



# 2.1

## DISEÑO ACÚSTICO DE SALAS: TEORÍA ESTADÍSTICA

**Ivana Rossell Turull**

Directora del Máster de Acústica Arquitectónica y Medioambiental  
Gerente de Ivana Rossell - Acústica  
[ivana@salle.url.edu](mailto:ivana@salle.url.edu) / [acustica@ivanarossell.com](mailto:acustica@ivanarossell.com)



# ÍNDICE

Introducción

Teoría Estadística

Campo de validez

Tiempo de reverberación

Nivel SPL en una sala en función de la distancia

- Análisis de los parámetros:

-Directividad de la fuente

-Factor de espacio

-Constante de la sala

-Potencia de la fuente

-Campo directo-reverberante

Absorción del aire

Tiempo de reverberación con absorción del aire

Cálculo de Reducción de ruido en un recinto

Ejemplos numéricos

La Relación Señal/Ruido

Ejemplos numéricos

La Relación Directo-Reverberante

Recintos acoplados

Acoplamiento acústico

Acoplamiento electroacústico

# INTRODUCCIÓN

## Teoría Estadística:

Estudia el comportamiento de la energía acústica en la sala desde su visión estacionaria; cuando la energía entregada por la fuente y la absorbida por las superficies de la sala llega a un estado de equilibrio. Los cálculos que aporta esta teoría son valores medios de tiempo de reverberación y de nivel de presión sonora. Parte de la suposición de un campo sonoro uniforme en la sala.

### **Teoría Geométrica:**

Asocia la onda sonora a un rayo que se propaga por la sala. Aplica las leyes de la óptica geométrica para deducir la dirección de propagación tras cada incidencia en las diferentes superficies del recinto y se ayuda de los coeficientes de absorción de cada material para calcular la energía perdida en cada reflexión.

Es la teoría aplicada en los programas informáticos de simulación de salas.

**Teoría Ondulatoria:** Es la única teoría que contempla el fenómeno ondulatorio del sonido. Gracias a esta teoría se podrá estudiar la influencia del dimensionado y las proporciones del recinto en su calidad acústica.

# TEORÍA ESTADÍSTICA

## **Campo de validez: (restricciones para usar la teoría sin demasiado error)**

Las ondas deben formar un campo acústico lo más uniforme posible

- Las dimensiones de la sala deben ser superiores a la mayor longitud de onda de uso
- Los coeficientes de absorción de las superficies deben ser moderados
- Los coeficientes de absorción de las superficies y materiales de la sala deben ser similares
- Los resultados son valores promediados, no instantáneos. No se tiene en cuenta la fase

Coeficiente de absorción energético:

Es la relación entre la energía absorbida por una superficie respecto la energía incidente, en función de la frecuencia.

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i}$$

Coeficiente de absorción medio :

Es el coeficiente de absorción promedio de una sala a una banda de frecuencias determinada.

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \cdot \alpha_i}{S}$$

Se calcula, para cada frecuencia, a partir de todos los materiales de sala, según la superficie que ocupen. Es la suma de absorciones proporcionada por cada material dividida entre la superficie total de la sala.

Libre recorrido medio : En una sala, es la distancia media libre de reflexiones. Según Knudsen, el libre recorrido medio es igual a:

$$\bar{l} = \frac{4 \cdot V}{S}$$

-siendo  $S$  la superficie total de la sala y  $V$  el volumen.

(Muchas de las fórmulas del tiempo de reverberación se basan en el libre recorrido medio)

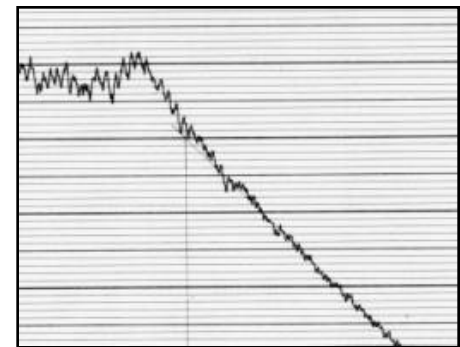
## TIEMPO DE REVERBERACIÓN

Definición:

Si excitamos una sala con una cierta energía, dejando pasar un tiempo transitorio hasta llegar a una situación estacionaria entre la energía entregada por la fuente sonora y la que recibe un receptor en un punto concreto de la sala, llamamos **tiempo de reverberación TR60**, al **tiempo transcurrido (medido en segundos) en decrecer 60 dB la energía que recibe el receptor, al parar bruscamente la fuente de excitación.**

El tiempo de reverberación es uno de los principales parámetros indicadores de la calidad acústica de una sala. Su valor depende de numerosos factores: el coeficiente de absorción de los materiales de la sala, el volumen, superficie, y el dimensionado de ésta entre otros.

