

# **Guía para el diseño de Auditorios**

**Curso de Acondicionamiento Acústico**

**Facultad de Arquitectura**

**Universidad de la República**

## **Introducción**

Los auditorios se construyen para satisfacer necesidades muy importantes para el relacionamiento de los seres humanos:

- 1) Necesidad de comunicación.
- 2) Necesidad de expresión artística (comunicación de la creación artística).

La existencia del fenómeno sonoro requiere la existencia de 3 elementos asociados que llamamos cadena acústica.

FUENTE	emisión
MEDIO	propagación
RECEPTOR	audición

El acondicionamiento acústico procura dar condiciones favorables a todos los elementos de la cadena acústica.

## **Otros aspectos del problema**

Conviene recordar que debe tenerse en cuenta para el diseño de un auditorio, otros aspectos no acústicos, de carácter socio–culturales, tales como: la tradición artística, el acceso de nuevas capas sociales a la cultura, etc.

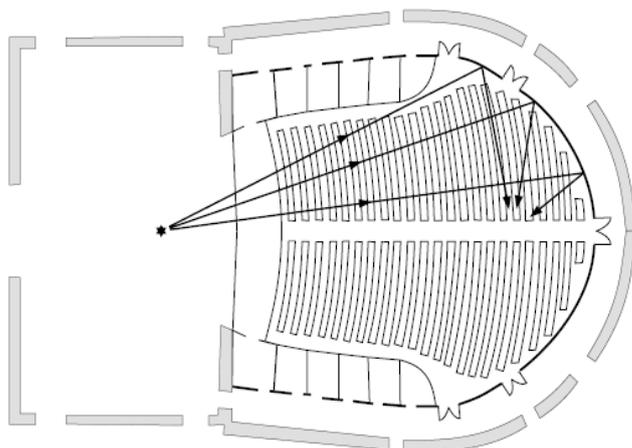
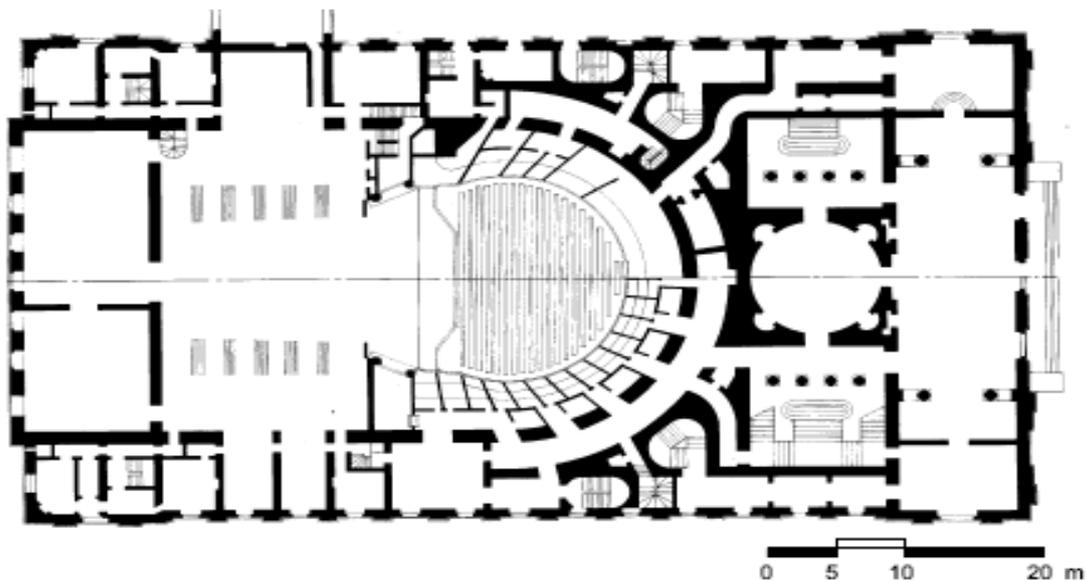
También es importante considerar que, a lo largo de la civilización existe una correspondencia entre la creación artística (composición musical), y los espacios para los cuales han sido creados.

## Aspectos históricos

La experiencia de la “caverna” para el hombre primitivo, le permitió recibir una nueva experiencia, al escuchar los sonidos producidos por él, encontrando posiblemente una fuente de recreación y expresión nueva.

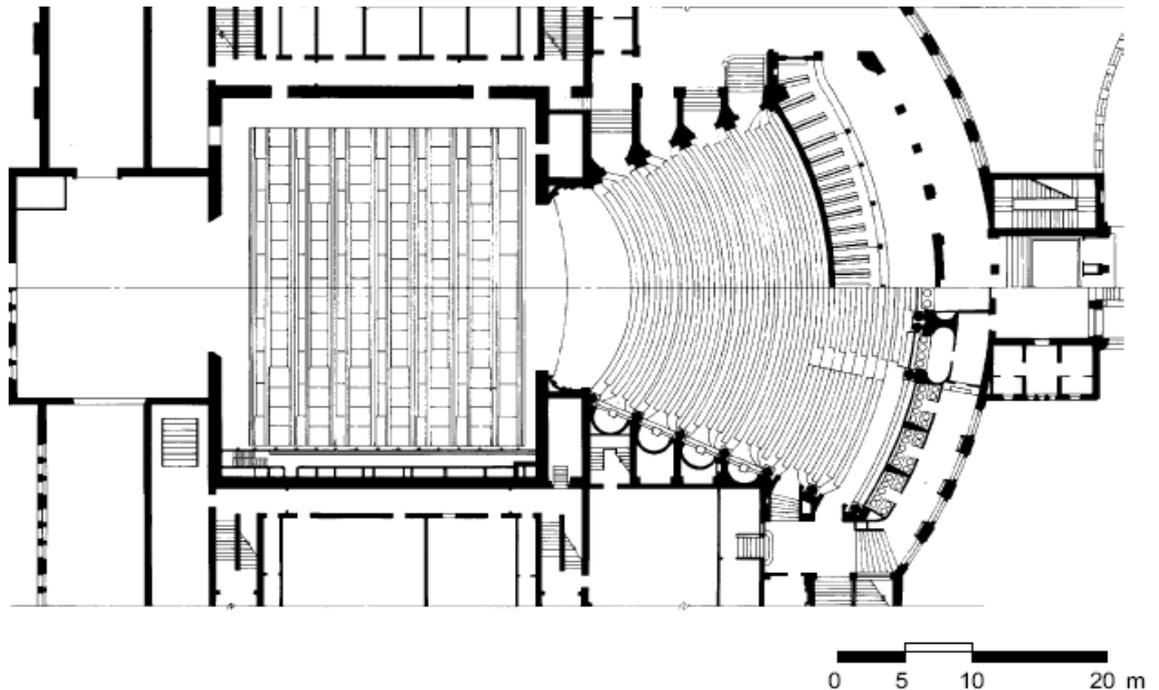
La música religiosa en la antigüedad y Edad Media, se adaptó a los espacios de los templos, en general muy reverberantes por sus dimensiones y materiales (piedra), obteniéndose composiciones como las *salmodias* y el *canto gregoriano* que por su llaneza, tienden a adaptarse a estas condiciones.

