseño nº1

a) Objetivos de diseño

- f_{\max} = frecuencia máxima para la cual se desea una óptima difusión
- f_0 = frecuencia de diseño (frecuencia mínima para la cual se desea una óptima difusión)

Se debe cumplir que:

$$\frac{f_{\max}}{f_0} \leq 8$$

- m_{\max} = orden o grado de difusión a la frecuencia f_0 (número entero)

Habitualmente:

$$m_{\max} = 2$$

b) Determinación de la anchura de las ranuras W

$$W = \frac{c}{2f_{\max}} - T$$

donde:

W = anchura de las ranuras (en mm)

c = velocidad de propagación del sonido (en mm/s)

T = espesor de los divisores (en mm)

Habitualmente:

$$1,5 \leq T \leq 5 \text{ mm}$$

c) Determinación del número de ranuras por periodo p

$$p = \frac{2 m_{\max} f_{\max}}{f_0}$$

donde p debe ser un número primo. En el caso de que no lo sea, es preciso elegir el número primo más próximo al valor calculado y de un valor más elevado.

d) Determinación de la profundidad de las ranuras d_n

$$d_n = \frac{s_n c}{2 p f_0} \quad (\text{en cm})$$

donde:

$s_n = n^2 \bmod p$

n = número entero desde 0 hasta p-1

c = velocidad de propagación del sonido (en cm/s)

Cada valor de s_n se obtiene como el resto del cociente entre n^2 y p.

e) Influencia del número de periodos en el grado de difusión del sonido

Cuanta mayor superficie se precise para proporcionar difusión del sonido, más períodos serán necesarios y menor difusión se podrá conseguir.

A1.4.2 Procedimiento de diseño nº 2

a) Objetivos de diseño

- f_{\max} = frecuencia máxima para la cual se desea una óptima difusión

- Obtención de la mínima frecuencia de diseño f_0 posible
- Se parte de un valor prefijado de la máxima profundidad de las ranuras $d_n(\max)$

b) Determinación de la anchura de las ranuras W

Igual que en el procedimiento anterior.

c) Determinación del número de ranuras por periodo p

El número de ranuras por periodo será, preferentemente, uno de los dos siguientes:

$$\begin{aligned} p &= 7 \\ p &= 23 \end{aligned}$$

El valor $p = 7$ se escogerá en el caso de que sea prioritaria la obtención de una frecuencia f_0 mínima, mientras que el valor $p = 23$ se reservará para aquellos casos en que prevalezca el objetivo de conseguir una máxima difusión del sonido, con una f_0 lo menor posible.

400

d) Determinación de f_0

$$f_0 = \frac{s_n(\max)}{p} \frac{c}{2d_n(\max)}$$

donde:

$s_n (\max)$ = valor máximo de s_n

$s_n = n^2 \bmod p$

n = número entero desde 0 hasta $p-1$

Cada valor de s_n se obtiene como el resto del cociente entre n^2 y p .

e) Influencia del número de periodos en el grado de difusión del sonido

Igual que en el procedimiento anterior.

Apéndice 2

Formulación de los parámetros acústicos

En todos los apartados siguientes en los que no se hace referencia explícita a las bandas de frecuencias de cálculo, los correspondientes parámetros se calculan en las bandas de octava comprendidas entre 125 Hz y 4 kHz.

A2.1 Nivel de presión sonora (SPL)

El nivel de presión sonora se define como 20 veces el logaritmo de la relación entre el valor eficaz de la presión sonora y el valor eficaz de la presión umbral de audición, a 1 kHz:

$$\text{SPL} = 20 \log \frac{p_{\text{ef}}}{p_{\text{ref}}} \text{ (en dB)}$$

donde:

p_{ef} = presión eficaz del sonido en consideración

p_{ref} = presión eficaz correspondiente al umbral de audición, a 1 kHz (2×10^{-5} Pa)

La utilización de dicha referencia tiene como objetivo que todos los sonidos audibles sean representados por valores SPL positivos.

A2.2 Tiempo de reverberación (RT)

Con independencia de la fórmula utilizada para el cálculo, el valor más representativo del tiempo de reverberación es el denominado RT_{mid} , que se obtiene como promedio de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1 kHz:

$$RT_{\text{mid}} = \frac{RT(500 \text{ Hz}) + RT(1 \text{ kHz})}{2} \text{ (en s)}$$

A continuación se dan 6 posibles expresiones para el cálculo del RT.

A2.2.1 RT Sabine:

$$RT = \frac{0,161 V}{A_{\text{tot}} + 4mV} \quad (\text{en s})$$

donde:

V = volumen del recinto (en m^3)

$A_{\text{tot}} = \bar{\alpha} S_{\text{tot}}$ = absorción total del recinto (en sabins)

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_i \alpha_i S_i}{S_{\text{tot}}} = \text{coeficiente medio de absorción del recinto}$$

α_i = coeficiente de absorción de la superficie “i”

S_i = área de la superficie “i” (en m^2)

$S_{\text{tot}} = \sum_i S_i$ = superficie total del recinto (en m^2)

m = constante de atenuación del sonido en el aire (en m^{-1})

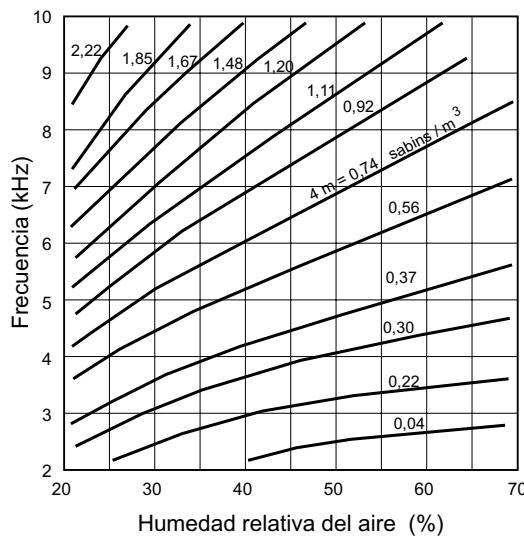


Fig. A2.1 Gráficas para la determinación del producto $4m$ (para una presión atmosférica estática de 10^5 Pa y una temperatura de 20°C)

A2.2.2 RT Norris-Eyring:

$$RT = \frac{0,161 V}{-\ln(1-\bar{\alpha}) S_{\text{tot}} + 4mV} \quad (\text{en s})$$

Los símbolos anteriores coinciden con los del apartado A2.2.1.

A2.2.3 RT Kuttruff:

$$RT = \frac{0,161 V}{aS_{\text{tot}} + 4mV} \quad (\text{en s})$$

donde:

$$a = \ln \left(\frac{1}{1 - \bar{\alpha}} \right) + \ln \left(1 + \frac{\sum_i S_i^2 (1 - \alpha_i) (\bar{\alpha} - \alpha_i)}{S_{\text{tot}}^2 (1 - \bar{\alpha})^2 - \sum_i S_i^2 (1 - \alpha_i)^2} \right)$$

El resto de símbolos coinciden con los del apartado A2.2.1.

A2.2.4 RT Sabine (ponderada por reflexiones):

$$RT = \frac{13,8 \bar{l}'}{c \bar{\alpha}' + cm\bar{l}'} \quad (\text{en s})$$

donde:

$$\bar{l}' = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N l_i$$

$$\bar{\alpha}' = \sum_j f_j \alpha_j$$

$$f_j = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_j}{N}$$

\bar{l}' : libre camino medio calculado a través de la teoría de rayos (en m)

c: velocidad del sonido (en m/s)

l_i : distancia entre dos colisiones consecutivas (en m)

N : número total de colisiones

$\bar{\alpha}'$: coeficiente medio de absorción

α_j : coeficiente de absorción de la cara j

N_j : número de colisiones sobre la cara j

m: constante de atenuación del sonido en el aire (en m^{-1})

A2.2.5 RT Norris-Eyring (ponderada por reflexiones):

$$RT = \frac{13,8 \bar{l}'}{-c \ln (1 - \bar{\alpha}') + cm\bar{l}'} \quad (\text{en s})$$

Los símbolos anteriores coinciden con los del apartado A2.2.4.

A2.2.6 Kuttruff (ponderada por reflexiones):

$$RT = \frac{13,8 \bar{l}'}{-c \ln(1 - \bar{\alpha}') \left[1 + \frac{\gamma^2}{2} \ln(1 - \bar{\alpha}') \right] + cm\bar{l}'} \quad (\text{en s})$$

donde:

$$\gamma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (l_i - \bar{l}')^2}{N \bar{l}'^2}} = \text{desviación típica correspondiente al libre camino medio}$$

El resto de símbolos coinciden con los del apartado A2.2.4.