Las principales formulaciones para el cálculo teórico del tiempo de reverberación, se encuentran dentro del marco de la teoría estadística y las presentamos a continuación:





- **TR60 según Sabine (1900)** (para salas “vivas”, con pequeño grado de absorción):

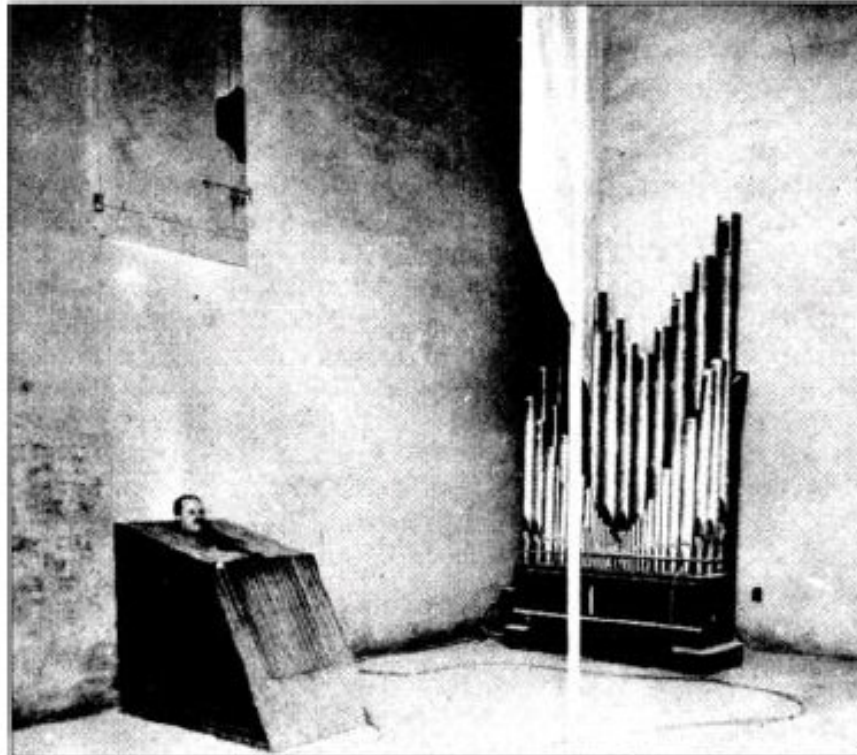
$$T_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{S \cdot \bar{\alpha}} = \frac{0,161 \cdot V}{A}$$

- La absorción total media se calcula como la media aritmética ponderada

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i S_i}{S} = \frac{\sum A_i}{S}$$

- Esta fórmula está basada en el libre recorrido medio ( $4V/S$ ) y se asumen las hipótesis de la teoría estadística:
- Campo acústico uniforme en la sala, 8 campo difuso; sala viva), igual probabilidad de propagación en todas direcciones y distribución homogénea de la absorción.

Clement Wallace Sabine (1869-1919), “padre” de la acústica arquitectónica:



### TR60 según Eyring i Norris (1930-1932):

Su teoría supone también un campo difuso y, por lo tanto, una distribución uniforme de la absorción de la sala. También se basa en el libre recorrido medio.

$$T_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{S(-\ln(1 - \bar{\alpha}))} = \frac{0,161 \cdot V}{A_{eyring}} \quad \bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i S_i}{S}$$

Para valores de coeficiente de absorción pequeños (menores a 0.2) las dos fórmulas expuestas coinciden, para salas más absorbentes estrictamente sería más correcta la ecuación de Eyring. Aún así, da resultados más reales Sabine. (Más adelante se explicará el por qué).

## Qué es el T30?, Qué es el T20?

El TR30, es el tiempo de reverberación de caída de 60 dB pero siguiendo la pendiente de caída de los primeros 30 dB. (Muchas veces la señal de excitación no puede estar 60 dB por encima del ruido de fondo de la sala, de este modo, se busca una dinámica de 30 dB y se calcula el TR60 siguiendo la pendiente marcada por estos 30 dB. (Erróneamente, algunos dicen que el TR30 o T30 es el tiempo de caída de 30 dB, por lo tanto, el TR60 sería el doble. Esto es falso.)

El T20 es el tiempo de caída de 60 dB pero siguiendo la pendiente marcada de los primeros 20 dB de caída. SE usa el T20 cuando el ruido de fondo es alto y la excitación sólo supera al ruido en 20 dB.

Tanto T30 como T20 (como T15 o EDT) también pueden usarse para saber, comparando Los diferentes valores, si la sala tiene un campo acústico uniforme o no. Valores iguales de los diferentes parámetros implican uniformidad de campo, y valores diferenciados implican diferentes pendientes de caída en la respuesta de la sala.

# NIVEL SPL EN UNA SALA EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA

Las ecuaciones que se muestran a continuación son equivalentes. Generalmente se usa la expresión de la derecha, por comodidad analítica:

$$SPL = 10 \cdot \log W \rho_c \left[ \frac{\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R}}{p_0^2} \right]$$

$$SPL = L_p = L_w + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

Parámetros implicados:

R: Constante de la sala:  $R = S\alpha / (1 - \alpha)$

r: Distancia fuente-receptor

Q: Directividad de la fuente/Factor de espacio

W: Potencia de la fuente (*wattios*)