La Ópera y el Bel Canto, prodigan y exaltan la proeza del cantante (virtuosismo), que es posible realizar en los teatros en forma de herradura, a la italiana. En 1637 el primer teatro de Venecia, y en 1780 el teatro Alla Scala de Milán.



Una actitud distinta plantea Wagner en el teatro de Bayruth, (forma de foso), donde propone una sala para su música.

Esto es coincidente con la tendencia actual de libertad absoluta, auditorios para grandes masas.



### **Tendencia actual**

En la actualidad el diseño de distintos tipos de auditorio (teatros, salas de conferencia, aulas, etc.) se ha convertido en un problema complejo en la práctica arquitectónica contemporánea

Es necesario integrar variados (e incluso conflictivos) requerimientos: estéticos, funcionales, técnicos, artísticos y económicos.

Decisiones de carácter arquitectónico afectan las condiciones auditivas de un auditorio:

forma

dimensiones

volumen

disposición y tratamiento de las distintas superficies

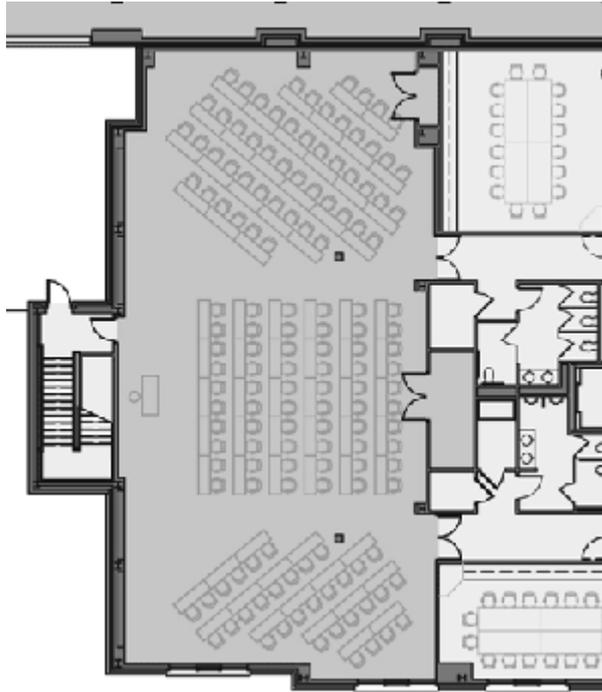
equipamiento interior y distribución de las butacas

volumen de audiencia



### **Auditorio multipropósito**

Un mismo espacio permite su utilización por distintos programas, la capacidad del espacio puede ser ajustada a necesidades específicas del momento.



## Requisitos acústicos

Se debe asegurar un **nivel sonoro adecuado** en todo sector del auditorio, particularmente en los asientos más remotos.

Se debe lograr una **distribución uniforme** de la **energía sonora** dentro del recinto.

Cuando se carece de refuerzo electro acústico es recomendable no sobrepasar los siguientes valores, según fuentes.

<b>Fuente</b>	<b>Volumen</b>	<b>N° de espectadores</b>
Orador medio -----	3.000 m <sup>3</sup> -----	970
Orador entrenado -----	6.000 “ -----	1.900
Cantante solista -----	10.000 “ -----	1.750
Orquesta Sinfónica -----	20.000 “ -----	2.570
Orq. y Masa Coral -----	50.000 “ -----	6.25

El auditorio debe proveer **óptimas características reverberantes** de manera de favorecer la recepción sonora por parte de la audiencia y el rendimiento del orador

El local debe encontrarse **libre de defectos acústicos** como ser ecos, ecos palpitantes, reflexiones tardías, concentraciones sonoras, sombras acústicas, resonancias, etc.

**Ruidos y vibraciones** que pudieren interferir con la audición u ejecución del material sonoro deben ser **excluidos o suficientemente reducidos** en todo sector del auditorio.

#### **Nivel sonoro adecuado**

La dificultad para lograr un nivel sonoro adecuado (especialmente en medianos y grandes auditorios) se debe a:

Perdida de energía que sufren las ondas sonoras en su propagación

Excesiva absorción ofrecida por la audiencia y contenido del local.

Se puede lograr un adecuado nivel sonoro reduciendo las pérdidas de energía sonora de las siguientes maneras:

El auditorio debe proyectarse de manera que **fuentes sonora y audiencia** se encuentren **lo más cerca posible**, reduciendo así la distancia a recorrer por las ondas sonoras. en grandes auditorios el uso de plateas elevadas (balcones) permite acercar un mayor número de butacas a la fuente.

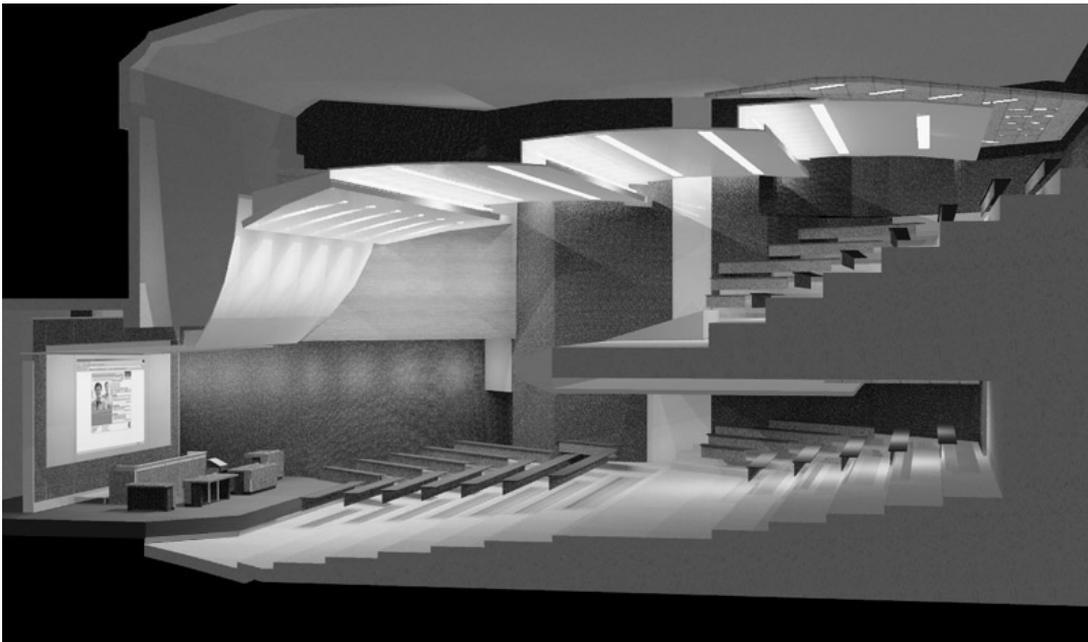
Se debe **eleva la fuente sonora** tanto como sea viable de manera de asegurar la libre propagación de las ondas sonoras directas a cada oyente las ondas sonoras directas son aquellas que se propagan desde la fuente sin considerar el fenómeno de reflexión.