A2.3 Calidez acústica (BR) y brillo (Br)

A2.3.1 Calidez acústica (BR)

La calidez acústica BR (“Bass Ratio”) se obtiene como el cociente entre la suma de los tiempos de reverberación correspondientes a las bandas de frecuencias de 125 Hz y 250 Hz y la suma de los RT correspondientes a las bandas de frecuencias de 500 Hz y 1 kHz:

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

A2.3.2 Brillo (Br)

El brillo (Br) se obtiene como el cociente entre la suma de los tiempos de reverberación correspondientes a las bandas de frecuencias de 2 kHz y 4 kHz y la suma de los RT correspondientes a las bandas de frecuencias de 500 Hz y 1 kHz:

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

A2.4 Relaciones energéticas ELR (“Early to Late Ratios”)

A2.4.1 C_t

Se define como 10 veces el logaritmo de la relación entre la energía que llega a un oyente den-

tro de los primeros “t” segundos desde la llegada del sonido directo (incluye el sonido directo) y la energía que le llega con posterioridad:

$$C_t = 10 \log \frac{\int_0^t p^2(t)dt}{\int_t^\infty p^2(t)dt} \text{ (en dB)}$$

donde:

$p(t)$ = presión sonora instantánea

A2.4.2 Claridad de la voz (C_{50})

Es el valor de C_t , particularizado para $t = 50$ ms:

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{0,05} p^2(t)dt}{\int_{0,05}^\infty p^2(t)dt} \text{ (en dB)} \quad \text{405}$$

Habitualmente se utiliza el valor medio ponderado denominado “speech average”:

$$C_{50} \text{ (“speech average”)} = 0,15 \cdot C_{50} (500 \text{ Hz}) + 0,25 \cdot C_{50} (1 \text{ kHz}) + \\ + 0,35 \cdot C_{50} (2 \text{ kHz}) + 0,25 \cdot C_{50} (4 \text{ kHz}) \quad (\text{en dB})$$

A2.4.3 Claridad musical (C_{80})

Es el valor de C_t , particularizado para $t = 80$ ms:

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{0,08} p^2(t)dt}{\int_{0,08}^\infty p^2(t)dt} \text{ (en dB)}$$

Habitualmente se utiliza el valor medio denominado “music average”:

$$C_{80} \text{ (“music average”)} = \frac{C_{80} (500 \text{ Hz}) + C_{80} (1 \text{ kHz}) + C_{80} (2 \text{ kHz})}{3} \text{ (en dB)}$$

A2.4.4 C_{t0}

Se define como el valor de C_t , una vez excluida la energía correspondiente al sonido directo:

$$C_{t0} = 10 \log \frac{\int_0^{0,005} p^2(t) dt}{\int_t^\infty p^2(t) dt} \text{ (en dB)}$$

A2.4.5 C_x

406

Curva ELR teórica correspondiente a un decaimiento puramente exponencial (condiciones de campo difuso):

$$C_x = 10 \log (e^{\frac{13,82 t}{RT}} - 1) \text{ (en dB)}$$

La curva C_x es la equivalente teórica a la curva C_{t0} .

A2.4.6 C_b

La curva C_b (debida a Barron) considera, además del tiempo de reverberación de la sala, su volumen V y la distancia r desde la fuente al receptor. Es una aproximación mejor que la curva C_x , ya que tiene en cuenta la disminución del nivel de presión sonora que se produce en un recinto cuando el receptor se aleja de la fuente:

$$C_x = 10 \log \left(e^{\frac{-13,82 t}{RT}} - 1 + \frac{Ve^{\frac{0,04 r + 13,82 t}{RT}}}{312 RT r^2} \right) \text{ (en dB)}$$

La curva C_b se puede considerar la equivalente teórica a la curva C_t .

A2.5 Curva de energía reflejada acumulada (RECC)

Según Toyota, la curva RECC (“Reflective Energy Cumulative Curve”) se define como 10 veces el logaritmo de la energía que llega a un oyente dentro de los primeros “t” segundos desde la llegada del sonido directo, excluyendo la energía asociada al mismo:

$$\text{RECC} (t) = 10 \log \int_{0.005}^t p^2 (t) dt \quad (\text{en dB})$$

El cálculo se efectúa en la banda de frecuencias comprendida entre 250 Hz y 2 kHz.

A2.6 Definición (D)

Según Thiele, la definición D (del alemán “Deutlichkeit”) es la relación entre la energía que llega al oyente dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluye el sonido directo y las primeras reflexiones) y la energía total recibida por el mismo:

$$D = \frac{\int_0^{0.05} p^2 (t) dt}{\int_0^{\infty} p^2 (t) dt}$$

407

La relación entre este parámetro y la claridad de la voz C_{50} , en una banda de frecuencias cualquiera, es:

$$D = \frac{1}{1 + 10^{-\frac{C_{50}}{10}}}$$

A2.7 Relación de primeras reflexiones (ERR)

Según Barron, la relación de primeras reflexiones ERR (“Early Reflection Ratio”) se define como la relación entre la energía que llega al oyente dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluye el sonido directo y las primeras reflexiones) y la energía correspondiente al sonido directo:

$$\text{ERR} = \frac{\int_0^{0.05} p^2 (t) dt}{\text{Energía del sonido directo}}$$

Este parámetro se calcula en la banda de frecuencias comprendida entre 125 Hz y 4 kHz.

A2.8 Inteligibilidad de la palabra

A2.8.1 Pérdida de articulación de consonantes %ALCons (“Articulation Loss of Consonants”)

$$\% \text{ALCons} = \frac{200 r^2 RT^2}{VQ} \quad (\text{para: } r \leq 3,16 D_c)$$

$$\% \text{ALCons} = 9RT \quad (\text{para: } r > 3,16 D_c)$$

donde:

r = distancia entre el emisor (orador) y el receptor (en m)

RT = tiempo de reverberación de la sala (en s)

V = volumen de la sala (en m^3)

D_c = distancia crítica = $0,14 \sqrt{QR}$

Q = factor de directividad de la fuente sonora en la dirección considerada ($Q = 2$ en el caso de la voz humana, considerando la dirección frontal del orador)

$$R = \frac{S_{\text{tot}} \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} = \text{constante de la sala (en } m^2)$$

408

S_{tot} = superficie total de la sala (en m^2)

$\bar{\alpha}$ = coeficiente medio de absorción de la sala

Habitualmente, el %ALCons se calcula en la banda de 2 kHz, por tratarse de la banda de máxima contribución a la inteligibilidad de la palabra.

A2.8.2 STI (“Speech Transmission Index”)

El índice STI, definido por Houtgast y Steeneken, permite cuantificar el grado de inteligibilidad de la palabra entre los valores 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad óptima). El STI se calcula a partir de la reducción de los diferentes índices de modulación “m” de la voz debida a la existencia de reverberación y de ruido de fondo en una sala.

Las 14 frecuencias de modulación F_m consideradas son las siguientes:

F_m (Hz)	0,63	0,8	1,0	1,25	1,6	2,0	2,5	3,15	4,0	5,0	6,3	8,0	10	12,5
------------	------	-----	-----	------	-----	-----	-----	------	-----	-----	-----	-----	----	------

Cada una de estas frecuencias produce un efecto de modulación sobre las 7 bandas de octava más representativas de la voz, cuyas frecuencias centrales son las detalladas a continuación:

F_0 (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
------------	-----	-----	-----	-------	-------	-------	-------

a) Proceso de cálculo del STI según Houtgast y Steeneken

a.1) Cálculo de la reducción de los índices de modulación

La expresión genérica correspondiente a la reducción del índice de modulación m para cada combinación de frecuencias F_0 y F_m se denomina función de transferencia de modulación MTF (“Modulation Transfer Function”). Su expresión es la siguiente:

$$m(F_0, F_m) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi F_m f(F_0)}{13,8} \right)^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{\frac{-S/N(F_0)}{10}}}$$

donde:

$f(F_0)$ = función genérica asociada al grado de reverberación del recinto considerado. Se le puede asignar valores de tiempo de reverberación (RT) o de “Early Decay Time” (EDT).

$\frac{S}{N}(F_0)$ = relación señal/ruido correspondiente a la banda centrada en la frecuencia F_0

Debido a que existen 14 valores de F_m y 7 valores de F_0 , el número total de valores de $m(F_0, F_m)$ es de: $14 \times 7 = 98$.

