Antonio Lecuona Neumann
José Ignacio Nogueira Goriba

Tema 6: Acústica física VI

- Espectros lineales y logarítmicos.
- Nivel de intensidad acústica *NIS* y nivel de presión acústica *NPS*.
- Potencia acústica y nivel acústico esférico.
- Directividad.

Espectros lineales y logarítmicos

En acústica resulta más útil y fiel a la percepción usar logaritmos de las intensidades, en lugar de sus valores directamente. El motivo se debe a como funciona nuestra percepción (Véase más adelante, en sicoacústica, la *Ley de Fletchner-Munson*). Por ello:

Es habitual usar el decibelio, que es 10 veces el logaritmo decimal de la intensidad, dividida por una intensidad de referencia. Se denomina **Nivel** N o **Level** L. Se explica más adelante. Justo a continuación se exponen más detalles, pero mientras hagamos un ejercicio.

Ejercicio: Tres bandas de octavas consecutivas muestran los siguientes niveles de intensidad acústica NIS: 50 dB, 53 dB y 49 dB. Calcular el nivel de la banda de octava correspondiente.

Solución: la octava incluye la energía de sus tres tercios, que equivale a sumar las tres intensidades. En general:

$$\left.\begin{array}{l} I = \sum_{i=1}^{n} I_i \\ L_i = 10\log_{10}\dfrac{I_i}{I_{ref}} \Rightarrow \dfrac{I_i}{I_{ref}} = 10^{L/10} \end{array}\right\} \rightarrow \underset{\sim}{L}_{NIS} = 10\log\frac{I}{I_{ref}} = 10\log\sum_{i=1}^{n} 10^{L_i/10}$$

Aplicándolo a nuestro caso:

$$L = 10\log\sum_{i=1}^{n} 10^{L_i/10} = 10\log(10^{50/10} + 10^{53/10} + 10^{49/10}) = 55{,}8\text{dB}$$

Puede observarse la dominancia del tercio más prominente de 53 dB.

Nivel de intensidad acústica *NIS* y nivel de presión acústica *NPS*

- Para adecuar el nivel de percepción al nivel de la intensidad se usa una transformación logarítmica, de tal manera que sea 0 en el umbral de percepción, internacionalmente acordado:

$$\underbrace{\underbrace{NIS}_{L}\,[\mathrm{dB}] = 10\log_{10}\frac{I}{I_{ref}};\quad I_{ref} = 10^{-12}\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2} \equiv \text{Umbral de percepción}}$$

Onda plana, Ec. (5): $I_{ref} = \dfrac{\left(P_{rms}{}^2\right)_{ref}}{\rho_{at} a}$

tomamos condiciones standard

$\rho_{at} = 1,293\,\dfrac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$

$a = 341\,\dfrac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$

$$\Rightarrow P_{rms} = \sqrt{\rho_{at} a I_{ref}} = \sqrt{1,293\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}\,341\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\,10^{-12}\,\frac{\mathrm{Nm}}{\mathrm{sm}^2}} = 21\mu\mathrm{Pa}$$

21 µPa es muy próximo al nivel de percepción a 1.000 Hz que internacionalmente se acepta que es 20 µPa *rms*. Véase Fig. 1 del tema 1.

Nivel de intensidad acústica NIS y nivel de presión acústica NPS

- La instrumentación acústica convencional mide P_{rms}, pues usa una membrana como sensor en lo que se denomina micrófono.
- Al cambiar la presión y la temperatura la relación entre intensidad acústica y presión cambia ligeramente, al cambiar $\rho_{at} a$.

Por ello, se prefiere referir a 20 µPa$_{rms}$ y llamarlo nivel de presión acústica (aunque se abrevie como NPS en lugar de NPA) en decibelios:

$$\left.\begin{matrix} NPS\ [\mathrm{dB}] \\ L_p\ [\mathrm{dB}] \end{matrix}\right\} = 10\log\left(\frac{P_{rms}}{(P_{rms})_{ref}}\right)^2 = 20\log\left(\frac{P_{rms}}{(P_{rms})_{ref}}\right) \qquad \text{(5qui)}$$

Coincide con NIS en condiciones habituales con un error inferior a 1 dB, que es el cambio de intensidad menor percibible por los humanos.

Notación habitual de NPS: L_p llamado “Sound Pressure Level SPL” o simplemente L.
El valor en dB de un sonido no es indicativo del nivel de sonoridad percibido; así, una subida de 2 dB **no significa** el doble de percepción.

Tampoco 100 dB significa el 100% de nada.

Antonio Lecuona Neumann
José Ignacio Nogueira Goriba

Potencia acústica y nivel acústico esférico

La integración de la intensidad acústica en una superficie de control que encierre la fuente en campo libre ha de dar la potencia acústica emitida, siempre que la potencia reactiva pueda despreciarse → campo lejano.

Existe normativa que permite medir con precisión la potencia de una fuente.

La potencia acústica suele medirse en dB denominándose **nivel de potencia** NP o en notación anglosajona L_w. Para ello:

La referencia para potencia es: $W_{ref} = 10^{-12}\text{W} = 1\text{pW}$

Como recordatorio la referencia para intensidad es $I_{ref} = 10^{-12}\ \text{W/m}^2$

Campo libre **esférico** no uniforme, el nivel acústico se calcula así:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} Q\langle \varphi, \upsilon \rangle$$

$$\underbrace{I_{ref}}_{10^{-12}\text{W/m}^2} = \frac{\overbrace{W_{ref}}^{10^{-12}\text{W}}}{4\pi {r_{ref}}^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow r_{ref} = \sqrt{\frac{W_{ref}}{4\pi I_{ref}}} = \sqrt{\frac{10^{-12}\text{W}}{4\pi 10^{-12}\text{W/m}^2}} = 0{,}282\text{m}$$

radio de una esfera de 1m^2

$$\Rightarrow \underbrace{\underbrace{10\log\frac{I}{I_{ref}}}_{NIS[\text{dB}]\square NPS[\text{dB}]} = \underbrace{10\log\frac{W}{W_{ref}}}_{NP[\text{dB}]} - \underbrace{20\log\frac{r}{r_{ref}}}_{20\log\frac{r}{0{,}282\text{m}}} + \underbrace{10\log Q\langle \varphi, \upsilon \rangle}_{DI}}_{NPS_{directa} = NP - 20\log r[\text{m}]\text{-}11\text{dB} + DI} \quad (6)$$

Directividad

Las fuentes generalmente no reparten homogéneamente la energía en el espacio libre, sino que favorecen ciertas direcciones, por sí mismas o por la acción de obstáculos vecinos.