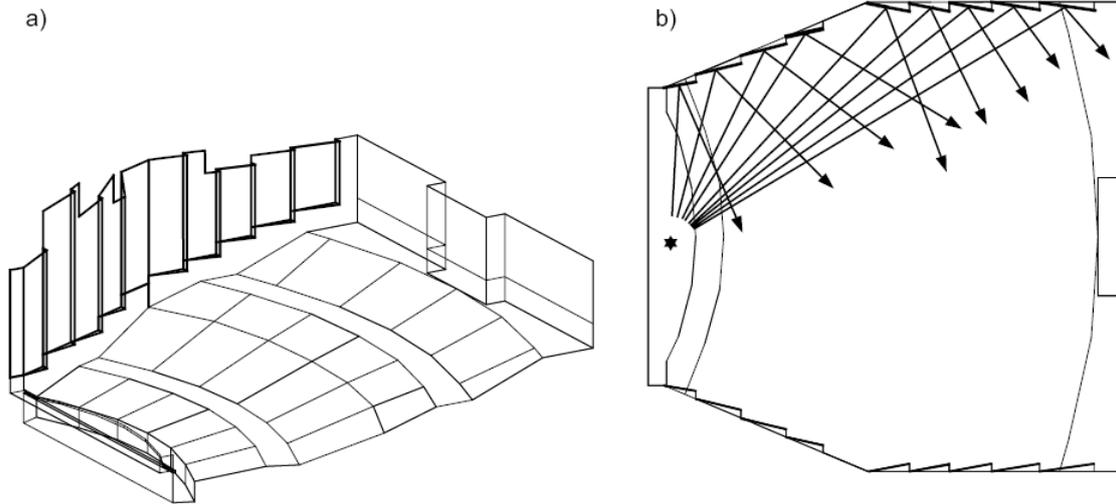
El piso sobre el que se ubican las butacas debe presentar una **pendiente apropiada** debido a que el sonido es mas fácilmente absorbido por la audiencia cuando se propaga de manera rasante, como regla general, y

teniendo en cuenta la seguridad, la pendiente a lo largo de los **pasillos** debería ser **no mayor al 12%**, incrementándose hasta un máximo de **35% en el área de audiencia**

La **fente sonora** debe ser cercana y profusamente **rodeada de superficies reflejantes** de manera de proporcionar energía sonora adicional hacia toda porción de la audiencia, en especial los asientos más remotos. debe recordarse que la respuesta de las **superficies reflejantes** dependerá de las longitudes de onda de las ondas sonoras incidentes.

El ángulo de las **superficies reflejantes** se establece de acuerdo a las leyes de reflexión del sonido y resulta esencial el buen uso del cielorraso y cerramientos laterales para la provisión de la mayor cantidad de primeras reflexiones (beneficiosas), el cielorraso y la parte frontal de las paredes laterales del auditorio constituyen superficies adecuadas para la ubicación de reflectores acústicos



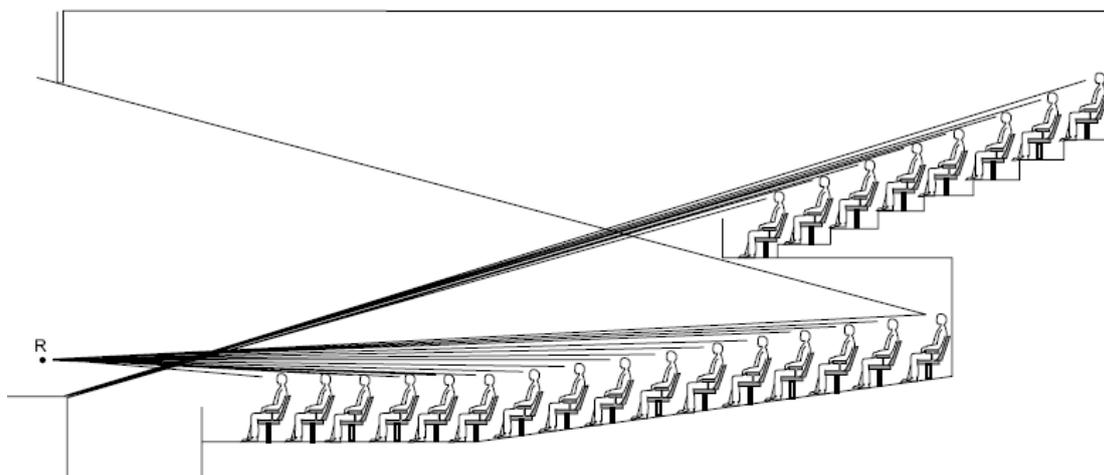


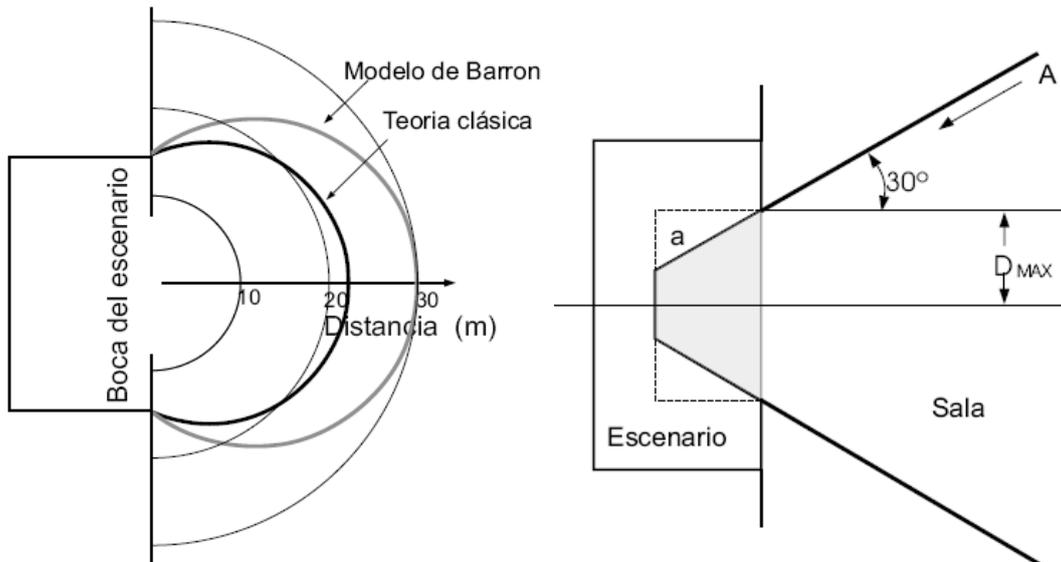
El **área y volumen del auditorio** debe mantenerse en un mínimo razonable, reduciendo así la distancia que el sonido directo y reflejado deben recorrer.

- palabra hablada ..... 3.1 m<sup>3</sup>
- sala de opera ..... 5.7 m<sup>3</sup>
- auditorios multi-uso ..... 7.1 m<sup>3</sup>
- salas de cine ..... 3.5 m<sup>3</sup>

Se debe **evitar** (particularmente en cercanías a la fuente sonora) el **paralelismo entre superficies reflejantes opuestas** (vertical u horizontalmente) de forma de minimizar reflexiones indeseadas hacia la fuente.