409

a.2) Conversión de los índices $m(F_0, F_m)$ a relaciones señal/ruido aparentes $(S/N)_{ap}$

$$(S/N)_{ap}(F_0, F_m) = 10 \log \frac{m(F_0, F_m)}{1 - m(F_0, F_m)}$$

Los 98 valores obtenidos se truncan de manera que todos ellos estén comprendidos entre 15 dB y -15 dB.

a.3) Cálculo de las relaciones señal/ruido aparentes medias por bandas de octava $\overline{(S/N)_{ap}}(F_0)$

Para cada banda de octava, se calcula el valor medio de las 14 relaciones señal/ruido aparentes, según la siguiente expresión:

$$\overline{(S/N)_{ap}}(F_0) = \frac{\sum_{F_m} (S/N)_{ap}(F_0, F_m)}{14}$$

a.4) Cálculo de la relación señal/ruido aparente media global $(\overline{S/N})_{ap}$

Para dicho cálculo se tienen en cuenta los siguientes factores de ponderación para cada banda de octava, en función de su grado de contribución a la inteligibilidad:

$$\begin{aligned} \overline{S/N}_{ap} = & 0,010 (\overline{S/N})_{ap} (125 \text{ Hz}) + 0,042 (\overline{S/N})_{ap} (250 \text{ Hz}) + 0,129 (\overline{S/N})_{ap} (500 \text{ Hz}) + \\ & + 0,200 (\overline{S/N})_{ap} (1 \text{ kHz}) + 0,312 (\overline{S/N})_{ap} (2 \text{ kHz}) + 0,250 (\overline{S/N})_{ap} (4 \text{ kHz}) + 0,057 (\overline{S/N})_{ap} (8 \text{ kHz}) \end{aligned}$$

a.5) Cálculo del índice STI

El valor del índice STI se obtiene a partir de la siguiente expresión:

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

Se puede comprobar fácilmente que los valores de STI siempre están comprendidos entre 0 y 1 debido a que los valores de $(\overline{S/N})_{ap}$ se hallan entre -15 dB y +15 dB.

b) Proceso de cálculo del STI por transformada de Fourier

El proceso de cálculo del STI por transformada de Fourier es equivalente al de Houtgast y Steeneken, con la única excepción de que la función de transferencia de modulación MTF se calcula a partir de la transformada de Fourier del cuadrado del módulo de la respuesta impulsional $h(t, F_0)$, dividida por la energía de la señal:

$$m(F_0, F_m) = \left| \frac{\int_0^{\infty} |h(t, F_0)|^2 e^{-j2\pi F_m t} dt}{\int_0^{\infty} |h(t, F_0)|^2 dt} \right| \cdot \frac{1}{1 + 10^{\frac{-S/N(F_0)}{10}}}$$

A2.8.3 RASTI (“Rapid Speech Transmission Index”)

El índice RASTI es una versión simplificada del STI. Por lo tanto, existe una analogía en cuanto al cálculo de ambos parámetros.

La simplificación consiste en reducir el número de frecuencias de modulación, así

como las bandas de octava a tener en cuenta. En concreto, las bandas de octava consideradas y las frecuencias de modulación asociadas a cada una de ellas son las siguientes:

F_0 (Hz)	F_m (Hz)			
500	1	2	4	8

F_0 (Hz)	F_m (Hz)				
2.000	0,7	1,4	2,8	5,6	11,2

Por lo tanto, el número de índices de modulación calculados es únicamente de 9, frente a los 98 utilizados en el caso del índice STI.

Los pasos a seguir para el cálculo del RASTI coinciden con los correspondientes al STI, con la excepción de que se calcula una única relación señal/ruido aparente media, que se toma como global:

$$\overline{(S/N)}_{ap} = \frac{\sum_{F_0, F_m} (S/N)_{ap} (F_0, F_m)}{9}$$

A2.9 Sonoridad (S)

Según Barron, la sonoridad S (“Speech sound level”) en un punto de una sala se define como la diferencia entre el nivel medio de presión sonora existente en el mismo producido por un actor situado sobre el escenario y el nivel de referencia de 39 dB. Este valor corresponde al nivel medio (promediado en el espacio) que produciría dicha persona al aire libre, a una distancia de 10 m.

Ambos niveles medios se obtienen promediando los valores correspondientes a las bandas de frecuencias centradas en 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz. Por ello, resulta práctico denominarla S_{mid} :

$$S_{mid} = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_A^2(t) dt} \text{ (en dB)}$$

donde:

$p_A(t)$ = presión sonora de referencia

A2.10 Sonoridad (G)

Según Lehmann, la sonoridad G (“strength factor”) se define como la diferencia entre el nivel total de presión sonora L_p producido por una fuente omnidireccional en un determinado punto de una sala y el nivel de presión sonora producido por la misma fuente situada en campo libre y medido a una distancia de 10 m (nivel de referencia):

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_A^2(t) dt} \text{ (en dB)}$$

donde:

$p_A(t)$ = presión sonora de referencia

Habitualmente se utiliza el valor obtenido como promedio de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1 kHz:

412

$$G_{mid} = \frac{G(500 \text{ Hz}) + G(1 \text{ kHz})}{2} \text{ (en dB)}$$

A2.11 Eficacia lateral (LF)

Según A. H. Marshall, la eficiencia lateral LF (“Lateral energy Fraction”) se define como la relación entre la energía que llega lateralmente a un oyente dentro de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo (se excluye el sonido directo) y la energía recibida en todas direcciones en dicho intervalo de tiempo:

$$LF = \frac{\int_{0.005}^{0.08} p^2(t) \cos^2 \theta dt}{\int_0^{0.08} p^2(t) dt}$$

Habitualmente se utiliza el valor obtenido como promedio de los valores correspondientes a las bandas desde 125 Hz a 1 kHz:

$$LF_{E4} = \frac{LF(125 \text{ Hz}) + LF(250 \text{ Hz}) + LF(500 \text{ Hz}) + LF(1 \text{ kHz})}{4}$$

A2.12 Correlación cruzada interaural (IACC)

La correlación cruzada interaural IACC (“InterAural Cross-Correlation”) se define como la correlación cruzada entre las respuestas impulsionales calculadas en ambos oídos, y es indicativa del grado de similitud existente entre ambas señales. Si las dos señales son iguales, el IACC valdrá 1, mientras que si son señales aleatorias independientes, el IACC será 0.

Hidaka define dos IACC: el $IACC_E$ (donde el subíndice E es la inicial de la palabra “Early”), correspondiente a los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo, y el $IACC_L$ (donde L es la inicial de la palabra “Late”), calculado a partir de los 80 ms hasta 1 s. El $IACC_E$ se define de la siguiente forma:

$$IACC_E = \max \frac{\int_{0,005}^{0,08} h_L(t) h_R(t + \tau) dt}{\left(\int_{0,005}^{0,08} h_L^2(t) dt \int_{0,005}^{0,08} h_R^2(t) dt \right)^{1/2}} \quad (\text{para } |\tau| \leq 1 \text{ ms})$$

donde $h_L(t)$ y $h_R(t)$ son las respuestas impulsionales asociadas a los oídos izquierdo y derecho, respectivamente. 413

Análogamente, el $IACC_L$ se define de la manera siguiente:

$$IACC_L = \max \frac{\int_{0,08}^1 h_L(t) h_R(t + \tau) dt}{\left(\int_{0,08}^1 h_L^2(t) dt \int_{0,08}^1 h_R^2(t) dt \right)^{1/2}} \quad (\text{para } |\tau| \leq 1 \text{ ms})$$

Según Okano, las bandas de frecuencias más representativas son las centradas en 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz. De aquí surgen las definiciones siguientes:

$$IACC_{E3} = \frac{IACC_E(500 \text{ Hz}) + IACC_E(1 \text{ kHz}) + IACC_E(2 \text{ kHz})}{3}$$

$$IACC_{L3} = \frac{IACC_L(500 \text{ Hz}) + IACC_L(1 \text{ kHz}) + IACC_L(2 \text{ kHz})}{3}$$

A2.13 Tiempo central (t_s)

Según Kürer, el tiempo central (o centro de gravedad) t_s se define como el momento de primer orden del área situada por debajo de la curva de decaimiento energético. Dicho parámetro es indicativo de la “distancia” (en ms) desde el origen temporal $t = 0$ hasta el “centro de gravedad” del área de la curva de decaimiento:

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\text{en ms})$$

Este parámetro se calcula en la banda de frecuencias comprendida entre 125 Hz y 4 kHz.

A2.14 Criterio de Ecos (EC)

414

El Criterio de Ecos EC (“Echo Criterion”), debido a Dietsch y Kraak, está basado en la relación:

$$t_s(\tau) = \frac{\int_0^{\tau} t p^n(t) dt}{\int_0^{\tau} p^n(t) dt} \quad (\text{en ms})$$

Se define como:

$$EC = \max \frac{\Delta t_s}{\Delta \tau}$$

Para salas destinadas a la palabra, se toma $n = 2/3$ y $\Delta\tau = 9$ ms, mientras que el cálculo se realiza en la banda de 1 kHz.

Para salas destinadas a música sinfónica, se toma $n = 1$ y $\Delta\tau = 14$ ms, mientras que el valor de EC se obtiene como promedio de los valores correspondientes a las bandas de 1 kHz y 2 kHz.

A2.15 Soporte objetivo (ST1)

El ST1 se define como 10 veces el logaritmo de la relación entre la energía asociada a las primeras reflexiones (entre 20 y 100 ms) proporcionadas por las paredes y el techo del escenario, y la energía recibida en los primeros 20 ms, ambos valores obtenidos a 1 m de distancia de una fuente omnidireccional situada en el escenario:

$$ST1 = 10 \log \frac{\int_{0,02}^{0,1} p^2(t)dt}{\int_0^{0,02} p^2(t)dt} \quad (\text{en dB})$$

Apéndice 3

Ficha técnica de 66 salas de conciertos de relevancia mundial

La exhaustiva información que se presenta a continuación en forma de ficha técnica se ha extraído del libro de L. Beranek “Concert and Opera Halls: How They Sound”, publicado por la “Acoustical Society of America” en 1.996.

