

EL ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO DE UNA SALA DE CONCIERTOS



PROYECTO FINAL DE GRADO

ALUMNO:

Salvador Montaner Solbes

DIRECTOR ACADÉMICO:

Ignacio Enrique Guillén Guillamón

FECHA:

Marzo 2012

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERIA EN LA EDIFICACIÓN



**UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA**



Índice

- INTRODUCCIÓN
 - Criterios generales
- PARTE I: SALA DE CONCIERTOS
 - **Capítulo 1:**
 - Conceptos básicos del sonido
 - Introducción al acondicionamiento acústico
 - Parámetros acústicos
 - Anomalías asociadas a las salas
 - **Capítulo 2:**
 - Diseño
 - ∧ Datos de partida.
 - ∧ Forma y dimensiones del escenario.
 - ∧ Estudio de la platea.
 - Superficies
 - Volumen
 - Obtención de parámetros acústicos
 - **Capítulo 3:**
 - Materiales
 - Aplicación de materiales y acústica geométrica.
 - ∧ Sillas
 - ∧ Escenario
 - ∧ Platea
 - ∧ Ventanas y puertas
 - Estudio y diseño de difusor unidimensional QRD.
 - **Capítulo 4:**
 - Conclusión.



- PARTE II: DOCUMENTACIÓN GRÁFICA
 - Vistas:
 - Plano nº 1. Planta Principal.
 - Plano nº 2. Planta Primera y Aforo.
 - Plano nº 3. Planta Cenital.
 - Plano nº 4. Techo en perspectiva.
 - Plano nº 5. Escenario.
 - Secciones:
 - Plano nº 6. Secciones Longitudinales.
 - Plano nº 7. Secciones Transversales.
 - Primeras Reflexiones:
 - Plano nº 8. Reflexiones en el plano Horizontal.
 - Plano nº 9. Reflexiones en el plano Horizontal.
 - Plano nº 10. Reflexiones en el plano vertical.
 - Detalles:
 - Plano nº 11. Detalles.
 - Difusor QRD:
 - Plano nº 12. Difusor QRD.
 - Superficies:
 - Plano nº 13. Superficies.
- PARTE III: ANEXOS
 - **ANEXO 1:** Ficha Mono Acoustic.
 - **ANEXO 2:** Tabla de Acondicionamiento Acústico y gráfica.
- PARTE IV: BIBLIOGRAFÍA



INTRODUCCIÓN

El trabajo que se presenta a continuación consiste en acondicionar acústicamente una sala, previamente existente, en un edificio de valencia cuyo fin va a ser albergar un auditorio para música de cámara o un grupo musical de cuerda reducido.

De todo el conjunto del edificio solo será objeto de estudio aquella planta donde esté previsto la ubicación del auditorio, dejando aparte todo lo demás.

Muchas veces los proyectos consisten en diseñar desde cero un recinto partiendo de un solar de ciertas dimensiones, según unas características y unos requisitos previamente acordados, en estos casos el diseño final toma forma y envergadura en relación con un presupuesto y unas necesidades. Hay otros, como el nuestro, donde el proyecto a diseñar se encuentra determinado en un edificio con unas dimensiones limitadas y situado entre plantas. En este caso el trabajo a realizar consiste en estudiar las dimensiones de partida junto con los objetivos de la sala de diseño y a partir de ahí tomar las decisiones necesarias para maximizar el mejor resultado posible final.

La intención fundamental de este trabajo es conocer los pasos y el proceso para el acondicionamiento acústico y una vez conocidos aplicarlos a la sala facilitada para observar los resultados finales según las decisiones que se han tomado.

Partiremos de las condiciones visuales y acústicas, para modificar y perfeccionar la geometría de la sala a nuestro favor, y terminaremos con el revestimiento de los paramentos con los materiales adecuados para cuidar tanto los aspectos acústicos como la estética de la sala.

Al finalizar se evaluará la solución tomada y se tomarán las conclusiones requeridas desde el punto de vista de la calidad acústica.



CRITERIOS GENERALES

- **Acústica arquitectónica**

Algunas personas suelen confundir dos conceptos que forman parte de la acústica arquitectónica como son el aislamiento acústico y el acondicionamiento acústico. Para empezar se podría decir que primero iría el aislamiento acústico que se complementaría con el posterior acondicionamiento acústico del recinto, es decir, no sirve de nada tener un recinto bien acondicionado si el aislamiento no está bien ejecutado puesto que los ruidos externos a la sala ensombrecerían la calidad acústica. En nuestro caso partimos de que el aislamiento ya está realizado para centrarnos únicamente en el acondicionamiento.

Para entenderlo mejor, 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, en este caso una sala de conciertos.

En cambio el aislamiento acústico se centra en el conjunto de acciones que da como resultado una correcta atenuación en la transmisión del ruido y vibraciones entre los diferentes espacios (tanto exteriores como interiores) que envuelven un recinto.

- **Objetivos Principales**

El auditorio que se pretende diseñar debe reunir la calidad acústica y visual necesaria propiamente indicada según unos parámetros acústicos que se detallan más adelante.

Aunque el espectador esté sentado en la primera fila, mejor recepción del sonido directo, como aquel que esté en la última fila, recibe el sonido directo junto con el reflejado, ambas personas deben sentir el confort de la sala y apreciar que el sonido es homogéneo y envolvente.

La calidad visual es un punto muy importante que muchas veces se olvida. Cualquier persona del público debe percibir prácticamente en su totalidad a la orquesta, indistintamente de la silla en que esté sentado. Para ello se considerarán unas pendientes que mejoren los ángulos de visión y evitar los objetos salientes y estructurales que molesten al espectador.

- **Visuales**

Cuando se habla de un auditorio indirectamente se piensa en la calidad acústica, pero el tema de las visuales está por encima del auditivo, ya que el sentido más importante del ser humano es la vista.

Por muy bien disipado que esté el sonido y le llegue a un espectador con total nitidez, si este tiene problemas de visión hacia la orquesta la sensación final no será positiva. La solución buena será aquella en la que se pueda observar el escenario en un 70-80% de su totalidad.

Para asegurar el tema de las visuales se considerará un punto central del escenario desde el cual se trazarán unos rayos visuales hasta los ojos de los espectadores. El propósito es que debemos dotar a la



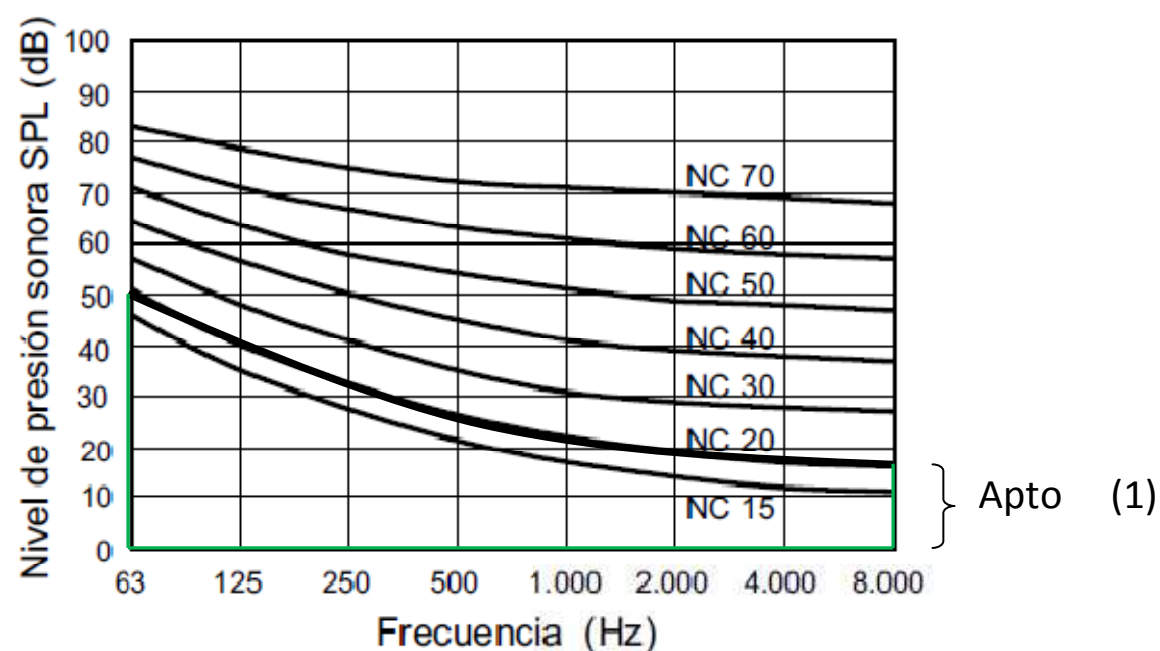
platea de la pendiente necesaria para que la visual no sea interrumpida por el espectador que se encuentra situado en la fila inmediatamente anterior.

- **Curvas NC**

Como ya hemos indicado anteriormente nuestro trabajo se centra en el acondicionamiento, puesto que el aislamiento ya está ejecutado. Esto no significa que no nos interese en garantizar que esté bien hecho.

Las curvas NC (“Noise Criteria”) evalúan de forma objetiva el grado de molestia que un ruido provoca en un oyente comparándolo con los niveles de ruido existentes en un recinto. Están dispuestas en un gráfico donde muestran de forma generalizada el nivel de presión sonora máximo recomendado (ruido) que se debe cumplir a las distintas bandas de octava entre 63 Hz y 8kHz. Dependiendo del recinto para el que esté pensado (oficina, sala de conferencias, auditorios, etc.) se requerirá un mayor o menor grado de aislamiento al ruido.

Un recinto cumple con la determinación de una curva NC cuando el ruido existente está por debajo de la curva NC correspondiente. En el caso de nuestro auditorio se garantizará una NC 20.



Según se observa la forma que tienen estas curvas es debido a que siguen la evolución de la sensibilidad del oído humano en función de la frecuencia. Así para las bajas frecuencias los niveles SPL son menos restrictivos debido a que la sensibilidad del oído es menor a medida que disminuye la frecuencia.

Por este motivo, antes de empezar con el acondicionamiento acústico, debemos asegurar el nivel de aislamiento requerido para la sala de conciertos con la ayuda de un sonómetro (medido en dBA).

- **Geometría**

La geometría de la sala es un factor decisivo cuando hablamos del acondicionamiento acústico puesto que dependiendo de la forma y dimensiones que tendrá esta va a condicionar directamente los



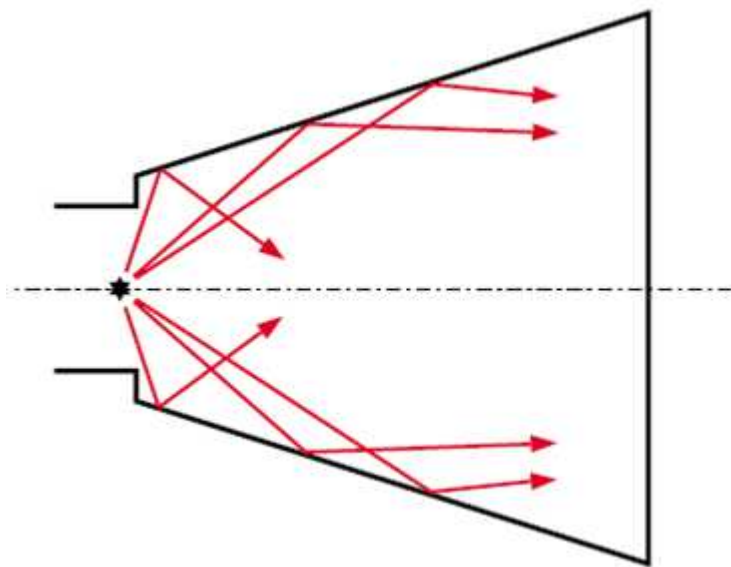
parámetros acústicos (tiempo de reverberación, sonoridad, claridad musical, etc.). Principalmente afecta al tema de las reflexiones del sonido y a las visuales.

Modificando las inclinaciones en las paredes verticales y los techos de la sala conseguiremos dirigir las reflexiones sonoras a aquellos lugares de la sala donde no llegue el sonido directo.

Respecto a las visuales únicamente tener en cuenta que no siempre la mejor geometría para los parámetros acústicos será la óptima en cuanto a las vistas y situación de sillas. Lo mejor será hacer un balance para quedarse con el mejor resultado.

• Tipologías de salas de conciertos

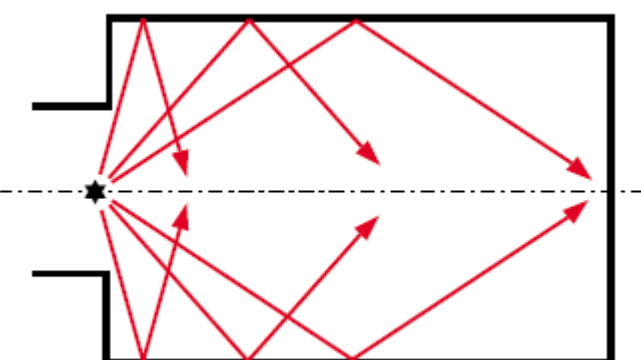
a) Salas en forma de abanico. (2)



- ^ Ausencia de reflexiones laterales en el centro de la sala.
- ^ Impresión espacial e intimidad acústica limitadas, especialmente en el centro de la sala.
- ^ Posibles focalizaciones en el caso de hacer la pared posterior cóncava.
- ^ A mayor ángulo de abanico peor acústica.
- ^ Gran aforo.

Ejemplo: Northern Alberta Jubilee Auditorium, Edmonton, Canadá.

b) Salas de planta rectangular. (3)

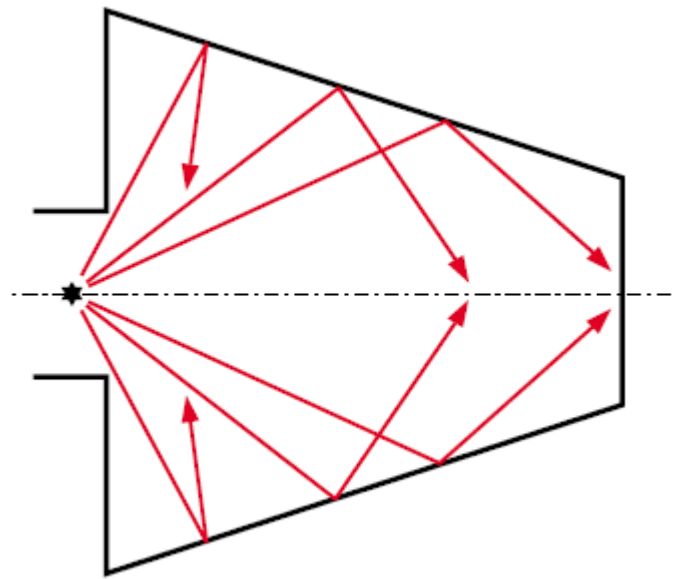


- ^ Abundantes reflexiones laterales.
- ^ Intimidad acústica elevada.
- ^ Salas relativamente estrechas.
- ^ Balcones estrechos.
- ^ Buena impresión espacial.
- ^ Sonoridad elevada.
- ^ Visuales deficientes en algunas localidades.
- ^ Elevado grado de difusión debido a las superficies irregulares.

Ejemplos: Viena Musikvereinssaal, Austria/ Amsterdam Concertgebouw, Holanda/ Boston Symphony Hall, EE.UU.



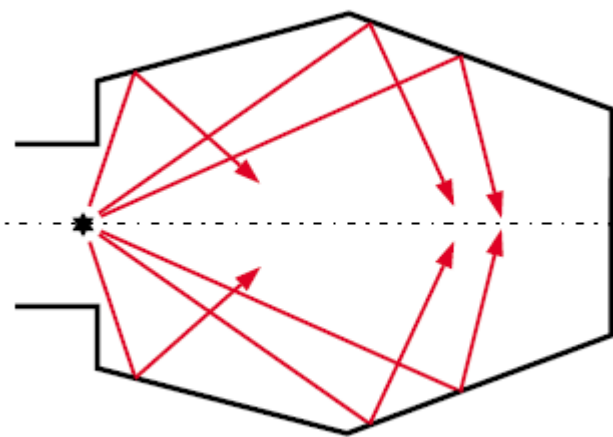
c) Salas en forma de abanico invertido. (4)



- ^ Gran cantidad de primeras reflexiones laterales.
- ^ Impresión espacial elevada.
- ^ Falta de visibilidad de las primeras filas de sus localidades.

Debido a los problemas visuales no hay ejemplos de este tipo.

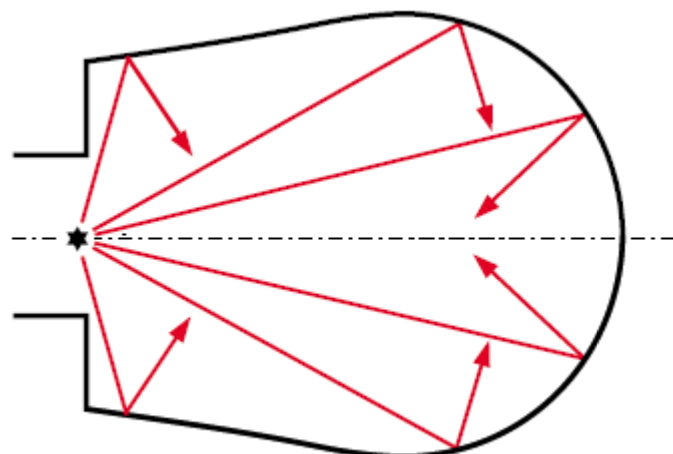
d) Salas en forma de hexágono alargado. (5)



- ^ Combinación de los perfiles en forma de abanico y de abanico invertido.
- ^ 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: Bunka Kaikan, Tokio, Japón.

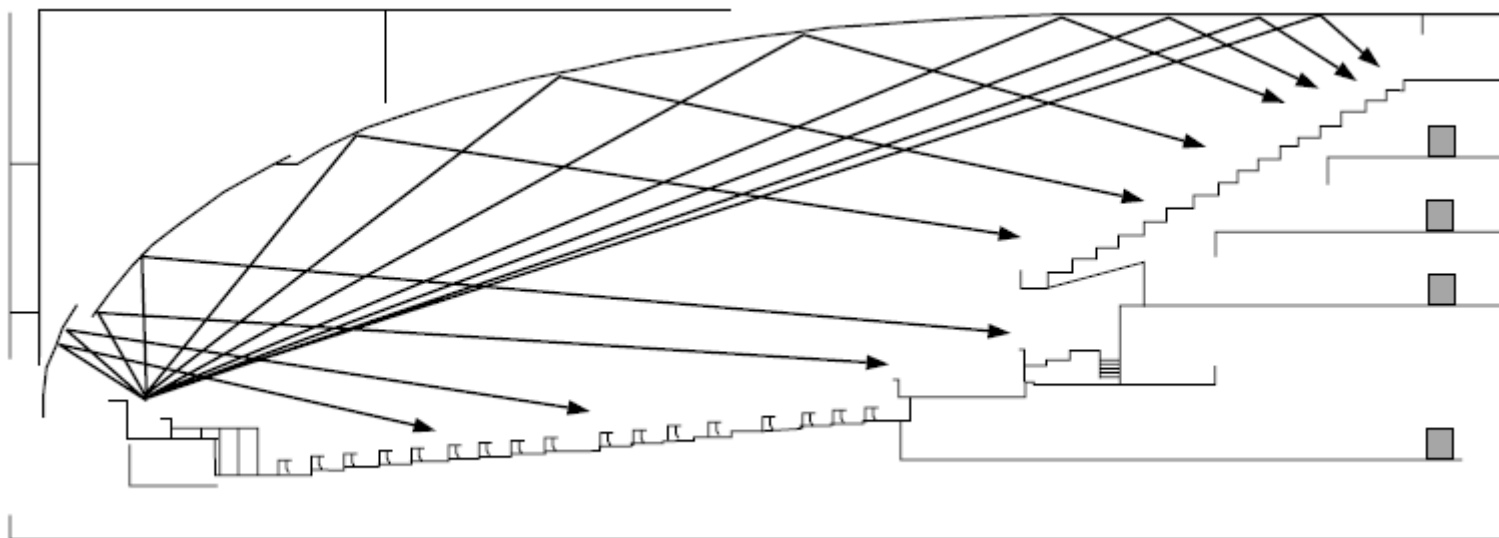
e) Salas en forma de herradura. (6)



- ^ Bastante utilizado en teatros y en teatros de ópera.
- ^ Posibles focalizaciones debido a la concavidad de la pared posterior.
- ^ Baja energía asociada a las primeras reflexiones.
- ^ Gran aforo.

Ejemplo: Carnegie Hall, Nueva York, EE.UU.

