



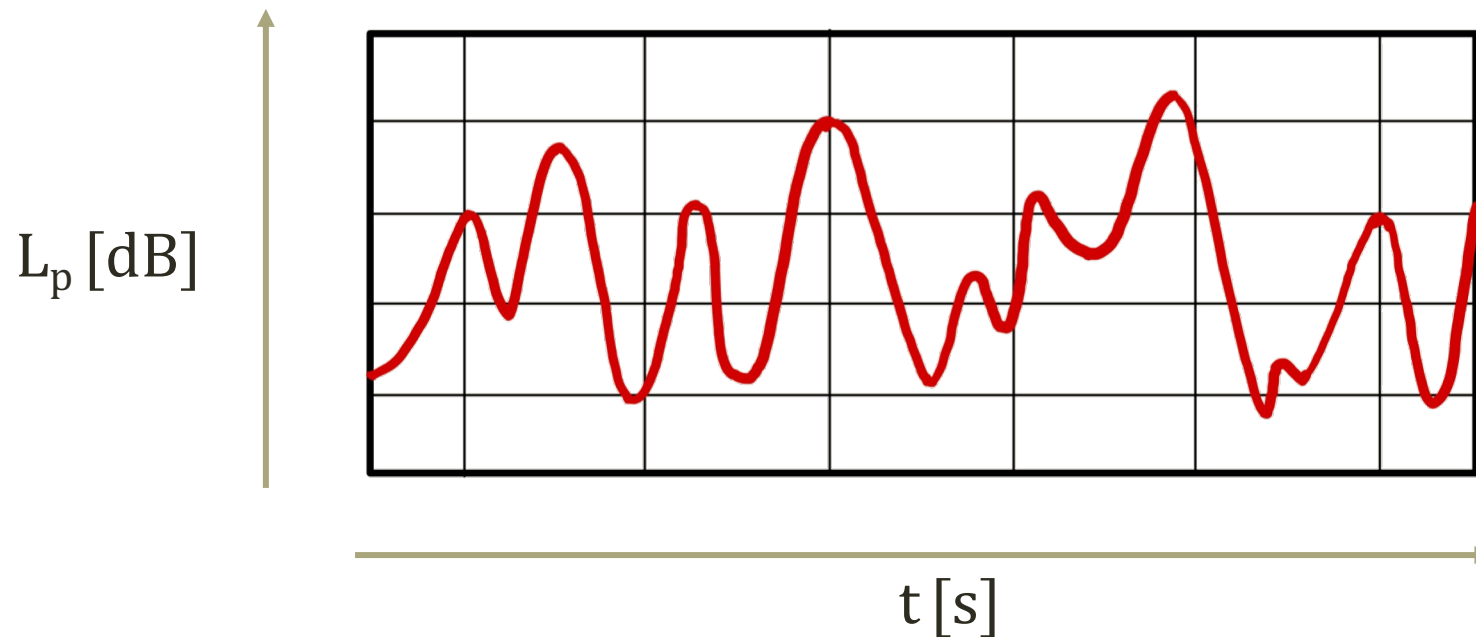
Grupo de Investigación en Acústica Arquitectónica
Universidad Politécnica de Madrid

¿Cómo medir tu sistema de monitoreo?