Las salas aparecen clasificadas de acuerdo con las siguientes seis categorías:

- Categoría A+ : “Superior”
- Categoría A : “Excelente”
- Categoría B+ : “Buena a Excelente”
- Categoría B : “Buena”
- Categoría C+ : “Aceptable a Buena”
- Categoría C : “Aceptable”

417

Es preciso comentar que existe un total de 47 salas cuya clasificación exacta ha sido imposible de establecer a partir de la información facilitada por Beranek en su libro. De forma indirecta, se ha deducido que la categoría asociada a cada una de ellas es la B+, o bien, la B. Es por ello que en la ficha técnica aparece indicado de esta manera.

Por otra parte, las salas pertenecientes a cada categoría están ordenadas por orden alfabético.

La información proporcionada de cada sala es la siguiente:

- Año de inauguración
- N : Número de asientos
- V: Volumen (m^3)
- S_s : Superficie real ocupada por las sillas (m^2)
- S_A : Superficie acústica efectiva ocupada por las sillas (m^2)
- S_o : Superficie del escenario ocupada por la orquesta (m^2)
- S_{tot} : Superficie acústica efectiva total (m^2)
- S_s/N : m^2 /asiento
- V/N : m^3 /asiento

- V/S_{tot} : m
- N/S_{tot} : m^{-2}
- RT_{mid} , sala ocupada (s)
- BR, sala ocupada
- G_{mid} , sala vacía (dB)
- t_i , centro platea (ms)
- $C_{80}(3)$, sala vacía (dB)
- LF_{E4} , sala vacía
- $(1-\text{IACC}_{E3})$, sala vacía
- SDI
- $ST1_{\text{mid}}$ (dB), sala vacía y escenario sin músicos
- S (Ando y Beranek)

NOMBRE DE LA SALA	DATOS GEOMÉTRICOS		AÑO INAUGU- RACION	Nº DE ASIENTOS N	VOLUMEN V (m^3)	SUPER- FICIE REAL SILLAS S_s (m^2)	SUPER- FICIE ACÚSTICA EFECTIVA SILLAS S_a (m^2)	SUPER- FICIE ORQUES- TA SILLAS S_o (m^2)	SUPER- FICIE ACÚSTICA EFECTIVA TOTAL S_{tot} (m^2)	S_s/N (m^2)	V/N (m^3)	V/S_{tot} (m)	N/S_{tot} (m^{-2})
Categoría A+ “Superior”													
Amsterdam, Concertgebouw	1.888	2.037	18.780	843	1.125	160	1.285	0,41	9,20	14,6	1,60		
Boston, Symphony Hall	1.900	2.625	18.750	1.056	1.370	152	1.522	0,40	7,14	12,3	1,72		
Vienna, Musikvereinssaal	1.870	1.680	15.000	690	955	163	1.118	0,41	8,93	13,4	1,50		
Categoría A “Excelente”													
Basel, Stadt-Casino	1.876	1.448	10.500	584	731	160	891	0,40	7,25	11,8	1,63		
Berlin, Konzerthaus (Schauspiel)	1.986	1.575	15.000	784	943	158	1.101	0,50	9,53	13,6	1,43		
Cardiff, Wales, St. David’s Hall	1.982	1.952	22.000	1.000	1.235	186	1.421	0,51	11,20	15,8	1,41		
Costa Mesa, Segerstrom Hall	1.986	2.903	27.800	1.504	1.742	223	1.965	0,52	9,58	14,2	1,48		
New York, Carnegie Hall	1.891	2.804	24.270	1.145	1.600	227	1.826	0,41	8,65	13,3	1,54		
Tokyo, Hamarikyu Asahi	1.992	552	5.800	283	395	73	468	0,51	10,50	11,4	1,09		
Zurich, Grosser Tonhalleaal	1.895	1.546	11.400	702	877	145	1.022	0,45	7,37	11,2	1,52		
Categoría B+ “Buena a Excelente” o B “Buena”													
Baltimore, Meyerhoff Hall	1.982	2.467	21.520	1.196	1.486	186	1.672	0,48	8,72	12,9	1,48		
Berlin, Kammermusiksaal	1.987	1.138	11.000	618	829	78	907	0,54	9,66	12,1	1,25		
Berlin, Philharmonie	1.963	2.335	21.000	1.057	1.385	172	1.557	0,45	9,00	13,5	1,42		
Birmingham, Symphony Hall	1.991	2.211	25.000	1.031	1.320	279	1.599	0,47	11,30	15,6	1,38		
Bonn, Beethovenhalle	1.959	1.407	15.730	864	115	204	319	0,61	11,20	11,9	1,06		
Bristol, Colston Hall	1.951	2.121	13.450	745	987	160	1.147	0,35	6,34	11,7	1,85		
Brussels, Palais des Beaux-Arts	1.929	2.150	12.520	1.020	1.300	186	1.486	0,47	5,83	8,4	1,44		
Budapest, Pátria Hall	1.985	1.750	13.400	1.140	1.286	156	1.442	0,65	7,66	9,3	1,21		
Caracas, Aula Magna	1.954	2.660	24.920	1.580	1.886	204	2.090	0,59	9,37	11,9	1,27		
Christchurch, N.Z., Town Hall	1.972	2.662	20.500	1.127	1.416	194	1.610	0,42	7,70	12,7	1,65		
Cleveland, Severance Hall	1.931	2.101	15.690	930	1.208	186	1.394	0,44	7,50	11,2	1,49		
Copenhagen, Radiohuset, Studio 1	1.945	1.081	11.900	605	721	288	1.009	0,56	11,00	11,8	1,07		
Copenhagen, Tivoli Koncertsal	1.956	1.789	12.740	988	1.136	195	1.331	0,55	7,10	9,6	1,35		
Dallas, McDermott/Meyerson Hall	1.989	2.065	23.900	980	1.210	250	1.460	0,47	11,60	16,4	1,41		
Edinburgh, Usher Hall	1.914	2.547	15.700	1.040	1.338	120	1.458	0,41	6,16	10,8	1,75		