El **área de audiencia** debe ocupar los sectores más favorables desde el punto de vista auditivo y visual. se deben evitar las áreas de audiencia excesivamente anchas.





no es aconsejable la ubicación de pasillos a lo largo del eje longitudinal, donde las condiciones de visión y audición son las más favorables.

Las medidas hasta aquí enumeradas permiten mejorar (a veces de manera sorprendente) el nivel sonoro en pequeños y medianos auditorios, pero no realizar milagros.

El primer paso en el logro de un adecuado nivel sonoro debe venir del orador, el cual debe hablar fuerte y claro, con una articulación silábica lo más clara y llana posible.

No puede lograrse un adecuado nivel sonoro si el sonido no fue apropiadamente emitido por la fuente.



## **Difusión uniforme del sonido**

Existen dos aspectos muy importantes que deben ser considerados a efectos de lograr una buena difusión del sonido en un auditorio:

La profusa aplicación de irregularidades superficiales de tamaño adecuado

La distribución aleatoria de material absorbente o la aplicación alternada de tratamientos acústicos reflejantes y absorbentes

Por razones económicas y estéticas, en especial en pequeñas salas, la aplicación de irregularidades superficiales resulta muchas veces dificultosa.

La instalación de un considerable número de irregularidades superficiales en un recinto con excesivo tiempo de reverberación genera asimismo una mejora en las condiciones de audición.

Un auditorio debería reaccionar frente a las señales de interés como un instrumento musical lo haría, realzando y prolongando el sonido original.

Esta prolongación del sonido como resultado de sucesivas reflexiones en un recinto cerrado una vez que ha cesado la emisión de la fuente es lo que llamamos reverberación.

Las características reverberantes óptimas de una sala, de acuerdo a su volumen y función, implican:

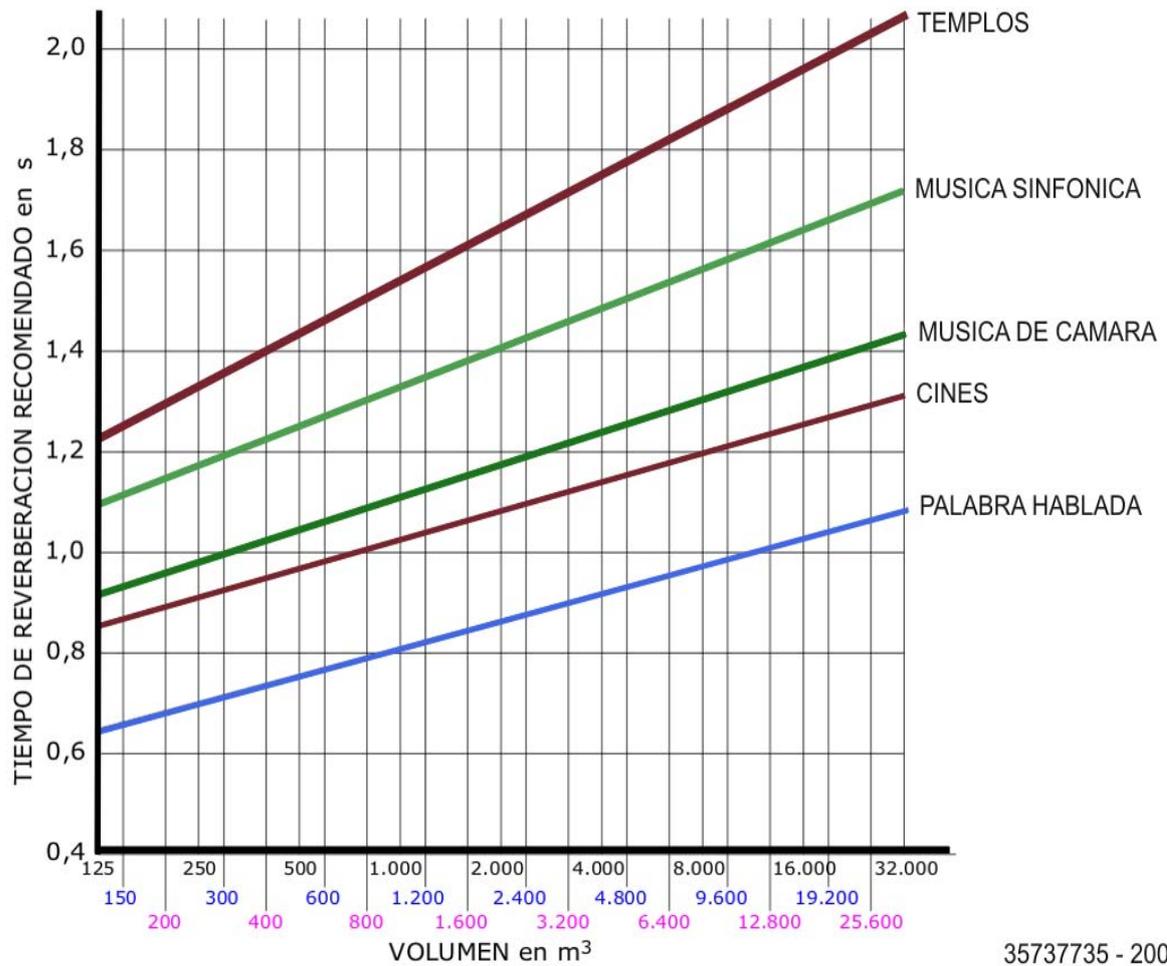
Adecuada relación T60 tiempo de reverberación vs. frecuencia

Adecuada relación entre el sonido directo (L0) y reflejado (Lr) que llega a la audiencia.

Óptimo crecimiento y decaimiento del sonido

El tiempo óptimo de reverberación puede representarse por una serie de curvas que indican los valores ideales en función del destino y volumen de la sala en cuestión

El siguiente cuadro muestra los tiempos óptimos de reverberación de distintos tipos de auditorios en función de su volumen según recomendaciones de distintos autores.



35737735 - 2009

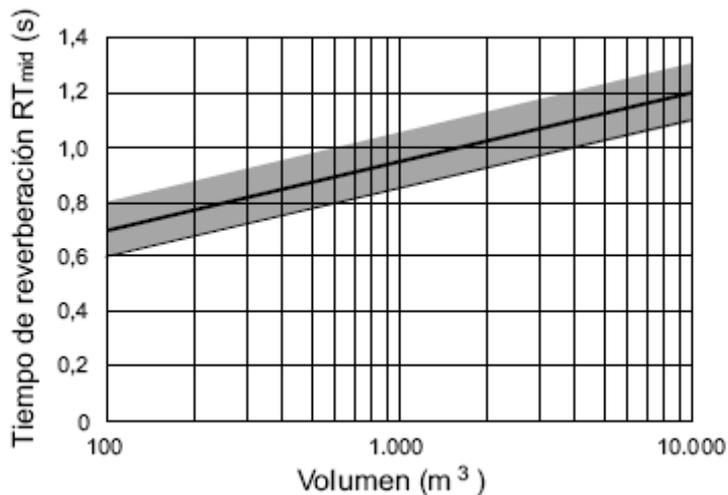
Variaciones excesivas del tiempo de reverberación fuera del rango de frecuencias medias genera condiciones insatisfactorias de audición, siendo recomendable una curva plana más allá de los 500 Hz

Música: se recomienda una curva cuyo valor en 125 Hz sea 1,5 veces mayor al valor en 500 Hz

Palabra hablada: la curva debe permanecer plana hasta la banda de 125 Hz.