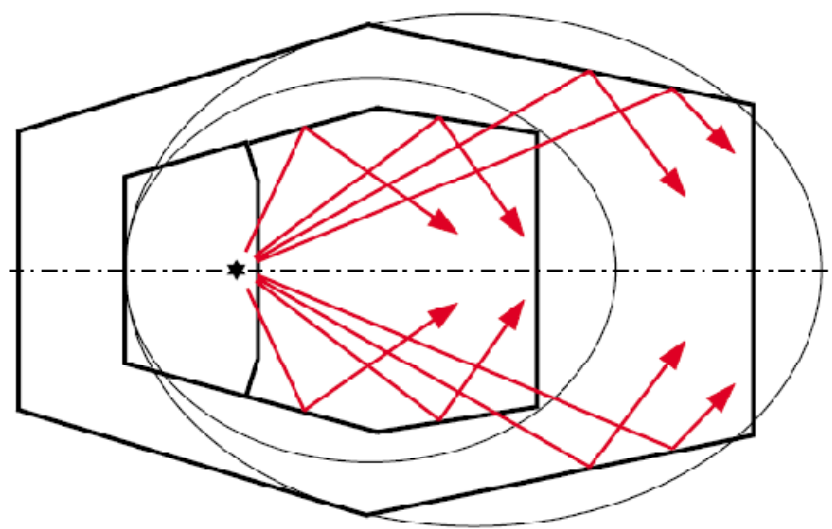
f) Salas con reflexiones frontales. (7)



- ^ Falso techo dividido en segmentos con forma aproximada a una parábola cilíndrica.
- ^ Primeras reflexiones creadas por el falso techo.
- ^ Sonido reflejado formando un haz de rayos casi paralelo.
- ^ Sonoridad uniforme.
- ^ Fuerte coloración del sonido.
- ^ Impresión espacial pobre.
- ^ Óptimo para una fuente sonora puntual (para conferencias, no para orquesta).
- ^ Ruido del público apreciado en el escenario.

Ejemplos: Sala de la liga de las Naciones, Ginebra, Suiza/ Sala Pléyel, Paris, Francia.

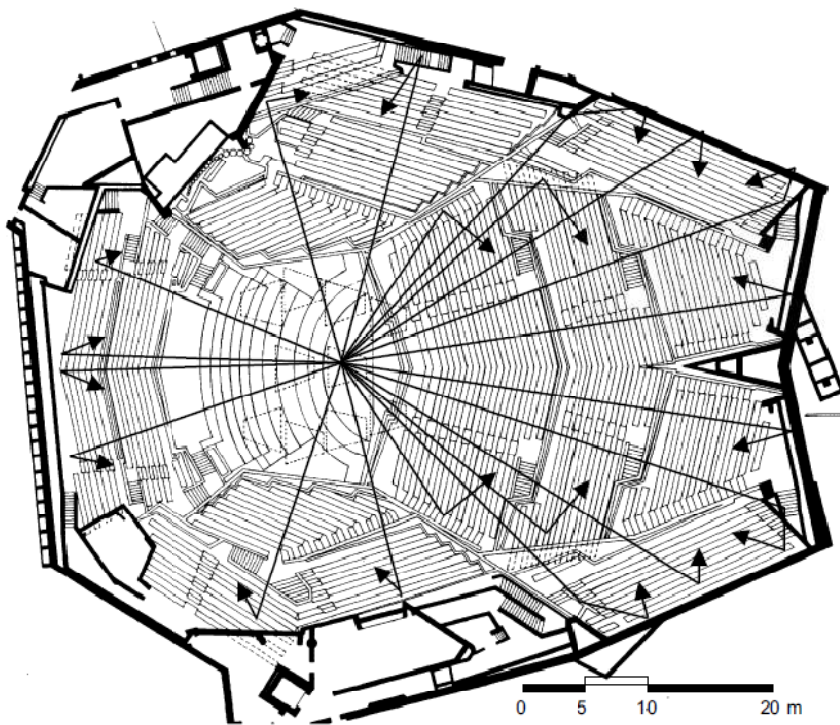
g) Salas con formas hexagonales superpuestas. (8)



- ^ Combinación entre el modelo de elipses superpuestas y la forma de hexágono alargado.
- ^ Público distribuido en dos niveles.
- ^ Inclinación pronunciada en los asientos del nivel superior.
- ^ Elevada intimidad acústica.
- ^ Techo con elementos difusos.
- ^ Buenas visuales.
- ^ Sonido excelente en el escenario y la sala "interior".

Ejemplos: De Doelen Concert Hall, Rotterdam, Holanda.

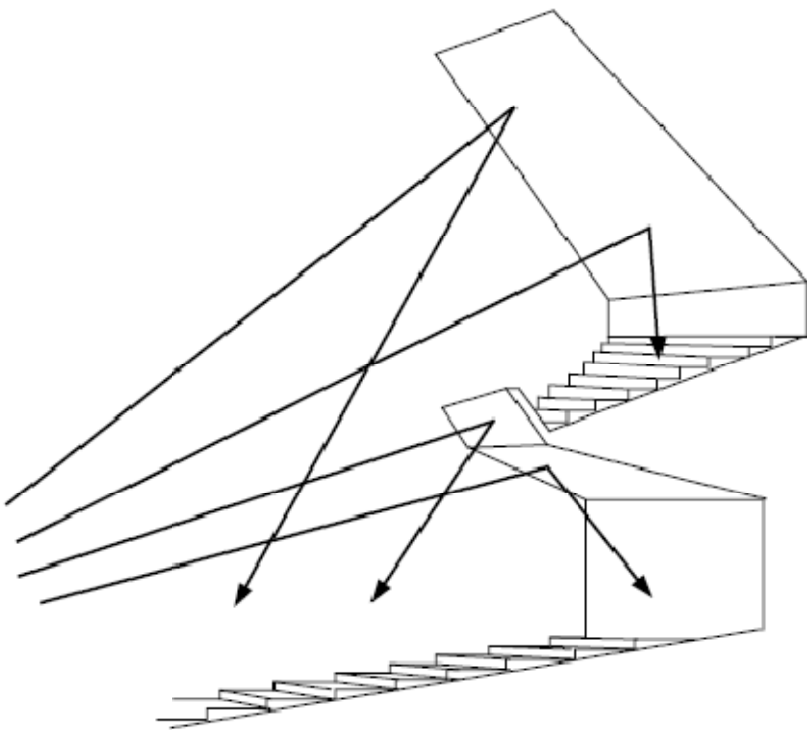
h) Salas con terrazas trapezoidales. (9)



- ^ Modelo formalizado por Cremer en 1.986.
- ^ Público distribuido en distintos niveles o terrazas.
- ^ Superficies reflectantes complejas alrededor de las terrazas.
- ^ Buena impresión espacial e intimidad acústica.
- ^ Visuales excelentes.
- ^ Falta de comunicación entre los músicos.
- ^ Gran aforo.

Ejemplo: Berlín Philharmonie, Alemania.

i) Salas con reflexiones laterales. (10)



- ^ Forma prácticamente elíptica.
- ^ Asientos agrupados en tres zonas reflectantes:
 - o Gran reflector inclinado.
 - o Barandilla inclinada del balcón.
 - o Parte inferior del balcón.
- ^ Intimidad acústica y claridad musical elevadas.
- ^ Sensación de reverberación no excesiva ($EDT < RT$).
- ^ Buenas visuales.
- ^ Gran aforo.

Ejemplo: Christchurch Town Hall, Nueva Zelanda.

j) Salas con sonido difuso.

- ^ Techo y paredes altamente difusas.
- ^ Ausencia de primeras reflexiones significativas.
- ^ Sensación de sonido envolvente.
- ^ Exceso de absorción.

Ejemplos: Herkulesaal, Munich, Alemania/ Beethovenhalle, Bonn, Alemania.



- **Salidas de emergencia**

El público dispone de tres puertas para su evacuación, dos situadas en un lado y la otra en el lado opuesto, mientras que los músicos saldrán por la única puerta de acceso al escenario.

Las salidas estarán señalizadas con el alumbrado permanente de emergencia colocado encima de las puertas para su correcta visualización. En los pasillos y cambios de rasante se dispondrán luces de leds o pilotos que sirvan para indicar el sentido de la marcha.

Los minusválidos serán evacuados al principio o al final para no entorpecer el ritmo de la evacuación.

Los sistemas de aviso y alarma serán visuales y sonoros.

- **Accesibilidad para discapacitados**

Los pasillos de acceso tendrán un ancho mínimo de 1,20. Desde la salida del ascensor el acceso a la platea y a los aseos se encuentra sin desniveles lo que facilitará el desplazamiento.

En el escenario se dispondrán unas rampas móviles que se colocaran en caso de utilizarse para salvar los peldaños semicirculares que dan forma a éste.

Se reservarán un mínimo de dos sillas para discapacitados que estarán situadas en la cota 0 del patio de butacas y próximas a la salida de emergencia.

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10. Imágenes extraídas del libro “Diseño acústico de espacios arquitectónicos”



PARTE I:

SALA DE CONCIERTOS



SALA DE CONCIERTOS. CAPÍTULO 1

1. PRINCIPIOS BÁSICOS DEL SONIDO

1.1. Definición del sonido

El sonido se puede definir como la sensación auditiva producida por una vibración de carácter mecánico que se propaga a través de un medio elástico y denso, como el aire por ejemplo. A diferencia de la luz, el sonido no puede propagarse en el vacío.

La propagación del sonido se produce cuando la fuente sonora entra en vibración transmitiendo esta vibración a las partículas de aire adyacentes. Las partículas no se desplazan sino que oscilan alrededor de su posición de equilibrio. Este fenómeno se conoce como propagación de la onda sonora.

En el siguiente ejemplo la fuente sonora sería el tambor:

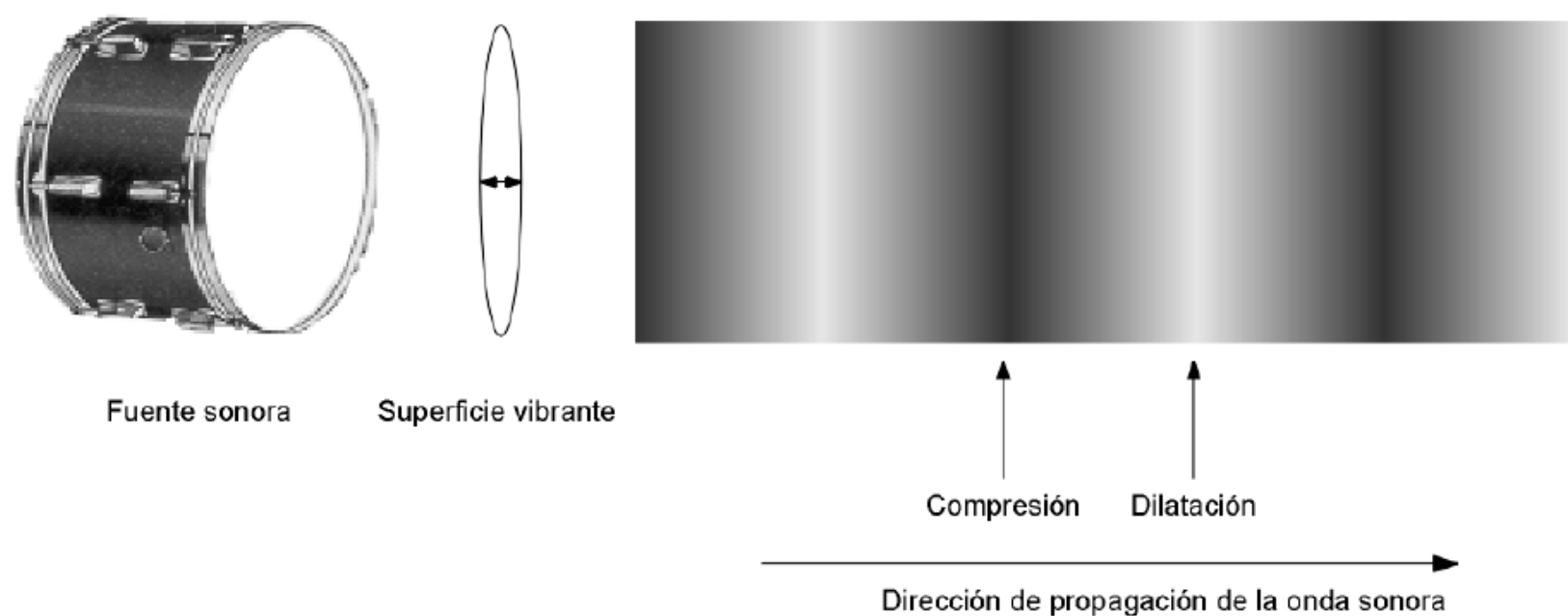
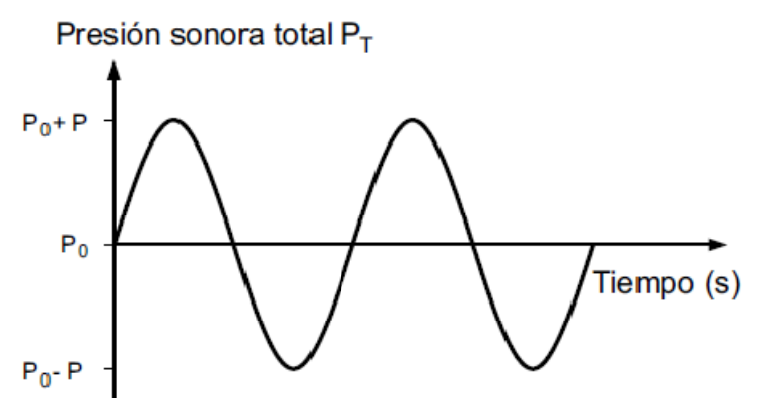


Fig. (11) Zonas de compresión y dilatación de las partículas de aire en la propagación de una onda sonora

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.

La magnitud de un campo sonoro suele cuantificarse mediante la presión sonora, o fuerza que ejerzan las partículas de aire por unidad de superficie.

Los incrementos y disminuciones periódicas de presión sonora alrededor de su valor de equilibrio (presión atmosférica estática P_0) 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. (12)





1.2. 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).

La frecuencia del sonido coincide con la frecuencia de la vibración mecánica que lo ha generado.

En la figura (13) se observan dos ejemplos de presión sonora p asociada a oscilaciones de diferente frecuencia.

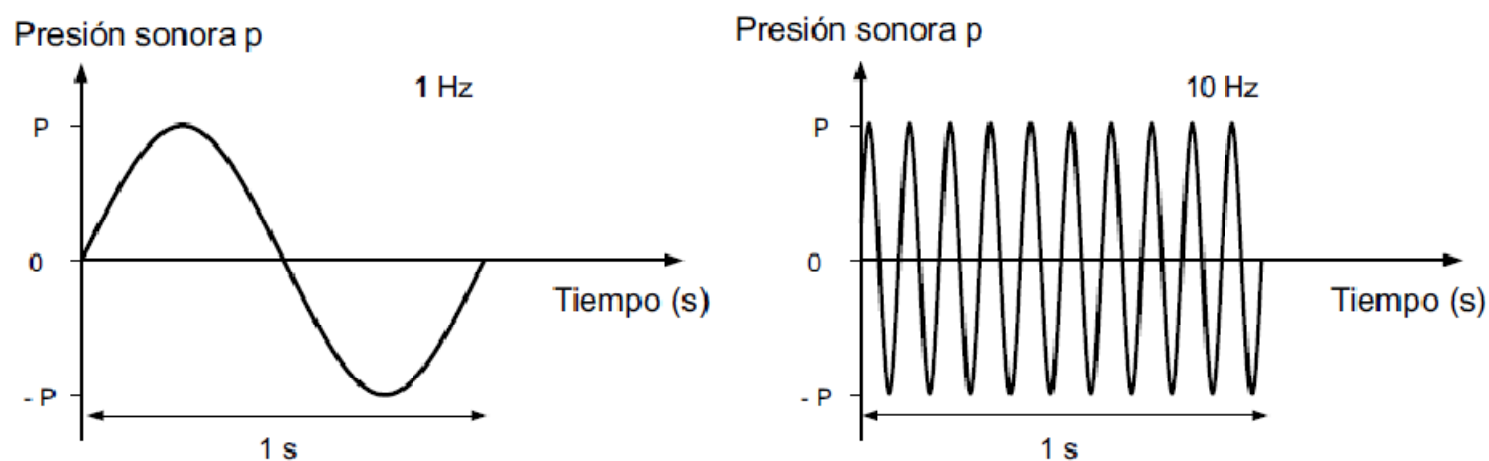


Fig. 13 Ejemplos de oscilaciones de frecuencias 1 y 10 Hz

1.3. 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.

1.4. 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.



1.5. 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 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.

1.6. Velocidad de propagación del sonido (c)

La velocidad de propagación del sonido (c) va en función de la elasticidad y densidad del medio de propagación. Cuanto más denso y menos elástico sea mayor velocidad de propagación. En el aire, 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.

Contrastando dos medios, la velocidad de propagación del sonido generado por un tren a través de los raíles es mucho mayor que a través del aire, por el hecho de que los raíles son de hierro, un medio mucho más denso i menos elástico que el aire.

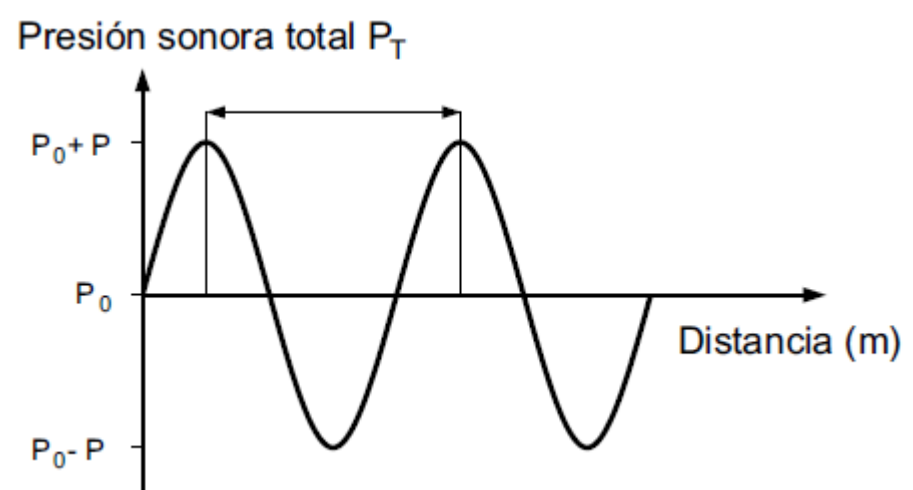
1.7. Longitud de onda del sonido (λ)

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. (Figura 14)

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

$$\lambda = c/f$$



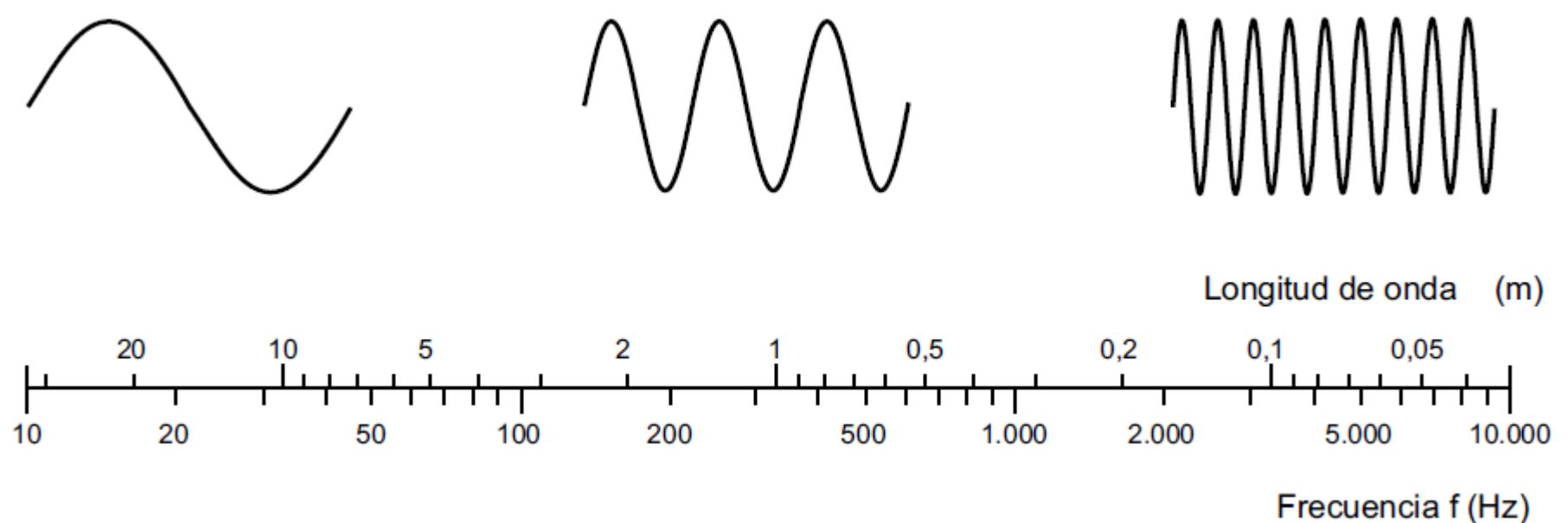
Según se observa, para cada frecuencia, la longitud de onda depende del medio de propagación, ya que es proporcional a la velocidad, y ésta varía para cada medio.

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 (15) se presenta un nomograma que relaciona λ con f , suponiendo que el medio de propagación es el aire.



1.8. Nivel de presión sonora (SPL)

Recordando lo dicho, 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).

Ahora bien, la utilización de dichas unidades da lugar a una serie de problemas cuyo origen se halla en el comportamiento del oído humano.

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 1kHz 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 este motivo 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). Posteriormente 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.

La escala resultante de niveles de presión sonora va 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.



1.9. Medición del sonido: el sonómetro

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”).