NOMBRE DE LA SALA	DATOS GEOMÉTRICOS	AÑO INAUGURACIÓN	Nº DE ASIENTOS N	VOLUMEN V (m³)	SUPERFICIE REAL SILLAS S _s (m²)	SUPERFICIE ACÚSTICA EFECTIVA SILLAS S _a (m²)	SUPERFICIE ORQUESA EFECTIVA S _o (m²)	SUPERFICIE ACÚSTICA EFECTIVA TOTAL S _{tot} (m²)	S/N (m²)	V/N (m³)	V/S _{tot} (m)	N/S _{tot} (m²)
Glasgow, Royal Concert Hall		1.990	2.459	22.700	1.147	1.365	218	1.583	0,47	9,23	14,3	1,55
Gothenburg, Konserthus		1.935	1.286	11.900	585	666	170	836	0,45	9,25	14,2	1,54
Helsinki, Kulttuuritalo		1.957	1.500	10.025	860	946	166	1.112	0,57	6,70	9,0	1,34
Jerusalem, Binyanei Ha' Oomah		1.960	3.142	24.700	1.672	2.137	260	2.397	0,53	7,90	10,3	1,30
Leipzig, Gewandhaus		1.981	1.900	21.000	1.036	1.197	181	1.378	0,55	11,00	15,2	1,38
Lenox, Seiji Ozawa Hall		1.994	1.180	11.610	496	739	202	941	0,42	9,83	12,3	1,25
Lenox, Tanglewood Music Shed		1.938	5.121	42.480	2.200	2.861	204	3.065	0,43	8,29	13,9	1,68
Liverpool, Philharmonic Hall		1.939	1.824	13.560	994	1.291	130	1.421	0,54	7,43	9,5	1,28
London, Royal Festival Hall		1.951	2.901	21.950	1.540	1.972	173	2.145	0,53	7,56	10,2	1,35
Manchester, Free Trade Hall		1.951	2.351	15.430	1.057	1.375	100	1.475	0,45	6,60	9,9	1,50
Mexico City, Sala Nezahualcoyotl		1.976	2.376	30.640	1.476	1.684	270	1.954	0,62	12,90	15,7	1,22
Minneapolis, Minn. Orch. Hall		1.974	2.450	18.975	1.266	1.574	203	1.777	0,52	7,74	10,7	1,38
Munich, Herkulessaal		1.953	1.287	13.590	586	674	168	842	0,46	10,60	16,1	1,52
Munich, Philharmonie Am Gasteig		1.985	2.487	29.700	1.329	1.639	230	1.869	0,53	12,40	15,9	1,28
New York, Avery Fisher Hall		1.976	2.742	20.400	1.189	1.480	203	1.683	0,43	7,44	12,1	1,63
Osaka, Symphony Hall		1.982	1.702	17.800	908	1.236	285	1.521	0,53	10,5	11,7	1,11
Paris, Salle Pléyel		1.927	2.386	15.500	780	1.058	242	1.300	0,33	6,5	11,9	1,83
Rochester, Eastman Theatre		1.923	3.347	25.500	1.580	1.907	204	2.225	0,47	7,62	11,5	1,51
Rotterdam, De Doelen Concert Hall		1.966	2.242	24.070	1.178	1.509	195	1.704	0,53	10,7	14,2	1,33
Salt Lake, Utah, Symphony Hall		1.979	2.812	19.500	1.486	1.669	218	1.887	0,53	6,93	10,3	1,49
Salzburg, Festspielhaus		1.960	2.158	15.500	1.058	1.375	195	1.570	0,49	7,20	9,9	1,38
Stuttgart, Liederhalle		1.956	2.000	16.000	1.000	1.300	176	1.476	0,50	8,00	10,4	1,30
Sydney Opera House, Concert Hall		1.973	2.679	24.600	1.362	1.563	181	1.744	0,51	9,18	14,0	1,53
Taipei, Concert Hall Auditorium		1.987	2.074	16.700	1.022	1.261	269	1.530	0,49	8,00	10,9	1,36
Tokyo, Bunka Kaikan, Ueno		1.961	2.327	17.300	983	1.301	241	1.542	0,42	7,40	11,2	1,51
Tokyo, Metropolitan Art Space		1.990	2.017	25.000	929	1.312	207	1.519	0,46	12,40	16,5	1,33
Tokyo, NHK Hall		1.973	3.677	25.200	1.458	1.821	193	2.014	0,40	6,85	12,5	1,82
Tokyo, Orchard Hall, Bunkamura		1.989	2.150	20.500	1.000	1.314	217	1.531	0,47	9,53	13,4	1,41
Tokyo, Suntory Hall		1.986	2.006	21.000	1.042	1.364	235	1.599	0,52	10,50	13,1	1,25
Toronto, Roy Thompson Hall		1.982	2.812	28.300	1.401	1.681	222	1.903	0,50	10,06	14,9	1,48
Washington, Kennedy Concert Hall		1.971	2.759	19.300	1.133	1.289	109	1.398	0,41	7,00	12,0	1,71
Worcester, Mechanics Hall		1.857	1.343	10.760	541	701	154	855	0,40	8,01	12,5	1,56
Categoría B “Buena”												
Chicago, Orchestra Hall		1.904	2.582	18.000	1.290	1.672	186	1.858	0,50	7,00	9,7	1,39
Edmonton, Alberta Jubilee Hall		1.957	2.678	21.500	1.500	1.951	186	2.137	0,56	8,00	10,0	1,25
Montreal, Salle Wilfrid-Pelletier		1.963	2.982	26.500	1.550	1.767	172	1.939	0,52	8,90	13,7	1,54
San Francisco, Davies Hall		1.980	2.743	24.070	1.214	1.562	200	1.762	0,44	8,78	13,0	1,48
Tel Aviv, Fredric Mann Auditorium		1.957	2.715	21.240	1.350	1.700	195	1.895	0,50	6,76	11,0	1,63
Categoría C+ “Aceptable a Buena”												
Bloomington, Indiana Univ. Aud.		1.941	3.760	26.900	1.877	2.438	186	2.624	0,50	7,20	10,2	1,42
Buffalo, Kleinhans Music Hall		1.940	2.839	18.240	1.580	1.951	205	2.156	0,56	6,42	8,5	1,32
London, Barbican Concert Hall		1.982	2.026	17.750	1.123	1.326	160	1.486	0,55	8,76	11,9	1,36
Categoría C “Aceptable”												
London, Royal Albert Hall		1.871	5.080	86.650	2.700	3.512	176	3.688	0,53	17,00	23,5	1,38

NOMBRE DE LA SALA	PARÁMETROS ACÚSTICOS		RT _{mid} OCUP. (s)	BR OCUP.	G _{mid} VACÍA (dB)	t _f CENTRO PLATEA (ms)	C ₈₀₍₃₎ VACÍA (dB)	LF _{E4} VACÍA	(I-IACC _{E3}) VACÍA	SDI	STL _{mid} (dB)	S (ANDO Y BERANEK)
Categoría A+ “Superior”												
Amsterdam, Concertgebouw	2,0	1,08	4,3	21	-3,3	0,18	0,62	1,0	-17,8	-0,293		
Boston, Symphony Hall	1,85	1,03	4,7	15	-2,7	0,20	0,65	1,0	-13,7	-0,297		
Vienna, Musikvereinssaal	2,0	1,11	5,5	12	-3,7	0,17	0,71	1,0	-13,9	-0,187		
Categoría A “Excelente”												
Basel, Stadt-Casino	1,8	1,17	6,6	16	-2,3	-	0,64	0,8	-13,7	-0,370		
Berlin, Konzerthaus (Schauspiel)	2,05	1,23	5,5	25	-2,5	-	0,66	1,0	-16,8	-0,281		
Cardiff, Wales, St. David's Hall	1,95	0,96	3,8	25	-0,9	0,17	0,60	0,6	-16,6	-0,598		
Costa Mesa, Segerstrom Hall	1,6	1,32	4,3	31	-0,4	0,23	0,62	0,9	-14,3	-0,445		
New York, Carnegie Hall	1,8	1,14	-	23	-	-			-	-		
Tokyo, Hamarikyu Asahi	1,7	0,94	9,3	16	-0,2	-	0,70		-	-		
Zurich, Grosser Tonhalleaal	2,05	1,23	6,7	14	-3,6	-	0,71	0,9	-12,6	-0,267		
Categoría B+ “Buena a Excelente” o B “Buena”												
Baltimore, Meyerhoff Hall	2,0	1,10	4,1	13	-1,6	0,17	0,54	0,8	-12,2	-0,405		
Berlin, Kammermusiksaal	1,7	0,89	-	20	-1,7	-			-	-		
Berlin, Philharmonie	1,95	1,01	4,3	21	-0,5	-	0,46	0,8	-16,8	-0,582		
Birmingham, Symphony Hall	1,85	1,08	-	27	-3,0	-			-	-		
Bonn, Beethovenhalle	1,65	1,06	-	27	-	-			-	-		
Bristol, Colston Hall	1,7	1,05	5,8	21	0,5	0,17	0,63	0,3	-	-0,749		
Brussels, Palais des Beaux-Arts	1,4	1,28	-	23	-	-			-	-		
Budapest, Pátria Hall	1,7	1,18	-	44	-	-			-	-		
Caracas, Aula Magna	1,3	1,32	-	30	-	-			-	-		
Christchurch, N.Z., Town Hall	2,1	1,06	3,8	11	-2,8	0,15	0,55	0,6	-	-0,491		
Cleveland, Severance Hall	1,5	1,14	3,9	20	0,4	0,15	0,59	0,8	-14,8	-0,515		
Copenhagen, Radiohuset, Studio 1	1,5	1,07	6,4	29	-0,7	0,15	0,58	0,5	-14,5	-0,657		
Copenhagen, Tivoli Koncertsal	1,3	1,10	-	16	-	-			-	-		
Dallas, McDermott/Meyerson Hall	2,8	1,19	-	21	-	-			-	-		
Edinburgh, Usher Hall	1,5	1,17	4,6	33	-1,2	0,27			-16,3	-		
Glasgow, Royal Concert Hall	1,75	1,12	2,2	20	0,6	0,23	0,77	0,8		-0,428		
Gothenburg, Konsertthus	1,65	1,08	-	33	0,3	0,09			-14,3	-		
Helsinki, Kulttuuritalo	1,05	1,17	-	26	-	-			-	-		
Jerusalem, Binyanei Ha' Oomah	1,75	1,05	2,6	26	0,2	-	0,55	0,4	-	-0,819		
Leipzig, Gewandhaus	2,0	0,97	-	27	-	-			-	-		
Lenox, Seiji Ozawa Hall	1,7	1,32	-	23	-	-			-	-		
Lenox, Tanglewood Music Shed	1,9	1,45	4,9	19	-3,1	0,12	0,46	0,8	-12,8	-0,670		
Liverpool, Philharmonic Hall	1,5	1,00	3,9	25	1,2	0,17	0,60	0,4	-	-0,771		
London, Royal Festival Hall	1,5	1,17	2,6	34	0,5	0,18	0,63	0,6	-16,0	-0,767		
Manchester, Free Trade Hall	1,6	0,97	4,1	25	1,0	0,27			-	-		
Mexico City, Sala Nezahualcoyotl	1,95	1,15	-	16	-	-			-	-		
Minneapolis, Minn. Orch. Hall	1,85	1,09	-	33	-	-			-	-		
Munich, Herkulessaal	1,8	1,15	-	24	-	-			-	-		
Munich, Philharmonie Am Gasteig	1,95	1,00	2,2	29	-0,7	0,12	0,49	0,8	-18,0	-0,740		
New York, Avery Fisher Hall	1,75	0,93	3,8	30	-1,5	-	0,54	0,7	-	-0,751		
Osaka, Symphony Hall	1,8	1,00	4,6	35	-1,2	-	0,56	0,8	-	-0,635		
Paris, Salle Pléyel	1,5	1,23	4,5	35	1,7	0,16	0,54	0,5	-	-0,798		