Consideremos fuentes que emiten una potencia acústica *W*. Llamaremos **intensidad media espacial** a: $\hat{I}$

Reparto homogéneo esférico: $\hat{I} = W/(4\pi r^2)$. Cilíndrico (p. u. de long.): $\hat{I} = W/(2\pi r)$

Para tener en cuenta la preferencia por ciertas direcciones se define un **factor de directividad**, función del ángulo de acimut y elevación φ, υ:

Factor de directividad: $Q\langle\varphi,\upsilon\rangle = \dfrac{I\langle\varphi,\upsilon\rangle}{\hat{I}}$

Factor de directividad máximo: $G = Q_{max} = \dfrac{I_{\max}}{\hat{I}} \begin{cases} \text{Esférico: } G = \dfrac{I_{\max}}{W} 4\pi r^2 \\ \text{Cilíndrico: } G = \dfrac{I_{\max}}{W} 2\pi r \end{cases}$

Índice de directividad: $\begin{cases} DI = 10\log(Q) \\ DI_{max} = 10\log(G) \end{cases}$

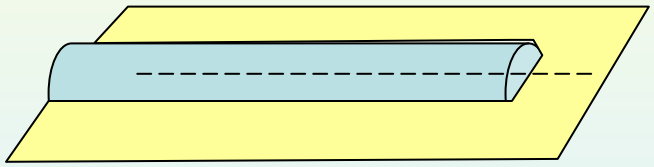
Directividad

En general, intensidad en campo lejano libre:

$$I = \frac{WQ\langle \varphi, \upsilon \rangle}{2n\pi r^n} \begin{cases} \text{Cilíndrico: } n = 1 \\ \text{Esférico: } n = 2 \end{cases}$$

Ejemplo: autopista recta con tráfico denso: ≈ fuente cilíndrica isótropa que solamente reparte su potencia en un semiplano

$$G = Q = \frac{I_{\max}}{W} 2\pi r \; ; \; I_{\max} = \frac{W}{\pi r} \Rightarrow G = Q = 2$$



Cálculo de la directividad esférica

- **Ejercicio:** Con los datos de la Figura 1, Tema 1, calcular *DI* del altavoz para las tres frecuencias dadas.
- **Solución:**

$$DI = 10\log\left(\frac{I_{\max}}{\hat{I}}\right) = L_{I_{max}} - L_{\hat{I}} \qquad \hat{I} = W/(4\pi r^2)$$

En la Figura 1 no es reconocible la intensidad media, pero se puede estimar sobre la base de la suavidad de la curva de *I*. Si asumimos que ésta varía linealmente desde 0º hasta 180º:

$$L_{\hat{I}} = 10\log\left(\frac{I_{\max} + I_{\min}}{2}\right) = 10\log\left(\frac{10^{\left(\frac{L_{I\max}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{L_{I\min}}{10}\right)}}{2}\right)$$

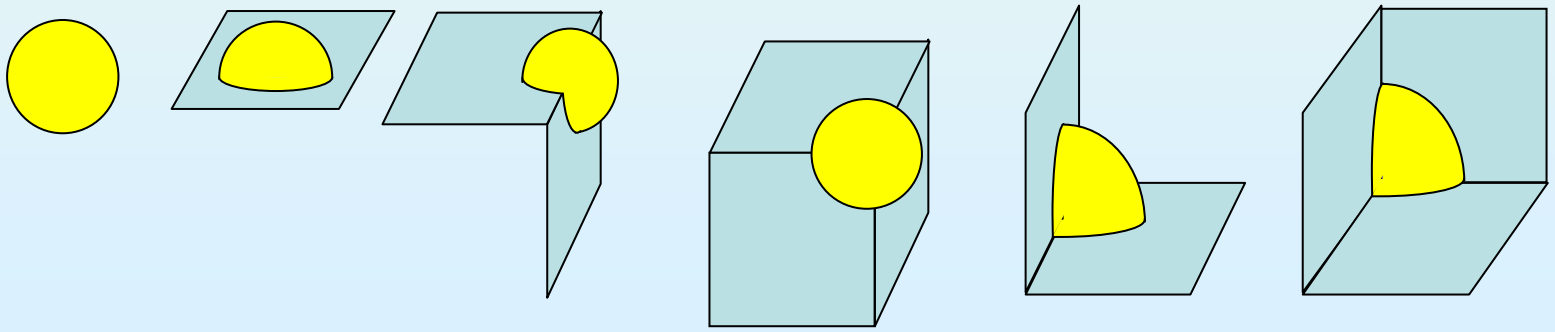
f [Hz]	250	1.000	4.000
$L_{I_{max}} \equiv NIS_{max}$	-6dB	-6dB	-6dB
$L_{I_{\min}}$	-12dB	-24dB	-36dB
$L_{\hat{I}}$	-8dB	-8,9dB	-9dB
DI	2dB	2,9dB	3dB

Cálculo de la directividad esférica

- **Ejercicio:** Calcule la directividad lejana de una fuente omnidireccional sobre una cara, sobre una arista, sobre una esquina, en un borde interno y en un rincón, en un exaedro recto de superficies planas no absorbentes.
- **Solución:** Al tratarse de una fuente omnidireccional, la intensidad máxima es constante con el ángulo, con lo que $G = Q$, pero se reparte en una superficie que es una fracción de la de la esfera, luego:

$$DI = 10\log Q = 10\log \frac{I_{\max}}{\hat{I}} = 10\log \frac{W/S}{W/S_{esfera}} = 10\log \frac{S_{esfera}}{S}$$

	En el espacio	Sobre una cara	Sobre una arista	Sobre una esquina	En un borde interno	En un rincón
$Q = \frac{S_{esfera}}{S}$	1	2	4/3	8/7	4	8
DI [dB]	0	3	1,25	0,58	6	9



Antonio Lecuona Neumann
José Ignacio Nogueira Goriba

Potencia acústica y nivel acústico cilíndrico

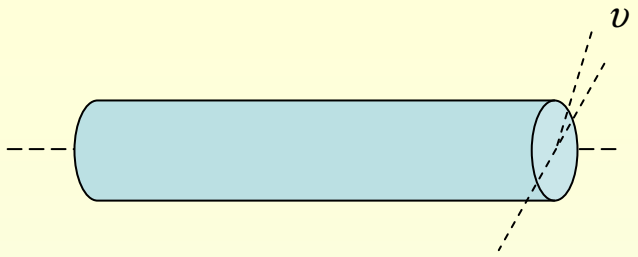
Campo libre cilíndrico no uniforme:

$$I = \frac{W}{2\pi r} Q\langle v\rangle$$

$$\underbrace{I_{ref}}_{10^{-12}\,\mathrm{W/m^2}} = \frac{\overbrace{W_{ref}}^{10^{-12}\,\mathrm{W}}}{2\pi r_{ref} \times 1\mathrm{m}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow r_{ref} = \frac{W_{ref}/\mathrm{m}}{2\pi I_{ref}} = \frac{10^{-12}\,\mathrm{W/m}}{2\pi 10^{-12}\,\mathrm{W/m^2}} = 0{,}159\mathrm{m}$$

Radio de un cilindro de $1\mathrm{m}^2/\mathrm{m}$



$$\Rightarrow \underbrace{10\log\frac{I}{I_{ref}}}_{NIS[\mathrm{dB}]\cong NPS[\mathrm{dB}]} = \underbrace{10\log\frac{W}{W_{ref}}}_{NP[\mathrm{dB}]} - \underbrace{10\log\frac{r}{r_{ref}}}_{10\log\frac{r}{0{,}159\mathrm{m}}} + \underbrace{10\log Q\langle v\rangle}_{DI}$$

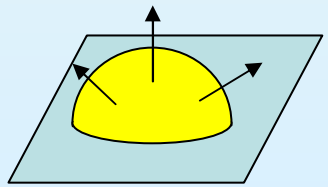
$$\boxed{NPS_{directa} = NP - 10\log r[\mathrm{m}]\text{-}8\mathrm{dB} + DI} \qquad (7)$$

Ejercicio: En la etiqueta de un electrodoméstico pequeño se indica $NP \equiv L_w$ = 70 dB, determinar NPS a 2 m de distancia en la hipótesis de campo libre (en el exterior p. e.) y asumiendo que radia por igual en todas direcciones:

Por campo uniforme: DI = 0 dB

$$NPS = NP - 20\log r[\mathrm{m}]\text{-}11\mathrm{dB} + DI = 70 - 20\log 2 - 11 = 53\mathrm{dB}$$

Si el electrodoméstico se situara en el suelo, aunque la potencia es la misma, se reparte en la mitad de espacio:



$$DI = 10\log 2 = 3\mathrm{dB} \Rightarrow NPS = 56\mathrm{dB}$$

Valores típicos de potencia acústica y nivel de potencia acústica

Potencia acústica [W]	$L_w \equiv NP$ [dB]	Fuente
25 a 40.000.000	195	Cohete Saturno
100.000	170	Ram Jet (estatorreactor)
10.000	160	Turborreactor militar de 3.200kg de empuje
1.000	150	Avión de transporte civil en despegue
100	140	Avión de 4 hélices en despegue
10	130	Martillo machacador industrial
1	120	Orquesta de 75 músicos
0,1	110	Radio a todo volumen (no HIFI)
0,01	100	Automóvil en autopista
0,001	90	Ventilador axial (2.500 m³/h)
0,0001	80	Grito
0,00001	70	Voz a nivel de conversación
0,000001	60	Voz baja
0,0000001	50	Voz muy baja
0,00000001	40	Casi un susurro
0,000000001	30	Susurro

Suma de niveles acústicos

- Se basan en la suma de intensidades, cuando es aceptable:

$$I = \sum_i I_i$$

$$\left.\begin{array}{l} I = \sum_i I_i \\ \underbrace{NPS}_{L_w} \equiv \underbrace{NIS}_{L_I} = 10\log\frac{I}{I_{ref}} \Rightarrow I = I_{ref}\,10^{\frac{NPS}{10}} \end{array}\right\} \Rightarrow \cancel{I_{ref}}\,10^{\frac{NPS}{10}} = \cancel{I_{ref}}\sum_i 10^{\left(\frac{NPS_i}{10}\right)}$$

Simplificando y tomando logaritmos:

$$10\log\left(10^{\frac{NPS}{10}}\right) = 10\log\left[\sum_i 10^{\left(\frac{NPS_i}{10}\right)}\right] \Rightarrow \boxed{NPS = 10\log\left[\sum_i 10^{\left(\frac{NPS_i}{10}\right)}\right]}$$

Ejercicio: Una fuente origina en un punto de su campo lejano un *NPS* de 90 dB, calcular la el *NPS* si se añade otra que origina también 90dB en el mismo punto.

$$NPS = 10\log\left[10^{\left(\frac{90}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{90}{10}\right)}\right] = 10\log\left[10^9 + 10^9\right] = 10\log 2\times 10^9 = 10\log 2 + 10\log 10^9 = 3\text{dB} + 90\text{dB} = 93\ \text{dB}$$

Se observa que una duplicación equivale a sumar 3 dB, sea cual sea el nivel

Campos acústicos simples reales

Un **campo libre** muestra:

- Un decrecimiento del NPS de 6dB al duplicarse la distancia, si es esférico, ec. (6).
- Un decrecimiento del NPS de 3 dB al duplicarse la distancia, si es cilíndrico, ec. (7).

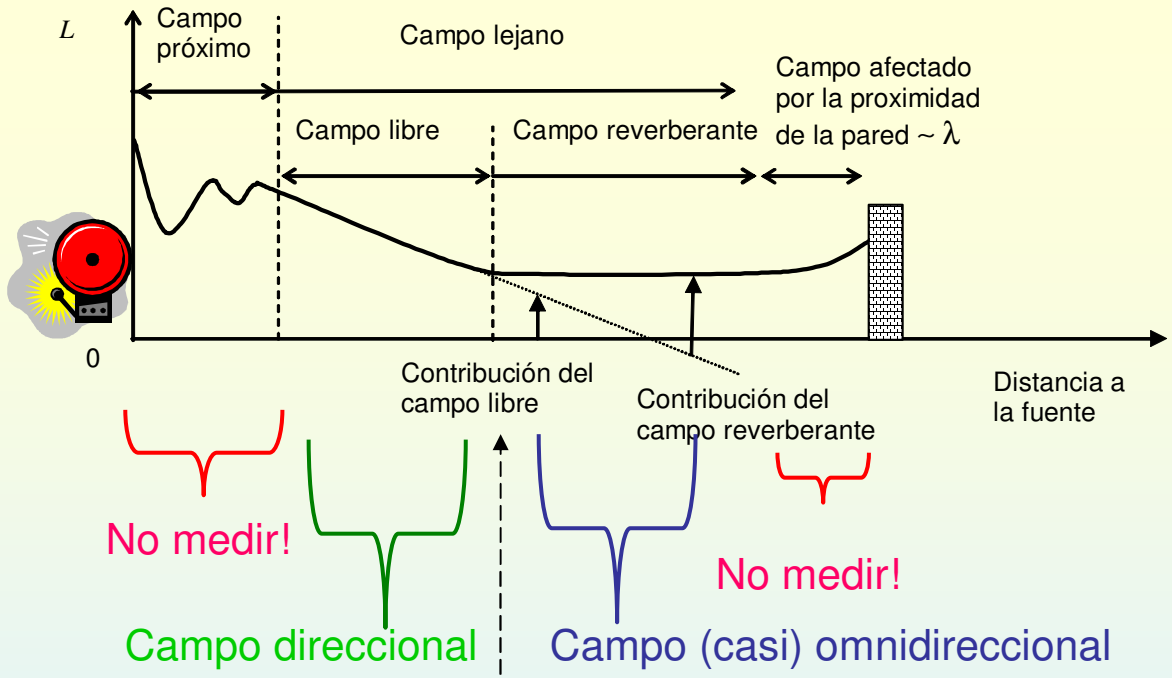
Un **campo difuso** muestra:

- Una insensibilidad del NPS con la distancia a la fuente.

Si en un recinto disponemos una fuente:

- Muy cerca de ella hay un **campo próximo**, complejo, donde la relación entre intensidad acústica y presión acústica no es tan simple como se asume corrientemente, desaconsejándose la medida con sonómetros y cálculos simples como los indicados.
- A distancias mayores que el doble de la dimensión de la fuente y mayores que la longitud de onda mayor de amplitud relevante estaremos en el **campo lejano**. El campo es simple y valen las relaciones hasta ahora descritas.
- En el campo lejano puede haber una zona donde se encuentre un **campo libre**, por dominar la radiación directa sobre la reflejada.
- A suficiente distancia aparece una aproximación al **campo difuso** por ser al menos comparable la radiación reflejada con la directa, se suele llamar **campo reverberante**. Lo suficientemente lejos llegaría a ser completamente difuso.

Campos acústicos simples reales



Medición del nivel acústico al alejarse el sonómetro de una fuente. Muestra la subida de nivel junto a una pared reflectante.

Se denomina **radio acústico del recinto** a la distancia desde la fuente a la que el decaimiento esférico empieza a perderse. Es tanto menor cuanto menos absorbentes sean las paredes, véase estimación más adelante. (!!)

Campos acústicos simples reales

Ejercicio: El **radio acústico de un recinto** (comentario (!!) En la página precedente) ha resultado ser de 20 m. Se está midiendo el ruido generado por una impresora matricial cuya dimensión mayor es 40 cm. Corríjase una medición realizada a 1 m de la misma, la cual arrojó un valor de 67 dBA para predecir la medición a 3 m.