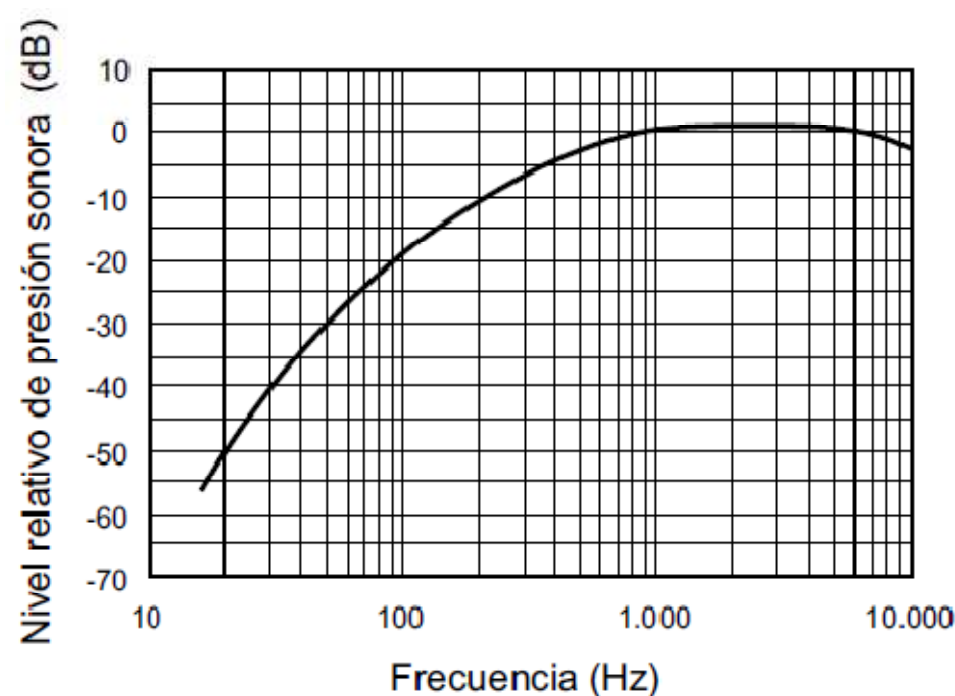
Por otro lado, con el fin de reducir al máximo las posibles diferencias entre las mediciones efectuadas con sonómetros de distintas marcas y modelos, existen unas normas internacionales a las que deben ceñirse los fabricantes de tales instrumentos.

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.

- **Red de ponderación A**

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 (16) 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.



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).



- **Análisis frecuencial**

Cuando 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.

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 siguiente se indican las frecuencias centrales de tales bandas, según prescribe la norma ISO 266.

FRECUENCIAS CENTRALES DE LAS BANDAS DE OCTAVA ESTANDARIZADAS EN Hz (ISO 266)										
16	31.5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	16.000

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.

- **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.

1.10. Propagación del sonido en el espacio libre

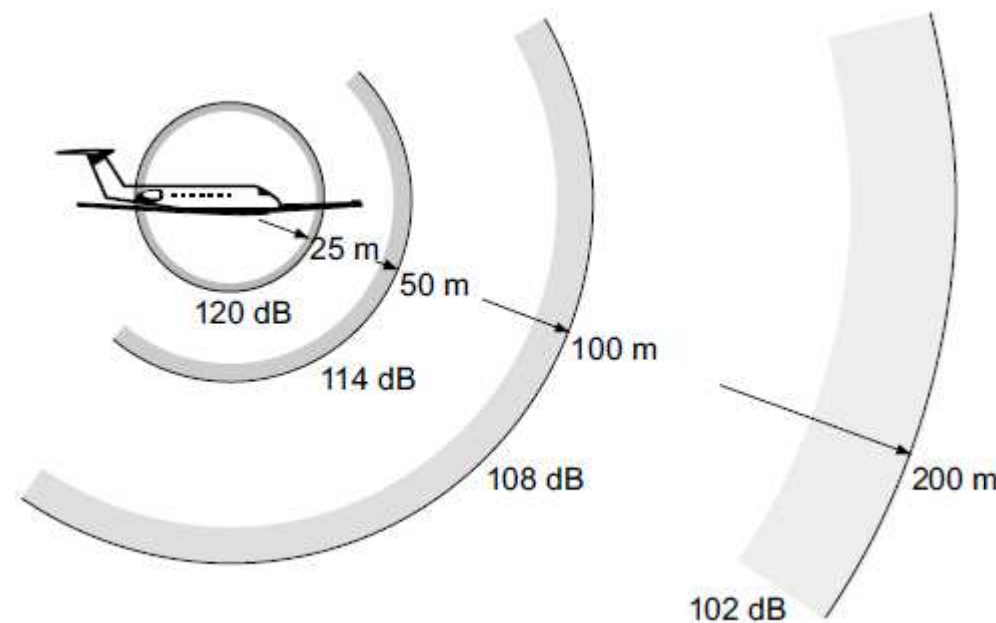
Cuando una fuente sonora situada en un recinto cerrado es activada, genera una onda sonora que se propaga en todas las direcciones. Un oyente ubicado en un punto cualquiera del mismo recibe dos tipos de sonido: el denominado sonido directo, es decir, aquél que le llega directamente desde la fuente sin 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.

Se considera una fuente sonora omnidireccional aquella fuente que radia energía de manera uniforme en todas las direcciones (factor de directividad $Q=1$) y tiene una propagación esférica.



A medida que nos distanciamos 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 (17) expuesta se muestra la mencionada disminución del nivel SPL con la distancia en el caso de que la fuente sonora sea un avión.



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 constituye un claro ejemplo de fuente directiva.

1.11. Propagación del sonido en el espacio 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.



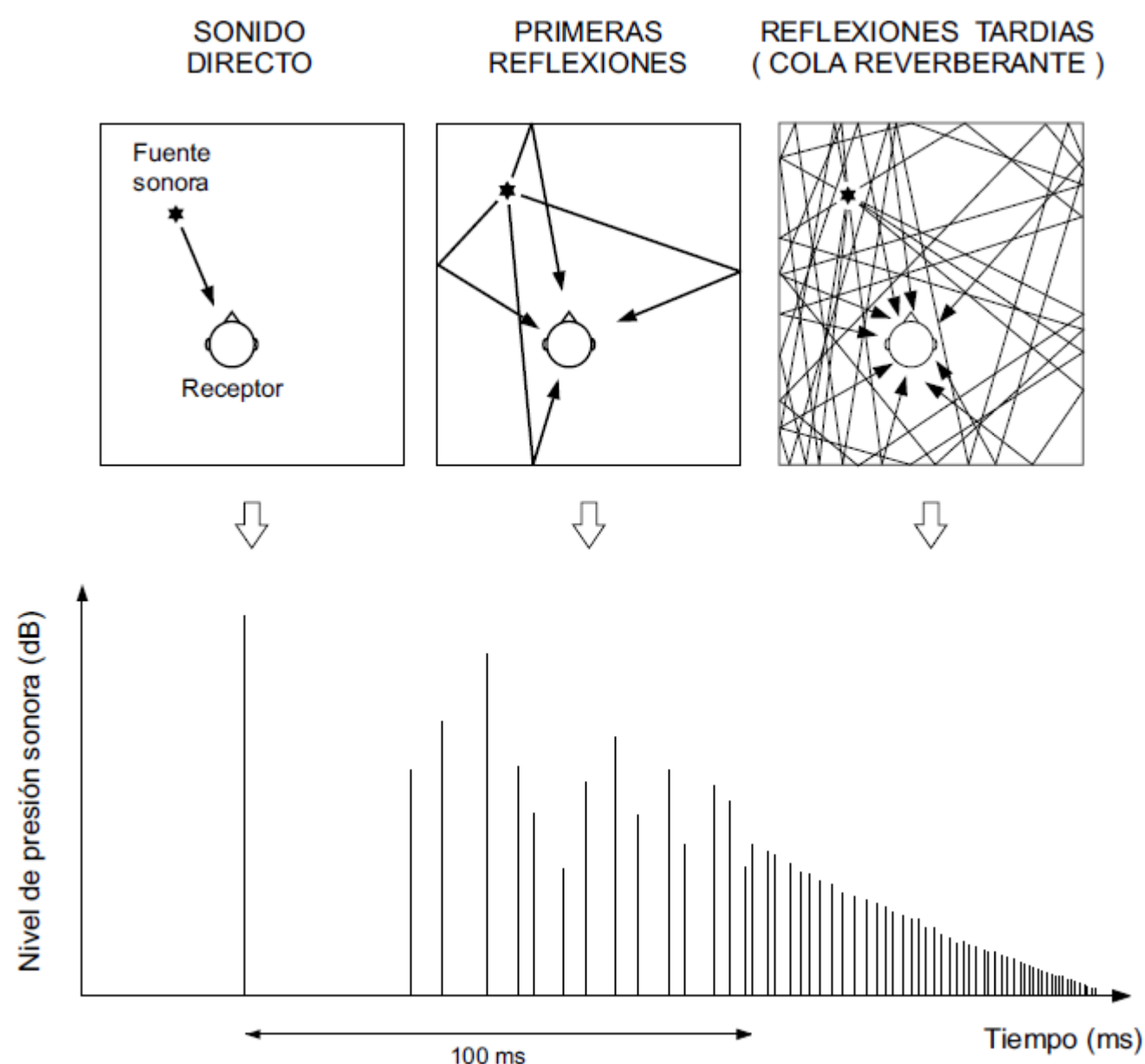
- **Sonido reflejado**

La evolución temporal del sonido reflejado en un punto cualquiera del recinto objeto de estudio, actúa de dos maneras diferentes: 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, y una segunda formada por reflexiones tardías que constituyen la denominada cola reverberante.

La llegada de reflexiones a un punto de la sala se produce de forma continua, y por tanto sin cambios bruscos, también es cierto que las primeras reflexiones llegan de forma más discreta 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 de aproximadamente 100 ms para la zona de primeras reflexiones 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 (18) 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, la zona de primeras reflexiones y la zona de reflexiones tardías (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.

- **Estudio de las primeras reflexiones. Acústica geométrica**

Como las primeras reflexiones presentan un nivel energético mayor que las tardías, (por ser de orden menor) dependen directamente de las formas geométricas de la sala.

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 (19) que observamos se representa gráficamente dicha ley. El análisis acústico basado en la hipótesis de reflexiones especulares constituye la base de la denominada acústica geométrica.



Dicho análisis representa una aproximación a la realidad, ya que sólo en determinadas circunstancias la hipótesis de reflexión especular es totalmente veraz.

Para que en la práctica se produzca una reflexión bastante especular es necesario que la superficie de reflexión cumpla los siguientes requisitos:

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

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.

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.

Por otro lado, el estudio de la cola reverberante, formada por las reflexiones tardías, sería imposible llevarse a cabo con la acústica geométrica debido a la densidad temporal de reflexiones en un punto



cualquiera de un recinto. La medición de la cola reverberante se efectúa mediante la acústica estadística.

- **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 (en el sonido es beneficioso hasta los 80 ms), 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, 17m.

1.12. Eco flotante

El eco flotante 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 20 y 21).

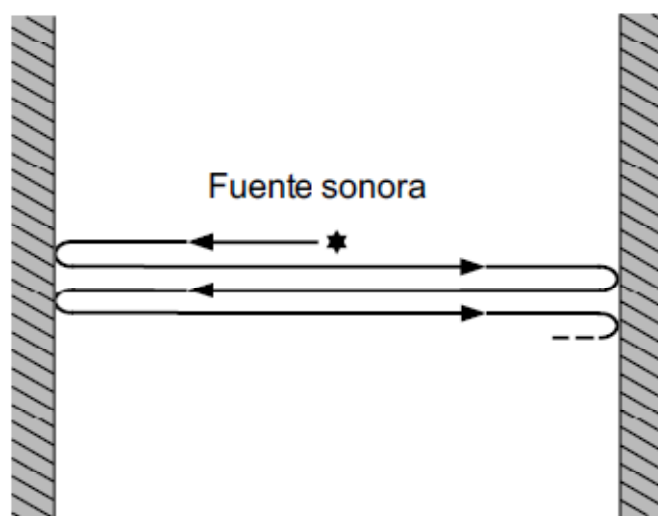


Fig. (20) Eco flotante aparecido al colocarla fuente sonora entre dos paredes paralelas, lisas y muy reflectantes.

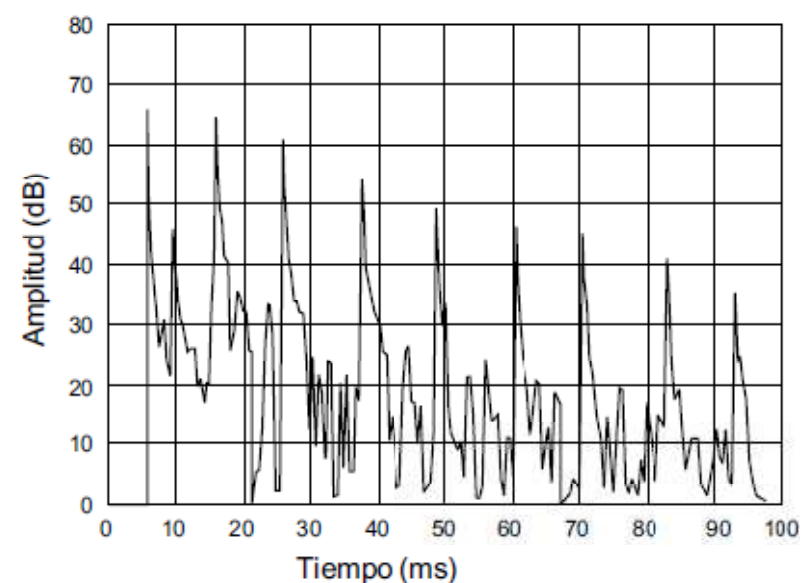


Fig. (21) Curva energía-tiempo ETC ilustrativa de la existencia de eco flotante.



1.13. 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.

Para un cálculo del RT más simple y más general se utilizará la fórmula de Sabine aunque en la práctica se ha demostrado que cuando el coeficiente de absorción medio es superior a 0,2, con la aplicación de la fórmula de Sabine se cometen errores superiores al 10 %.

Se han intentado corregir estos errores como es el caso de Eyring que propone otra expresión del tiempo de reverberación para locales más absorbentes, o Millington que define un nuevo coeficiente de absorción para evitar que algunos materiales con alta absorción, mediante las fórmulas de Sabine y Eyring, puedan dar valores por encima de la unidad.

11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21. Imágenes extraídas del libro “Diseño acústico de espacios arquitectónicos”



INTRODUCCIÓN AL ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO

Sería difícil entender el acondicionamiento acústico sin nombrar ciertos conceptos acústicos en los que se materializa dicho estudio.

El acondicionamiento acústico tiene por objeto conseguir un grado de difusión acústica y un tiempo de reverberación uniforme en todos los puntos del mismo. Con ello se pretende mejorar las condiciones acústicas de sonoridad aumentando el confort acústico interno de la sala.

Las propiedades acústicas de un local están determinadas por la proporción de energía absorbida por paredes, techos, suelos y objetos.

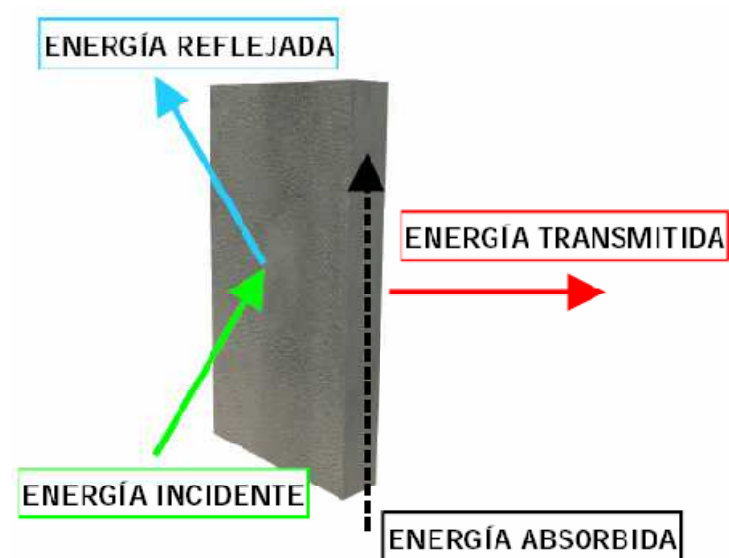
Cuando una fuente sonora emite energía, las ondas producidas se propagan radialmente en todas las direcciones a partir de ella, y cuando encuentran un obstáculo en su camino, pueden cambiar su dirección (se reflejan) o atravesarlo (difracción).

No existe una superficie física que sea un reflector perfecto, sino que la superficie de impacto se pondrá en movimiento (vibración aparente) por efecto de la onda incidente, o si tiene estructura porosa, permitirá la propagación de las ondas en el interior del cuerpo material.

Fig.(22)

Al producirse estos procesos, las ondas reflejadas tendrán menos energía que las ondas incidentes, diciéndose que parte de la energía incidente es absorbida por la superficie.

El sonido producido por una fuente sonora continua dentro de un recinto incide sobre las superficies límites del mismo, reflejándose en parte, tendiendo estas reflexiones a aumentar el nivel de presión acústica del recinto.



Los materiales que se utilizan como absorbentes sonoros son aquellos que reducen el nivel de energía sonora de las múltiples reflexiones que persisten en el tiempo en un local.

El campo sonoro dentro de una sala está formado por 2 componentes:

- Sonido directo: que va desde la fuente al espectador, siendo el mismo que tenemos bajo las condiciones de campo libre.
- Sonido reverberante: sonidos reflejados que van desde la fuente al receptor después de una o más reflexiones en las superficies.

De acuerdo con lo expuesto, el campo sonoro se determina a partir, tanto de la potencia acústica de la fuente, así como de las propiedades reflectantes de las superficies de recinto.

Desde el punto de vista de un acondicionamiento acústico interesa que el intervalo de tiempo que transcurre entre el sonido directo que llega antes que todas las reflexiones y éstas no exceda de un determinado tiempo, porque en caso contrario aparecería una cola reverberante que perjudicaría el buen entendimiento.



Por otra parte, la calidad viene definida por distintos parámetros según sea el tipo de mensaje sonoro, ya que no se exige lo mismo en la precepción de un mensaje oral, palabra hablada, que en la de uno musical y dentro de éste, la calidad de audición varía en gran manera según el tipo de música.

Todo lugar destinado a la emisión y audición de mensajes sonoros lleva implícita la existencia de una cadena de comunicación, compuesta por tres grandes elementos básicos: emisor, canal de transmisión y receptor. El mensaje se transmite a lo largo de esta cadena con el fin de llegar al receptor con la máxima calidad posible. Los mensajes acústicos son transportados por ondas sonoras diferenciándose unas de otras por su espectro de frecuencias. Dichas ondas, emitidas por el emisor, van a ser alteradas, distorsionadas y filtradas por el canal antes de llegar al sistema auditivo del receptor, quien, en último caso, define la adecuación o no de una sala a un determinado mensaje sonoro.

Emisor:

El emisor estará constituido por la fuente sonora junto con los sonidos que emite. Es por tanto fundamental tener ciertas nociones sobre las características de las fuentes naturales de emisión, en este caso nos centraremos en los sonidos musicales.

Los sonidos musicales se distinguen de otros sonidos por su espectro relativamente simple, periódico y ordenado (excepto los sonidos producidos por instrumentos de percusión). La música, en general, está basada en escalas constituidas por determinadas frecuencias. Cuando se analizan los sonidos musicales se encuentra que la relación entre sus frecuencias son números enteros, correspondiendo a la frecuencia fundamental y sus armónicos.

La frecuencia fundamental de un instrumento o sonido da la impresión subjetiva de tono y la presencia y números de armónicos da al sonido su calidad musical o timbre.

Los armónicos son los que generan el timbre característico de una fuente de sonido (ya sea una voz humana, un instrumento musical, etc.). Son los que permiten diferenciar un tipo de instrumento de otro, o reconocer el timbre de la voz de una persona.

Los armónicos más altos son inaudibles, y lo que da diferentes timbres a diferentes instrumentos es la amplitud y la ubicación de los primeros armónicos y los parciales. Y las diferentes trayectorias de las ondas sonoras de dos instrumentos tocando al unísono es lo que permite al oyente percibirlos como dos instrumentos separados.

Los instrumentos de cuerda son los que tiene como sistema básico de emisión la vibración de cuerdas. La frecuencia fundamental depende de la longitud de la cuerda, de su tensión y de su masa.

Los armónicos serán múltiplos de dicha frecuencia. Variando la longitud efectiva de la cuerda se emiten distintas frecuencias fundamentales y por tanto, distintos armónicos. El sonido emitido por la vibración de una cuerda es muy débil, pero es reforzado por diferentes sistemas resonadores, cuyas frecuencias de resonancia varían con sus características geométricas y físicas.

Los instrumentos de viento se basan en columnas resonantes de aire. La frecuencia fundamental del sonido emitido depende de la longitud del tubo.



También se producen armónicos dependiendo su número e intensidad del tipo de instrumentos. Estos instrumentos están equipados con válvulas, orificios o ranuras, que permiten variar la longitud efectiva del tubo y por tanto, la frecuencia fundamental y los armónicos que le acompañan.

Los instrumentos de percusión son excitados por un golpe dado sobre un sistema de vibración que puede ser una barra, varilla, membrana o campana.