NOMBRE DE LA SALA \ PARÁMETROS ACÚSTICOS	RT _{mid} OCUP. (s)	BR OCUP.	G _{mid} VACÍA (dB)	t _l CENTRO PLATEA (ms)	C ₈₀₍₃₎ VACÍA (dB)	LF _{E4} VACÍA	(I-IACC _{E3}) VACÍA	SDI	ST1 _{mid} (dB)	S (ANDO Y BERANEK)
Rochester, Eastman Theatre	1,65	1,26	-	20	-	-	-	-	-	-
Rotterdam, De Doelen Concert Hall	2,05	0,95	3,2	35	-2,8	-	0,55	0,9	-	-0,731
Salt Lake, Utah, Symphony Hall	1,7	1,06	2,0	30	-1,8	-	0,59	0,6	-12,9	-0,658
Salzburg, Festspielhaus	1,5	1,10	4,0	27	-0,3	0,16	0,54	0,9	-15,8	-0,507
Stuttgart, Liederhalle	1,6	1,00	4,3	29	-0,2	0,13	0,44	0,5	-14,5	-0,844
Sydney Opera House, Concert Hall	2,2	0,98	-	36	-	-	-	-	-	-
Taipei, Concert Hall Auditorium	2,0	0,97	-	29	-0,3	-	-	-	-	-
Tokyo, Bunka Kaikan, Ueno	1,5	1,20	3,7	14	-1,0	0,18	-	-	-	-
Tokyo, Metropolitan Art Space	2,15	1,17	3,6	27	-1,1	-	-	-	-	-
Tokyo, NHK Hall	1,7	1,10	-	23	0,0	-	-	-	-	-
Tokyo, Orchard Hall, Bunkamura	1,8	1,11	-	26	-2,0	-	-	-	-	-
Tokyo, Suntory Hall	2,0	1,08	4,5	30	-1,1	0,16	-	-	-	-
Toronto, Roy Thompson Hall	1,8	1,10	3,8	35	0,6	0,14	0,54	0,5	-	-0,743
Washington, Kennedy Concert Hall	1,85	1,06	3,3	25	-0,3	0,21	0,61	0,6	-18,1	-0,609
Worcester, Mechanics Hall	1,55	1,16	5,6	28	-1,0	0,22	0,57	0,8	-16,1	-0,450
Categoría B “Buena”										
Chicago, Orchestra Hall	1,25	1,15	-	36	-	-	-	-	-	-
Edmonton, Alberta Jubilee Hall	1,4	0,99	0,4	31	4,1	0,13	0,49	0,3	-	-1,853
Montreal, Salle Wilfrid-Pelletier	1,65	1,21	0,8	20	-0,3	0,12	0,46	0,6	-	-0,840
San Francisco, Davies Hall	1,85	1,11	2,8	12	-0,9	-	0,44	0,7	-12,4	-0,616
Tel Aviv, Fredric Mann Auditorium	1,55	0,98	2,9	30	-0,4	-	0,41	0,5	-	-1,141
Categoría C+ “Aceptable a Buena”										
Bloomington, Indiana Univ. Aud.	1,4	1,12	-	40	-	-	-	-	-	-
Buffalo, Kleinhans Music Hall	1,3	1,28	2,9	32	3,1	0,10	0,41	0,3	-14,8	-1,381
London, Barbican Concert Hall	1,75	1,07	3,4	27	-1,6	0,12	0,46	0,3	-13,2	-0,983
Categoría C “Aceptable”										
London, Royal Albert Hall	2,4	1,13	-0,1	15	0,5	0,14	0,52	0,5	-	-1,044

Bibliografía

Libros

- Ando, Y. (1.985) *Concert Hall Acoustics*, Springer Verlag, Berlín
- Barron, M. (1.993) *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, E&FN Spon, Londres
- Beranek, L.L. (1.962) *Music, Acoustics and Architecture*, Wiley, Nueva York
- Beranek, L.L. (1.996) *Concert and Opera Halls: How They Sound*, Acoustical Society of America, Nueva York
- Cremer, L. y Mueller, H. (1.982) *Principles and Applications of Room Acoustics*, Vols. 1 y 2, Applied Science Publishers Ltd., Londres
- Forsyth, M. (1.987) *Auditoria*, The Mitchell Publishing Company Limited, Londres
- Izenour, G. (1.977) *Theater Design*, McGraw Hill Book Company, Nueva York
- Knudsen, V.O. y Harris, C.M. (1.978) *Acoustical Designing in Architecture*, Acoustical Society of America, Nueva York
- Kuttruff, H. (1.991) *Room Acoustics*, Elsevier Science Publishers Ltd., Nueva York

423

Artículos

- Askenfeld, A. (1.986) “Stage floors and risers – supporting resonant bodies or sound traps?”, *Acoustics for Choir and Orchestra*, Royal Academy of Music, Estocolmo, 43-61
- Barron, M. (1.988) “Subjective study of British symphony concert halls”, *Acustica* 66, 1-14
- Barron, M. (1.993) “Objective measures of spatial impression in concert halls”, *Proc. 11th Int. Congr. on Acoustics*, París, Paper N° 7.2.22
- Barron, M. y Lee, L.J. (1.988) “Energy relations in concert auditoriums. I” *J. Acoust. Soc. Am.* 84, 618-628
- Beranek, L.L. (1.969) “Audience and chair absorption in large halls: II”, *J. Acoust. Soc. Am.* 45, 13-19
- Bradley, J.S. (1.991) “Some further investigations of the seat dip effect”, *J. Acoust. Soc. Am.* 90, 324-333

-
- D'Antonio, P. y Konnert J.H. (1.984) "The Reflection Phase Grating diffusor: design theory and application", *J.Audio Eng. Soc.*, Vol. 32, Nº 4
 - Fasold, W. y Winkler, H. (1.976) "Bauphysikalische Entwurfslehre, Band 5: Raumakustik", VEB Verlag für Bauwesen, Berlín
 - Gade, A. C. (1.989) "Investigations of musicians' room acoustic conditions in concert halls", *Acustica* 69, 193-203 y 249-262
 - Haan, C.H. y Fricke, F.R. (1.993) "Surface diffusivity as a measure of the acoustic quality of concert halls", *Proc. of Conference of the Australia and New Zealand Architectural Science Association*, Sydney, 81-90
 - Hidaka, T. Okano, T. y Beranek, L.L. (1.991) "Studies of Inter-Aural Cross Correlation (IACC) and its relation to subjective evaluation of the acoustics of concert halls", *122nd Meeting of the Acoustical Society of America*, Houston, Texas
 - Houtgast, T. y Steeneken, H. J. M. (1.973) "The Modulation Transfer Function in room acoustics as a predictor of speech intelligibility", *Acustica* 28, 66-73
 - Kath, U. y Kuhl, W. (1.965) "Messungen zur Schallabsorption von Polsterstühlen mit und ohne Personen", *Acustica* 15, 127-131
 - Kosten, C.W. (1.965) "New method for the calculation of the reverberation time of halls for public assembly", *Acustica* 16, 325-330
 - Kürer, R. (1.969) *Acustica* 21, 370
 - Lehmann, P. (1.976) dissertation, Technical University, Berlín
 - Marshall, A.H. y Barron, M. (1.981) "Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls", *J. Sound Vib.* 77, 211-232
 - Marshall, L.G. (1.994) "An acoustic measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio", *J. Acoust. Soc. Am.* 96, 2251-2261
 - Meyer, J. (1.993) "The Sound of the Orchestra", *J.Audio Eng. Soc.*, Vol. 41, Nº 4
 - Peutz, V.M.A. (1.971) "Articulation Loss of Consonants as a criterion for speech transmission in a room", *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 19, Nº 11
 - Rindel, J.H. (1.986) "Attenuation of sound reflections due to diffraction", *Nordic Acoustical Meeting*, Aalborg, Dinamarca
 - Schroeder, M.R. (1.965) "New method of measuring reverberation time", *J. Acoust. Soc. Am.* 37, 409-412
 - Schroeder, M.R. (1.975) "Diffuse sound reflections by maximum-length sequences", *J. Acoust. Soc. Am.* 57, 149-150
 - Schroeder, M.R. (1.979) "Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls: more lateral sound diffusion", *J. Acoust. Soc. Am.* 65, 958-963
 - Schultz, T.J. y Watters, B.G. (1.964) "Propagation of sound across audience seating", *J. Acoust. Soc. Am.* 36, 885-896
 - Thiele, R. (1.953) "Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallrückwürfe in Räumen", *Acustica* 3, 291-302
 - Toyota, Y., Oguchi, K. y Nagata, N. (1.988) "A study on the characteristics of early reflections in concert halls", *J. Acoust. Soc. Am.* Supl. 1 84, S130
 - Wilkens, H. (1.975) "Beschreibung subjektiver Beurteilungen der Akustik von Konzertsälen", dissertation, Technical University, Berlín

Referencias

Capítulo 1

Fig. 1.16: cortesía de Dicesva, S.L.