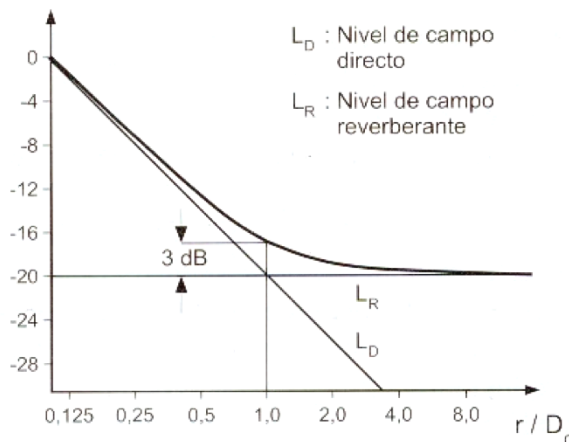
$\rho_c$ : Impedancia del aire (*417 rayl*)

$p_0$ : Presión umbral (*20  $\mu$  Pa*)

$L_w$ : Nivel de potencia de la fuente (dB)

$$L_w = 10 \cdot \log(W/W_0)$$

$w_0$  = potencia umbral (*10pw=10<sup>-12</sup>w*)



**Directividad de la fuente (Q) :**

Caracteriza la radiación espacial de la fuente sonora.

Generalmente se representa con el factor de directividad  $Q$ , o con el índice de directividad  **$DI$**  expresado en decibelios.

$$DI = 10 \cdot \log Q$$

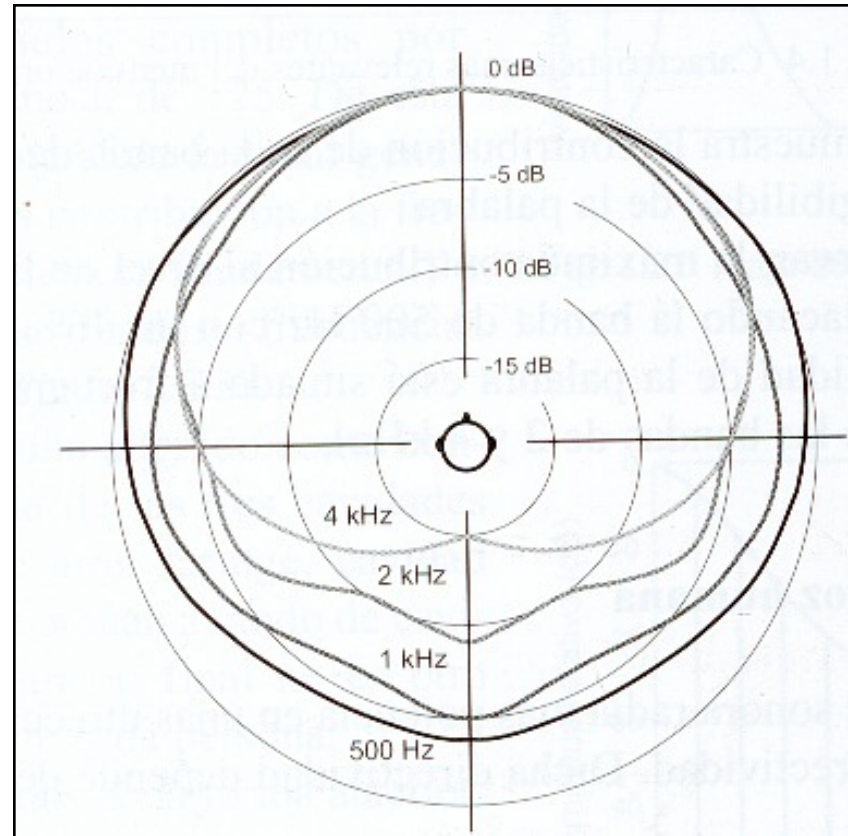
**$DI$** : Son los dB que se reciben en la dirección preferente en la fuente direccional respecto a los que daría una fuente omnidireccional de la misma potencia.

Cada tipo de fuente sonora tiene su propio diagrama de directividad y cada diagrama es diferente para cada banda frecuencial.

De esta forma, no es lo mismo tratar un escenario, por ejemplo, si va a reproducirse voz cantada, o si va a colocarse una orquesta, o una banda de instrumentos determinados.