Algunos tienen carácter periódico con una frecuencia fundamental y con armónicos y, otros no, como el caso de membranas o láminas que producen sonidos complejos con frecuencias no armónicas.

La energía radiada por los instrumentos musicales puede ser variada considerablemente por el músico. Suelen tener una dinámica de 40 dB o más.

El sonido mínimo producido por un instrumento es del orden de 30 dB y el máximo de 100 dB, medidos ambos a 1 m.

Canal de transmisión:

En el caso que nos ocupa, el canal de transmisión está constituido por la sala, con sus características geométricas y físicas y las diversas vías de propagación del sonido emitido en ella.

Cuando una fuente puntual comienza a vibrar dentro de una sala, emite energía en todas las direcciones, que se propaga en forma de ondas esféricas, cuya intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia recorrida (divergencia esférica). Sin embargo, cuando la onda llega a un cerramiento de la sala, la propagación de la misma se interrumpe, pudiendo ocurrir 3 casos:

- Que toda la energía se transmita al cerramiento, desapareciendo la onda en la sala; sería el caso de la absorción total.
- Que toda la energía se refleje dando lugar a una onda regresiva; sería el caso de reflexión total.
- Que parte de la energía se transmita al cerramiento y parte se refleje en la sala, que constituye el caso real.

Receptor:

El receptor está constituido por los oyentes con sus respectivos mecanismos de escucha, y es el que califica la calidad acústica de un local de audición.

El oído humano puede modificar su respuesta mediante unos condicionantes que pueden ser semánticos o estéticos. Esto hace difícil la cuantificación de la calidad acústica ya que la información semántica (lenguaje normalizado o código conocido por ambas partes) es cuantificable mientras que no lo es de manera uniforme la percepción de la información estética (se dirige a la afectividad del receptor sugiriéndole diversos estados de ánimo).

Así el criterio básico para la calificación de la percepción de mensajes orales es que el sonido sea inteligible, es decir, que tenga suficiente intensidad para emerger del ruido de fondo y que el espectro de cada sonido individual esté mínimamente alterado para poderlo reconocer. Todo esto exige un



compromiso entre la pérdida de claridad, debida al excesivo sonido reflejado y la pérdida de intensidad, debida a la excesiva absorción por parte de la sala.

Los criterios subjetivos que definen la calidad de percepción de los sonidos musicales son más difíciles de establecer, ya que intervienen juicios estéticos y emocionales. En cualquier caso, debe existir una buena componente del sonido directo y un equilibrio entre reverberación y claridad dependiente del tipo de música. Existen otros atributos imprescindibles para una adecuada audición musical, como el necesario refuerzo de los tonos graves, la difusión o sensación de que el sonido reflejado proviene de todas las direcciones, con intensidades similares y la impresión espacial o sensación de intimidad que hace que se perciba la música como interpretada en salas pequeñas.

En cualquier tipo de audición, además, deben estar ausentes los problemas acústicos como puedan ser, el sonido de fondo, ecos, focalizaciones y resonancias aisladas.

22. Imágenes extraídas de los apuntes de la UPV



PARÁMETROS ACÚSTICOS BÁSICOS

- **Tiempo de reverberación (RT)**

Se puede decir que es el dato más importante en las salas de audiciones y había que empezar definiéndolo para aclarar su significado, ya que algunas personas suelen confundirlo con el fenómeno del eco.

El tiempo de reverberación 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 depende de la frecuencia.

Coloquialmente recibe el nombre de “viveza” de la sala y su valor medio correspondiente a las bandas de frecuencias centrales de 500 Hz y 1000 Hz estando la sala totalmente ocupada suele oscilar entre 1,2 y 2 segundos dependiendo del tipo de música que se vaya a interpretar en la sala (ópera, música de cámara, música sinfónica, etc.).

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

- **Calidez acústica (BR) y brillo (Br)**

Cuando el tiempo de reverberación no se ajusta en las frecuencias centrales aparecen los términos de la calidez y el brillo de la sala.

Se dice que la calidez acústica es la respuesta que tiene la sala a bajas frecuencias, en la que se representa la suavidad, la melosidad y la riqueza de graves.

De manera objetiva se representa con el parámetro BR (“Bass Ratio”) y se define como la relación entre la suma de los RT correspondientes a frecuencias bajas (125 Hz y 250 Hz) y la suma de los RT correspondientes a frecuencias medias (500 Hz y 1000 Hz).

$$BR = \frac{\sum RT(125\text{ Hz y } 250\text{ Hz}) \text{ Bajas}}{\sum RT(500\text{ Hz y } 1\text{ kHz}) \text{ Medias}}$$

Se recomienda que su valor para la sala ocupada sea como mínimo de 1,10 s y como máximo dependerá del valor del RT_{mid} . Beranek indica los siguientes valores para una sala de conciertos destinada a música sinfónica:

$$1,10 \leq BR \leq 1,25 \text{ (si } RT_{\text{mid}} = 2,2 \text{ s)}$$

$$1,10 \leq BR \leq 1,45 \text{ (si } RT_{\text{mid}} = 1,8 \text{ s)}$$



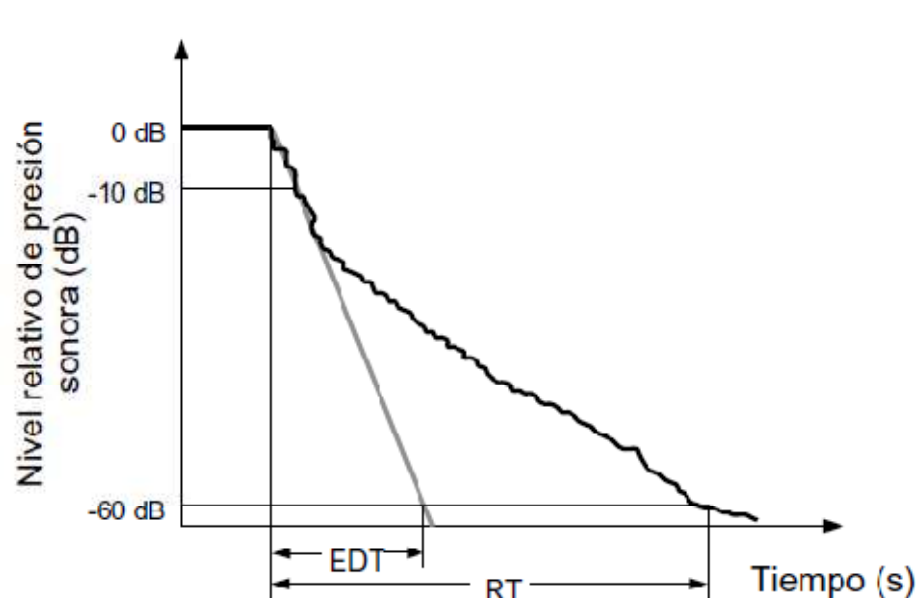
Haciendo referencia al término brillante se representa por el parámetro Br e indica si el sonido en la sala es claro y rico en armónicos. Se define como la relación entre la suma de los tiempos de reverberación RT a frecuencias altas (2 kHz y 4 kHz) y la suma de los RT correspondientes a frecuencias medias (500 Hz y 1 kHz).

$$Br = \frac{\sum RT (2kHz \text{ y } 4kHz) \text{ Altas}}{\sum RT (500Hz \text{ y } 1kHz) \text{ Medias}}$$

Se recomienda que su valor oscile entre 0,87 y 1 s con la sala ocupada, aunque rara vez llegará a 1 debido a que se produce una pérdida de energía de las ondas sonoras al propagarse a través del aire, causada por la fricción existente entre sus partículas. Dicha absorción se produce a partir de 2 kHz y aumenta con la frecuencia y a medida que disminuye la humedad relativa del ambiente.

- **“Early Decay Time” (EDT)**

Con objeto de garantizar una buena difusión del sonido en una sala ocupada, es preciso que el valor medio de los EDT (“early decay time”) correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1 kHz sea del mismo orden que RT_{mid} : (Fig. 23)



$$EDT_{mid} \approx RT_{mid}$$

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 en 10dB, este parámetro también varía según la frecuencia.

El EDT está más relacionado con la impresión subjetiva de viveza que el RT, lo que significa que en aquellos puntos de la sala con un EDT significativamente menor que el RT, la sala resultará, desde un punto de vista subjetivo, más apagada.

Como se puede observar en el dibujo, el hecho de que EDT sea inferior al RT significa que en ese punto la energía sonora decae más rápido debido a una falta de difusión del sonido.

La difusión hace referencia a la orientación del campo reverberante. Es la propiedad que hace que el sonido llegue a muchos lados del espacio con energía suficiente, por tanto, una buena difusión será aquella que permita que el sonido reverberante llegue al oído del espectador procedente de todas las direcciones y con la misma intensidad.



- **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.

Lehmann define la sonoridad G 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).

$$G = L_p(\text{sala}) - L_p(\text{campo libre a 10m})$$

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:

$$4 \leq G_{\text{mid}} \leq 5,5\text{dB}$$

- **“Initial-Time-Delay Gap (t_i)**

En términos subjetivos se conoce como “intimidad acústica” y provoca que al escuchar la música en una gran sala de la impresión de que la sala sea más pequeña y confortable.

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.

- **Relaciones energéticas (ELR): C_t , C_{to} , C_x**

Motivados por la necesidad 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_{to} 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:

$$C_t(t) = \frac{\text{Energía hasta el instante } t}{\text{Energía a partir del instante } t} \text{ (en dB)}$$

Igualmente, 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.

El último parámetro, el 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.

- ⌢ 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.

• Claridad musical (C_{80})

La claridad musical C_{80} indica el grado de separación entre los diferentes sonidos individuales integrantes de una composición musical.

Cremer lo 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):

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

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.

- Beranek recomienda para salas vacías: $-4 \leq C_{80}(3) \leq 0$ dB.
- L.G. Marshall propone para salas ocupadas: $-2 \leq C_{80}(3) \leq +2$ dB

Cabe destacar que el C_{80} está altamente relacionado con el tiempo de reverberación RT , en cuanto a que a medida que aumenta el RT_{mid} disminuye el valor de $C_{80}(3)$.

- **Curva de energía reflejada acumulada (RECC)**

Según Toyota, la curva de energía reflejada acumulada 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):

$$RECC(t) = \text{Energía hasta el instante } t \text{ (excluyendo el sonido directo) (en dB)}$$

- **Textura**

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.

Actualmente no existe ningún sistema de medida de la textura, así pues, 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.

- **Amplitud aparente de la fuente sonora (ASW)**

El parámetro ASW (“Apparent Source Width”) está asociado 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.

Constituye uno de los dos componentes básicos de la espacialidad o impresión espacial del sonido.



Cuanto mayor sea el valor de la ASW, mayor será la espacialidad del sonido resultando una mayor valoración subjetiva de la calidad acústica de la sala.

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. Cuanto mayor sea la diferencia entre ambos sonidos, mayor será la ASW.

Existen dos parámetros que permiten cuantificar el grado de ASW. Uno es la denominada **eficiencia lateral** (LF), relacionada con la energía de las primeras reflexiones laterales:

$$LF = \frac{\text{Energía lateral hasta 80 ms (excluyendo el sonido directo)}}{\text{Energía total hasta 80 ms}}$$

Y el otro la llamada **correlación interaural** ($IACC_E$), asociada al grado de disimilitud entre las primeras reflexiones que llegan a ambos oídos. Si son iguales valdrá 1, mientras que si son señales aleatorias independientes valdrá 0.

$$0 \leq IACC \leq 1$$

Ambos parámetros correspondientes a los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo (aclarar que el subíndice “E” es la inicial de la palabra “early”). Sin meternos más en los aspectos técnicos de estos parámetros se resume:

- Eficiencia lateral media $LF_{E4}(125 \text{ Hz} - 1\text{kHz})$, sala vacía $\geq 0,19$
- Correlación cruzada interaural ($1 - IACC_{E3}$) (500Hz – 2kHz), sala vacía $\approx 0,70$

- **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.



Existen dos parámetros relacionados con el grado de difusión, el primero sería la **correlación cruzada interaural**, nombrada anteriormente, aunque se suele utilizar el valor $(1-IACC_{L3})$, en el que el subíndice “L” es la inicial de la palabra “late” y por lo tanto cuantifica el grado de disimilitud que llegan a los oídos a partir de los 80 ms desde la llegada del sonido directo.

$(1-IACC_{L3})$	CATEGORÍA ACÚSTICA DE LAS SALAS
0,88	Excelente
0,87	Muy buena/ Excelente
0,85	Buena

El segundo parámetro que mejora la sensación de sonido envolvente es el denominado **índice de difusión** SDI (“Surface Diffusivity Index), el cual 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. A las superficies con *grandes irregularidades* se le asigna un grado de difusión 1, por el contrario a las *superficie lisas* se les asigna un grado de difusión 0. En resumen, cuanto mayor sea el valor de SDI, mayor será el grado de LEV, es decir, la impresión espacial en la sala.

$$0 \leq SDI \leq 1$$

PARÁMETROS ACÚSTICOS RELACIONADOS CON EL ESCENARIO Y LA ORQUESTA

- **Soporte objetivo (ST1)**

Este parámetro representa la capacidad de los músicos de escucharse a sí mismos y al resto de la orquesta. Según Gade el ST1 se define como la relación entre la energía asociada a las primeras reflexiones (entre 20 y 100ms) proporcionadas por las paredes y el techo del escenario, y la energía recibida en los primeros 20 ms, ambos valores obtenidos a 1m de distancia de una fuente omnidireccional situada en el escenario. Se expresa en escala logarítmica (dB):

$$ST1 = \frac{\text{Energía entre 20 y 100 ms}}{\text{Energía hasta 20 ms}} \text{ (en dB)}$$

Habitualmente se utiliza el soporte objetivo medio $ST1_{mid}$. Definido como:

$$ST1 = \frac{ST1 (250 \text{ Hz}) + ST1 (500 \text{ Hz}) + ST1 (1 \text{ kHz}) + ST1 (2 \text{ kHz})}{4}$$

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.).

- **Términos entre la orquesta y sus secciones**

- Balance (“balance”): cualidad 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 músicos, 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.

Cuando se diseñe el escenario se tendrán en cuenta la forma, las dimensiones, las paredes con sus difusiones y reflexiones, techo, etc. con la finalidad de que estos 4 términos sean lo más correctos posibles dentro de las capacidades de nuestra sala.

23. Imagen extraída del libro “Diseño acústico de espacios arquitectónicos”



ANOMALÍAS ASOCIADAS A SALAS DE CONCIERTOS

Cuando se realiza un estudio tan minucioso como el acondicionamiento acústico de una sala, en el cual hay que tener en cuenta muchos parámetros acústicos, se suelen dejar a un lado otros aspectos tan importantes o más que hacen que el resultado final no sea el deseado. A continuación se presentan las posibles anomalías más comunes que afectan a las salas de conciertos.

- **Efectos sobre la calidad tonal**

La calidad tonal es correcta cuando no existe realce o atenuación manifiesta de ninguna de las frecuencias generadas por la fuente sonora y una sala de conciertos debe presentar una calidad tonal óptima. La calidad tonal puede ser alterada de diferentes formas, como por ejemplo, por una vibración producida de una superficie metálica. La incorporación de pequeñas irregularidades sobre la superficie metálica, o bien, la aplicación de materiales amortiguantes de vibraciones, pueden atenuar dicha anomalía.

Por otro lado, si las paredes laterales de una sala o las superficies reflectantes del techo son planas y completamente lisas con objeto de producir primeras reflexiones sobre la zona del público, el sonido reflejado por ellas (y en especial el correspondiente a los violines) puede adquirir cierta dureza (“glare”) debido a la absorción de las bajas frecuencias, que en algunos casos es especialmente molesto.

- **Desplazamiento de la fuente sonora (falsa focalización)**

Otro efecto deficiente percibido en ciertas localidades, incluso en 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 del público. Los espectadores allí situados podrán llegar a percibir el sonido como procedente exclusivamente de dicha superficie, encubriendo la auténtica fuente sonora que se encuentra en el escenario. La fuente sonora se habrá virtualmente “desplazado” y, por tanto, tendrá lugar una falsa localización de la misma. Para contrarrestarlo es necesario crear una mayor difusión en la sala.

- **Ecos y focalizaciones del sonido**

Uno de los objetivos fundamentales en el diseño de salas de conciertos es evitar la aparición de ecos, focalizaciones del sonido y eco flotante.

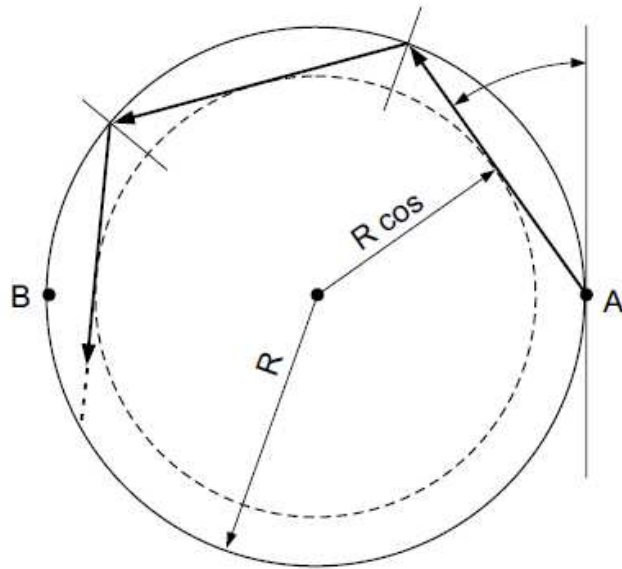
En una sala de conciertos, el eco es toda aquella reflexión significativa que alcanza al oyente en un instante de tiempo superior a los 80 ms desde la llegada del sonido directo. El eco resulta totalmente desfavorable tanto para los músicos como para los espectadores. Suelen ser debidos a la existencia de una pared posterior reflectante, o bien a la presencia de un reflector de esquina, aunque



para que aparezca un eco, la distancia entre el escenario y la superficie reflectiva debe ser superior a 13,8 m, ya que en tal caso la reflexión generada llegará con un retardo superior a los 80 ms.

- **Galería de susurros**

Galería de los susurros (“Whispering Gallery”) es la denominación inglesa dada a una superficie reflectante en forma circular o abovedada. Fig. (24)



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.

Será desaconsejable esta forma de escenario a no ser que se cree alguna discontinuidad que evite este fenómeno.

- **Curvas NC**

Citadas anteriormente, son las curvas que se tienen de referencia para el grado de molestia que un determinado ruido de fondo provoca sobre un espectador para cada banda de octava comprendida entre 63 Hz y los 8 kHz. Establecen los niveles máximos recomendados para cada espacio en función de su uso.

El ruido de fondo puede ser debido a los ruidos interiores (sistemas de climatización) y/o a los ruidos exteriores.

Un recinto cumplirá dicha exigencia cuando sus niveles de ruido se encuentren por debajo de la curva NC correspondiente.

La curva NC recomendada para salas de conciertos es la NC-15 (no perjudicaría la audición de un “pianissimo”, por ejemplo), si bien se suele admitir hasta la NC-25.

24. Imagen extraída del libro “Diseño acústico de espacios arquitectónicos”



SALA DE CONCIERTOS. CAPÍTULO 2

DISEÑO

Cada una de las partes a la hora de diseñar un auditorio es importante para conseguir que el resultado final se vea reflejado en una calidad acústica buena.

En otros proyectos los datos de partida serían los objetivos acústicos necesarios para conseguir la mejor calidad sonora y el aforo pretendido según unos requisitos previos. En cambio, el hecho de tener el recinto con un volumen premeditado y la principal geometría de la sala condicionará, en mayor o menor medida, algunos aspectos de la sala como el número de butacas, los materiales para revestir o algunos parámetros acústicos relacionados con las reflexiones del sonido.

Partiendo de la sala objeto se tendrá en cuenta el equilibrio entre el volumen y las sillas, que es lo que más absorción produce en la sala, las líneas visuales del espectador, los espacios mínimos de circulación junto con las medidas de las sillas y los accesos al recinto. Así pues, la elección de los revestimientos, bien sean absorbentes o reflectantes, y su óptima colocación en paredes, suelos y techos variarán el resultado de los parámetros acústicos.

Todos estos requerimientos se han de conjuntar con las demandas exigidas desde el escenario, ya que dependiendo de qué música vaya a interpretarse los valores acústicos tomarán una medidas u otras. En nuestro caso los cálculos están pensados para un conjunto musical pequeño y orquesta de cámara.