Solución: En la hipótesis de que la impresora emita a frecuencias medias y altas, lo cual es lo habitual para los modelos recientes por su alta velocidad de impresión, la longitud de onda será menor que 40 cm, con lo que a 1 m ya estamos en campo lejano. Como 3 m es claramente inferior al radio del recinto, estamos en campo libre y se puede usar la ley del cuadrado de la distancia.

$$W_1 = W_2 \Rightarrow I_1 S_1 = I_2 S_2$$

$$\left.\begin{array}{l} \underbrace{10\log\left(\dfrac{I_2}{I_{ref}}\right)}_{\text{Ec.(5qui)}\Rightarrow NPS_2} \\ = 10\log\left(\dfrac{I_1}{I_{ref}}\dfrac{S_1}{S_2}\right) \end{array}\right\} \Rightarrow NPS_2 = NPS_1 - 10\log\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 = 67\,\text{dBA} - 9\,\text{dB} = 58\,\text{dBA}$$

Nivel acústico en recintos

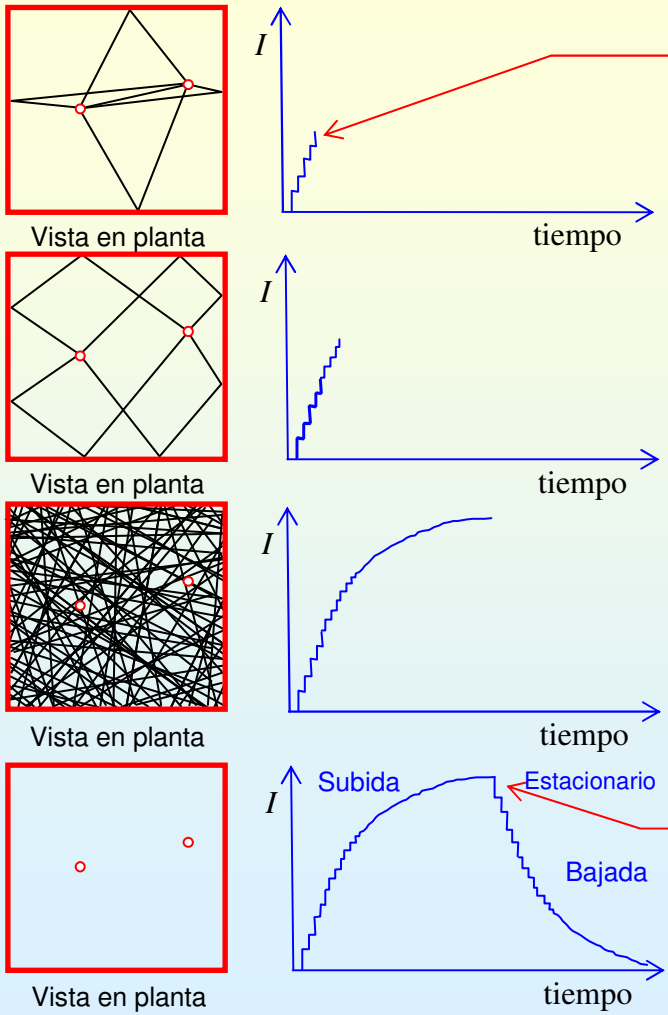
Evolución en el tiempo de la densidad de energía (O) de una fuente (S) que comienza a emitir bruscamente sonido sostenido y posteriormente cesa bruscamente.

Sonido directo y primeras reflexiones

Reflexiones múltiples (rayos menos intensos y más numerosos)

Reflexiones de orden elevado. La densidad de energía es alta.

Ha dejado de emitir la fuente, pero se reciben las reflexiones del sonido, aún viajando en el aire (reverberación)



Idealización, normalmente ocurren pulsos (ecos) al principio.

Subida

Si continuara la emisión alcanzaríamos un estado estacionario (sostenimiento)

Caída

Idealización, normalmente ocurren pulsos (ecos) al principio.

Fuente: H. Olson Music, Physics and Engineering, 2nd ed. Dover 1967

Eco y reverberación

Al comenzar el sonido en un recinto, se recibe el primer **eco** instantes después, a causa de una primera reflexión. Los siguientes ecos vienen a continuación, para seguidamente comenzar a llegar los ecos de segundas reflexiones, cada vez aportando menos a causa de la absorción de las paredes y del aire.

La superposición de ecos hace que el nivel acústico suba, a costa de cierta inteligibilidad del sonido.

Al cesar un sonido, éste persiste, fenómeno denominado **reverberación**. Los ecos cada vez son más débiles, hasta que resultan inaudibles.

También se denomina **reverberación** el fenómeno de no poderse distinguir unos ecos de otros.

Si el eco de una sílaba se superpone con la siguiente, la **inteligibilidad** de la palabra sufre.

- Para estudiar de forma simple la subida de nivel acústico de una fuente tenida y la reverberación al cesar ésta asumamos que **desde el principio de alcanza el campo difuso**. Con ello toda la superficie S estará "iluminada" con igual intensidad acústica.
- Se asumirá que al cesar el sonido ocurre lo mismo, se tiene campo difuso hasta el final.
- Esto permite recurrir a una subida y bajada del nivel acústico continuas.

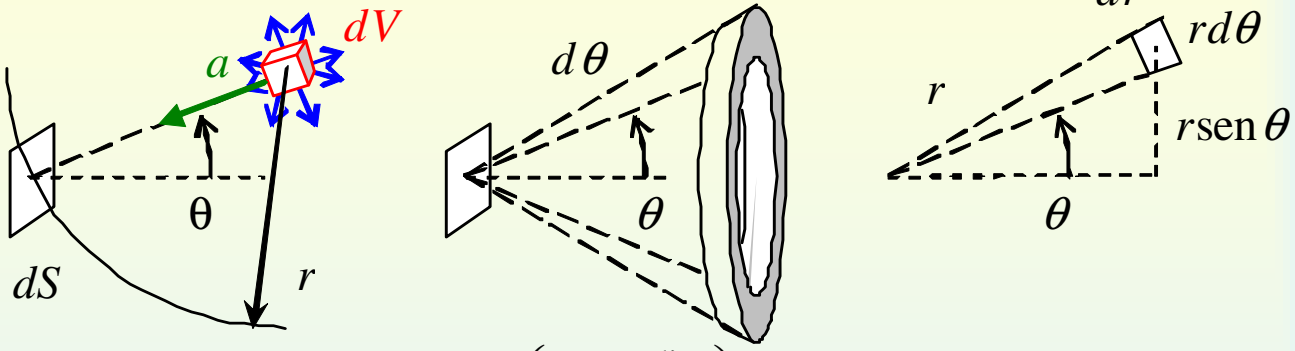
Nivel acústico en recintos

- Balance energético no estacionario del sonido en un recinto para estudiar su evolución en el tiempo.
- La absorción se realiza fundamentalmente en las superficies, siendo la absorción del aire generalmente inapreciable salvo distancias grandes $\rightarrow$ buscar relación entre la densidad de energía w dentro del recinto y el flujo de energía que alcanza las paredes.
- Finalmente formular el balance.
- Se asumirá evolución continua, como aproximación a la evolución escalonada anteriormente vista.
- Se asumirá densidad acústica espacialmente homogénea (campo difuso).