Antonio Pedrero González

SEÑALES

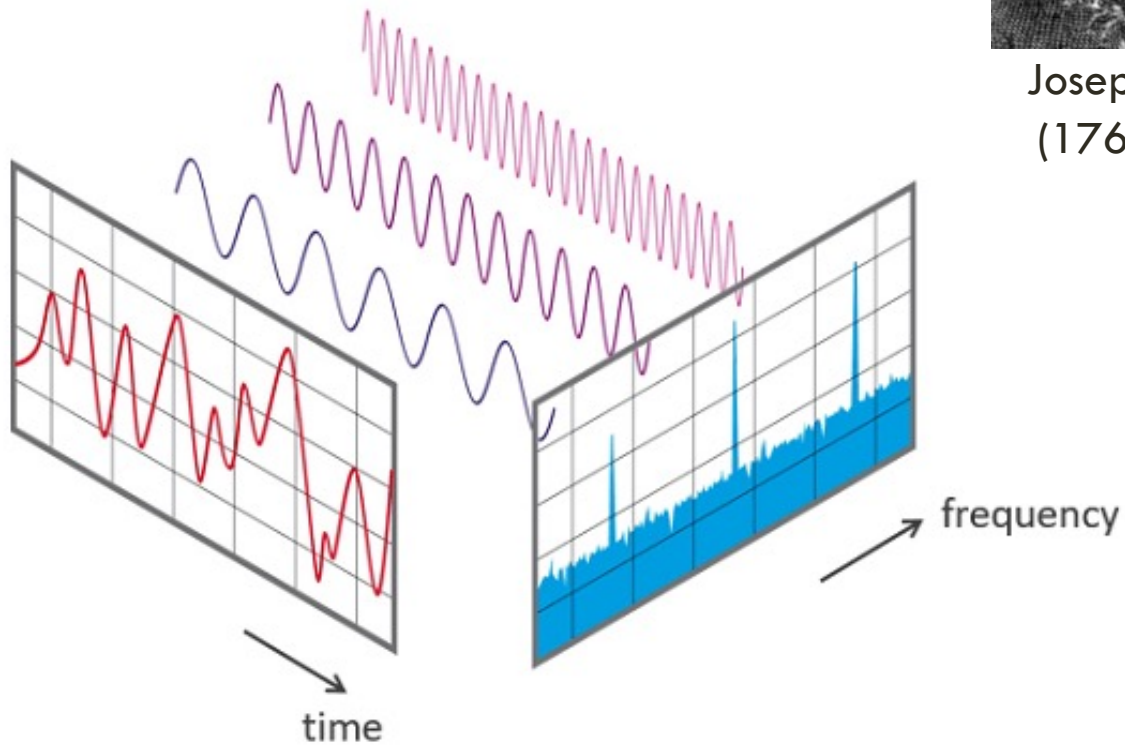
Una señal es una representación matemática de la evolución de una magnitud física respecto de algún o algunos parámetros; generalmente tiempo o espacio.



SEÑALES



Joseph Fourier
(1768-1830)



$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt$$

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) \cdot e^{j2\pi ft} dt$$

Fuente: Trekhleb,O; Playing with Discrete Fourier Transform Algorithm in JavaScript



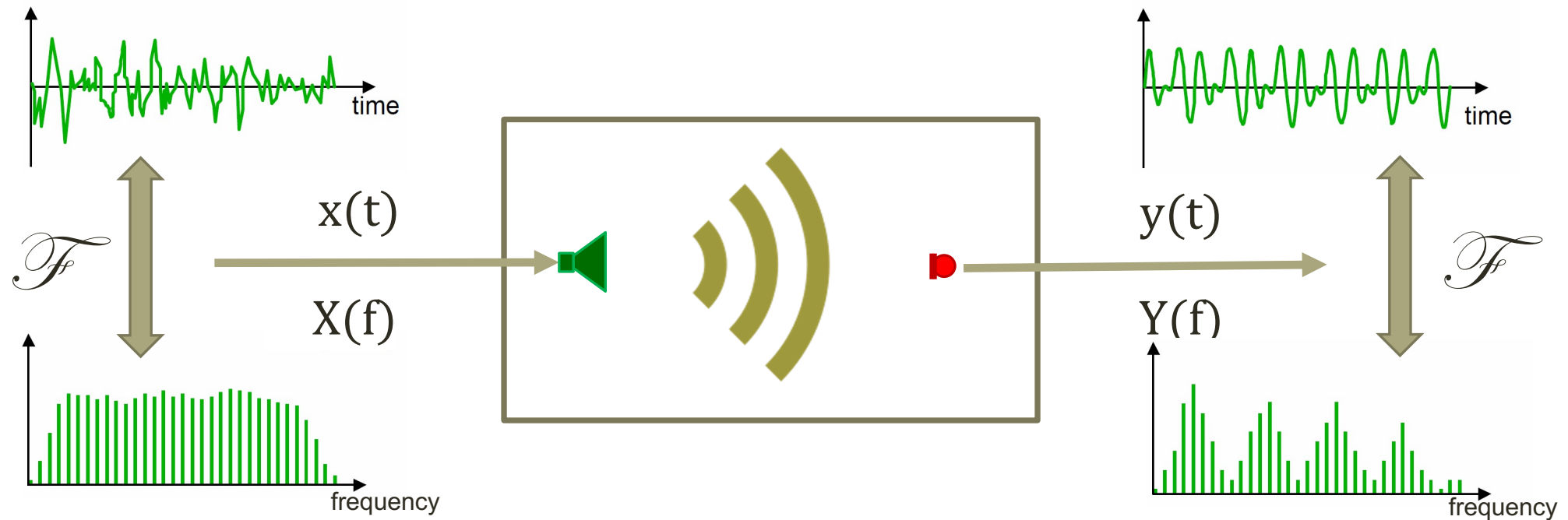
SISTEMAS

Un sistema es una representación matemática de una entidad física que ante el estímulo de una o varias magnitudes físicas (señales) ofrece como respuesta otras magnitudes (señales).