Para auditorios multipropósito, por debajo de los 500 Hz. la curva T60 vs. frecuencia puede variar dentro de los límites antes descritos.

Desviaciones del orden del 5 al 10% del valor óptimo de tiempo de reverberación son considerados como aceptables, sobretodo en el caso de auditorios con un alto grado de difusión sonora.



el control de la reverberación consistirá en establecer la absorción total del recinto de manera de lograr el tiempo de reverberación previamente seleccionado

$$A_t (\text{Sab}) = a_i \cdot S_i + A_e + A_a$$

$A_t$  = absorción total de la sala

$a_i$  = coeficiente de absorción del material  $i$

$S_i$  = superficie total del material  $i$

$A_e$  = absorción de espectadores o audiencia

$A_a$  = absorción del aire

Para un cálculo simplificado del tiempo de reverberación de salas de tamaño medio y económica aplicación de materiales absorbentes se puede utilizar la siguiente fórmula.

$$T_{60} = 0,16 \cdot V \cdot A_t$$

donde:

$T_{60}$  = tiempo de reverberación en segundos

$V$  = volumen del recinto en  $m^3$

$A_t$  = absorción total del recinto en Sabines

valores de m

h.relativa	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
20	0.001	0.005	0.020	0.060
30	0.001	0.003	0.013	0.046
40	0.001	0.003	0.009	0.035
50	0.001	0.002	0.007	0.028
60	0.001	0.002	0.006	0.023
70	0.001	0.002	0.005	0.020

para salas se mayor volumen se introduce la siguiente corrección:

$$T60 = 0,16 \cdot V \cdot At + 4m \cdot V$$

donde:

*T60 = tiempo de reverberación (s)*

*V = volumen del recinto en m<sup>3</sup>*

*At = absorción total del recinto (Sab)*

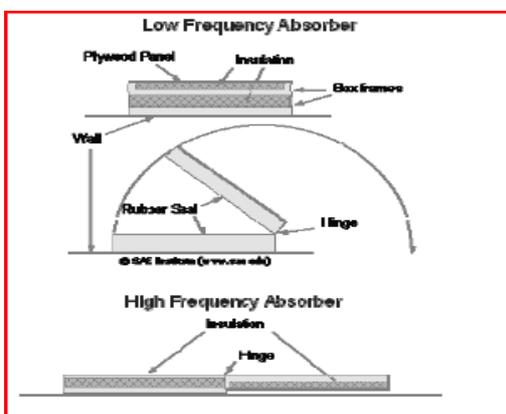
*m = parámetro en función de la humedad relativa*

De la fórmula se desprende:

A mayor volumen, mayor tiempo de reverberación

A medida que aumentamos la absorción de la sala disminuye el tiempo de reverberación

Es posible variar el tiempo de reverberación de un mismo auditorio al incrementar o disminuir su volumen (por ejemplo, subiendo o bajando un cielorraso móvil) o a través de la utilización de absorbentes variables



Para la elección de terminaciones se debe tener en cuenta:

Coeficiente de absorción en frecuencias representativas

Apariencia (tamaño, juntas, colores, texturas)

Resistencia al fuego e inflamabilidad

Costos de instalación

Dificultad de instalación

Durabilidad (resistencia al impacto, a la abrasión, etc.)

Para la elección de terminaciones se debe tener cuenta:

Coeficiente de reflexión luminosa

Mantenimiento, limpieza, efecto de la redecoración en las características de absorción y costo de mantenimiento

Condiciones de trabajo (temperatura, humedad durante la instalación, puesta en servicio)

Integración de los elementos arquitectónicos (puertas, ventanas, instalaciones) en el acabado acústico

Peso y densidad

Resistencia a la humedad y condensación en condiciones de servicio

Posibilidad de acceso a espacios sobre cielorrasos suspendidos

Coeficiente de aislación térmica

Posibilidad de sustitución

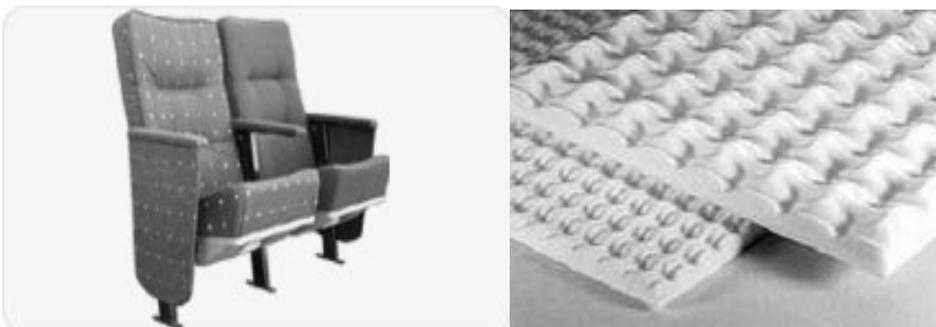
Como regla general, los materiales absorbentes deben instalarse sobre aquellas superficies o cerramientos del auditorio que se encuentran propensas a producir defectos acústicos

El tratamiento acústico absorbente debe ocupar:

pared posterior (opuesta a la fuente)

los sectores mas alejados de los cerramientos laterales

a lo largo del perímetro del cielorraso



SUPERFICIE	MATERIAL
Suelo de platea, palcos y anfiteatro	Sillas con un bajo porcentaje de superficie tapizada
Paredes laterales y posteriores Superficie en diente de sierra bajo el anfiteatro (figura 4.45) Paredes colaterales a la boca del escenario Paredes del foso de orquesta Reflectores suspendidos del techo (figura 4.45)	Tablero de madera lisa de 12,5 mm de espesor y 14 Kg/m <sup>2</sup> de densidad
Falso techo (figura 4.45) Superficie sobre la boca del escenario	Panel de madera de 12,5 mm de espesor y 14 Kg/m <sup>2</sup> de densidad, perforado en un 5% mediante agujeros de 5 mm de diámetro separados 20 mm, montado con cámara de aire $\geq 200$ mm rellena de lana de roca de 40 mm y 70 Kg/m <sup>3</sup>
Suelo del foso de orquesta	Madera
Ventana sala de control	Cristal
Paredes laterales y techo de los palcos	Yeso enlucido
Pared posterior de los palcos	Cortinas fruncidas al 180% y de 0,45 Kg/m <sup>2</sup> de densidad

## Eliminación de defectos acústicos

Además de proveer aquellos atributos acústicos positivos, como nivel sonoro adecuado, distribución uniforme de la energía sonora y óptimo tiempo de reverberación; resulta esencial eliminar los potenciales defectos acústicos de la sala.

A continuación se describen los defectos acústicos más comunes, los cuales pueden deteriorar o incluso destruir condiciones acústicas que de otro modo hubiesen resultado adecuadas.