Antonio Lecuona Neumann
José Ignacio Nogueira Goriba

Nivel acústico en recintos

Elemento de pared dS y elemento de volumen en el recinto dV con densidad de energía w, elijamos una configuración favorable para integrar la contribución al flujo de energía acústica incidente $\dot{E}_{inc}$ en dS de un campo difuso, que por ser omnidireccional no resulta inmediata de obtener.



Fracción de la sup. esférica

$$d^2E_{inc} = wdV\,\overbrace{\frac{dS\cos\theta}{4\pi r^2}}$$

Con igual θ : $dV = \left(2\pi\,\overbrace{rsen\theta}^{\text{radio}}\right)(dr)(rd\theta) = 2\pi r^2 drsen\theta d\theta$

$$dE_{inc} = \frac{wdSdr}{2}\int_0^{\pi/2} sen\theta\cos\theta d\theta = \frac{wdSdr}{4}$$

$$\dot{E}_{inc} = \frac{dE}{dt} = \frac{wadS}{4}$$

Propag. a la veloc. del sonido: $dt=dr/a$

Todo el recinto con área de absorción A absorbe una potencia:

$$\dot{E} = \frac{waA}{4}$$

Campo difuso, se suman todas las fuentes: $w = \sum_i w_i$

Nivel acústico en recintos

- El balance puede formularse así:

$$V\frac{dw}{dt}+\frac{aA}{4}w=W$$

Potencia de energía acústica de las fuentes, constante.

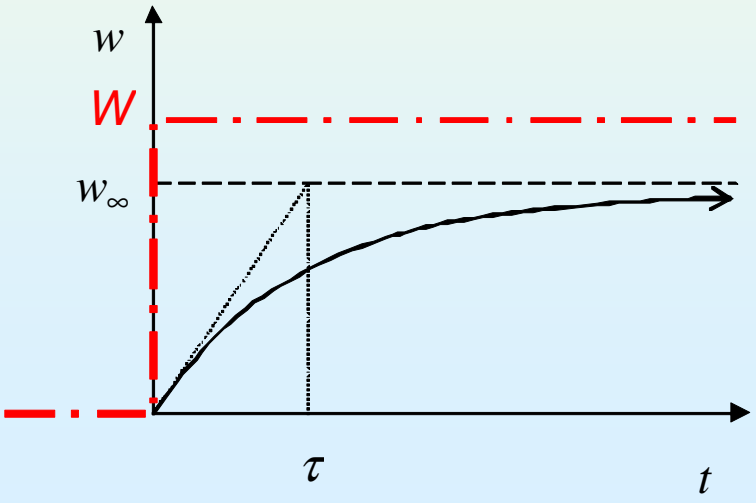
Variación de la energía acústica en V

Absorción de la energía acústica en V

Integrando la ec. dif. con comienzo en $t = 0$, $w = 0$, W = cte. a partir de $t = 0$:

$$w=\underbrace{\frac{4W}{Aa}}_{w_\infty}\left[1-\exp\left(-t/\tau\right)\right]$$

Con la constante de tiempo: $\tau=\dfrac{4V}{Aa}$



Nivel acústico en recintos

Se alcanza el estado estacionario cuando $t >> \tau$

$$w_\infty = \frac{4W}{Aa}$$

Según la ec. (5 bis) :

$$w = \frac{(P_{rms})^2}{\rho_{at} a^2} \Rightarrow (P_{rms})^2 = \rho_{at} a^2 w$$

$$\Rightarrow (P_{rms\infty})^2 = \frac{4W\rho_{at} a}{A} \quad (*)$$

Ejemplo: Suponga un recinto típico de salón unifamiliar de 5m×5m×2,5m, con un área de absorción A = 10 m², en el cual una fuente acústica emite 0,1 W de potencia acústica. Determinar el nivel acústico en decibelios.

Solución:

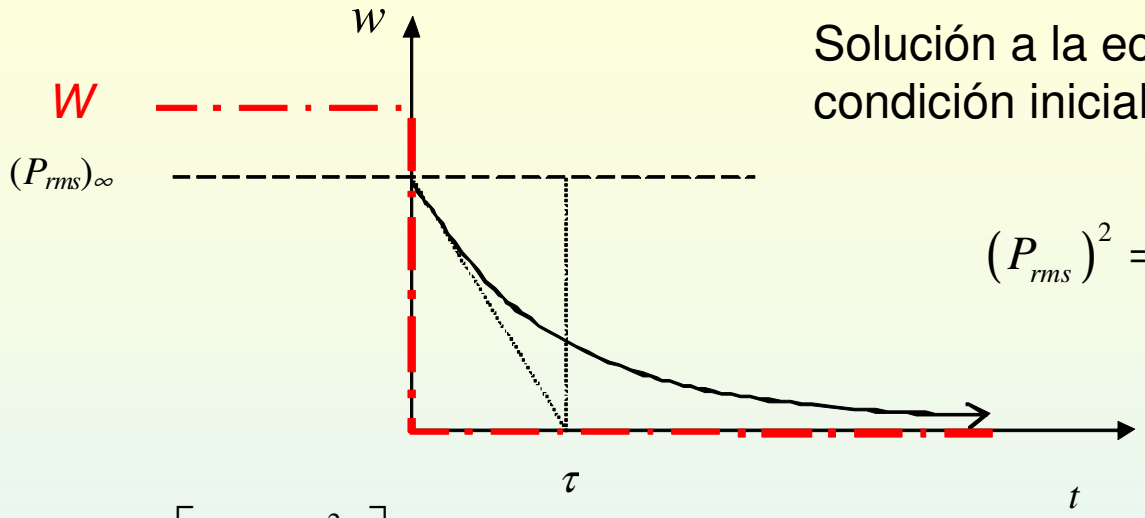
$$NPS = L_p = 10\log\left(\frac{P_{rms}}{20\mu\text{Pa}}\right)^2 = 20\log\left(\frac{P_{rms}}{20\mu\text{Pa}}\right)$$

$$(P_{rms})_e = \sqrt{\frac{4W\rho_{at} a}{A}} = \sqrt{\frac{4\times 0{,}1\,(\text{Nm/s})\times 1{,}2\,(\text{kg/m}^3)\,340\,(\text{m/s})}{10\text{m}^2}} = 4{,}04\text{Pa}$$

$$\Rightarrow L_p = 20\log\left(\frac{4{,}04\text{Pa}}{20\mu\text{Pa}}\right) = 106\text{dB}$$

Nivel acústico en recintos

- **Tiempo de reverberación** T o T_{60}: tiempo en el que un sonido estacionario, al cesar reduce su *rms* a la **millonésima** parte ≡ -60 dB**.**



Solución a la ecuación dif. Con la condición inicial: $t = 0$, $P_{rms} = P_{rms\infty}$, $W = 0$

$$\left(P_{rms}\right)^2 = \left(P_{rms\infty}\right)^2 \exp\left(-t/\tau\right)$$

Inicial

$$-60 = 10\log\left[\frac{\left(P_{rms}\right)^2}{\left(P_{rms\infty}\right)^2}\right] = 10\log\left[\exp\left(-T_{60}/\tau\right)\right] = -\frac{10T_{60}}{\tau\ln(10)} = -\frac{10T_{60}Aa}{4V\ln(10)} \Rightarrow T = \frac{24V\ln(10)}{Aa}$$

a = 343 m/s a 20ºC $\rightarrow$ $$T_{60} = 0{,}1611\frac{V}{\underbrace{\bar{\alpha}S}_{A}}\left(\text{s/m}\right)$$

(9) **Fórmula de Sabine**

Para coeficiente medio de absorción la unidad o cercano a ella no es precisa esta ecuación .