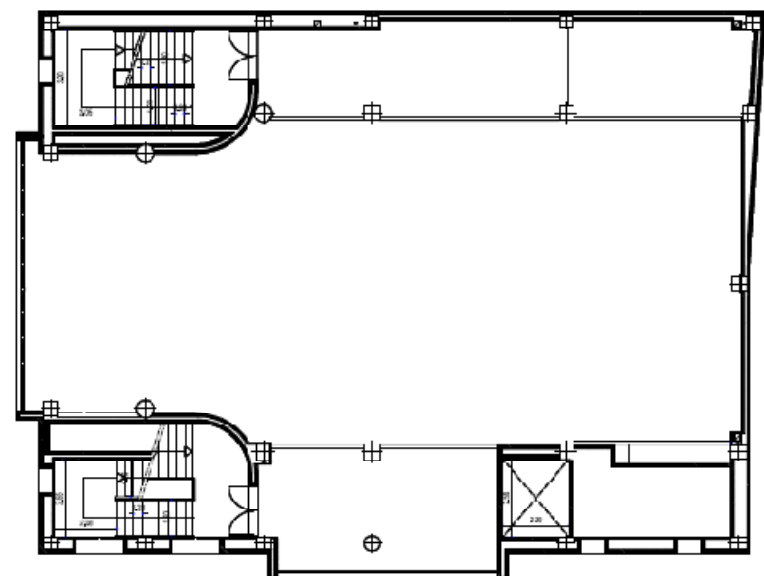
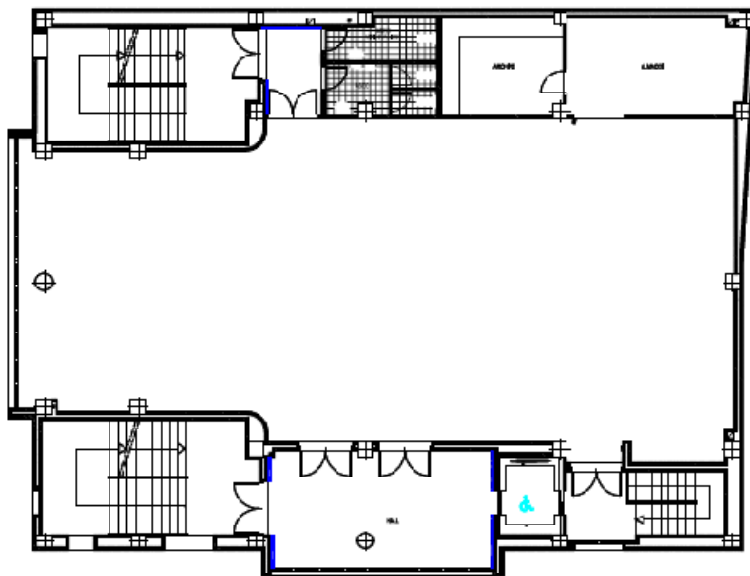
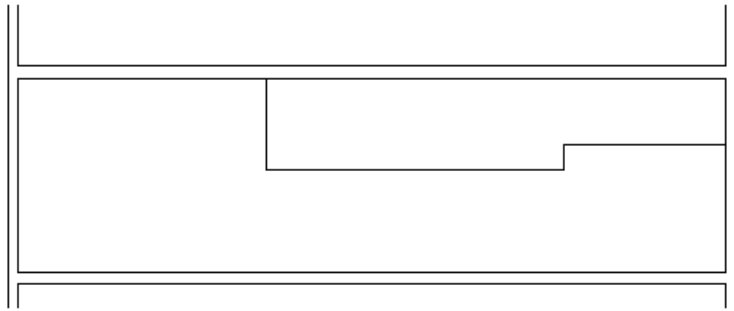
Hay que recordar que la finalidad del trabajo radica en que cualquier espectador, desde el lugar que sea, tenga una comodidad visual y acústica óptima, que se reflejará en la valoración general de la sala.

CONSIDERACIONES:

Algunas decisiones y argumentos utilizados para el cálculo y disposición de materiales en esta sala no son necesarios debido a que las dimensiones son tan reducidas que no llegan a producirse las anomalías que en otros auditorios más grandes sí que observaríamos. El factor más importante en estas salas pequeñas viene a ser el tiempo de reverberación, aunque es interesante a modo práctico tener presente todo el conjunto, desde el mínimo detalle, para conseguir una buena acústica.



1. DATOS DE PARTIDA



La información gráfica recibida consta de tres dibujos, dos secciones horizontales (Planta principal y primera) y una sección vertical. La primera impresión es que se trata de una sala con una geometría fundamentalmente rectangular aunque tiene algunas particularidades.

La altura libre de la sala es de 6,40 m que es relativamente pequeña si se compara con otros auditorios. Este hecho va a condicionar las visuales y la colocación de las sillas.

En los lados longitudinales de la sala a partir de la cota 3,40 y 4,20 m respectivamente se ensancha el volumen del auditorio quedando un lateral al descubierto y en el otro formando dos habitáculos debido al cajeado del ascensor.

La solución tomada en cuanto a la ubicación del escenario ha sido la de colocarlo en uno de los lados de menor longitud ya que así se podrán aprovechar mejor las reflexiones laterales por la forma rectangular de la sala y además el público tiene la ventaja de presenciar a la orquesta de frente compartiendo las mismas características acústicas desde cualquier punto de la platea.



2. FORMA Y DIMENSIONES DEL ESCENARIO

Dentro del auditorio se distingue la zona llamada escenario que es la parte donde se encuentran los músicos y solistas, cuando interpretan las piezas musicales, y su respectivo director encargado de dirigir a la orquesta, es desde aquí donde se proyectará el sonido hacia los oyentes y las diferentes superficies que envuelven la sala.

Como ya se ha comentado sobre la ubicación del escenario y tomada la planta rectangular como referencia, se dispondrá concretamente en el lado derecho de la sala, de menor longitud pero un poco más ancho que su homólogo de enfrente. Además, en el otro lado de menor longitud el cerramiento coincide con la fachada y comparte unas ventanas para aprovechar los puntos de luz naturales, cosa que no encaja demasiado bien con las condiciones buscadas para el escenario.

En cuanto a las dimensiones de éste, hay que enfocarlo para una orquesta de cámara, básicamente para cuerda y un poco de viento, entre veinte o veinticinco plazas según información facilitada. Haciendo caso a los consejos de varios autores (Beranek y Gade principalmente) se ha elegido una superficie media por músico de $1,5\text{m}^2$, sabiendo que no deben estar alejados entre sí más de 8 metros con la intención de no reducir la capacidad de interpretación conjunta. Por cálculo salen:

$$25 \text{ músicos} \times 1,5\text{m}^2 = 37,5 \text{ m}^2$$

pero atendiendo a las condiciones de la sala ya construida y considerando unas puertas de acceso que hay desde un almacén y desde los camerinos que están situadas en los laterales del escenario, se ha tomado una dimensión prácticamente el doble de la necesaria de 65m^2 aproximadamente, con un ancho de 10,75m (ancho de la sala) y una profundidad de 5,75m; estas dimensiones cumplen también con las recomendaciones del diseño de escenarios en cuanto a que si es demasiado ancho o profundo el sonido de los instrumentos pueden llegar a los oyentes con un retardo excesivo en relación con los más cercanos.

Hay que tener en cuenta (conocimiento por parte de los músicos) que el hecho de que el escenario sea más grande no significa que deban ocupar la totalidad de éste ya que el sonido conjunto sería peor, aunque sí que es verdad que pueden estar un poco más espaciados.

Una vez deducida la dimensión en planta, aclaramos el uso de tarimas para los músicos y el director, que tendrán una disposición radial y concéntrica hacia el director para poder visualizar al mismo tiempo la partitura y los gestos de éste; el escenario queda dividido en tres niveles de tarimas semicirculares cuya separación entre cada una será de 15cm en vertical. Desde la parte más elevada que se encuentra a 1,20m se baja a la siguiente tarima situada a cota 1,05m con un ancho de 1,40m; seguidamente se accede a la tarima de menor cota 0,90m que tiene un ancho de 2,50m y se encuentran los músicos más cercanos al director. La tarima del director se encuentra a cota 1,05m, con el fin que todos los músicos puedan ver sin problemas al director de la orquesta.



Haciendo referencia a los términos relacionados con la orquesta, el hecho de que el escenario esté dotado con tarimas de diferente cota ayuda a conseguir un equilibrio entre todas las secciones y favorece la interpretación conjunta ("*balance*"). Así mismo, la disposición radial de los músicos en un punto concéntrico, donde se encuentra el director, ayuda a mezclar y a sincronizar los sonidos de los diferentes instrumentos, sonando como un único cuerpo ("*blend*"). El motivo de utilizar difusores en las paredes y un suelo acústicamente apropiado ayudará a los músicos a tocar al unísono por el hecho de poder escucharse satisfactoriamente ("*ensemble*"). Cuando analicemos las reflexiones se tendrá en cuenta que no se produzcan primeras reflexiones desde la sala hacia el escenario con la intención de no producir ecos, ya que los músicos necesitan tener la sensación de que la sala responde de forma inmediata a una nota ("*attack*").

Respecto a su altura sobre el patio de butacas partimos de un intervalo límite aconsejado que va desde 0,5m hasta 1,2m con el fin de no crear problemas de falta de visibilidad de la orquesta, especialmente para todos aquellos espectadores situados en las primeras filas de la platea. Para nuestro auditorio se ha optado por una altura de 1,20m y de éste modo también se reduce la inclinación del patio de butacas por el hecho de que las visuales soportan mejor los ángulos si el escenario es más alto que bajo.

El diseño geométrico y los materiales empleados para las paredes, techo y suelo del escenario vienen referidos más adelante cuando hablemos en el apartado de materiales.

El único acceso que comunica el escenario con la platea se ha dispuesto mediante una escalera ubicada en el recinto destinado al archivo, es de uso restringido y su utilización solo se hará en casos puntuales. Salvará un desnivel de 1,20m y su acceso desde el patio de butacas será a través de una puerta facilitada. Tiene un ancho de paso de 1,25m llegando a estrecharse hasta 0,90m debido a la intersección de un pilar, está formada por seis peldaños, que estarán ejecutados mediante 7 contrahuellas de 14,1cm y 6 huellas de 24cm. En el lado libre se colocará una barandilla de 0,90m, cumpliendo con las restricciones del código técnico de la edificación (DB-SU).



3. ESTUDIO DE LA PLATEA

La platea es el término que se utiliza para referirse a la zona de la sala donde estarán sentados los espectadores en sus respectivas butacas. A partir de las dimensiones de la sala junto con el escenario calculado y el concepto de la visibilidad se ha diseñado la platea con el máximo aforo posible y para que desde cualquier lugar donde esté sentado un espectador, además de tener una buena percepción acústica, disponga de una visibilidad óptima dentro de las capacidades de la sala.

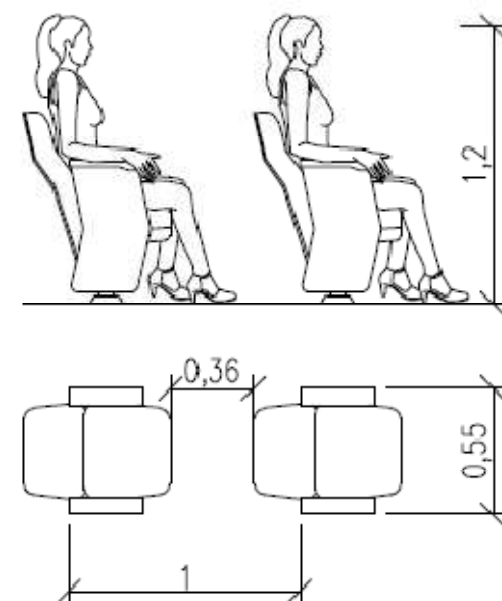
Antes que nada hay que tener en cuenta los accesos a la sala y su localización. Las entradas principales desde el Hall, dos puertas, se encuentran en mitad de la sala en el lado donde está ubicado el ascensor, hay otro acceso en el lado opuesto desde el cual se acceden a los aseos.

A partir de la geometría inicial en planta de la sala se ha realizado un cambio significativo pensando en mejorar las reflexiones laterales de la zona posterior y aunque se reduzca el número de sillas un poco se va a compensar acústicamente. Las paredes del fondo de la platea se han inclinado 7° respecto a la horizontal, quedando la sala en forma de abanico invertido y así conseguir una mayor impresión espacial gracias a las reflexiones laterales.

Una vez comentada la geometría básica y los accesos entramos en el tema de las **visuales**, hay que contemplar que el sonido que llega a cada espectador no puede obstruirse por los espectadores que están sentados delante y por este motivo hay que realizar la platea dotándola de una pendiente en sentido descendente hacia el escenario; al mismo tiempo controlar que el ángulo de visión de cada persona (formado por la directriz que va desde los ojos del espectador hasta un punto del escenario) no se interrumpe por la cabeza de la persona sentada en la fila de enfrente, así pues, se ha calculado la posición de las butacas empezando por las primeras filas, más cerca del escenario, y terminando por la última fila de la sala. Las primeras cuatro filas, debido a la altura del escenario no han requerido pendiente. Se ha tomado una altura media de 1,20m para los ojos de los espectadores sentados en la butaca y como punto de referencia en el escenario se ha elegido un punto en el centro del escenario a una altura de 0,40m (aproximadamente la rodilla de un músico sentado). Fig. (25)

Las **butacas** elegidas tienen una superficie en planta de 0,30m² y un ancho de 55cm con una separación entre respaldos de 1m quedando un hueco libre de paso para los espectadores de 36 cm por fila.

Aunque se aconseja que para la música de cámara el volumen por espectador sea de 6-9 m³/espectador debido al tiempo de reverberación requerido, la verdad es que se ha dispuesto el máximo aforo posible dejando las distancias mínimas de circulación, resultando un total de 238 localidades. Después ya se ajustarán los parámetros acústicos con ayuda de los materiales para revestir.





Aparentemente puede parecer lógica la ejecución de un anfiteatro para ubicar más butacas y aumentar el aforo de la sala pero son varios los criterios que desestiman esta solución:

- ^ La altura libre que posee la sala (6,40m) es muy poca, además, la pendiente que toma la platea después del cálculo de las visuales reduce la altura libre aún más; Beranek nos recuerda que la profundidad D de la zona situada debajo de un anfiteatro o balcón en una sala de conciertos no debe ser superior a la altura H de la abertura asociada, hecho que nos limita a poder colocar como mucho 2 o 3 filas de butacas en el anfiteatro.

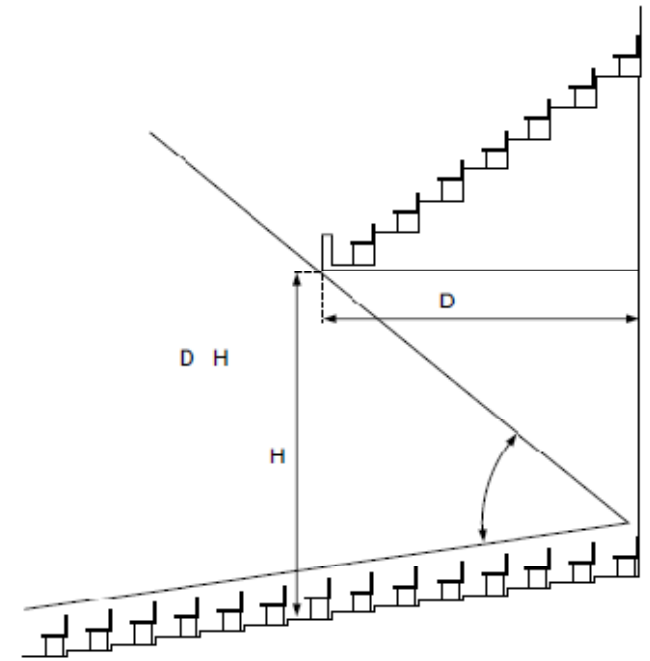


Fig. (26)

- ^ Los materiales que se colocarán en el techo, junto con sus dimensiones y geometría reduce la altura libre aún más.
- ^ Por otra parte, en la planta primera de los laterales de la sala, accesibles desde la escalera principal, queda una altura libre de 2,85m, pero aparte de los problemas planteados se añade el de la situación de pilares estructurales que reducen el ángulo de visión.
- ^ Además, por su relación con el tiempo de reverberación, no es conveniente aumentar el número de butacas cuando tenemos un volumen de la sala prefijado que no se puede modificar, ya que resultaría ser una sala demasiado apagada y no se garantizaría una sonoridad correcta.

La decisión sobre la altura del escenario de 1,20m condiciona la inclinación de la platea haciendo que sin tener que dotarla de una pendiente muy grande los espectadores puedan tener buenas visuales del escenario. Este hecho provoca, según varios autores, el efecto llamado "seatdip" caracterizado por producirse una fuerte absorción (entre 10 y 20 dB) a bajas frecuencias, pero este efecto no se produce siempre en todas las salas tal y como indica Barron, que señala que debido a las primeras reflexiones procedentes del techo y los laterales compensan la deficiencia energética del sonido directo a bajas frecuencias.

Para prevenir este caso y aprovechando la altura libre resultante al no disponer de anfiteatro, se ha convenido realizar una pendiente del 20% para las filas de butacas y así aumentar también el campo visual de los espectadores.

Según la superficie que ocupan las sillas dentro de la sala, Kosten y Beranek llegan a afirmar que la absorción producida por éstas es independiente al número de butacas colocadas, siempre que se cumplan dos cosas:

- ^ Que la sala tenga un grado de difusión dentro de la normalidad.
- ^ La densidad de sillas (m^2 por asiento) cumpla un margen de valores entre 0,45 y 0,79:



$$0,45 \leq \frac{Ss}{N} \leq 0,79 \longrightarrow \frac{144 \text{ m}^2}{238 \text{ butacas}} = 0,60$$

Los accesos a las butacas que se encuentran en la parte más elevada de la platea se han realizado por un lado con peldaños variables siguiendo la pendiente de la platea y por la parte de los aseos se ha realizado una pendiente del 15% con una longitud máxima en planta de 2,87m. Los minusválidos tendrán acceso a la parte de la platea donde no haya desniveles.

En los pasillos laterales hay un ancho libre de paso de 1,25m, mientras que desde la primera fila hasta el escenario hay 1,20m libres de obstáculos. El pasillo que hay en medio de la platea, paralelo a las filas de butacas, tiene hasta 1,36m de amplitud y es el que comunica los aseos (con pendiente) y el resto de la sala (mediante peldaños). La escalera de acceso a las últimas butacas de la platea tiene un ancho de paso de 0,96m y está ejecutada con trece peldaños de 50 cm de huella y 10cm de contrahuella.

Para facilitar el acceso a las sillas del primer tramo de la platea se han dispuesto unos peldaños en uno de los extremos de la fila. Para mayor seguridad de las personas que estén sentadas delante de la rampa, se colocará una barandilla de 0,90m.

25, 26. Imágenes extraídas del libro “Diseño acústico de espacios arquitectónicos”

CÁLCULO DE SUPERFICIES

A continuación se adjunta el plano de las superficies indicadas en la tabla, en el cual la superficie está detallada para su posterior uso en el cálculo de su revestimiento y acondicionamiento de la sala. (ver plano de superficies)

SENTIDO DE LA SUPERFICIE	UBICACIÓN	SUPERFICIE (m ²)
SUPERFICIES HORIZONTALES	Suelo Platea	170,73
	Suelo Escenario	61,55
	Suelo Planta 1ª	100,32
	Techo Escenario	87,52
	Techo Difusor	163,46*
	Techo Absorbente	110,58
SUPERFICIES VERTICALES	Laterales Planta 1ª	82,11
	Laterales QRD	57,16
	Laterales Reflectantes	109,70
	Fondo Platea	11,02
	Fondo Escenario	71,56
OTRAS	Sillas	144,27
	Ventanas	15,61
	Puertas	19,15
TOTAL		1060,48

*Se ha computado un 20% más que la superficie en planta a causa de las superficies salientes de la alta difusión.



OBTENCIÓN DE PARÁMETROS ACÚSTICOS

1. Tiempo de reverberación (RT)

Como sea visto en el apartado de parámetros del sonido, 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 decae 60dB. Es el término principal de la sala.

Algunos autores, a partir de la experiencia de otras salas, han considerado intervalos de tiempo (en segundos) para el valor medio de los RT en función del volumen de la sala, las bandas de frecuencia (500Hz-1Kh) y el tipo de música a interpretar. En nuestro caso tratándose de música de cámara, se estima un RT_{mid} entre 1,3 – 1,7 segundos.

En teoría estas recomendaciones vienen dadas para salas de mayores dimensiones, pero tratándose de una sala de pequeñas dimensiones como la nuestra ($1455m^3$) bastaría con un RT alrededor de 1 segundo, ya que un tiempo superior sumado a las reflexiones producidas puede producir un sonido saturado y mezclado.

A partir del volumen de la sala obtenido y del RT_{mid} acordado se obtiene el coeficiente medio de absorción (α) utilizando la fórmula clásica por excelencia, la denominada fórmula de Sabine y despreciando el efecto de la absorción producida por el aire, tenemos:

Datos:

Volumen del recinto (V) = $1455 m^3$

Tiempo de reverberación medio (RT) = 1 s

Superficie total del recinto (S_t) = $1060,5 m^2$

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

$$A_{tot} = 0,161 \frac{V}{RT} = 0,161 \frac{1455}{1} = 234,25 \text{ sabine}$$

Una vez obtenida la absorción total (A_{tot}) es posible calcular el coeficiente medio de absorción (α) resolviendo el cociente entre la absorción total (A_{tot}) y la superficie total de recinto (S_t).

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

$$S_t = S_i \text{ (recinto)} + S_s \text{ (sillas)}$$

Hay que tener en cuenta que la absorción total de la sala es la producida por las superficies límite más la producida por las sillas ocupadas: $A_{tot} = \sum S_i \alpha_i + A_s \alpha_s$

$$\alpha_{med} = \frac{234,25}{1060,5 + 144,3} = 0,19$$



1.1 Calidez acústica (BR) y brillo (Br)

Para la calidez acústica, que es la riqueza en graves, se recomienda que el tiempo de reverberación sea superior a 1,10. Mientras que para el brillo o riqueza en armónicos se indica un intervalo entre 0,87 y 1 segundo.