**Eco:** el eco constituye quizás el defecto acústico más serio en una sala. Este es percibido cuando el sonido reflejado por cualquiera de las superficies o cerramientos posee el suficiente nivel y retardo para ser percibido como un sonido distinto al proveniente de la fuente de forma directa.

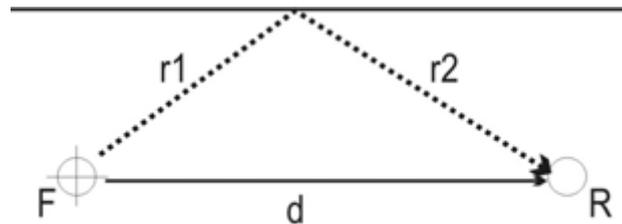
El eco ocurre para intervalos entre la percepción del sonido directo y el reflejado originados por una misma fuente mayores a:

**0,04 s (palabra hablada)**

**0,1 s (música)**

dada la velocidad de propagación del sonido en el aire (345 m/s), los intervalos críticos antes especificados corresponden a diferencias entre recorridos del orden:

### 14 m (palabra hablada)



### 34 m (música)

las primeras reflexiones deben mantenerse dentro de ciertos límites de retardo (R) y amplitud con respecto al sonido directo para evitar ser percibido como un sonido distinto (eco)

$$R \text{ (ms)} = 0.34 (r1 + r2 - d)$$

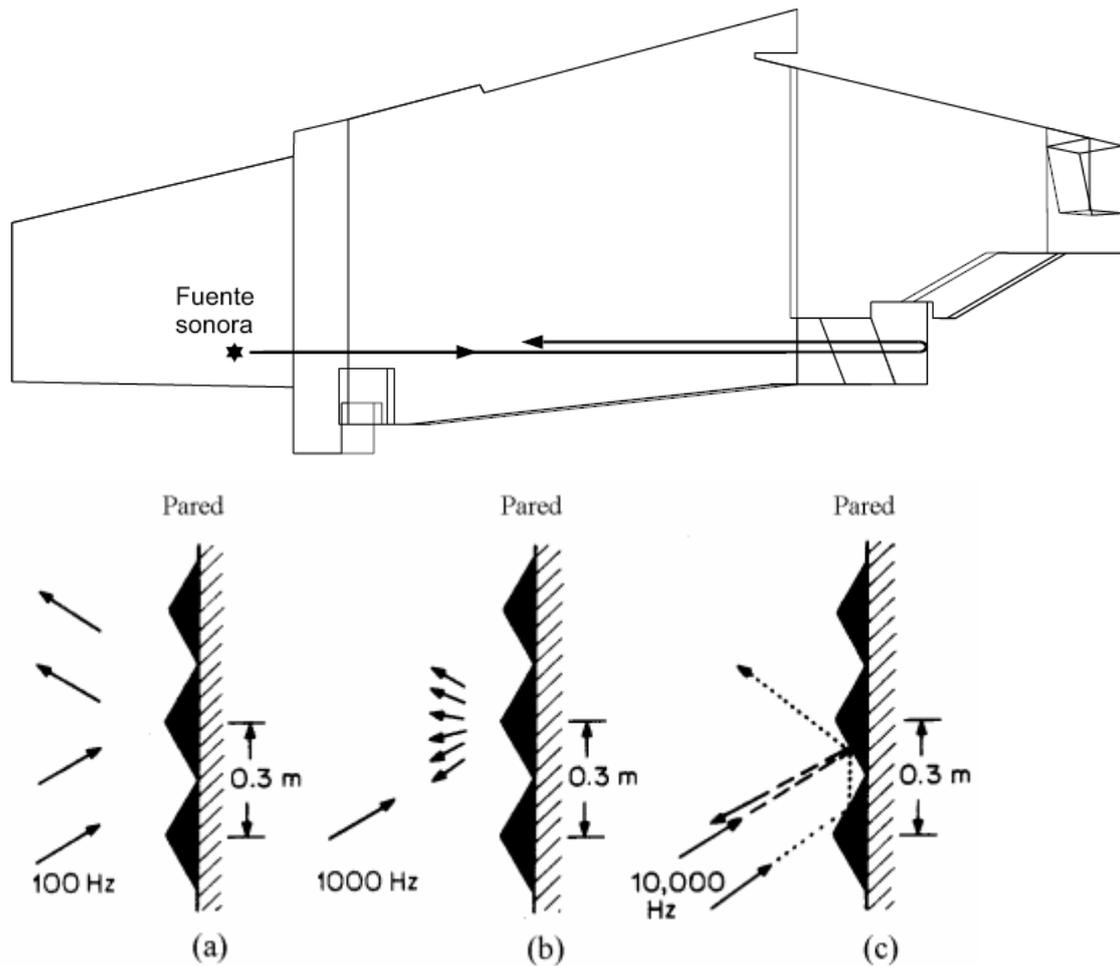
palabra hablada:  $R < 30\text{ms}$      $(r1 + r2 - d < 10\text{m})$

música:  $R < 100\text{ms}$      $(r1 + r2 - d < 34\text{m})$

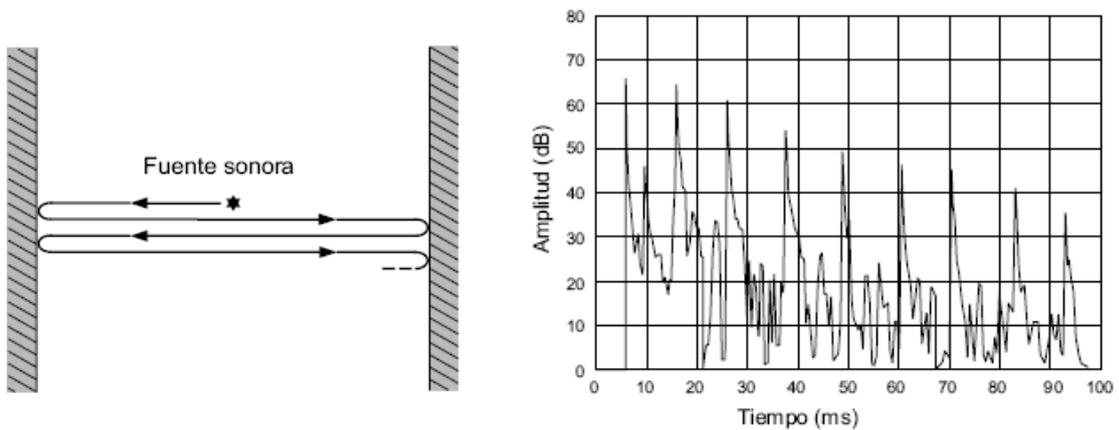
No debe confundirse el eco con la reverberación.

El eco es la precisa y altamente indeseable repetición de la señal original; mientras que la reverberación, dentro de límites razonables, es la beneficiosa prolongación o extensión del sonido directo.

**Reflexiones tardías:** constituyen un defecto similar al eco con la diferencia que el tiempo de retardo entre señales es algo menor.