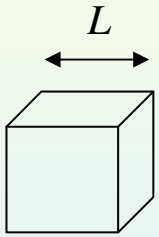
Por ello es frecuente ver que A se sustituye por: $R = \frac{\bar{\alpha}S}{1-\bar{\alpha}}$ que resuelve el problema.

Proviene de teorías más elaboradas.

Nivel acústico en recintos

Ejercicio: haciendo uso de la fórmula de Sabine, determinar el tiempo de reverberación en condiciones atmosféricas normales de un recinto cúbico recubierto interiormente de un material de coeficiente de absorción medio 0,1. Haga uso de A y de R para comparar.

$$\left.\begin{array}{l} \text{Ec. (9):}\ T_{60} = 0{,}1611 \dfrac{V}{\underbrace{\bar{\alpha} S}_{A}} \dfrac{\text{s}}{\text{m}} \\ V = L^3 \ ; \quad S = 6L^2 \end{array}\right\} \Rightarrow T_{60} = 0{,}1611 \frac{L^3}{6L^2} = 0{,}0269 \frac{L}{\bar{\alpha}} \frac{\text{s}}{\text{m}}$$



L (m)	T_{60} (s) con A	T_{60} (s) con R
1	0,27	0,24
10	2,7	2,4
50	13,45	12

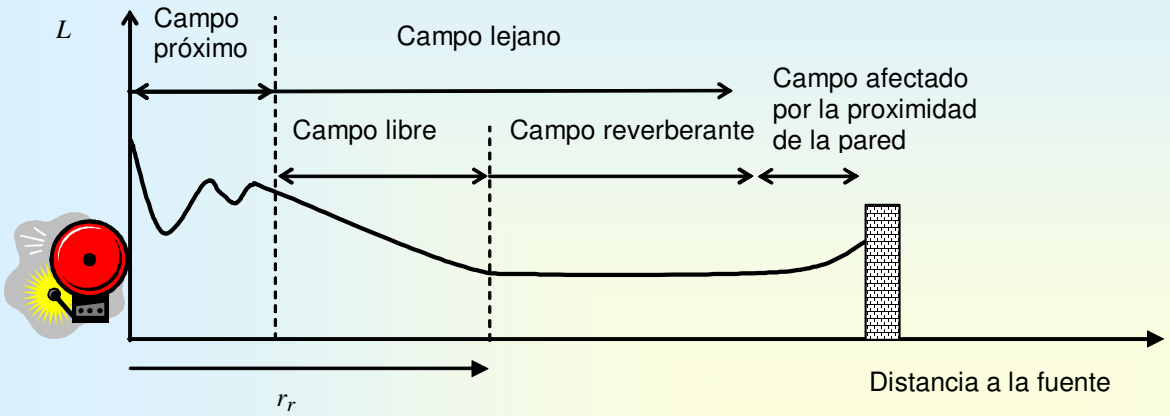
Debido a lo que cambia α con la frecuencia, el tiempo de reverberación se suele medir en bandas de tercios de octava. Demostración con diferentes T_{60} en la Wikipedia:

http://en.wikipedia.org/wiki/Reverberation_time

Reverberation_effect.ogg

Antonio Lecuona Neumann
José Ignacio Nogueira Goriba

Cálculo del radio del recinto (sonido estacionario)



Recordando: Se denomina **radio del recinto** r_r o **distancia crítica** a la distancia a la que el decaimiento esférico empieza a perderse. Es tanto menor cuanto menos absorbentes sean las paredes.

Estimación del **radio del recinto**: $I_{directa} = I_{reverberante} \Rightarrow NPS_{directa} = NPS_{reverberante}$.
Además es lógico asumir omnidireccionalidad: $DI = 0$

$$\text{Ec. (6)} \rightarrow NPS_{directa} = NP - 20\log r[\text{m}]\text{-}11\text{dB} = NPS_{reverberante}$$

$$NPS_{reverberante} = 10\log\left[\frac{(P_{rms\infty})}{P_{rmsref}}\right]^2 = 10\log\left(\frac{W}{W_{ref}}\frac{4W_{ref}\rho_{at}a}{AP_{rmsref}{}^2}\right) = NP + 10\log\left(\frac{4W_{ref}\rho_{at}a}{AP_{rmsref}{}^2}\right)$$

$$W_{ref} = 10^{-12}\,\text{W} \;;\; \rho_{at} = 1,293\,\text{kg/m}^3 \;;\; a = 343\,\text{m/s} \;;\; P_{rmsref} = 20\times10^{-6}\,\text{N/m}^2$$

$$10\log\left(\frac{4W_{ref}\rho_{at}a}{AP_{rms0}{}^2}\right) = 10\log\left(\frac{4\times10^{-12}\,\frac{\text{kgm}}{\text{s}}\,1,293\,\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\,343\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{\text{Am}^2\times\left(20\times10^{-6}\right)^2\frac{(\text{kgm/s})^2}{\text{m}^4}}\right) = 6,5\text{dB} - 10\log A[\text{m}^2]$$

$$\Rightarrow 20\log r_r[\text{m}] = 10\log A[\text{m}^2]\text{-}17,5\text{dB} \quad (\underline{a})$$

Demostrar que el radio estimado de un recinto esférico con $\alpha = 1$ es aproximadamente la mitad del radio geométrico, aunque debería ser idéntico:

Hacemos $A = 4\pi r_A{}^2$ resulta: $20\log r_r = 10\log 4\pi + 20\log r_A - 17,5dB = 20\log r_A - 6,5 \Rightarrow r_r = 0,4734 r_A$

Nivel acústico en recintos

Ejercicio: Demostrar que el radio de un recinto sigue la fórmula de la Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Reverberation,

$$r_r[m] = 0,057\sqrt{\frac{V[m^3]}{T_{60}[s]}}$$

Ec.(ª): $20\log r_r[\mathrm{m}]=10\log A[\mathrm{m}^2]\text{-}17,5\mathrm{dB} \Rightarrow r_r=\sqrt{0,0178A} = 0,133\sqrt{A}$

$$A = \frac{0,1611V[\mathrm{m}^3]}{T_{60}[\mathrm{s}]}$$

$$\Rightarrow r_r[\mathrm{m}]=0,0535\sqrt{\frac{V[\mathrm{m}^3]}{T_{60}[\mathrm{s}]}}$$

Explicación caso práctico de la Kettering University:
http://www.kettering.edu/~drussell/Demos/RT60/RT60.html