Los parámetros referidos al tiempo de reverberación son los únicos que se pueden establecer con mayor exactitud antes de diseñar la sala ya que conociendo el volumen, la superficie y los coeficientes de absorción de los materiales que utilizaremos en la sala se pueden aproximar los tiempos.

En cambio, los otros parámetros se tendrán en cuenta para el diseño y las reflexiones pero no se podrán cuantificar hasta que la sala no esté construida y con la ayuda de un sonómetro.

A continuación se presenta una tabla donde se resumen los parámetros acústicos:

PARÁMETRO ACÚSTICO	VALOR RECOMENDADO	VALORACIÓN SUBJETIVA
Tiempo de reverberación medio RT_{mid} (500 Hz – 1 kHz), sala ocupada.	$1,3 \leq RT_{mid} \leq 1,7$ s	Grado de viveza de la sala
Calidez acústica BR, sala ocupada.	$1,10 \leq BR \leq 1,60$ (si $RT_{mid} = 1,5$ s)	Riqueza en sonidos graves, melosidad y suavidad de la música.
Brillo Br, sala ocupada.	$Br \geq 0,87$	Riqueza en sonidos agudos.
“EarlyDecay 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.
“Initial-Time-Delay Gap” t_i (centroplatea)	$t_i \leq 20$ 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). Energía de 1ª reflexiones.
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). Grado disimilitud a los oídos.
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.



SALA DE CONCIERTOS. CAPÍTULO 3

CUALIDADES DE LOS MATERIALES ACÚSTICOS

Una vez conocido el volumen y las superficies que van a dar forma a la sala objeto de estudio, el hecho de conseguir unas condiciones acústicas óptimas va a depender directamente de los tipos de materiales que utilicemos como revestimientos y así poder variar el tiempo de reverberación.

Según la finalidad a que vaya a estar sometida la sala se necesitará potenciar, en mayor o menor medida, las primeras reflexiones o conseguir una determinada difusión.

En este apartado se indican los diferentes materiales y sus características básicas que permitirán modificar los parámetros acústicos a partir de estos tres principales efectos sobre la energía sonora:

- ^ Absorción del sonido: principalmente de las sillas y del público y de aquellos materiales absorbentes con una superficie porosa o absorbentes selectivos (resonadores).
- ^ Reflexión del sonido: debida a elementos reflectores a partir de materiales sin porosidad y utilizados para dirigir las reflexiones hacia el público.
- ^ Difusión del sonido: elementos difusores que dispersan la energía sonora incidente en múltiples direcciones para aumentar la espacialidad de la sala.

1. Absorción del sonido

La energía sonora se reduce de diferentes formas dentro de una sala de grandes dimensiones cuando se precisa disminuir un tiempo de reverberación determinado. Hay absorciones que no son tan fáciles de cuantificar, como la propagación de la onda sonora en el aire o la vibración producida en puertas y ventanas, en cambio hay otros materiales que podemos conocer los coeficientes de absorción que producen en las diferentes bandas de frecuencias.

Por otra parte, las características de absorción de los materiales absorbentes y de los resonadores dependen no sólo de sus propiedades físicas, sino también de condicionantes y de detalles constructivos, que varían sustancialmente de un caso a otro y que no se pueden representar mediante una expresión matemática.

Antes de utilizar un material será imprescindible, en caso de no conocer sus coeficientes de absorción (α_{SABINE}), realizar ensayos de laboratorio según un procedimiento homologado en la sala reverberante.

A continuación se detallan las características de absorción de los materiales y elementos susceptibles de producir cualquier absorción en una sala. Se ordenan de menor a mayor importancia.



- **Absorción de los materiales constructivos en paredes y techos**

En general se trata de materiales bastante rígidos y con porosidad nula que producen una mínima absorción del sonido. Además solo se apreciará esta absorción cuando queden vistos y no se coloque ningún tipo de revestimiento encima.

La absorción se produce cuando la energía se disipa por la capa de aire adyacente al material en forma de calor, aunque de forma práctica se obtiene el coeficiente de absorción del material. A medida que la superficie rugosa del material es mayor la capa de aire adherida creará una mayor absorción.

- **Absorción del aire**

Solo es significativa en salas de grandes dimensiones a frecuencias altas (≥ 2 kHz) y con porcentajes bajos de humedad relativa (10-30%). A partir de unas tablas se deduce la constante de atenuación del sonido en el aire “m” y se aplica a la fórmula de Sabine.

- **Absorción de las superficies vibrantes**

Las superficies que pueden entrar en vibración son las puertas, ventanas y las paredes separadoras ligeras y aunque en principio no suelen producir demasiada absorción conviene tener presente.

La importancia de esta absorción es que a diferencia de un material absorbente, cuya absorción está controlada, cuando se produce una vibración la energía no se disipa en forma de calor sino que realmente está absorbiendo la energía y una parte de esta es radiada hacia el exterior, como si fuese una ventana abierta en el caso más extremo.

Existe una expresión que permite aproximar un coeficiente de absorción α cuando el numerador es pequeño comparado con el denominador:

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

ρ = densidad del aire = 1,18 Kg/m³

$\omega = 2\pi f$

f = frecuencia (en Hz)

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



- **Materiales absorbentes**

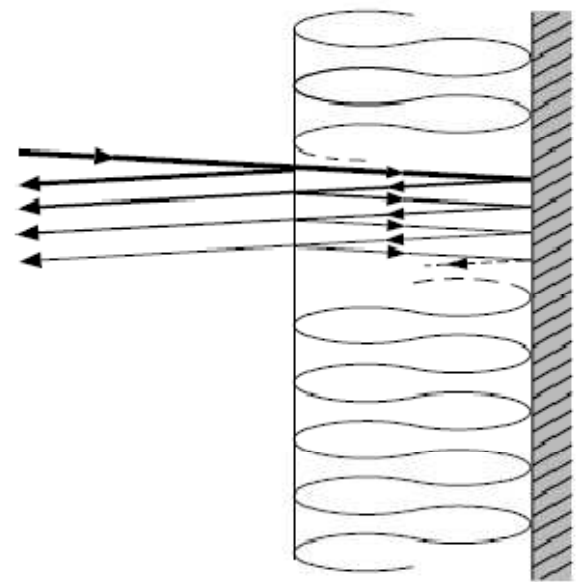
Como ya se ha dicho, existen dos tipos de elementos diseñados para producir una determinada absorción, los materiales absorbentes (absorben en todas las frecuencias) y los absorbentes selectivos o resonadores (absorben en una determinada frecuencia).

Los objetivos que se buscan al utilizar estos materiales son:

- ˘ Obtener el tiempo de reverberación adecuado para la actividad deseada.
- ˘ Prevenir o eliminar ecos.
- ˘ Reducción del nivel de campo reverberante en espacios ruidosos.

La explicación del proceso de absorción se basa en que 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.

Fig. (27)



Esto se produce en mayor cantidad a medida que aumenta la porosidad del material, accesibles desde la cara exterior. Los más comunes son la fibra de vidrio, la lana mineral, la espuma a base de resina de melanina o la espuma de poliuretano. A continuación se indican los condicionantes sobre los materiales absorbentes.

- ˘ **Coefficiente NRC**

Se llama coeficiente de reducción acústica y sustituye a los coeficientes de absorción por bandas de frecuencia. No es aconsejable utilizarlo para el diseño ya que consiste en una media aritmética de los coeficientes de absorción correspondiente a las cuatro bandas de frecuencias centrales (250 Hz, 500 Hz, 1kHz y 2kHz).

- ˘ **Espesor del material**

Cuando colocamos un material absorbente junto a una pared rígida hay que tener en cuenta que la absorción es baja a todas aquellas frecuencias para las que se cumple que el espesor del material “D” es mucho menor que la longitud de onda λ del sonido dentro del material.

Así pues al aumentar el espesor de un material se va a notar más en la absorción a bajas y medias frecuencias (aumentando también) ya que para las altas frecuencias, el hecho de tener una λ pequeña, no modificará tanto su coeficiente.



^ **Porosidad del material**

Partiendo de su colocación sobre una pared rígida, a mayor porosidad del material mayor absorción a todas las frecuencias, debido a una mayor penetración de la onda incidente.

^ **Densidad del material**

Cuando la densidad es muy baja existe menos absorción debido a una poca pérdida por fricción y a medida que aumenta la densidad se produce una mayor absorción hasta un límite (100 Kg/m^3), a partir del cual la absorción disminuye, debido a una menor penetración de la onda incidente.

En la práctica, las densidades de los materiales absorbentes oscila entre 40 y 70 Kg/m^3

^ **Distancia del material a la pared rígida**

Simplemente decir que a medida que se aleja un material absorbente de una pared rígida, menor será la frecuencia a la que la absorción será máxima.

Esto se debe a que al aumentar esta distancia d , la longitud de onda λ también aumenta, ya que la absorción máxima se produce cuando $d = \lambda/4$ o múltiplo impar. En cambio si se aumenta demasiado d y se cumple que $d = \lambda/2$ o múltiplo par, la absorción será la mínima a causa de la velocidad de las partículas de aire que vale 0.

En la práctica se recomienda disponer el material en zigzag para suavizar las irregularidades del coeficiente de absorción.

^ **Suspensión del techo**

Cuando no hay suficiente superficie para colocar materiales de absorción se dispone el material absorbente suspendido del techo.

^ **Protección de los materiales absorbentes**

Algunas veces interesa cubrir la cara de los materiales absorbentes por la cara expuesta al recinto. Los principales motivos son:

- Con el tiempo, algunos materiales pueden desprender partículas que contaminen el aire.
- Protegerlos del alcance del público para que no sean dañados.
- Razones estéticas.

Recubrimientos más comunes: velo acústico transparente, superficie microporosa, placa rígida de mortero poroso, placa de viruta de madera, lámina de plástico o papel, panel perforado o ranurado de madera.



- **Elementos absorbentes selectivos (resonadores)**

Como ya hemos visto, al aumentar el espesor de un material o separarlo de la pared puede aumentar la absorción a bajas frecuencias.

Ahora bien, si se pretende obtener una gran absorción a frecuencias bajas con objeto de reducir 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.

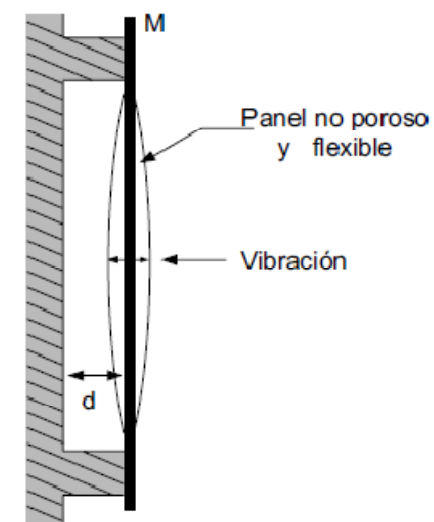
A continuación se exponen los cuatro tipos de resonadores existentes:

- ^ **De membrana o diafragmático**

Se compone por un panel no poroso y flexible, como la madera, que se dispone a una distancia de la pared, dejando una cavidad de aire, y anclado únicamente en sus extremos.

Cuando la onda incide sobre el panel, éste entra en vibración y disipa parte de la energía incidente en forma de calor.

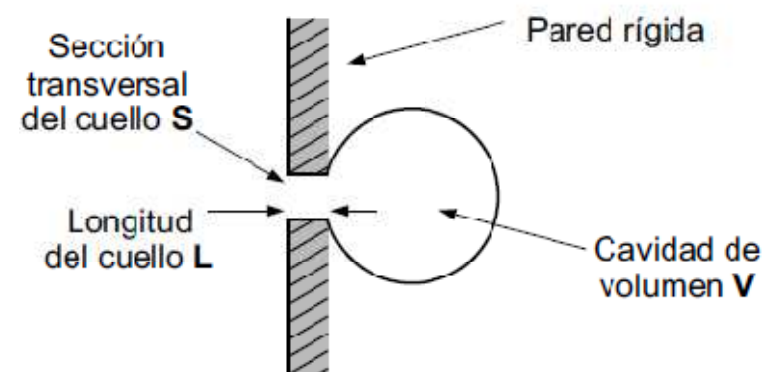
Fig. (28)



- ^ **simple de cavidad (Helmholtz)**

Está formado por una cavidad cerrada de aire conectada a la sala a través de una abertura o cuello estrecho. Presenta un comportamiento muy selectivo, es decir, presenta una absorción muy elevada a la frecuencia de resonancia, aunque si se rellena la cavidad de aire con material absorbente se suaviza la curva de absorción.

Fig. (29)



- ^ **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.

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 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.

^ 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.

Es parecido al resonador múltiple a base de paneles.

• Absorción del público y de las sillas

Es la parte que más absorción produce en relación con todos los aspectos que hemos nombrado anteriormente.

Se puede cuantificar desde dos vertientes principales: considerando que el público se halla disperso (como en un polideportivo o una estación de ferrocarril) o bien que se halla sentado de forma agrupada (auditorio). En el primer caso se tendrá en cuenta la absorción por persona (en sabins) mientras que en el otro se considerarán dos conjuntos de coeficientes de absorción unitarios (por m^2), el de las sillas vacías y ocupadas.

En nuestro caso solo nos centraremos en la absorción producida por el público sentado. La expresión es la siguiente:

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

S_A = superficie acústica efectiva ocupada por las sillas (en m^2): 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.

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

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



Se ha demostrado, en mediciones realizadas por Beranek, que según la superficie del tapizado en las sillas variarán de forma importante los coeficientes de absorción. La absorción de las sillas afecta principalmente a medias y altas frecuencias.

2. Reflexión del sonido

El uso de reflectores específicos ayuda a crear reflexiones útiles en la zona del público. El material reflectante deberá ser liso, no poroso y totalmente rígido, ya que si no se cumplen estas tres premisas existirá una mayor absorción frente a la reflexión que buscamos.

Para aprovecharnos de las primeras reflexiones útiles hay que distinguir entre las salas destinadas a la palabra y la audición de música sin amplificadores. Cuando la finalidad es escuchar a un orador, las primeras reflexiones serán beneficiosas hasta los 50ms, ya que ayudaran a mejorar la inteligibilidad de la palabra y aumentar la sonoridad. En el caso de salas de conciertos se admitirán las primeras reflexiones hasta los 80ms y así aumentar la sonoridad y la claridad musical, además si las reflexiones son laterales se aumentará el grado de impresión espacial.

En principio, todos los materiales producen una cierta reflexión, menos aquellos que tengan un coeficiente de absorción muy elevado ($\alpha = 1$). Por otra parte, la geometría del reflector también influirá en la reflexión de la onda incidente, en cuanto a que la reflexión especular solo se producirá si la superficie es lisa, además la dimensión de este respecto a la longitud de onda incidente va a condicionar el fenómeno de la difracción. Todas aquellas frecuencias bajas, cuya longitud de onda sea superior a la dimensión del reflector se difractarán, es decir, la onda seguirá su propagación cambiando de dirección.

Acto seguido, se explican los dos tipos de reflectores que existe:

- **Reflectores planos**

Los estudios realizados por Rindel en 1.986 demuestran una relación entre las dimensiones de un reflector plano y las frecuencias límites a partir de las cuales empieza la difracción. Sin profundizar en este tema, la tabla siguiente muestra las longitudes de onda asociadas a cada frecuencia, se sabe que para producir una reflexión a una determinada frecuencia, el elemento reflector deberá ser mayor que su longitud de onda.

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

No es aconsejable utilizar reflectores planos de grandes dimensiones para no producir anomalías como la coloración del sonido o desplazamientos de la fuente sonora.



- **Reflectores curvos**

Proporcionan una mayor dispersión en el sonido que los reflectores planos al tener un perfil convexo. Para que cumpla la función de reflector su radio de curvatura debe ser mayor a 5m, ya que si es menor tiende a comportarse como un difusor de sonido.

Si el perfil del reflector es cóncavo las reflexiones pueden dar lugar a un efecto de focalización del sonido, caso que se debe evitar.

3. Difusión del sonido

Son elementos expresamente diseñados para provocar la dispersión de las ondas sonoras incidentes de una manera uniforme y en múltiples direcciones. Modelos de difusores:

- **Difusores policilíndricos**

Formados por un conjunto de superficies lisas de forma convexa dispuestas secuencialmente con un radio de curvatura inferior, aproximadamente, a 5m. Suelen ser de madera.

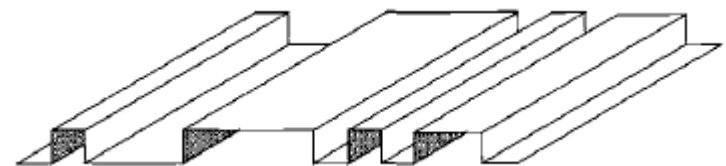
- **Difusores de Schroeder**

Estos difusores también se denominan RPG y se basan en distintas secuencias matemáticas previamente fijadas. Existen varios tipos:

- Difusores MLS
- Difusores QRD
- Difusores PRD

^ **Difusores MLS**

Basados en unas secuencias pseudoaleatorias periódicas, denominadas de longitud máxima, que sólo pueden adquirir valores diferentes: -1 y +1. Fig. (30)



El elemento difusor consiste en una superficie dentada. Se crea partiendo de una superficie lisa y reflectante, la cual se subdivide en tramos de igual anchura. A cada tramo se le asigna un valor de la secuencia pseudoaleatoria, de acuerdo con el siguiente procedimiento:

- Si el valor es -1, el tramo queda inalterado.
- Si el valor es +1, se crea una ranura en el espacio ocupado por el tramo.

Este tipo de difusores presenta menor absorción a bajas frecuencias que los difusores QRD y PRD.



^ Difusores QRD

Existen dos tipos de difusores de residuos cuadráticos, los unidimensionales y los bidimensionales.

Unidimensionales:

Son los más utilizados a nivel práctico, consisten en una serie de ranuras paralelas de forma rectangular, de igual anchura y de diferente profundidad. Por lo general, dichas ranuras están 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 que producen, en un determinado margen de frecuencias, una dispersión del sonido en planos perpendiculares a dicha ranura.

Bidimensionales:

Aparecen 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 generalmente cuadrada.

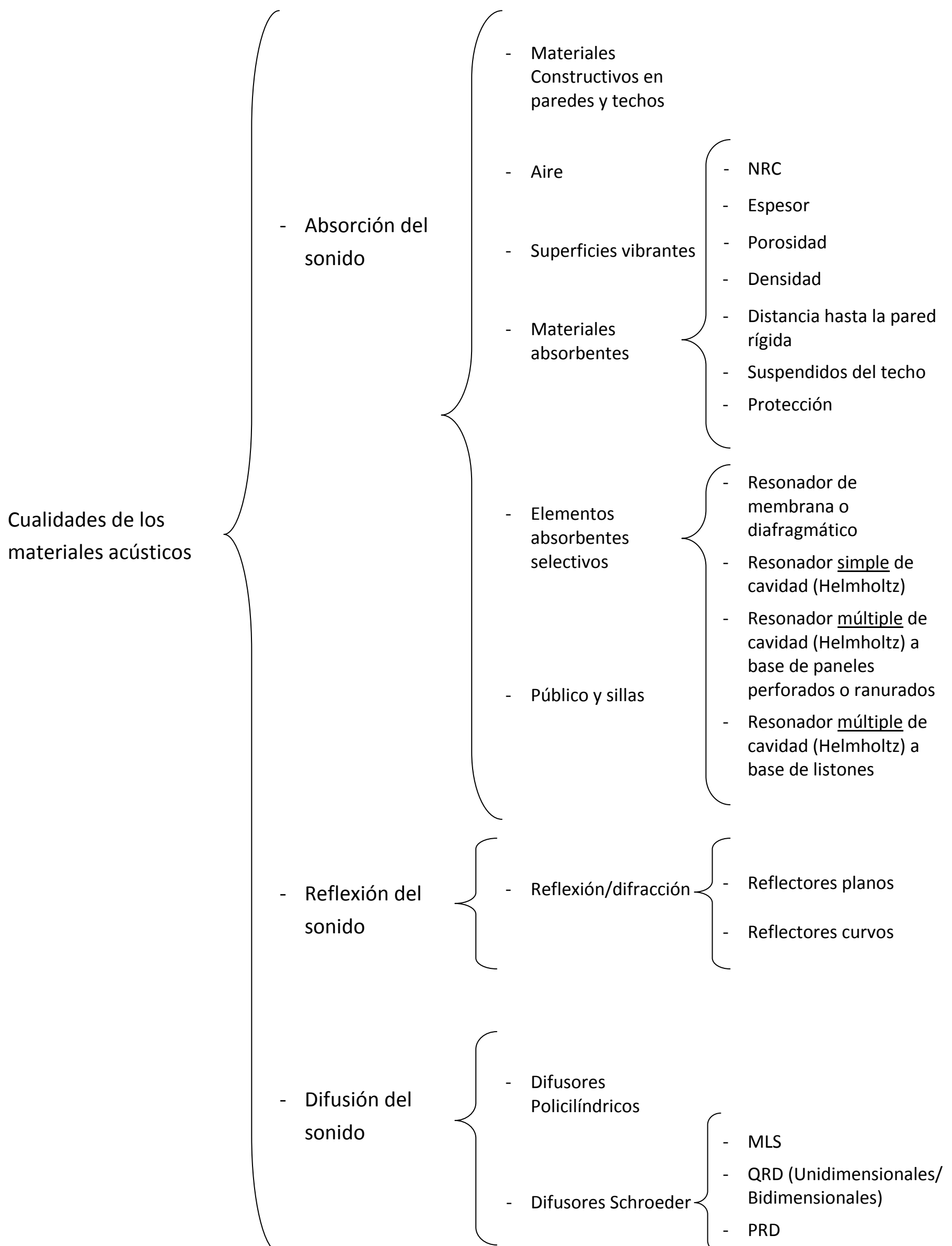
^ Difusores PRD

Son como los difusores QRD con la diferencia de que la profundidad de las ranuras se obtiene a partir de una frecuencia generadora distinta.