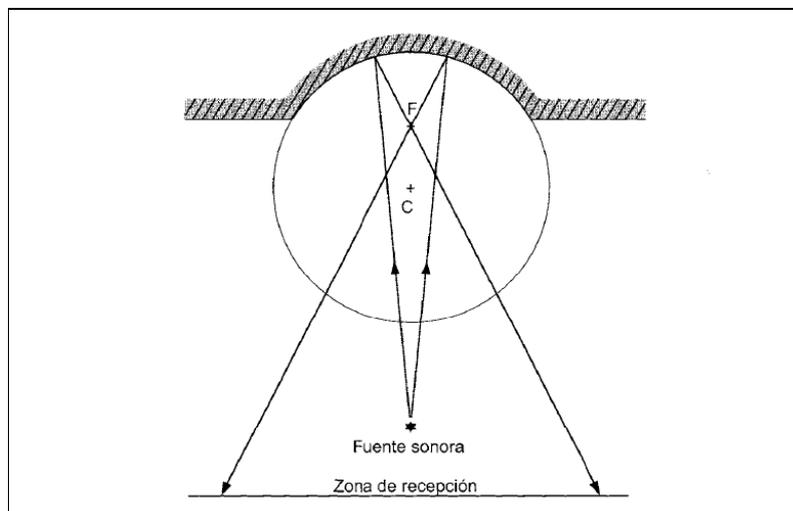
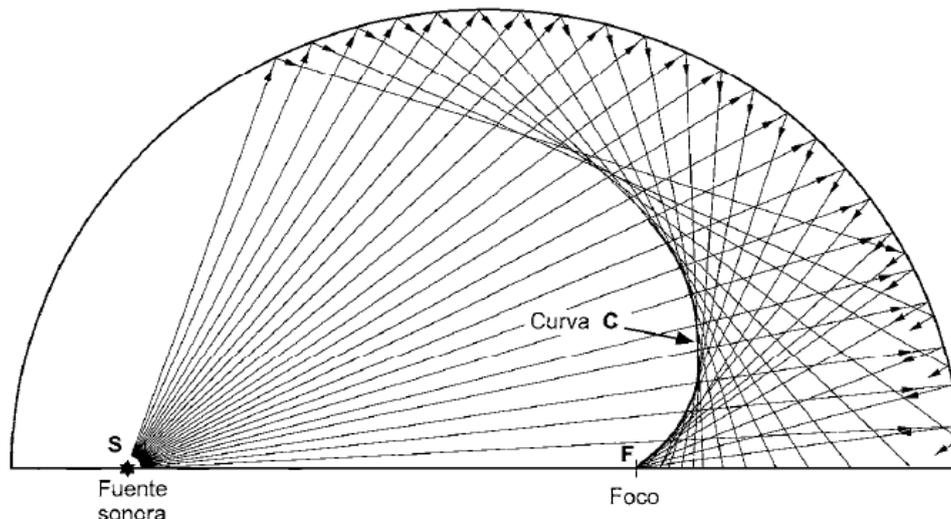


**Eco palpitante:** consiste en una rápida sucesión de pequeños ecos y se observa cuando un sonido corto, como un aplauso o disparo, es producido entre dos superficies reflejantes paralelas aun cuando el resto de los cerramientos sean superficies no paralelas, absorbentes o difusoras del sonido. Para ello se debe evitar en lo posible el paralelismo entre dos superficies reflejantes opuestas es una manera de evitar el fenómeno de eco palpitante.



Este no será percibido si la fuente sonora no se encuentra ubicada entre la zona crítica antes descrita el eco palpitante también puede ocurrir entre superficies reflejantes no paralelas si la fuente se ubica entre las mismas

**Concentraciones sonoras (focalizaciones):** también llamadas “puntos calientes”, son causados por reflexiones del sonido sobre superficies cóncavas, el nivel sonoro en estos puntos resulta artificialmente elevado, siempre a expensas de otros sectores de audiencia, o “puntos sordos”, donde las condiciones de audición resultan insatisfactorias. grandes y continuos cerramientos cóncavos, particularmente aquellos con un gran radio de curvatura, deberán evitarse o serán adecuadamente tratados con material absorbente. En caso de no poder evitar las superficies cóncavas o ante la imposibilidad de generar el tratamiento acústico necesario, éstas superficies deben disponerse de manera que focalicen en un punto por encima o por debajo del área de audiencia.



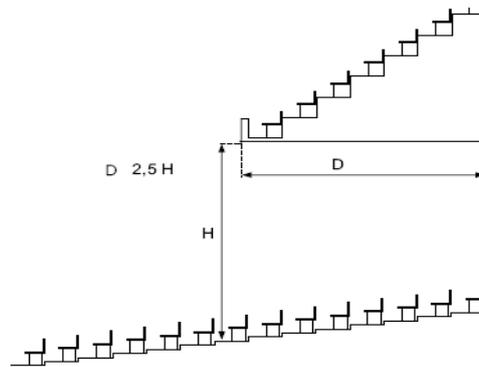
**Espacios acoplados:** si un auditorio se encuentra conectado a un espacio reverberante adyacente (como un vestíbulo, caja de escaleras, corredor, etc.) a través de vanos o aberturas, los dos recintos se comportarán como espacios acoplados, produciéndose una inmisión de sonido reverberado al auditorio proveniente del espacio adyacente, aun cuando la reverberación dentro del auditorio haya sido adecuadamente controlada, siendo especialmente molesto para aquellos espectadores ubicados cerca del vano o abertura.

el efecto indeseado de los espacios acoplados puede evitarse mediante: separación acústica adecuada entre ambos locales, valores de tiempo de reverberación similares en los mismos y reducción del tiempo de reverberación de ambos recintos

**Distorsión:** la distorsión es un cambio indeseado en calidad del sonido musical debido a la desigual o excesiva absorción sonora de las superficies o cerramientos para las distintas frecuencias. puede evitarse si los acabados acústicos aplicados poseen balanceadas características de absorción a lo largo del rango de audiofrecuencia.

**Resonancia:** la resonancia de una sala, a veces llamada coloración, ocurre cuando ciertos sonidos con una estrecha banda de frecuencia tienden a poseer un nivel sonoro mayor al de las otras frecuencias. este defecto acústico es mas pronunciado en pequeñas salas y su eliminación es de particular importancia en el diseño de estudios de radio y grabación, donde el sonido es captado por micrófonos.