Antonio Lecuona Neumann
José Ignacio Nogueira Goriba

Nivel acústico en recintos

Sobre la base de la suma de intensidades, se puede sumar **la directa y la reverberante**. Así, el nivel acústico en un punto del campo lejano a distancia r de la fuente, alejado de las paredes, en estado estacionario, puede calcularse así:

$$NPS = 10\log\left(\overbrace{I_{directa}}^{\text{Ec. (6)}} + \overbrace{I_{reverberante}}^{\text{Ec. (*)}}\right) = 10\log\left[\left(\frac{QW}{4\pi r^2 I_{ref}} + \frac{4W\rho_{at}a}{AP_{rmsref}{}^2}\right)\frac{W_{ref}}{W_{ref}}\right] =$$

$$= \underbrace{10\log\left(\frac{W}{W_{ref}}\right)}_{NP\equiv L_w} + 10\log\left(\frac{Q}{4\pi r^2}\frac{\overbrace{W_{ref}}^{10^{-12}\,\mathrm{W}}}{\underbrace{I_{ref}}_{10^{-12}\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}}} + \frac{4W_{ref}\rho_{at}a}{AP_{rmsref}{}^2}\right) = NP + 10\log\left(\frac{Q}{4\pi r^2[\mathrm{m}^2]} + \frac{4}{A[\mathrm{m}^2]}1{,}11\right)$$

Se ajusta el resultado tomando el factor 1,11 como 1,0 y se sustituye A por: $R = \dfrac{S\bar{\alpha}}{1-\bar{\alpha}}$

quedando:

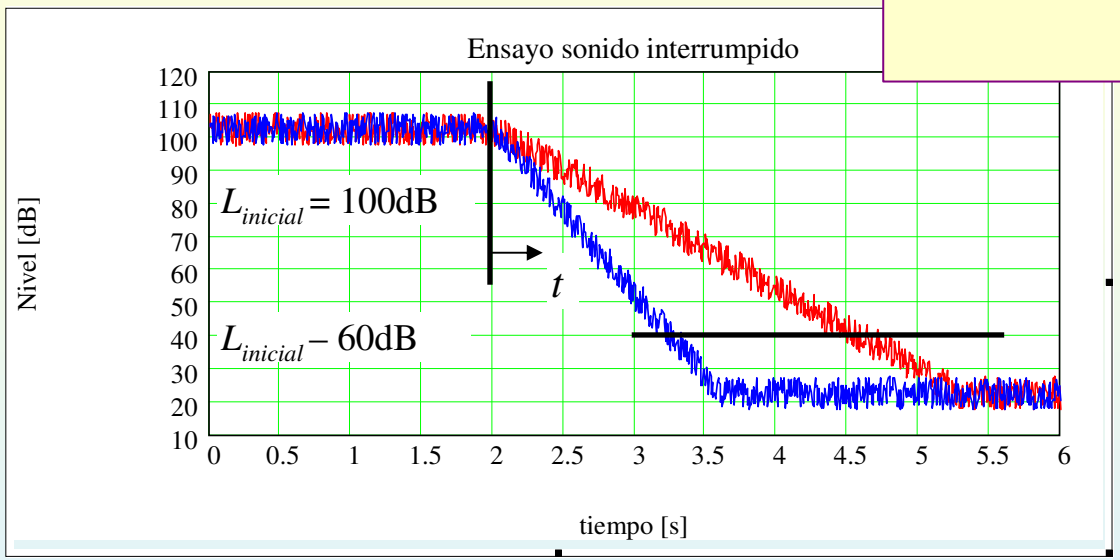
$$\underbrace{NPS}_{L_p} = \underbrace{NP}_{L_w} + 10\log\left(\frac{Q}{4\pi r^2[m^2]} + \frac{4}{R[m^2]}\right) \qquad (\$)$$

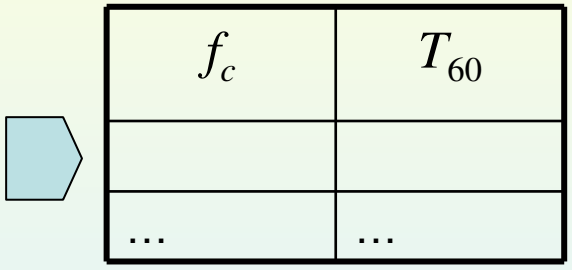
Puede comprobarse que igualando ambos sumandos se obtiene una relación muy próxima a la Ec. (ª). El uso de R en lugar de A resuelve la inexactitud antes encontrada al hallar el radio del recinto esférico

Medida de T_{60} (método de sonido interrumpido)

Se realiza actualmente en bandas de tercios de octava, o en octavas, a causa de la muy distinta absorción de los materiales a distintas frecuencias. Para ello se usa ruido rosa estacionario, que se interrumpe de golpe y se filtra para el intervalo frecuencial elegido.

$$(P_{rms})^2 = (P_{rms})^2_{\infty} \exp(-t/\tau) \Rightarrow \underbrace{10\log\frac{(P_{rms})^2/(P_{ref})^2}{(P_{rms})^2_{\infty}/(P_{ref})^2}}_{L-L_{inicial}} = -\frac{t}{\tau \ln(10)}$$





Hasta 31 tercios de octava

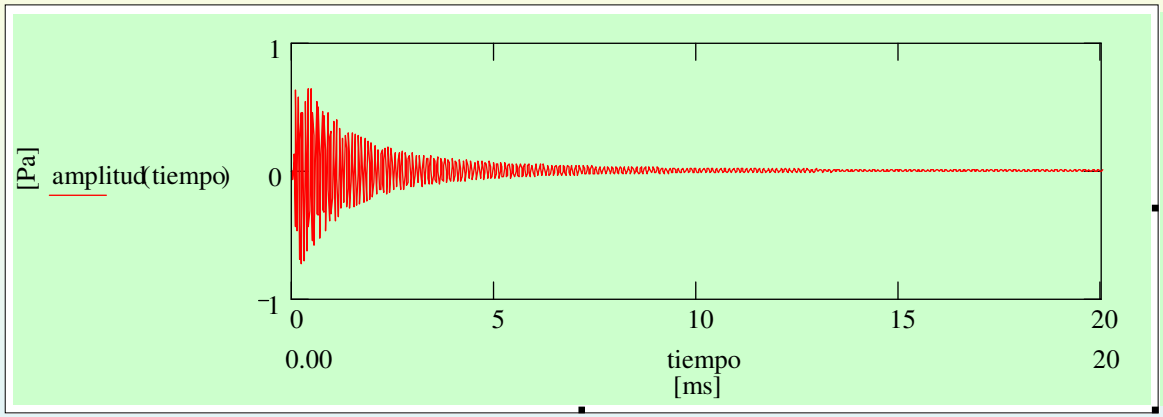
Evolución en el tiempo del nivel de presión acústica instantáneo, medido en una habitación vacía (en rojo) y tras alfombrar el suelo (en azul) proporcionando tiempos de reverberación de 2,6 s y 1,3 s resp. Corresponde a ruido rosa filtrado dejando pasar solamente la octava de frecuencia central de 1.000 Hz. Dimensiones del local más adelante.

Generalmente el ruido de fondo impide llegar a -60dB, por lo que se puede medir solamente hasta – 30 dB (CTE-DB-HR) y extrapolar; se denomina $2T_{30} \cong T_{60}$.

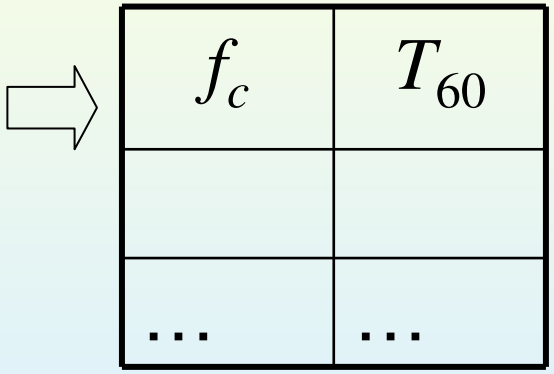
Medida alternativa de T_{60}

El tiempo de reverberación a cada tercio de octava se mide fácilmente con el método del disparo (explotar un globo, una chispa p. e.,), a través de un algoritmo de integración inversa filtrando, llamado **método de Schroeder**.