27, 28, 29, 30. Imágenes extraídas del libro “Diseño acústico de espacios arquitectónicos”



ESQUEMA RESUMEN





APLICACIÓN DE MATERIALES Y ACÚSTICA GEOMÉTRICA

Siguiendo el mismo procedimiento que en el diseño, todos los revestimientos que aplicaremos con sus características particulares se han organizado desde dos vertientes separadas, pero que al mismo tiempo forma parte de un todo que es la sala, estamos refiriéndonos al estudio del escenario y a la platea. Antes de revestir las superficies límites se estudiará la absorción más destacable en la sala, la provocada por las sillas.

A continuación se observa el proceso utilizado para conseguir la acústica óptima. Primero se detalla el material que colocaremos, con sus dimensiones, espesores, colocación y coeficientes de absorción y después analizaremos los efectos acústicos que produce, tratándose de absorciones, reflexiones o difusiones.

Sillas

Las sillas provocan una absorción considerable a todas las frecuencias, pero hay un incremento a medida que aumenta la frecuencia, por este motivo, se ha buscado un tipo de silla con un porcentaje medio de superficie tapizada y fijas. A continuación se muestra la absorción de las sillas vacías.

Material	Coeficientes de Absorción					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Butacas vacías con porcentaje medio de superficie tapizada	0,56	0,64	0,7	0,72	0,68	0,62

Absorción provocada por las mismas sillas ocupadas por los espectadores.

Material	Coeficientes de Absorción					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Butacas ocupadas con porcentaje medio de superficie tapizada	0,68	0,75	0,82	0,85	0,86	0,86

Al estar ocupadas aumenta su absorción en todas las frecuencias. Estos coeficientes se aplican por unidad de superficie ocupada de sillas y cuando se saque la absorción producida en la sala se preverá el tipo de materiales para revestir y conseguir el tiempo de reverberación estimado.



Escenario

- Suelo

Se utilizará una madera barnizada (de 20 a 25 mm) que irá colocada sobre unas vigas con la máxima separación posible. Las vigas, a su vez, apoyarán sobre los tabiquillos conejeros.

Material	Coeficientes de Absorción					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Madera barnizada sobre vigas	0,15	0,11	0,1	0,07	0,06	0,07

Se trata de un suelo que proporciona una reflexión del sonido, pero al colocar la madera sobre las vigas separadas actúa como un resonador de membrana produciendo una absorción a bajas frecuencias.

Esta solución desde el punto de vista de los conceptos acústicos se producen dos efectos contrarios: por una parte el suelo actúa como un amplificador para los instrumentos que apoyan directamente en éste (violoncelos y contrabajos) y por otro lado, esta disposición del suelo provoca una absorción de bajas frecuencias. De este modo se puede concluir que los músicos prefieren un suelo acústicamente vivo y más rico en armónicos.

- Paredes

Por una parte tenemos las paredes de los lados y por otra la pared posterior del escenario. En las paredes laterales se colocarán difusores QRD realizados con tablero de madera de 20mm de espesor y considerando una cámara de aire media (puesto que la profundidad varía) de 50mm.

Material	Coeficientes de Absorción					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Tablero de Madera de 20mm y cámara de aire de 50mm	0,1	0,11	0,1	0,08	0,08	0,05

Los módulos de QRD diseñados estarán formados por dos difusores: el inferior y de mayor dimensión para la difusión en horizontal (ranuras verticales) y el superior y más pequeño para la difusión en vertical (ranuras horizontales). Su dimensión total es de 3/4,2 x 2,09 x 0,16m (la altura cambia cuando termina el escenario).

Se colocarán 4 en cada lado y para no bloquear los accesos al escenario se diseñarán con un sistema de apertura en aquellos módulos donde coincida una puerta o armario.



Como nota indicar que este modelo de difusor (con pequeñas variantes) también ha sido utilizado en salas tan prestigiosas como la Joseph Meyerhoff Symphony Hall de Baltimore (EE.UU.).

A nivel acústico decir que estos difusores crearán una mayor difusión en horizontal que en vertical porque la geometría rectangular de la sala y su poca altura así lo requieren. Debido a que la relación entre el ancho de sus ranuras y su profundidad es pequeña, y la madera utilizada es poco porosa, la absorción total del módulo QRD no será importante. Respecto a la valoración personal, los que más se beneficiarán de esta difusión serán los músicos, además del público de las primeras filas que también apreciarán una mayor espacialidad del sonido.

En cuanto a la pared posterior del escenario estará realizada con un tablero de madera con cámara en el dorso.

Material	Coeficientes de Absorción					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Tablero de Madera con cámara en el dorso	0,2	0,15	0,15	0,1	0,1	0,1

El tablero tendrá un espesor de 20-25mm y unas dimensiones de 4,10 x 2,70m. Se utilizarán cuatro unidades de estos tableros para cubrir la superficie, dispuestos en forma cóncavoconvexa variando la cámara del dorso hasta una separación de 0,3m respecto la pared.

Esta disposición, además de cubrir estéticamente un pilar visto en el escenario, crea una reflexión del sonido hacia los lados y así impide que el sonido se refleje de forma totalmente paralela hacia el público.

- Techo

Se realizará con el mismo material que la pared posterior del escenario, con tablero de madera con cámara en el dorso (ver coeficientes de absorción en la página anterior).

Se ha demostrado que es la superficie más efectiva para proporcionar las primeras reflexiones y debido a la poca altura libre que hay (5,20m) se ha tomado la decisión de colocar un techo inclinado al 8% “escalonado” en cuatro tramos. Cada tramo tiene como medida longitudinal el ancho del escenario (10,75m) y posee un ancho de 2m pensado para que haya una reflexión que abarque el mayor número de frecuencias, ya que las frecuencias más bajas tienen una longitud de onda mayor que las altas frecuencias y si no fuesen lo bastante anchos los tramos del techo se produciría una coloración tonal.

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



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

A partir de esta tabla y el ancho elegido para los reflectores del techo del escenario (2m) se deduce que las frecuencias situadas por debajo de 200 Hz, aproximadamente, no serán bien reflejadas aunque no debe preocuparnos ya que lo importante es que trabajen de forma óptima a partir de la banda de frecuencias centrada en 500 Hz.

Por el contrario, tampoco es conveniente utilizar reflectores planos de grandes dimensiones ya que puede dar lugar a la aparición de anomalías como la coloración del sonido o el desplazamiento de la fuente sonora.

Sabiendo que el escenario tiene una profundidad de 5,75m el techo se ha diseñado con mayor profundidad que éste (8,36m) para conseguir así una mayor superficie de reflexión.

Platea

- Suelo

En la platea se podrán diferenciar dos suelos: el accesible a todo el público y el que está situado en la planta primera de los laterales, que no será accesible para los espectadores, únicamente para el personal de mantenimiento.

El suelo del patio de butacas estará realizado con un parquet montado sobre rastreles.

Material	Coeficientes de Absorción					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Parqué sobre rastreles	0,05	0,03	0,06	0,09	0,1	0,2

Se ha elegido este material porque tiene una absorción baja y además está acorde con los materiales de la sala, donde predomina la madera. En los pasillos, si la superficie es resbaladiza se podrán utilizar alfombras de pequeño grosor que no produzcan demasiada absorción.

En el caso del suelo de primera planta se utilizará un linóleo de 0,65cm de espesor.

Material	Coeficientes de Absorción					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Linóleo de 0,65cm	0,01	0,01	0,01	0,02	0,2	0,3



Hubiese sido más lógico utilizar el mismo material para ambos suelos, pero varios motivos han propiciado el uso del linóleo: va a ser una superficie no accesible y como tal no tendrá visibilidad, además produce un poco menos de absorción que el parqué y por finalizar, resulta más económico.

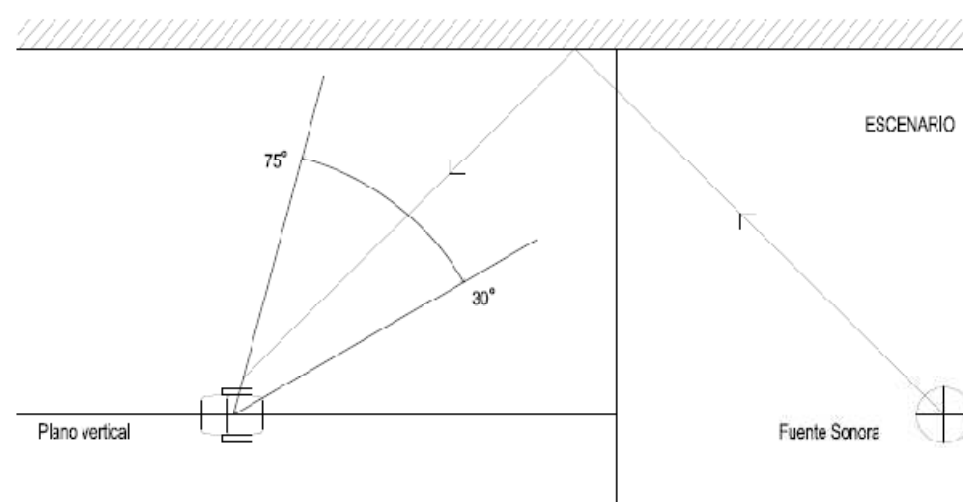
- Paredes

Hasta la altura de la segunda fila de butacas llegan los difusores QRD y a partir de ahí hasta el fondo de la platea, incluido este debido a su pequeña superficie, se utilizará un tablero de madera fijado sólidamente a la pared.

Material	Coeficientes de Absorción					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Tablero de madera fijado sólidamente a la pared	0,04	0,04	0,03	0,03	0,3	0,2

El hecho de que nuestra sala sea rectangular y de pequeñas dimensiones favorece a las primeras reflexiones laterales, por este motivo el material usado en las paredes no es absorbente.

Cualquier superficie de la sala es susceptible de proporcionar primeras reflexiones a alguna zona del público pero ha sido demostrado (Ando) mediante experimentos 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), que son llamadas primeras reflexiones laterales.



Para que sean efectivas, estas reflexiones deben llegar a los espectadores dentro de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo porque si llegaran más tarde se produciría eco en la sala, aunque este hecho no debe preocuparnos en las condiciones de la sala expuesta ya que debido a las pequeñas dimensiones del recinto es imposible que el camino recorrido por el sonido directo y el sonido reflejado supere los 27,6m, que es la máxima distancia para que las reflexiones resulten beneficiosas según la velocidad del sonido (345 m/s). La existencia de una gran cantidad de primeras



reflexiones mejora la claridad musical (C_{80}), el grado de impresión espacial, la textura del sonido y la intimidad acústica.

- Techo

Hay dos techos totalmente diferentes en la platea, el techo difuso, colocado sobre las sillas y el que se encuentra en los laterales de primera planta que es muy absorbente.

El techo difuso está realizado con yeso laminado con y lana de roca.

Material	Coeficientes de Absorción					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Yeso laminado 13+13mm con cámara de aire y lana de 40Kg/m ³	0,1	0,04	0,05	0,05	0,08	0,18

Se ha diseñado con grandes dimensiones y con piezas triangulares que varían su dimensión y ángulo unas respecto a otras con la intención de conseguir una gran difusión de todas las frecuencias.

La existencia de estas irregularidades aumenta el grado de difusión y hace que el sonido sea más envolvente. Ello, a su vez, produce un aumento de la impresión espacial de la sala.

El techo absorbente se realizará con MonoAcoustic TE de espesor 30mm y colocado a una distancia de 200mm del forjado.

Material	Coeficientes de Absorción					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
MonoAcoustic TE 30mm + 200mm de plenum	0,35	0,6	0,9	1	1	1

Se trata de un material muy absorbente, que además de ayudar a rebajar el tiempo de reverberación, absorbe todas aquellas reflexiones que impactan en el techo de los laterales y provocan la cola reverberante.

Ventanas y puertas

Todas las ventanas de la sala llevarán una cortina ligera de algodón de 340 g/m² de gramaje plana a la pared y en función de la ocupación de la sala o de la luz que moleste se correrá o se plegará. Es un elemento que podrá modificar un poco la absorción de la sala.

En cuanto a las puertas de acceso irán revestidas con madera sólida de 5cm de espesor.

A continuación se muestra una tabla con los resultados obtenidos a partir de la fórmula de Sabine y los materiales utilizados en cada paramento. Los cálculos se han realizado para la sala llena, ocupada

al 50% y vacía. El objetivo es que no haya cambios notables en función de la ocupación de la sala. (para una mejor observación ver ANEXO)

AUDITORIO DE MÚSICA

VOLUMEN (m3) 1455

SUPERFICIE (m2)	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	Promedio CTE
Suelo	170,73	8,54	5,12	10,24	15,37	17,07	14,23
Suelo escenario	81,55	9,23	8,77	8,18	4,31	3,89	4,72
Suelo P.1ª	100,32	1,00	1,00	1,00	2,01	2,01	1,87
Techo difusor	183,48	18,35	8,54	8,17	13,08	29,42	9,81
Techo absorbente (1ªP)	110,58	38,70	88,35	99,52	110,58	110,58	108,89
Techo escenario	87,52	17,50	13,13	13,13	8,75	8,75	10,21
Lateral 1ª planta	82,11	1,97	2,22	2,48	3,04	1,58	2,35
Laterales QRD	57,16	5,72	6,29	5,72	4,57	2,86	4,95
Laterales reflectantes	109,70	4,39	4,39	3,29	3,29	2,19	3,29
Fondo platea	11,02	0,44	0,44	0,33	0,33	0,22	0,33
Posterior escenario	71,58	14,31	10,73	10,73	7,16	7,16	8,35
puertas (5)	19,15	0,19	0,98	0,98	0,77	0,77	0,83
ventanas	15,81	0,47	0,82	1,72	2,85	3,75	2,71
Sillas vacías	144,27	80,79	92,33	100,99	103,87	98,10	100,99
Sillas ocupadas	144,27	98,10	108,20	118,30	122,63	124,07	121,67
Sumatorio	1204,75	216,92	232,76	281,74	293,62	335,74	292,01

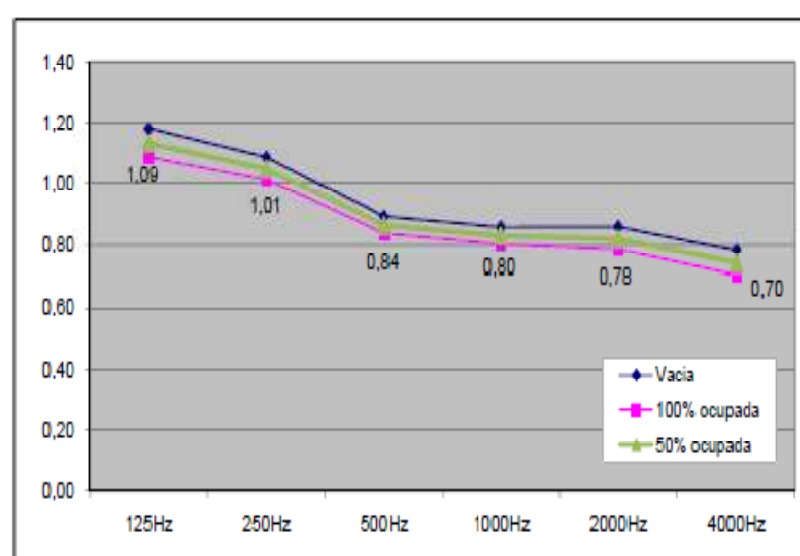
Vacia	Sabine	1,18	1,09	0,89	0,86	0,86	0,78	0,87
50% ocupada	Sabine	1,13	1,05	0,86	0,83	0,82	0,74	0,84
100% ocupada	Sabine	1,09	1,01	0,84	0,80	0,78	0,70	0,81

Calidez	1,28	Rt mid	0,82	LLENA
Brillo	0,91			

Calidez	1,29	Rt mid	0,85	MEDIA
Brillo	0,92			

Calidez	1,30	Rt mid	0,87	VACIA
Brillo	0,94			

MATERIALES	125	250	500	1000	2000	4000
Parqué sobre rastreles	0,05	0,03	0,06	0,09	0,1	0,2
Madera barnizada sobre vigas	0,15	0,11	0,1	0,07	0,08	0,07
Linóleo (0,65 cm)	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
Y. laminado 13+13mm, c. de aire de 200mm y 50mm de lana de 40kg/m3	0,1	0,04	0,05	0,05	0,08	0,18
MonoAcoustic TE 30mm + 200mm de plenum	0,35	0,6	0,9	1	1	1
Tablero de Madera con cámara en el dorso	0,2	0,15	0,15	0,1	0,1	0,1
Yeso, enfucido liso	0,024	0,027	0,03	0,037	0,019	0,034
Tablero Madera de 20 mm y 50 mm de cámara de aire	0,1	0,11	0,1	0,08	0,08	0,05
Tablero Madera fijado sólidamente a la pared	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02
Tablero Madera fijado sólidamente a la pared	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02
Tablero de Madera con cámara en el dorso	0,2	0,15	0,15	0,1	0,1	0,1
Madera sólida, 5 cm de espesor	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
Cortina ligera de algodón de 340 g/m2 de gramaje, plana a la pared	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Butacas(vacias) con porcentaje medio de superficie tapizada	0,56	0,64	0,7	0,72	0,68	0,62
Butacas(ocupadas) con porcentaje medio de superficie tapizada	0,68	0,75	0,82	0,85	0,86	0,86



Se aprecia que la curva tiene un sentido descendiente. El RT más alto en las frecuencias bajas se compensa con el techo de alta difusión diseñado para la sala y en las altas frecuencias se subsana al predominar el revestimiento de madera en todas las paredes de la sala, que ayudará a crear primeras reflexiones laterales.



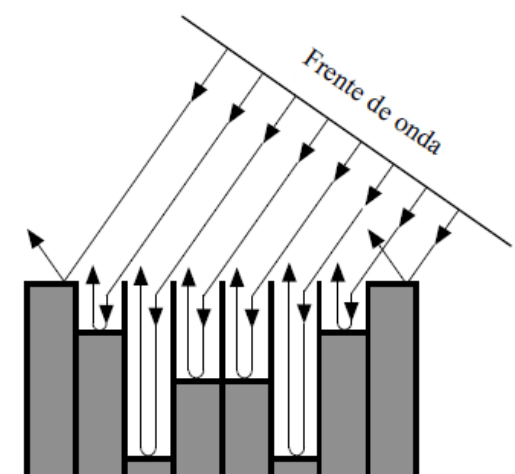
ESTUDIO Y DISEÑO DE UN DIFUSOR UNIDIMENSIONAL QRD.

Continuando con la introducción de materiales acústicos, los difusores unidimensionales QRD 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. 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.

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 respectivas se suman (aumentando o disminuyendo la presión sonora resultante). 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 el fenómeno de *interferencia constructiva*, mientras que si ambas ondas tienen la misma amplitud, pero signos opuestos, la presión resultante es nula, dando lugar a una *interferencia destructiva*.

El hecho que explica esta diferencia de casos extremos se encuentra en la denominada fase de las ondas sonoras. De manera breve, la fase indica el estado de vibración de una onda sonora en un instante cualquiera. En la interferencia constructiva, ambas ondas están en fase (diferencia de fase = 0°), mientras que en la interferencia destructiva, las ondas se encuentran 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 (que varía en cada ranura). En dicho instante, la onda se refleja y viaja en sentido contrario hasta alcanzar nuevamente la abertura 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 las distintas profundidades, la fase de la señal asociada a cada una en el instante de la rerradiación de la energía sonora incidente también será diferente, lo cual dará lugar a un fenómeno de interferencia entre todas las ondas que intervienen. Fig. (31)



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 (expresada bien en términos absolutos -cm- o en términos relativos – adimensional-) que deberá ser lo más uniforme posible para una correcta distribución de la energía reflejada. La secuencia de profundidades (s_n) necesaria se obtiene de la siguiente expresión:



$$s_n = n^2 \bmod p$$

Donde:

p = número primo (3,5,7,11...).

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 pone de manifiesto una de las propiedades más relevantes de este tipo de difusores: la simetría. A continuación se presenta el listado de valores s_n correspondiente a los números primos comprendidos entre $p=3$ y $p=23$ (1 periodo).

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

PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Haciendo uso de varias expresiones matemáticas se puede llegar a diseñar un difusor con las medidas exactas, los márgenes de frecuencias óptimos y grado de difusión requerido dependiendo de nuestras preferencias a la hora de elegir unos datos para obtener unos resultados.

En nuestro caso, como se trata de una sala predefinida, las dimensiones reducidas nos llevan a aprovechar al máximo el espacio y dotar de mayor importancia a los parámetros dimensionales por delante de los acústicos, cosa que no repercute en mermar la sonoridad sino en disminuir aspectos como el grado de difusión hacia la sala o variar la frecuencia máxima o mínima óptimas para las cuales el difusor diseñado ha de trabajar.