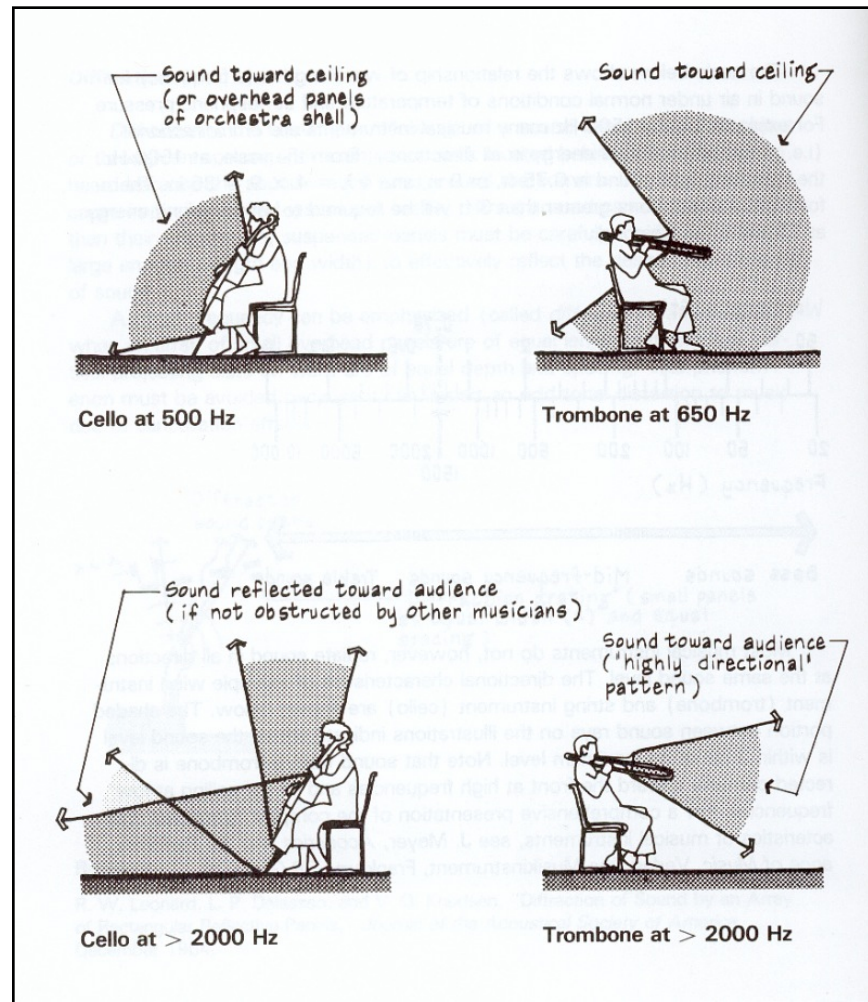
Mostramos a continuación algunos ejemplos de radiación:

Diagrama de directividad de la voz humana a diferentes frecuencias:





Diagramas de radiación de diferentes instrumentos musicales, a diferentes frecuencias.





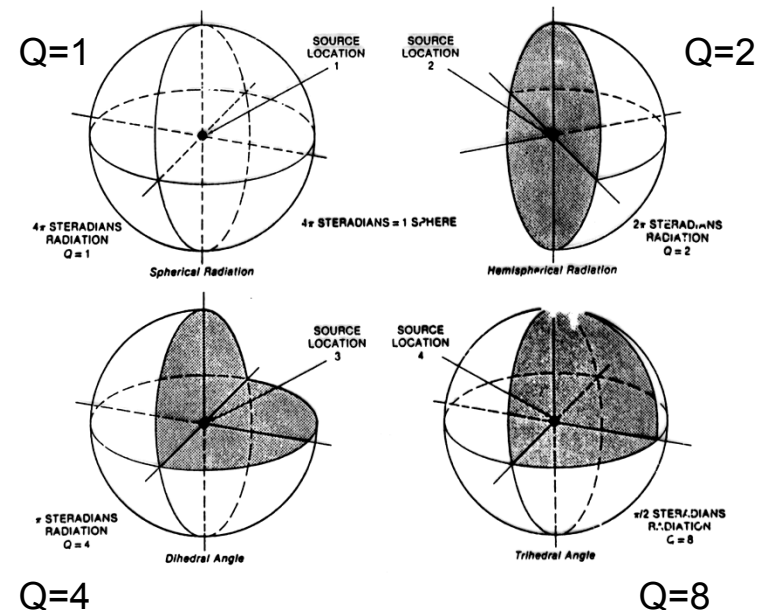
## El factor de espacio contemplado dentro del valor de Q:

Dentro del término Q se incluye la influencia de lo que se conoce como factor de espacio.

Este término consiste en un incremento de la energía debido a que la fuente sonora se encuentra sobre uno o varios planos reflectantes. La energía se re-radía hacia la zona libre del espacio. A continuación mostramos un ejemplo del comportamiento de una fuente omnidireccional:

Una fuente omnidireccional ( $Q=1$ ) sobre un plano reflectante supone un factor de espacio tal que modifica la Q a 2.

Sobre dos planos reflectantes (esquina), la  $Q=4$ . Y así, en factores de 2, sucesivamente.



**La constante de la sala ( $R$ ):**

La constante de la sala será un indicativo del grado de absorción de esta, o, en otras palabras, de su nivel de reverberación.

Relaciona el coeficiente medio de absorción de la sala con su superficie total.

$$R = \frac{S\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$$

Es un término totalmente dependiente de la frecuencia; cada sala toma un valor determinado de  $R$  a cada banda frecuencial.

Una sala anecoica, con coeficiente de absorción tendiendo a la unidad para todas las frecuencias, tendrá una constante  $R$  que tenderá a infinito.

Por lo tanto, el campo reverberante ( $4/R$ ) será cero.  $R \rightarrow \infty$

Una sala muy reverberante, con coeficiente de absorción cercano a cero a todas las frecuencias, tendrá una  $R$  que tenderá a cero.

El campo reverberante tenderá a infinito, lo que significa que el campo directo será despreciable y el reverberante muy elevado.

$$R \rightarrow 0$$

**Potencia acústica:**

La potencia acústica es una característica intrínseca de la fuente sonora. Nos da información, en función de la frecuencia, de lo potente que es la fuente sonora; de la intensidad acústica que es capaz de entregar promediada en una superficie.