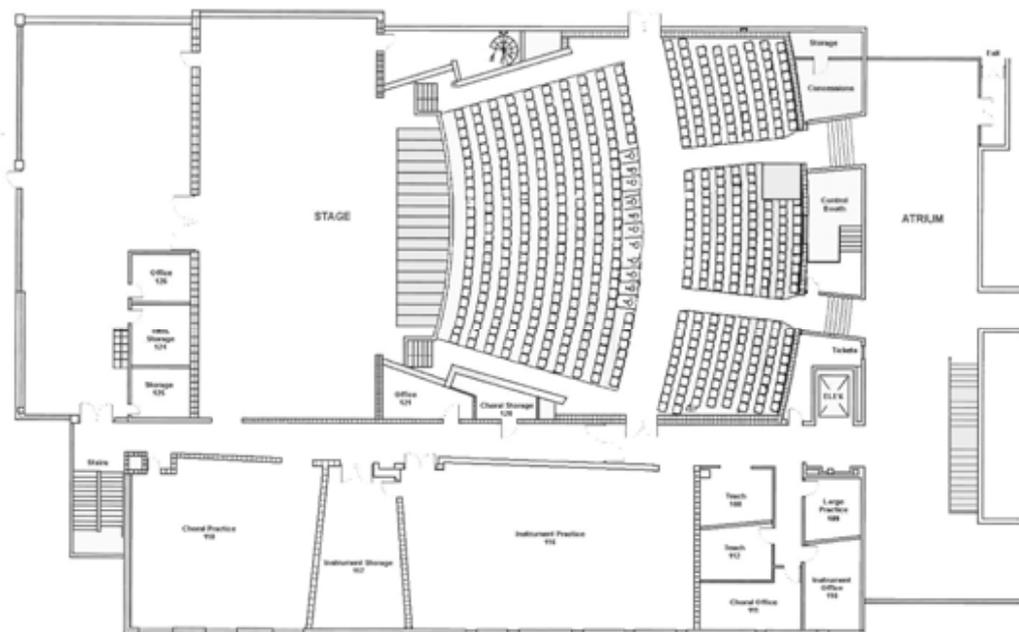
**Sombra acústica:** el fenómeno de sombra acústica es percibido debajo de un balcón o platea que se proyecta demasiado sobre el espacio de aire de un auditorio, aquellos balcones cuya profundidad exceda el doble de su altura deberán evitarse ya que no permitirán que las butacas mas alejadas ubicadas debajo de la platea reciban una cantidad adecuada de sonido directo y reflejado, generando así pobres condiciones de audición.



**Control de ruidos:** deberán aplicarse todos los recursos de la técnica de control de ruido.

En el caso de las salas el diseño comienza con una correcta elección de su implantación urbana y su distribución interna, separando lo más posible la sala de las posibles fuentes interiores o exteriores de ruido y vibración

La importancia de localizar el auditorio lo mas alejado de las fuentes de ruido no debe dejar de remarcar, ya que ha demostrado ser la medida mas económica y eficiente para el control de ruido.



El diseño de un área buffer o de protección acústica compuesta por locales ubicados entre la fuente de ruido y el auditorio permitirá una menor necesidad de aislación de los cerramientos del auditorio, reduciendo así los costos. aquellos locales que integran dicha área de buffer (lobbies, vestíbulos, áreas de

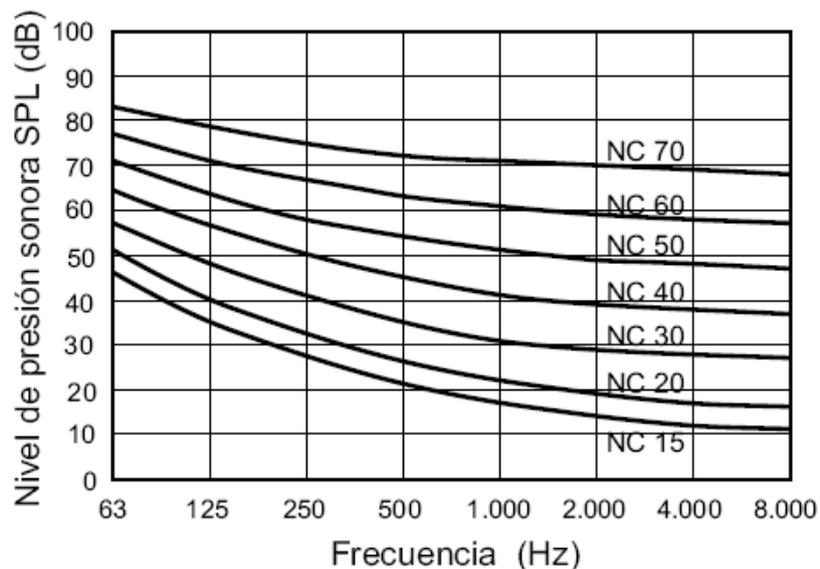
circulación, oficinas, etc.) deben poseer un tratamiento absorbente en su cielorraso y en la medida de lo posible pisos alfombrados

Las áreas de circulación deben estar correctamente aisladas del auditorio a través de puertas acústicas apropiadas.

Si un auditorio se ubica contiguo a otro (horizontal o verticalmente), una pared o piso de adecuada performance acústica debe ubicarse entre ambos de manera de permitir su uso simultáneo.

En el diseño de auditorios se deberá evitar el uso de sonidos enmascarantes.

Los sistemas de ventilación y aire acondicionado de un auditorio deben ser diseñados de manera que el nivel sonoro de los mismos se encuentre de 5 a 15 dB por debajo del nivel de ruido de fondo indicado por las curvas NC. Esto responde a la necesidad de evitar la interferencia con la inteligibilidad de la palabra o el disfrute de la música.



El diseño de auditorios multipropósito o divisibles, el cerramiento divisorio constituye un frecuente problema en el diseño de los mismos, antes de diseñar y seleccionar la partición móvil, deben establecerse claramente los usos que se darán a los sub-espacios resultantes de manera de establecer con certeza los niveles sonoros y poder definir la aislación acústica mínima necesaria.

Aislación necesaria de la partición móvil, según usos:

palabra hablada ( $R_w$  40 a 45 dB)

refuerzo electroacústico ( $R_w$  45 a 50 dB)

representación musical ( $R_w$  50 a 60 dB)

Para el caso particular de auditorios divisibles, el ruido generado por los sistemas de aire acondicionado y ventilación puede ser útil para enmascarar los eventuales ruidos intrusos provenientes de las particiones móviles, reduciendo así el grado de aislación necesario.

La divisibilidad de auditorios también genera problemas acústicos adicionales como ser:

Necesidad de control de la reverberación en el auditorio completo o dividido.

Eliminación de reflexiones perjudiciales entre las particiones móviles y las paredes opuestas.

El control de inmisión de ruido entre espacios adyacentes a través de ductos y espacios sobre cielorraso.

La instalación de un cielorraso suspendido resulta hoy prácticamente indispensable debido a la necesidad de ubicar las instalaciones de eléctrica, ventilación y aire acondicionado que sirven a la sala.

Si un auditorio fuese objeto de vibraciones originadas en sus inmediaciones (por ejemplo tráfico de vehículos pesados), se tomarán precauciones específicas para evitar que éstas lleguen a la estructura del edificio.

## Bibliografía

*“quien hace algo, siempre debe algo”*

- ***“Master Handbook of Acoustics”*** (F. Alton Everest)
- ***“Environmental Acoustics”*** (Doelle, Leslie)
- ***“Curso de acústica en arquitectura”*** (Mestre Sancho – García Senchermes)
- ***“Acústica arquitectónica aplicada”*** (Recuero López, Manuel)
- ***“ABC de la acústica arquitectónica”*** (Arau, Higini)
- ***“Apuntes de clase del Curso de Acondicionamiento Acústico – 1985-2004”*** (Hakas, Jorge)