1. Objetivos de diseño.

Los objetivos inicialmente establecidos son:

- $f_{\max} = 2.000$ Hz (frecuencia máxima para la cual se desea una óptima difusión).
- $d_n(\max) = 15$ cm (máxima profundidad de las ranuras).
- $f_0 = __?$ (obtención de la mínima frecuencia de diseño f_0 posible).



2. Determinación de la anchura de las ranuras W.

La anchura de las ranuras depende exclusivamente de la f_{\max} a través de la siguiente expresión:

$$W = \frac{c}{2f_{\max}} - T$$

$$W = \frac{345.000}{2 \cdot 2.000} - 4,25 = 82 \text{ mm} \approx \underline{\underline{8,2 \text{ cm}}} \text{ (ranuras verticales)}$$

$$f_{\max} = \frac{345.000}{2 (95 + 4,25)} = \underline{\underline{1738 \text{ Hz}}} \text{ (ranuras horizontales)}$$

Donde:

W = anchura de las ranuras (en mm). En las ranuras horizontales viene determinada según el diseño.

c = 345 m/s (velocidad de propagación del sonido (en mm/s).

T = Espesor de los divisores (en mm).

Se deduce, observando la expresión, que cuanto mayor sea el valor elegido de la frecuencia máxima (f_{\max}) más estrechas deberán ser las ranuras (W). Para una f_{\max} de 2.000 Hz se obtiene un ancho de ranura de 82mm y del mismo modo para una anchura de 88mm se obtendrá una difusión a una frecuencia máxima de 1870 Hz.

En cuanto al valor de T, éste debe ser lo menor posible a fin de no producir una mínima alteración de las propiedades difusoras del elemento, si bien ello no significa que se pueda prescindir de los divisores, ya que son imprescindibles con objeto de obligar a que cada onda sonora recorra la profundidad total de la correspondiente ranura.

En la práctica T debe ser, como mínimo, 15 veces menor que W, aunque a medida que se aumente p se incrementará esta proporción. Así pues, para p= 53 es preciso que T sea 30 veces menor que W para obtener una óptima difusión.

Los valores habituales de T se hallan entre 1,5 y 5 mm. Los materiales a utilizar son el aluminio, cuando los separadores son muy estrechos, y la madera para los separadores más gruesos. Destacar que cuando los separadores son más delgados se producen mayores absorciones a baja frecuencia.

Otra expresión que se desprende de su observación es que la anchura total (ranura + separador) debe ser igual a la mitad de la longitud de onda correspondiente a la máxima frecuencia de difusión:

$$W + T = \frac{c}{2f_{\max}} = \frac{\lambda_{\min}}{2} \longrightarrow \lambda_{\min} = 2 (W + T) = 2 (82 + 4,25) = 172,5 \text{ mm} \approx 17,25 \text{ cm (2.000 Hz)}$$



3. Determinación del número de ranuras por periodo. p

El número de ranuras verticales por periodo será $p = 23$ y en las horizontales $p = 7$.

El motivo de esta elección se detalla a partir de la siguiente expresión, correspondiente a la frecuencia mínima (f_0):

$$f_0 = \frac{sn(\max)}{p} \frac{c}{2dn(\max)}$$

Como en nuestro caso el valor de la máxima profundidad de las ranuras estaba prefijado, $d_n(\max) = 15$ cm, el valor del segundo cociente siempre será constante y por lo tanto, para obtener la frecuencia más baja posible hay que buscar un valor de “p” para que el cociente $sn(\max)/p$ sea mínimo también.

Como aclaración, comentar que a medida que se aumenta el valor de “p” se aumenta el grado de difusión pero también aumenta el valor de $s_n(\max)$, así que el cociente tomará diversos valores que habrá que estudiar.

En esta tabla se aprecia que el resultado del cociente mínimo y por lo tanto la frecuencia f_0 mínima se produce con $p = 7$, pero estos datos tan bajos implican que la difusión del sonido no sea la óptima, tal y como se demuestra en la expresión:

$$p = \frac{2 m(\max) f_{max}}{f_0} \rightarrow m_{max} = \frac{p f_0}{2 f_{max}}$$

$$m_{max} = \frac{7 \cdot 657(*)}{2 \cdot 1738} = \mathbf{1,32} \text{ (menor difusión)}$$

$$m_{max'} = \frac{23 \cdot 900(*)}{2 \cdot 2.000} = \mathbf{5,18} \text{ (mayor difusión)}$$

Se observa que el valor del orden o grado de difusión (m_{max}) es directamente proporcional al producto entre p y f_0 . Por este motivo se buscará otro valor de p, en detrimento de la f_0 , para crear un grado de difusión un poco mayor. La tabla indica que para un valor de $p = 23$ la curva tiene un mínimo relativo, la cual cosa demuestra que se trata del valor óptimo que estábamos buscando.

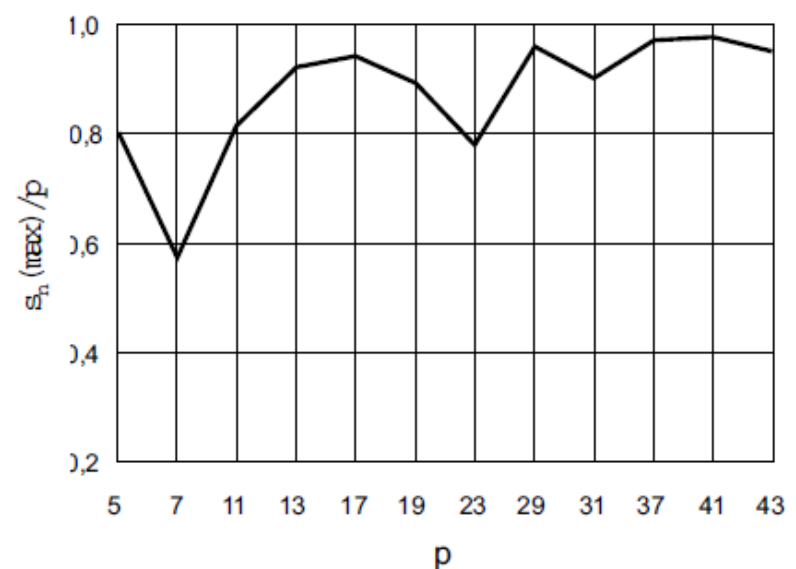


Fig. (32)

$$f_0 = \frac{sn(\max)}{p} \frac{c}{2 dn(\max)} \rightarrow f_0 = \frac{18 \cdot 345.000}{23 \cdot 2 \cdot 150} = \underline{\underline{900 \text{ Hz}}} (*)$$

$$\rightarrow f_{0'} = \frac{4 \cdot 345.000}{7 \cdot 2 \cdot 150} = \underline{\underline{657 \text{ Hz}}} (*)$$



RESUMEN DE PARÁMETROS OBTENIDOS		
TODO	d_n (máxima profundidad de ranuras)	150 mm
	T (espesor de los divisores)	4,25 mm
RANURAS VERTICALES	f_{max} (frecuencia máxima)	2.000 Hz
	W (anchura de ranuras)	82 mm
	p (número de ranuras)	23
	f_0 (frecuencia mínima)	900 Hz
	m_{max} (índice de difusión)	5,18
RANURAS HORIZONTALES	f_{max} (frecuencia máxima)	1738 Hz
	W (anchura de ranuras)	95 mm
	p (número de ranuras)	7
	f_0 (frecuencia mínima)	657 Hz
	m_{max} (índice de difusión)	1,32

4. Difusor diseñado para nuestra sala.

Una vez estudiadas todas las posibles variantes que pueden tomar las partes de un difusor y considerando las dimensiones donde queremos colocar el difusor se ha optado por diseñar uno que dispondrá de dos planos de difusión, aunque en el plano horizontal es donde se pretende crear una mayor difusión, por el hecho de que la sala tiene una forma rectangular donde predomina una mayor profundidad sobre la altura.

La dimensión del módulo de difusor QRD total es de 2,09 m de ancho por 3,00 m de altura; escogiendo la parte inferior y de mayor dimensión (2,09 x 2,30 m) para la difusión en horizontal, y la parte superior y de menor dimensión (2,09 x 0,70 m) para la difusión en vertical. Puesto que se requiere un mayor grado de difusión (m_{max}) en el plano horizontal, mayor deberá ser el número de ranuras por periodo (p), así pues, la parte inferior del módulo posee 23 ranuras verticales ($p=23$) y la parte superior un total de 7 ranuras horizontales ($p=7$).

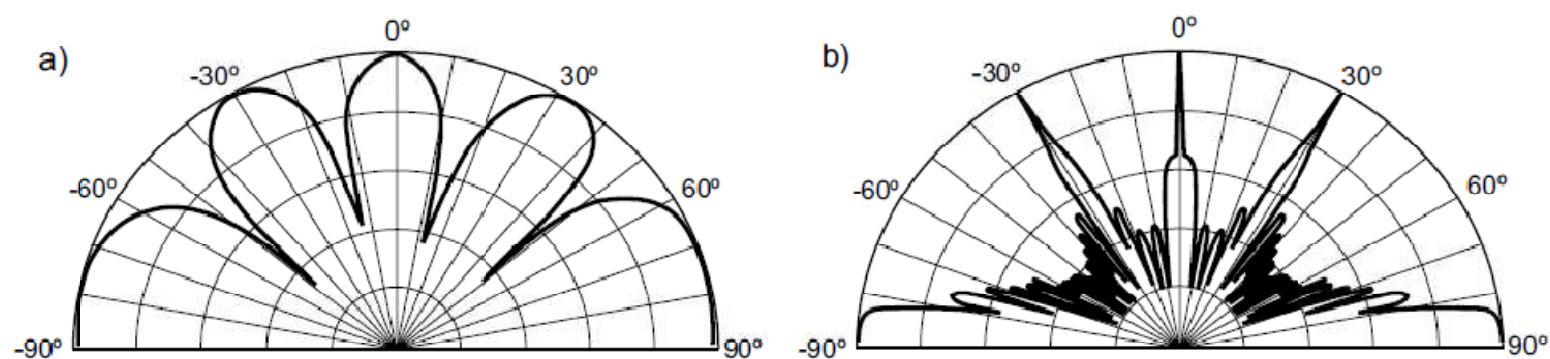


El resultado de elegir diferentes números primos (7 y 23) para la difusión del sonido también repercute en la difusión óptima de la frecuencia mínima (f_0) siendo esta de 900 Hz para la difusión en horizontal ($p=23$) y 657 Hz para la difusión en el plano vertical ($p=7$).

5. Influencia del número de periodos en el grado de difusión del sonido.

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 será 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.

A modo de ejemplo ilustrativo, para aclarar lo dicho en el párrafo anterior, 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. (33)



En nuestra sala se colocarán 4 módulos de los difusores diseñados en cada uno de los dos lados del escenario. Todos ellos estarán dispuestos desde el fondo del escenario y sobresaldrán hasta la platea para dispersar el sonido nada más la orquesta interprete las piezas musicales. (ver plano).

31, 32, 33. Imágenes extraídas del libro “Diseño acústico de espacios arquitectónicos”



SALA DE CONCIERTOS. CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES

El proyecto técnico realizado ha sido una experiencia gratificante. Antes de empezar a trabajar he necesitado la lectura y estudio de libros para introducirme en esta temática del sonido y formarme en el acondicionamiento acústico, ya que hasta el momento no tenía una familiaridad con algunos parámetros como la frecuencia, el nivel de presión sonora, difusión del sonido, conceptos como la amplitud, la espacialidad, etc.

Hasta que no se obtiene un poco de flexibilidad con el acondicionamiento y sus parámetros da la sensación de que no consigues cuadrar todos los puntos que engloban la calidad acústica de la sala, además se trata de un proceso en el que algunas partes se calculan directamente o mediante fórmulas (como las sillas, el tiempo de reverberación o las visuales), pero en la mayoría de conceptos acústicos hay que presuponer unos resultados e ir tomando decisiones respecto la forma y colocación de los materiales. En realidad los resultados acústicos no se podrán conocer hasta que la sala no esté terminada y con la ayuda de un sonómetro.

Desde que empecé con el trabajo he realizado algunos cambios importantes, aconsejado por mi Director académico, Don Ignacio Enrique Guillén Guillamón, debido a la distribución previa que había junto con las soluciones acústicas. Estos son los cambios más destacables:

- La situación del escenario iba en el lado opuesto por sus características, pero varias decisiones llevaron a cambiar su ubicación: las ventanas y la pendiente de la platea con los accesos a los recintos principalmente.
- La difusión del techo era más simple y muy regular. Se cambió para producir una mayor difusión a todas las frecuencias.
- La pared del fondo en forma de abanico invertido.
- La escalera del escenario se quitó del recinto principal porque reducía el espacio y tenía un encuentro impropio con los niveles de las tarimas.
- El suelo de la platea era de linóleo, pero como las paredes estaban revestidas de madera, se cambió por un parquet sobre rastreles para dar una mayor homogeneidad.

Con todos estos cambios, la sala modificaba su volumen y superficies con lo que afectaba a los tiempos de reverberación y a la disposición de los materiales.



El hecho de colocar el escenario en un lado implica que todo el público tenga unas visuales parecidas y en cuanto a la llegada del sonido, las primeras filas recibirán mejor el sonido directo que en las últimas, que se beneficiarán de las primeras reflexiones laterales y del techo. Aunque las pequeñas dimensiones de la sala conllevan a una gran sonoridad y amplitud.

Las dimensiones de la sala junto con la gran superficie de sillas producen bastante absorción y como consecuencia el revestimiento principal de la sala es la madera para producir la reflexión del sonido.



PARTE II:

DOCUMENTACIÓN GRÁFICA



PARTE III: ANEXOS

Mono® Acoustic TE

Mono® Acoustic TE supone una innovación revolucionaria, al asociar la elegancia de un techo totalmente continuo sin estructura visible ni perforaciones, a un rendimiento acústico de excepción.

Mono® Acoustic TE

Mono® Acoustic TE supone una innovación revolucionaria, al asociar la elegancia de un techo totalmente continuo, sin estructura visible ni perforaciones, a un rendimiento acústico de excepción.

El incomparable sistema Mono Acoustic TE es un techo continuo con elevadas propiedades acústicas. Totalmente innovador, está patentado y fabricado con lana de roca de la mejor calidad, lo que le otorga un óptimo rendimiento técnico.

Mono Acoustic TE se pone al servicio de la libre imaginación del diseñador, gracias a su gran flexibilidad de instalación. Inclinado, plano, curvado, blanco o coloreado al gusto de cada uno, permite, entre otras posibilidades, la creación de islas acústicas o incluso el tratamiento de las paredes verticales, además de integrar fácilmente los elementos técnicos habituales. Es polivalente y se adapta a todos los proyectos, ya sean nuevos o de rehabilitación.

Descripción:

Los paneles acústicos de lana de roca (30 mm) están provistos de un velo de color blanco en la cara visible y de un contravelo de elevado rendimiento en la cara trasera. Los paneles se fijan mecánicamente sobre la estructura y, a continuación, se aplica una capa con uniones y una capa de acabado (en blanco o en color).

Montaje:

Mono Acoustic TE puede instalarse sobre una estructura estándar o bien directamente sobre un techo existente. Véase la ficha DTA nº 9/07 853 y la guía de instalación.

GAMA

Cantos	Dimensiones modulares (mm)	Peso (kg/m²)	Sistemas de instalación
TE	1200 x 1200 x 30	4,5	Sistema Mono Acoustic TE

Para este producto, las dimensiones modulares corresponden a dimensiones exactas.





AISLAMIENTO ACÚSTICO

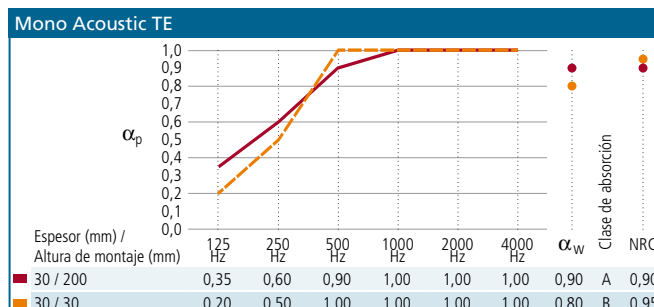
El índice de atenuación acústica de Mono Acoustic TE se ha medido en laboratorio certificado conforme a la norma ISO 140-3 y ha obtenido el rendimiento siguiente: $R_w (C; C_{tr}) = 22 (-2; -3)$ dB.



ABSORCIÓN ACÚSTICA

La absorción acústica se ha medido conforme con la norma ISO 354.

Los diversos datos relacionados con la absorción acústica (α_p , α_w y clase de absorción) se han calculado en relación con la norma ISO 11654.



PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS

Generalidades : Las placas de techo Rockfon se componen básicamente de lana de roca. La lana de roca es un material incombustible, cuyo punto de fusión sobrepasa los 1.000°C.

Reacción al fuego : Euroclase A2-s1,d0 conforme a la norma EN 13501-1.



RESISTENCIA A LA HUMEDAD Y ESTABILIDAD DIMENSIONAL (RESISTENCIA A LA FLEXIÓN)

Los techos Rockfon son dimensionalmente estables incluso en condiciones de humedad de hasta el 100%. Pueden montarse en condiciones de temperatura de 0°C a 40°C. No precisan ningún periodo de aclimatación.

El techo Mono Acoustic TE resiste los ambientes húmedos, como los habituales en las piscinas (de hasta un 100% de humedad relativa en atmósfera clorada). Sin embargo, conviene evitar las salpicaduras directas de agua. En los entornos con riesgo de corrosión (piscinas), los componentes de la estructura y los elementos de suspensión deben ser anticorrosivos y el plénum debe estar suficientemente ventilado.



REFLEXIÓN DE LA LUZ

Blanco : 72% de reflexión de la luz conforme a la norma DIN 5036-3.



CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Los productos de un espesor superior o igual a 30 mm se han medido según la norma EN 12667 y han obtenido el valor: $\lambda_D = 37$ mW/mK.

Resistencia térmica : $R = 0,80$ m²·K/W.



HIGIENE

La lana de roca no contiene ningún elemento que favorezca el desarrollo de microorganismos.



MANTENIMIENTO

El techo Mono Acoustic TE es antiestático. La superficie puede aspirarse a baja potencia y con la ayuda de un cepillo suave. No debe limpiarse nunca con agua ni frotarse con un trapo húmedo.



REPARACIÓN

Para renovar o reparar la superficie, puede pulverizarse una nueva capa de acabado Mono Acoustic. Potencia de pulverización recomendada: 0,3 kg/m² (húmeda). Esta operación puede influir ligeramente en el nivel de absorción acústica. Para más información, consulte la guía técnica Mono Acoustic TE.



MEDIO AMBIENTE

Una selección representativa de techos Rockfon posee la etiqueta "Indoor Climate" danesa y finlandesa (M1) que evalúan la inocuidad de los productos de construcción en la calidad del aire interior.

Mono Acoustic TE es reciclable. La lana de roca posee la clasificación EUEB.

ACTIVA TU TECHO

En Rockfon® desarrollamos soluciones inteligentes para techos, que abordan activamente diversos problemas importantes de los edificios modernos y los proyectos de reforma.

Los productos Rockfon destacan por su diseño, estética y facilidad de instalación, factores a los que se suman características tan decisivas como una resistencia al fuego y una acústica excelentes.

Estas características sitúan nuestras soluciones para techos entre las más eficaces, rentables y rápidas del actual mercado de interiores.

La amplia gama de soluciones Rockfon para techos garantiza a nuestros clientes la aportación activa de un valor añadido en el proceso de construcción, al permitirles crear unos ambientes interiores inmejorables.

Es por ello que decimos: "ACTIVA TU TECHO".

ROCKWOOL PENINSULAR S.A.U. - ROCKFON

C/ Bruc 50, 3º 3ª
08010 Barcelona

Tel. : +34 93 318 90 28
Fax : +34 93 317 89 66
www.rockfon.es
e-mail : info@rockwool.es

Todos los códigos de color mencionados se basan en la NCS – Natural Color System®, propiedad y uso bajo la licencia de color NCS AB, Estocolmo 2010.

Documento no contractual. Sujeto a modificaciones sin previo aviso. Créditos fotos: Rockfon.



PARTE IV: BIBLIOGRAFÍA



BIBLIOGRAFIA

Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Antoni Carrión Isbert

Auditorium acoustics and architectural design. Michael Barron

Guía acústica de la construcción. Fco. Javier Rodríguez Rodríguez, Javier de la Puente Crespo

Acústica arquitectónica y urbanística. Fco. Javier Sancho Vendrell, Jaime Llinares Galiana, Ana Llopis Reyna.

Guía acústica de la construcción. Fco. Javier Rodríguez Rodríguez, Javier de la Puente Crespo

Acústica arquitectónica. Manuel Recuero

Apuntes de Acústica arquitectónica de la Universidad Politécnica de Valencia.

Páginas WEB:

<http://www.eumus.edu.uy/eme/cursos/acustica/apuntes/cap04.pdf>

http://es.wikipedia.org/wiki/Ac%C3%BAstica_arquitect%C3%B3nica

<http://www.duiops.net/hifi/cine-en-casa-introduccionacondicionamiento.html>

http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_02_03/Acustica_arquitectonica/practica/MATERIALES.HTM