Fig. 1.20: Rossing, T.D. (1.983) *The Science of Sound*, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts

Fig. 1.24: Moreno, A. y Pfretzschnner, J. (1.977) “Human head directivity in speech emission: a new approach”, *Acoustic Letters*, 1- 78-84

Fig. 1.51: Kurtovic, H. (1.975) “The influence of reflected sounds upon speech intelligibility”, *Acustica* 33, 32-39

425

Capítulo 2

Figs. 2.30, 2.52b y 2.75: cortesía de Audioscan, S.L.

Figs. 2.4, 2.5, 2.18, 2.20, 2.31 y 2.32: cortesía de Cristalería Española, S.A.

Figs. 2.6 y 2.7: cortesía de Macco, S.L.

Fig. 2.17: cortesía de Metrasoni, S.L.

Figs. 2.19, 2.23 y 2.24: cortesía de Wanner y Vinyas, S.A.

Figs. 2.21 y 2.22: cortesía de Notson, S.L.

Fig. 2.25: cortesía de Heraklith España, S.L.

Fig. 2.39: Cremer, L. y Mueller, H. (1.982) *Principles and Applications of Room Acoustics*, Vol. 2, Applied Science Publishers Ltd., Londres

Fig. 2.48: cortesía de C.i.C.S. Cortines i Control Solar, S.L.

Fig. 2.49: cortesía de Knauf GmbH Sucursal en España

Fig. 2.50: cortesía de Acieroid, S.A.

Fig. 2.51: cortesía de Cerámicas del Ter, S.A.

Figs. 2.56, 2.57 y 2.58: cortesía de Figueras International Seating, S.A.

Fig. 2.63: Rossing, T.D. (1.983) *The Science of Sound*, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts

Figs. 2.73, 2.83 izqda. y 2.84: Beranek, L.L. (1.996) *Concert and Opera Halls: How They Sound*, Acoustical Society of America, Nueva York

Fig. 2.79 dcha.: cortesía de Audio Síntesis, S.L.

Fig. 2.83 dcha.: Barron, M. (1.993) *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, E&FN Spon, Londres

Fig. 2.85: cortesía de Audio Síntesis, S.L.

Capítulo 3

Figs. 3.4, 3.12 y 3.13: cortesía de Audioscan, S.L.

Fig. 3.9: cortesía de la Universidad Politécnica de Cataluña

Fig. 3.16: cortesía de Saski Baskonia, S.A.D.

Capítulo 4

Figs. 4.1, 4.2, 4.3, 4.6, 4.7, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16: Izenour, G. (1.977) *Theater Design*, McGraw Hill Book Company, Nueva York

Figs. 4.4, 4.8 y 4.40: Barron, M. (1.993) *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, E&FN Spon, Londres

Fig. 4.5: Cremer, L. y Mueller, H. (1.982) *Principles and Applications of Room Acoustics*, Vol. 1, Applied Science Publishers Ltd., Londres

Figs. 4.17 y 4.18: Forsyth, M. (1.987) *Auditoria*, The Mitchell Publishing Company Limited, Londres

Figs. 4.34 y 4.44: cortesía de Audioscan, S.L.

Capítulo 5

Fig. 5.9: cortesía de Telco Electronics, S.A.

Figs. 5.19 sup., 5.21, 5.22, 5.23, 5.26 sup., 5.28, 5.30, 5.32, 5.34, 5.36, 5.37, 5.46, 5.47, 5.50: Beranek, L.L. (1.996) *Concert and Opera Halls: How They Sound*, Acoustical Society of America, Nueva York

Figs. 5.38 y 5.39: cortesía de Tusquets, Díaz y asociados

Fig. 5.40: Sound & Video Contractor (enero 1.997)

Fig. 5.52: cortesía de Oxford University Press España, S.A.

Figs. 5.53, 5.56, 5.60 y 5.61: cortesía de Audioscan, S.L.

Capítulo 6

Fig. 6.1: cortesía de Kingland, S.L.

Figs. 6.2a, 6.3a, 6.5a, 6.6a: Izenour, G. (1.977) *Theater Design*, McGraw Hill Book Company,

Nueva York

Fig. 6.4: Beranek, L.L. (1.996) *Concert and Opera Halls: How They Sound*, Acoustical Society of America, Nueva York

Figs. 6.7 y 6.8: cortesía de Figueras International Seating, S.A.

Fig. 6.14: cortesía de Audio Síntesis, S.L.

Fig. 6.19b: Barron, M. (1.993) *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, E&FN Spon, Londres

Capítulo 7

Figs. 7.5, 7.7 y 7.12: cortesía de Audioscan, S.L.

Índice alfabético

- Absorción de las sillas
Absorción del aire
Absorción del público
Absorción del sonido
Absorción en función de la densidad
Absorción en función de la distancia
Absorción en función de la porosidad
Absorción en función del espesor
Acondicionamiento acústico
Acústica estadística
Acústica geométrica
Acústica ondulatoria
Acústica variable
Acústica variable mediante elementos físicos variables
Acústica variable mediante sistemas electrónicos
Aislamiento acústico
Amsterdam Concertgebouw (Holanda)
Ancho de banda útil (BW)
Ando, Y.
Anfiteatros y balcones
Anglada Bayés, M.
Artigues Codó, R.
Askenfeld, A.
Audioscan, ingeniería del sonido
Auditorio de Cornellá (Barcelona, España)
Auditorio de Lleida (España)
Auditorio de Sant Cugat del Vallés (Barcelona, España)
Auditorio de Tenerife, Santa Cruz de Tenerife (España)
Auditorio de Tortosa (Tarragona, España)
- Auralización
Auralización binaural
Auralización mediante una unidad de reverberación digital
Auralización monoaural
Auralización por convolución
Avery Fisher Hall, Nueva York (EE.UU.)
Balance
Balance energético sonoro
Banda de frecuencias
Barron, M.
“Bass Ratio” (BR)
Beazley, S.
Beethovenhalle, Bonn (Alemania)
Beranek, L.L.
Berlin Konzerthaus (Schauspiel)
Berlin Philharmonie (Alemania)
Blanch Pons, F.
Boca del escenario
Bonet Armengol, J.
Borzone Tettamanti, S.A.
Bosch Aragó, M.
Boston Symphony Hall (EE.UU.)
Bradley, J.S.
Brillo (Br)
Bristol Colston Hall (Gran Bretaña)
Bunka Kaikan, Tokio (Japón)
Cain Auditorium, Manhattan (Kansas, EE.UU.)
Calatrava Valls, S.

Cálculo de la inteligibilidad de la palabra	Densidad espectral de potencia
Cálculo del tiempo de reverberación	Derngate Centre, Northampton (Gran Bretaña)
Sabine	Detroit Ford Auditorium (EE.UU.)
Norris-Eyring	Diagnóstico acústico
Promediado de rayos	Difracción del sonido
Schroeder	Difusión del sonido
Kuttruff	Difusores bimensionales QRD
Kuttruff iterativo	Difusores de Schroeder
Sabine (ponderada por reflexiones)	Difusores MLS
Norris-Eyring (ponderada por reflexiones)	Difusores policilíndricos
Kuttruff (ponderada por reflexiones)	Difusores PRD
Calidad tonal	Difusores RPG
Calidez acústica	Difusores unidimensionales QRD
Campo directo	Directividad de la voz humana
Campo reverberante	Distancia crítica (D_c)
Características del escenario	Distorsión armónica total (THD)
Características del mensaje oral	Domènec Montaner, Ll.
Carnegie Hall, Nueva York (EE.UU.)	“Early Decay Time” (EDT)
Catedral de Vitoria (España)	Eco flotante
Cavidad reverberante	Ecograma
Centro de gravedad (t_s)	Ecos
Chicago Orchestra Hall (EE.UU.)	Efecto “cocktail party”
Christchurch Town Hall (Nueva Zelanda)	Efecto “seat dip”
Claridad de la voz (C_{50})	Efecto Larsen
Claridad musical (C_{80})	Efecto tambor
Coeficiente de reducción acústica (NRC)	Eficiencia lateral (LF)
Coeficiente medio de absorción ($\bar{\alpha}$)	Elipse de retardo constante
Cola reverberante	Energía difusa
Coloración de la voz	Enmascaramiento del sonido
Conjunción	Escala lineal
Constante de la sala (R)	Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Vallés, Sant Cugat (Barcelona, España)
Copenhagen Tivoli Koncertsal (Dinamarca)	Espacialidad del sonido
Correlación cruzada interaural (IACC)	Espacialidad del sonido: amplitud aparente de la fuente sonora
Cortinas	Espacialidad del sonido: sensación de sonido envolvente
Cremer, L.	Espacios de uso comunitario
Criterio de ecos (EC)	Espacios de uso deportivo
Criterios de diseño de la concha acústica	Espacios multifuncionales
Criterios de diseño del escenario	Espectro frecuencial
Curva de energía reflejada acumulada (RECC)	Espinós Olivé, C.
Curva energía-tiempo (ETC)	Estructura de la concha acústica
Curvas NC	Eugene McDermott Concert Hall, Dallas (EE.UU.)
De Doelen Concert Hall, Rotterdam (Holanda)	
de Solà-Morales Rubió, I.	
Definición (D)	