La relación con la intensidad acústica, en campo libre es:  $W = I \cdot S$

La potencia acústica se mide en wattios ( $w$ ) o puede expresarse también en dB a partir de una referencia:

$$L_W = dB_{ref1pw} = 10 \log \frac{w}{10^{-12} w}$$

Ejemplo:

Se toma como referencia estandarizada la potencia de un orador como la que da 39 dB<sub>SPL</sub> a 10 metros en campo libre ( $W=10\mu W$ ).

Se toma como potencia de referencia para una orquesta la que da 69 dB<sub>SPL</sub> a 10 metros en campo libre (10·mW).

$$SPL = L_p = L_W + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

**Campo Directo:**  $\frac{Q}{4 \cdot \pi r^2}$

La energía del campo directo depende de la distancia entre fuente y receptor (ley cuadrática inversa para propagación esférica) y de la directividad de la fuente.

**Campo Reverberante:**  $\frac{4}{R}$

La energía que proporciona el campo reverberante depende del tratamiento acústico de la sala (constante de la sala), por lo tanto, es un dato totalmente dependiente de la frecuencia.

A la distancia llamada **distancia crítica (Dc)** o radio crítico ( $r$ ) se igualan las contribuciones de campo directo y campo reverberante.

$$\frac{Q}{4\pi r^2} = \frac{4}{R} \rightarrow D_c = 0.14\sqrt{Q \cdot R}$$

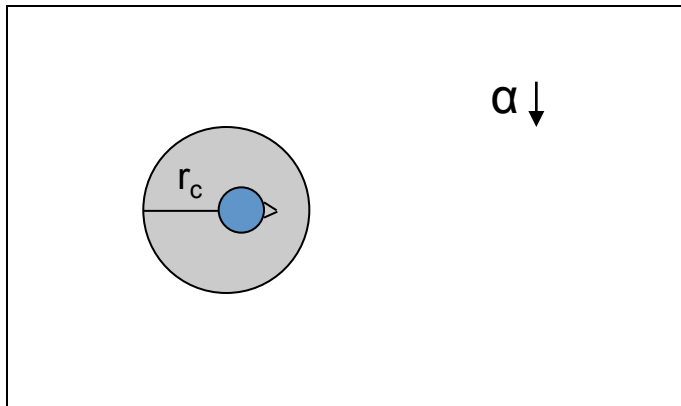
A esta distancia se obtienen  $3\text{dB}_{\text{SPL}}$  de incremento respecto a los que tendríamos en condiciones de campo libre.

### Relación Directo-Reverberante: rel D/R (dB)

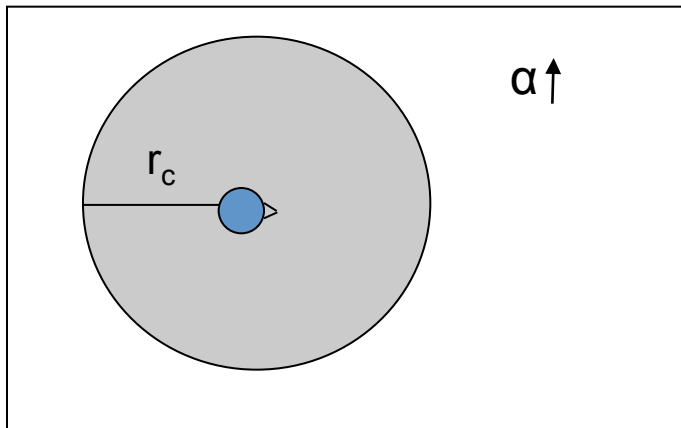
$$\text{rel } D/R = 10 \cdot \log \frac{\frac{Q}{4\pi r^2}}{\frac{4}{R}}$$

Nos indica, en decibelios, la relación de niveles entre el campo directo y el campo reverberante a la que se encuentra un receptor a una distancia concreta de la fuente, en una sala determinada, y a una banda de frecuencias dada.

Zona de influencia de campo directo (zona de elevada inteligibilidad)  
expresada en función del radio crítico o radio de reverberación:

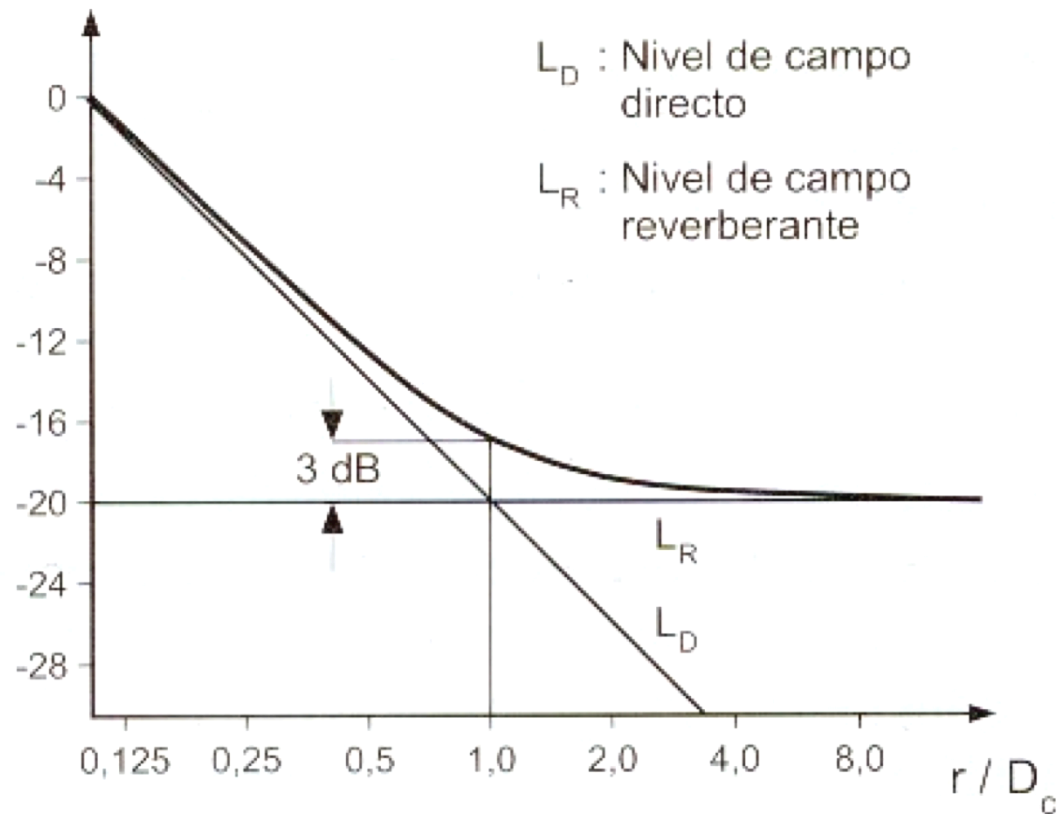


Recinto sin tratamiento absorbente;  
Radio crítico pequeño.



Recinto con tratamiento absorbente;  
Radio crítico grande, influencia de la  
Reverberación minimizada

Gráfico del nivel de presión en función de la distancia normalizado a la distancia crítica:



## Nivel de presión sonora en una sala:

$$SPL = L_p = L_w + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

## Nivel de presión sonora en campo libre:

En campo libre tenemos ausencia de reflexiones y por tanto el término correspondiente al campo reverberante es cero:

$$SPL = L_p = L_w + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} \right) = L_w - 20 \log r - 11 + 10 \log Q$$



# ABSORCIÓN DEL AIRE

## **Absorción del aire:**

El medio por el que se propaga la onda sonora contribuye en cierto grado a la absorción de la energía que conduce.

**La absorción del aire depende de la temperatura, de la humedad y de la frecuencia de la onda.**

La importancia de esta absorción estará en función de la distancia recorrida por el sonido. Su valor será significativo en comparación de la absorción debida al tratamiento de la sala.

La absorción del aire proviene de dos fenómenos:

- Por la viscosidad cinemática de las partículas, que se desplazan con el paso de la onda.
- Por intercambio de energía sonora en energía de traslación y de vibración entre las moléculas dipolares de los gases que componen el aire; principalmente el vapor de agua.

# ABSORCIÓN DEL AIRE

La absorción del aire se representa (de forma aproximada) con el parámetro  $m$ .

Este parámetro puede hallarse con la ayuda de gráficas o calcularse de forma aproximada a través de la expresión:

$$m = 5.5 \cdot 10^{-4} \frac{50}{h} \left[ \frac{f}{1000} \right]^{1.7}$$

donde  $h$ : *humedad relativa en % (por ejemplo, si la humedad es del 60%  $h$  es igual a 60).*

$f$ : *frecuencia de la onda.*

En términos generales:

A mayor frecuencia mayor absorción.

A menor temperatura y humedad, mayor absorción.

## Absorción del aire según ISO 9613:

*m*: en  $10^{-3}$  Neper por metro (a partir de las tablas ISO 9613-1, que da dB/1Km)

Absorción Aire	125	250	500	1000	2000	4000	8000
10°C, 30%-50%H	0,1	0,2	0,5	1,1	2,7	9,4	29
10°C, 50%-70%H	0,1	0,2	0,5	0,8	1,8	5,9	21,1
10°C, 70%-90%H	0,1	0,2	0,5	0,7	1,4	4,4	15,8
20°C, 30%-50%H	0,1	0,3	0,6	1	1,9	5,8	20,3
20°C, 50%-70%H	0,1	0,3	0,6	1	1,7	4,1	13,5
20°C, 70%-90%H	0,1	0,3	0,6	1,1	1,7	3,5	10,6

# ABSORCIÓN DEL AIRE

## Tiempo de reverberación considerando la absorción del aire:

La absorción del aire se añade como término de absorción en la fórmula y queda multiplicado por 4 veces el volumen de la sala.

$$T = \frac{60 \cdot V}{1.086c[S\alpha + 4mV]}$$

La absorción del aire será significativa para salas muy vivas (con poca absorción), para salas de gran volumen y para alta frecuencia.