Es más cómodo y sencillo al no requerir altavoz y fuente de ruido rosa, aunque requiere de un sonómetro con capacidad de procesamiento específico:



P de la respuesta de un recinto a un ruido impulsivo, de tipo disparo.



Hasta 31 tercios de octava

- T_{20} y T_{30} se usan también para dar idea de la evolución temprana de la reverberación, que influye mucho en la inteligibilidad de la palabra.

Cálculo de T_{60} con la fórmula de Sabine

Ejercicio: Estimar los tiempos de reverberación de una habitación de 9,25 m de largo, 7,65 m de ancho, y 3,15 m de alto. Las paredes son de bloques de hormigón pintado, techo y suelo son de hormigón visto. Comparar con el valor medido, mostrado antes. Los datos de coeficiente de absorción son los siguientes:

Frecuencia central (Hz)	**125**	**250**	**500**	***1.000***	**2.000**	**4.000**
Bloques de hormigón pintado	0,10	0,05	0,06	*0,07*	0,09	0,08
Hormigón visto	0,01	0,01	0,015	*0,02*	0,02	0,02
Alfombra sobre hormigón	0,02	0,06	0,04	*0,37*	0,60	0,65
Alfombra sobre espuma	0,08	0,24	0,57	*0,69*	0,71	0,73

$$\left.\begin{aligned} & T_{60}[s] = 0{,}1611\frac{V[m^3]}{A[m^2]} \;;\quad V = 223\mathrm{m}^3 \;;\quad \text{A 1.000 Hz:} \\ & A = 70{,}76\mathrm{m}^2 \times (0{,}02 + 0{,}02) + 2\left(7{,}65 + 9{,}25\right) \times 3{,}15 \times 0{,}07 = 10{,}28\mathrm{m}^2 \end{aligned}\right\} \Rightarrow T_{60,1.000\,Hz} = 3{,}49\mathrm{s}$$

Valores típicos del tiempo de reverberación en la literatura anglosajona

- El tiempo de reverberación a las frecuencias mas usadas en el habla (1.000 y 2.000 Hz típicamente) es el principal criterio para evaluar el comportamiento acústico de un recinto, aunque no el único.
- Si es excesivo (sala viva) la reverberación dificulta el entendimiento de la comunicación hablada, pero se obtienen niveles de sonoridad más elevados, importante para el habla sin megafonía.
- Si es insuficiente (sala seca) el ambiente puede resultar inhóspito y frío, especialmente si es grande.
- Según el uso del recinto conviene un tiempo de reverberación. Es creciente con el tamaño.

Volumen del recinto (m^3)	**Tiempo de reverberación recomendado [s] literatura anglo**		
	Sala de conferencias, cine, aula	Sala de conciertos	Iglesia
10.000	1,0 a 1,1	1,5 a 2,2	2,0 a 3,0
1.000	0,7 a 0,8	1,3 a 2,0	1,6 a 2,2
100	0,6 a 0,7	1,1 a 1,6	1,2

Tiempo de reverberación máximo según el CTE

Código Técnico de la Edificación en España (CTE), Documento Básico HR de Protección frente al ruido.

2.2 Valores límite de tiempo de reverberación (promedio entre el de 500 Hz, 1.000 Hz y 2.000 Hz)

1 El tiempo de reverberación en recintos protegidos* y de uso docente (aulas), independientemente del volumen del recinto, no debe ser mayor que 0,7 s.

2 El tiempo de reverberación en salas de conferencias en forma de paralelepípedo, cuyo volumen sea menor que 350 m^3, no debe ser mayor que 0,7 s.

3 El tiempo de reverberación en salas de conferencias en forma de paralelepípedo, cuyo volumen sea 250 $m^3 < V \leq 350$ m^3, no debe ser mayor que 0,5 s.

4 El tiempo de reverberación en restaurantes y comedores, independientemente del volumen del recinto, no debe ser mayor que 0,9 s.

* Recintos protegidos son recintos habitables con protección mayor.

Tiempo de reverberación e inteligibilidad de la palabra.

- Un tiempo de reverberación mínimo permite que el nivel de la voz natural recibido por el oyente sea más elevado a causa de los distintos rayos reflejados recibidos, que refuerzan la intensidad, favoreciendo la inteligibilidad de la comunicación oral. Por ello, los auditorios previstos para la voz natural (anfiteatros antiguos, iglesias antiguas, aulas, mercados, etc.) suelen tener tiempos de reverberación ligeramente altos.
- El efecto positivo del mayor nivel acústico se ve ensombrecido por el efecto negativo de la reverberación, que dificulta la inteligibilidad. La causa es el distinto tiempo de llegada de los distintos rayos.
- Una mayor calidad de la comunicación hablada se consigue con tiempos de reverberación pequeños y un refuerzo electroacústico (micrófono-amplificador y altavoces) que distribuya la palabra por el recinto.

Demostración accesible en la empresa McSquared System Design Group, Inc. en:
http://www.mcsquared.com/y-reverb.htm

Cuestiones de autoevaluación, tema 6

- ¿Porqué un espectro de sonido se representa en coordenadas logarítmicas?.
- ¿Porqué un espectro en octavas siempre tiene más intensidad en cada banda que el espectro del mismo sonido en fracciones de octava?.
- Compruebe que 0 dB de nivel de intensidad acústica no corresponde con 0 dB de nivel de potencia.
- La directividad de una fuente ¿puede ser alterada por objetos próximos?.
- ¿ Se puede decir que la suma de dos fuentes acústicas que difieran más de 10 dB entre sí es igual a la más intensa?. Razone la respuesta.
- Dado un recinto, su radio acústico ¿es menor si se ha aumentado la absorción del recinto?.
- Verifique que al aumentar la escala de un recinto, con materiales iguales, el tiempo de reverberación aumenta con ella. Correspondientemente, los tiempos de reverberación recomendados para locales de grandes magnitudes suelen ser grandes también.

Actividades propuestas, tema 6

- Observe el indicador gráfico “display” de un reproductor de música de alta fidelidad e identifique las barras que muestran el contenido a las distintas frecuencias simultáneamente a la reproducción. Si es de suficiente calidad será de octavas o fracción de ella. Puede que no incluyan todo el intervalo acústico ni que usen las frecuencias centrales preferidas.
- Observe los indicadores de nivel de audio “VU meters” en un equipo de música. Generalmente marcan 0 dB en el máximo nivel posible, por lo que lo normal es tener dB < 0. Si dB > 0 habrá saturación.
- El bibliografía adicional encuentre la directividad de un sensor acústico. Comprobará que análogamente a la directividad de una fuente, ésta es mayor cuanto mayor es la dimensión de la fuente transversal a la dirección de propagación. Así, los animales con orejas grandes, éstas suelen ser orientables.
- Observe que cuando se desea difundir el sonido en un plano horizontal, se disponen los altavoces más altos que anchos, o se apilan verticalmente.
- Experimente sobre el tiempo de reverberación de un recinto dando una palmada seca. Así es como Sabine empezó a valorarlos acústicamente.
- ¿Es el tiempo de reverberación distinto a distintas frecuencias?