- Factor de directividad (Q)
Falsa localización de la fuente sonora
Fasold, W.
Festspielhaus, Bayreuth (Alemania)
Filtros para análisis frecuencial
Focalización del sonido
Formas típicas de salas de conciertos
Fórmula de Rayleigh
Frecuencia del sonido (f)
Fricke, F.R.
Frontons González, J.
Fuente sonora
Fusión
Gade, A.C.
Galería de los susurros
Garnier, C.
Generación del sonido
Glasgow Royal Concert Hall (Gran Bretaña)
Gran Teatro de Burdeos (Francia)
Gran Teatro Imperial, Parque Temático Port Aventura, Tarragona (España)
Grösser Tonhallesaal, Zurich (Suiza)
Guthrie Theatre, Minneapolis (EE.UU.)
Guthrie, T.
Haan, C.H.
Hamarikyu Asahi Hall, Tokio (Japón)
Harris, C.M.
Herkulesaal, Munich (Alemania)
Hidaka, T.
Huguet Monné, J.
Incidencia rasante
Índice de difusión (SDI)
“Initial-Time-Delay Gap” (ITDG)
Inmediatz de respuesta
Instituto Takenaka
Inteligibilidad de la palabra (%ALCons)
Inteligibilidad de la palabra (STI/RASTI)
IRCAM (“Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique”), París (Francia)
Joseph Meyerhoff Symphony Hall, Baltimore (EE.UU.)
Jujol Gibert, J. M.
Kath, U.
Knudsen, V.O.
Kosten, C.W.
Kuhl, W.
Kurtovic, H.
La Scala de Milán (Italia)
Laboratorio de acústica del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona, España)
Le Corbousier, C.E.
Lee, L.
Lehmann, P.
Lenox Tanglewood Music Shed, Massachusetts (EE.UU.)
Llinàs Carmona, J. A.
Localización de la fuente sonora
Longitud de onda del sonido (λ)
López-Atalaya Mañosa, G.
Marshall, A.H.
Marshall, L.G.
Materiales absorbentes
Medida del tiempo de reverberación
Meyer, J.
Modos propios de una sala
Moreno, A.
Müller, H.A.
Museo del Louvre, París (Francia)
Nadal Oller, L.
Nivel continuo equivalente de presión sonora (Leq)
Nivel de presión sonora (SPL)
Niveles audibles
Nogués Teixidor, M.
Normas CEI
Normas ISO
Normas UNE
Northern Alberta Jubilee Auditorium, Edmonton (Canadá)
Okano, T.
Ópera de París (Francia)
Pabellón Polideportivo de Zurbano (Vitoria, España)
Palacio de la Mutualité, París (Francia)
Palau de la Música Catalana, Barcelona (España)
Palladio, A.
Paneles giratorios
Paneles móviles reflectantes
Paneles móviles suspendidos del techo

Paneles perforados superpuestos	concha acústica
Panella Soler, Ll.	Riba Samarra, J.
Paredes del escenario	Rindel, J.H.
Partición o mampara móvil vertical	Rius Camps, F.
Percepción subjetiva de primeras reflexiones	Royal Albert Hall, Londres (Gran Bretaña)
Pérdida de Articulación de Consonantes	Royal Exchange Theatre, Manchester (Gran Bretaña)
Peutz, V.M.A.	Royal Festival Hall, Londres (Gran Bretaña)
Pfretzschner, J.	Sabine, W.C.
Philharmonic Hall, Nueva York (EE.UU.)	Sala de actos del edificio docente de la Dirección
Piermarini, G.	General de Deportes de la Generalitat de Cataluña,
Piñol Cort, A.	Esplugues de Llobregat (Barcelona, España)
Polideportivo del Campus Norte de la Universidad	Sala de la Liga de las Naciones, Ginebra (Suiza)
Politécnica de Cataluña, Barcelona (España)	Sala Kotobuki (Japón)
Presión atmosférica estática (P_0)	Sala Nezahualcoyotl, Ciudad de Méjico (Méjico)
Presión sonora	Sala Pléyel, París (Francia)
Primeras reflexiones	Sala Sinfónica del Auditorio de Las Palmas, Gran
Prinzregenten Theater, Munich (Alemania)	Canaria (España)
Programas de simulación electroacústica	Salas con formas hexagonales superpuestas
Programas de simulación acústica	Salas con reflexiones frontales
Propagación de la onda sonora	Salas con reflexiones laterales
Propagación del sonido en el espacio libre	Salas con sonido difuso
Propagación del sonido en un recinto cerrado	Salas con terrazas trapezoidales
Puigjaner Bagaria, I.	Salas de conciertos de relevancia mundial
Radio de reverberación	Salas de conferencias/aulas
“Rapid Speech Transmission Index” (RASTI)	Salas de planta rectangular
Recubrimientos de los materiales absorbentes	Salas en forma de abanico
Red de ponderación A	Salas en forma de abanico invertido
Reflectores a modo de falso techo	Salas en forma de hexágono alargado
Reflectores curvos	Salvat Espasa, P.
Reflectores laterales	Salzburg Festspielhaus (Austria)
Reflectores planos	Sanabria Boix, R.
Reflectores suspendidos del techo	Schroeder, M. R.
Reflexión del sonido	Schultz, T.J.
Relación de primeras reflexiones (ERR)	Segerstrom Hall, Costa Mesa, California (EE.UU.)
Relaciones energéticas (ELR)	Sender Freies Berlin Hall (Alemania)
Resistencia de flujo (r_s)	Serra Solé, Ll.M.
Resonador de membrana	Sillas móviles
Resonador múltiple de cavidad (Helmholtz)	Simulación acústica de recintos
Resonador simple de cavidad (Helmholtz)	Sistema concentrado de altavoces
Resonadores	Sistema de cierre y abertura del falso techo
Resonancia asistida (AR)	Sistema de Control Acústico (ACS)
Respuesta frecuencial	Sistema de fonación humana
Reverberación de canal múltiple (MCR)	Sistema de megafonía
Revestimientos de las superficies interiores de la	Sistema distribuido de altavoces

- Sistemas de creación de sonido virtual
Sonido directo
Sonido focalizado
Sonido periódico complejo
Sonido periódico simple
Sonido reflejado
Sonido transitorio
Sonidos aleatorios
Sonidos deterministas
Sonómetro
Sonómetro integrador
Sonoridad
Sonoridad (G)
Sonoridad (S)
Soporte objetivo (ST1)
Soulodre, G.A.
“Speech Transmission Index” (STI)
St. David’s Hall, Cardiff (Gran Bretaña)
Staatsoper, Viena (Austria)
Stadt-Casino, Basilea (Suiza)
Suelo del escenario
Superficie acústica efectiva
Superficie y forma del escenario
Sureda Deulovol, M.
Takahiko Yangisawa
Teatro “El Jardí” de Figueres (Girona, España)
Teatro “La Passió” de Esparreguera (Barcelona,
España)
Teatro Ateneu de Igualada (Barcelona, España)
Teatro Atlántida de Vic (Barcelona, España)
Teatro Cirvianum de Torelló (Barcelona, España)
Teatro de Aspendus (Turquía)
Teatro de Epidauro (Grecia)
Teatro de la Casa de la Cultura de Tres Cantos
(Madrid, España)
Teatro de Waldbühne, Berlín (Alemania)
Teatro Drury Lane, Londres (Gran Bretaña)
Teatro Fortuny de Reus (Tarragona, España)
Teatro Metropol de Tarragona (España)
Teatro Municipal de Girona (España)
Teatro Municipal de Olot (Girona, España)
Teatro Nacional de Munich (Alemania)
Teatro Olímpico de Vicenza (Italia)
Teatro Orchard (Gran Bretaña)
- Teatro Victoria Eugenia de San Sebastián (España)
Teatros: distancia máxima recomendada
Teatros: perfil teórico óptimo
Teatros al aire libre
Teatros circulares
Teatros clásicos griegos
Teatros clásicos romanos
Teatros con escenario integrado
Teatros de proscenio
Teatros del Barroco
Teatros del Renacimiento
Teatros en recintos cerrados
Techo del escenario
Teoría revisada de Barron
Textura
Thiele, R.
Tiempo de reverberación (RT)
Tipologías de salas de conciertos
Tokyo Opera City Concert Hall (Japón)
Tokyo Suntory Hall (Japón)
Torre de Telecomunicaciones de Telefónica, Barcelona
(España)
Toyota, Y.
Tusquets Guillén, O.
Twose Roura, L.A.
Uniformidad de cobertura
Variación de la absorción adicional
Velocidad de propagación del sonido (c)
Veterans’ Memorial Auditorium, San Rafael
(California, EE.UU.)
Viena Musikvereinssaal (Austria)
Visuales
Watters, B.G.
Wilkins, H.
Winkler, H.
Zona de campo directo
Zona de campo reverberante