La expresión de Eyring, por ejemplo, queda de la siguiente manera:

$$T = \frac{60 \cdot V}{1.086c[(-\ln(1 - \alpha))S + 4mV]}$$

# REDUCCIÓN DE RUIDO

## Cálculo de la Reducción de ruido (SPL en el recinto) por tratamiento acústico:

Reducción de ruido:  $SPL_1 - SPL_2$

Dentro del marco de la teoría estadística, para cálculos aproximados, en recintos con un campo acústico suficientemente uniforme, y para situaciones en que el receptor se encuentra **en influencia total de campo reverberante**, se puede calcular la reducción de ruido en un recinto después de tratarlo acústicamente con la expresión:

$$\Delta SPL = 10 \cdot \log \frac{R_1}{R_2} \quad R_1 = \frac{S\bar{\alpha}_1}{1 - \bar{\alpha}_1} \quad R_2 = \frac{S\bar{\alpha}_2}{1 - \bar{\alpha}_2}$$

donde  $R_1$  es la constante inicial, que depende del coeficiente de absorción medio inicial, y  $R_2$  es la conseguida después del tratamiento.

Esta reducción es para cada banda frecuencial, en función de la absorción de la sala a cada frecuencia antes y después del tratamiento. En realidad, esta es la expresión simplificada (por obviar el campo directo) a partir de restar los niveles de presión antes y después del tratamiento.

# REDUCCIÓN DE RUIDO

Ejemplos numéricos:

Coef. Inicial	Coef. Final	Reducción (dB)
0,02	0,05	-4,1
0,02	0,2	-11,1
0,02	0,5	-18,7
0,02	0,99	36,9
0,2	0,3	-2,3
0,2	0,5	-6
0,2	0,6	-7,8
0,2	0,8	-12
0,2	0,99	-26
0,4	0,5	-1,8
0,4	0,6	-3,5
0,4	0,7	-5,4
0,4	0,8	-7,8
0,4	0,99	-21,7
0,6	0,7	-1,9
0,6	0,8	-4,3
0,6	0,9	-7,8
0,6	0,99	-18,2

Suponemos el siguiente caso: (Sala de dimensiones 12m\*7m\*3m)

Frec	Coef inicial	Coef final	Reducción (dB)
125 Hz	0,05	0,15	-5
250 Hz	0,08	0,3	-7
500 Hz	0,1	0,45	-9
1KHz	0,15	0,6	-9
2KHz	0,2	0,8	-12
4KHz	0,2	0,8	-12

**¿Cual es la reducción global de ruido?**

# REDUCCIÓN DE RUIDO

**Cálculo de la reducción global de ruido;** ejemplo numérico:

Sala de dimensiones 12\*7\*3 m. Suponiendo un ruido inicial SPL1.

- 1- Se calcula la reducción por bandas
- 2- Se calcula la energía global antes del tratamiento (global de SPL1)
- 3- Se calcula la energía global (reducida) después del tratamiento (SPL2=SPL1-reducción)
- 4- Se restan las energías globales para hallar la reducción global (SPL1 global- SPL2 global)

	Coef nicial	Coef final	Reducción	SPL1	SPL2	SPL1 pond A	SPL2 pond A
125 Hz	0,05	0,15	-5	75	70	59	54
250 Hz	0,08	0,3	-7	77	70	69	62
500 Hz	0,1	0,45	-9	75	66	72	63
1KHz	0,15	0,6	-9	63	54	63	54
2KHz	0,2	0,8	-12	62	50	63	51
4KHz	0,2	0,8	-12	61	49	62	50
Global (dB)			6,9	80,73	73,86		
Gobal (A)			8,3			74,8	66,5



# REDUCCIÓN DE RUIDO

## Caso 2:

	Coef nicial	Coef final	Reducció	SPL1	SPL2	SPL1 pond A	SPL2 pond A
125 Hz	0,05	0,2	-7	75	68	59	52
250 Hz	0,08	0,25	-6	77	71	69	63
500 Hz	0,1	0,3	-6	75	69	72	66
1KHz	0,15	0,5	-8	63	55	63	55
2KHz	0,2	0,6	-8	62	54	63	55
4KHz	0,2	0,6	-8	61	53	62	54
<b>Global</b>			<b>6,1</b>	<b>80,7</b>	<b>74,6</b>		
<b>Gobal (A)</b>			<b>6,2</b>			<b>74,8</b>	<b>68,6</b>

## RELACIÓN SEÑAL/RUIDO: rel (S/N) (Signal/Noise Ratio)

### Relación Señal / Ruido:

Nos da la relación en  $\text{dB}_{\text{SPL}}$  de señal útil respecto a señal no útil (ruido). Se trata de la diferencia, en decibelios, entre la señal que nos interesa y el ruido. Es simplemente la resta. Esta resta puede darse en función de la frecuencia, pero puede expresarse también en decibelios globales con o sin ponderación A. El cálculo global de la relación señal ruido es parecido al de la reducción global de ruido:

Ejemplo numérico: Caso A:

125 Hz	76	60	50	34,00	26
250 Hz	77	69	52	44,00	25
500 Hz	75	72	40	37,00	35
1KHz	63	63	33	33,00	30
2KHz	62	63	28	29,00	34
4KHz	61	62	26	27,00	35
Global	81,0	74,8	54,3	45,6	
	Rel S/N global	Lineal	(81-54,3)	26,7	dB
		Pond A	(74,8-45,6)	29,2	dB (pond A)

## Caso B:

	Señal (dB)	Señal (dBA)	Ruido (dB)	Ruido (dBA)	Rel S/N (dB)
125 Hz	52	36	34	18,00	18
250 Hz	50	42	32	24,00	18
500 Hz	51	48	34	31,00	17
1KHz	48	48	31	31,00	17
2KHz	46	47	22	23,00	24
4KHz	46	47	23	24,00	23
Global	57,22	53,91	39,15	35,16	
		Rel S/N global	Lineal	18,07	
			Pond A	18,75	

# RELACIÓN DIRECTO/REVERBERANTE

## Relación Directo / Reverberante

Nos indica la situación de un receptor en cuanto a influencia de campo directo o reverberante:

$$SPL = L_p = L_w + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

$$rel D/R = 10 \cdot \log \frac{\frac{Q}{4\pi r^2}}{\frac{4}{R}}$$

Esta relación se expresa en dBs (positivos o negativos) y se da para cada banda de frecuencia.

Si relD/R es positiva: el receptor se encuentra bajo influencia de campo directo

Si relD/R es negativa: el receptor se encuentra bajo influencia de campo reverberante

# RECINTOS ACOPLADOS

## **Recintos acoplados:**

Distinguimos dos clases de acoplamiento:

- Acoplamiento acústico
- Acoplamiento electroacústico

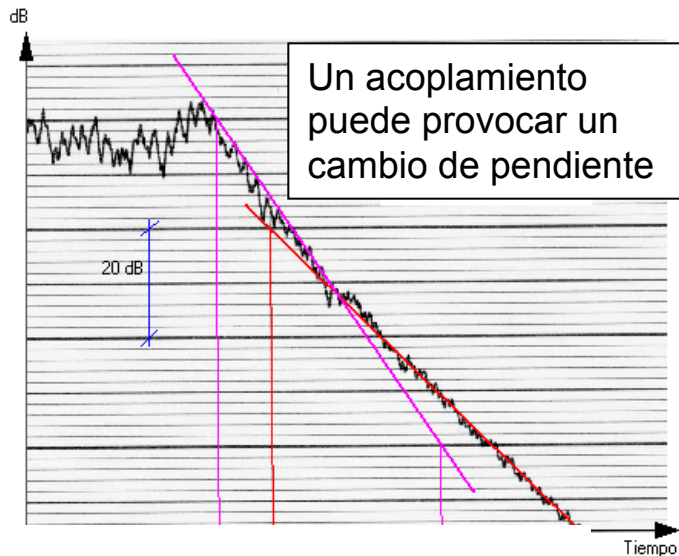
## **Acoplamiento acústico**

Dos o más recintos comunicados a través de una apertura que permite el paso del sonido de uno a otro. El sonido, generado en una recinto puede pasar al espacio acoplado y regresar, provocando una especie de realimentación.

El tiempo de reverberación de un espacio con salas o recintos acoplados es difícil de predecir y estará caracterizado por las características acústicas de todas las partes acopladas.

# RECINTOS ACOPLADOS

Un caso típico es el producido por el acoplamiento de dos espacios de reverberación diferenciada. Es el caso de estar en un recinto muy absorbente acoplado a otro muy reverberante. La curva de reverberación del espacio absorbente se caracterizará por tener un cambio de pendiente (incremento de la reverberación) debido a la energía (tardía) que llega al receptor.

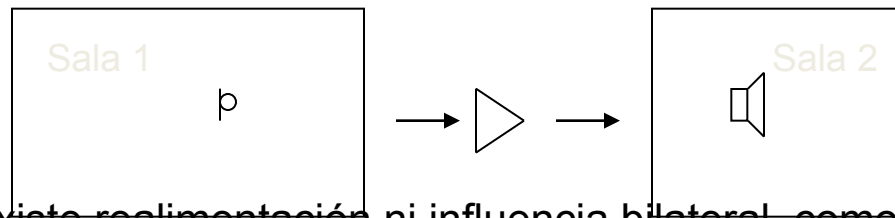


El comportamiento acústico en los balcones o “boxes” de los auditorios y teatros corresponde a este caso explicado de acoplamiento. Los balcones de público se pueden considerar como pequeños recintos absorbentes acoplados a la sala.

# RECINTOS ACOPLADOS

## Acoplamiento electroacústico:

Se produce cuando dos salas físicamente independientes se comunican acústicamente a través de un sistema electroacústico.



En este caso no existe realimentación ni influencia bilateral, como en el caso anterior. La “sala 1” influenciará en la grabación que allí se produzca y, por tanto, su reverberación podrá percibirse en la sala 2, sumándose en esta última sala a la propia.

El efecto global, para el caso de acoplamiento electroacústico, puede aproximarse a una suma de los dos efectos individuales.