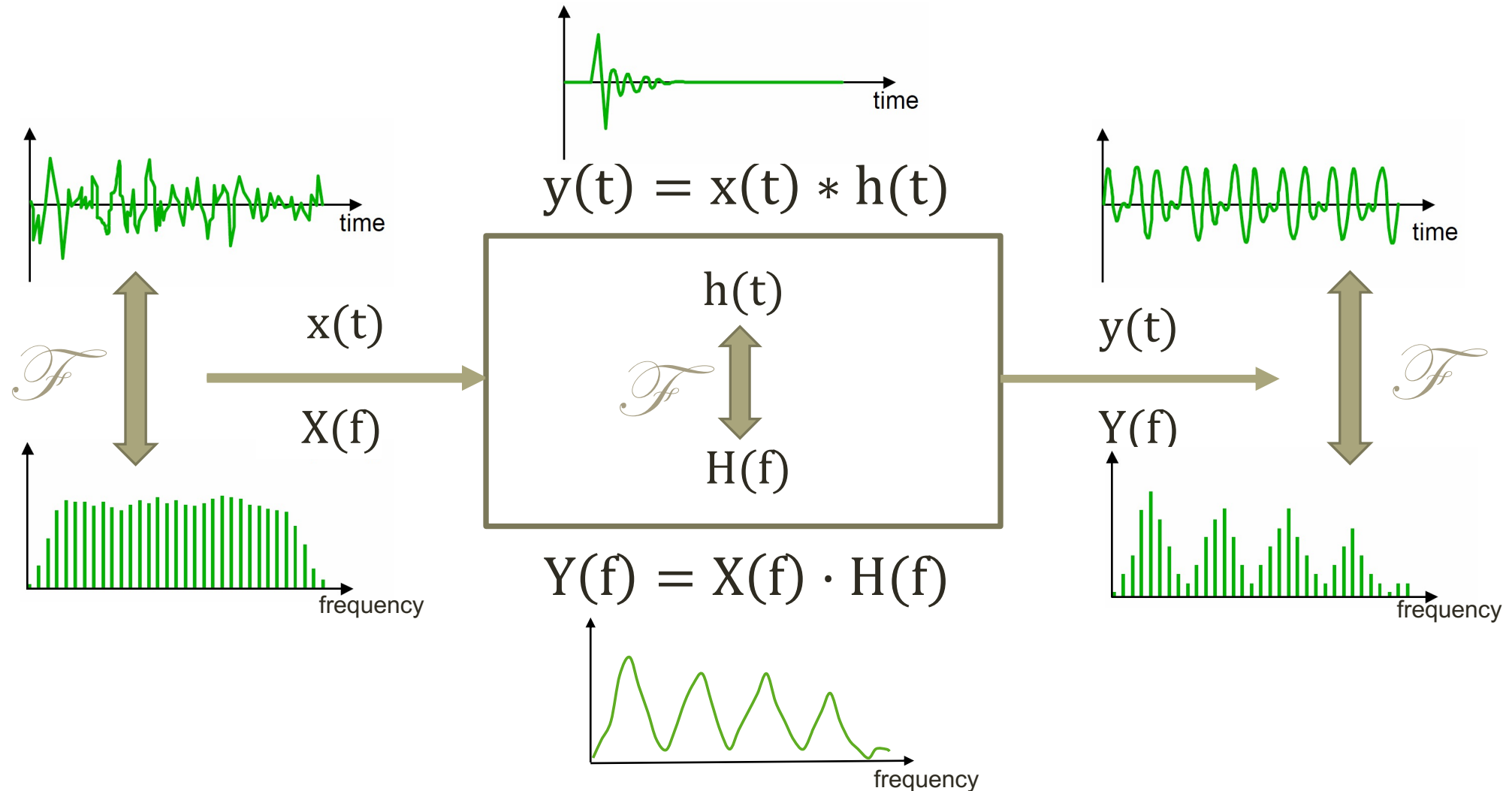


SISTEMAS

Un sistema es una representación matemática de una entidad física que ante el estímulo de una o varias magnitudes físicas (señales) ofrece como respuesta otras magnitudes (señales).

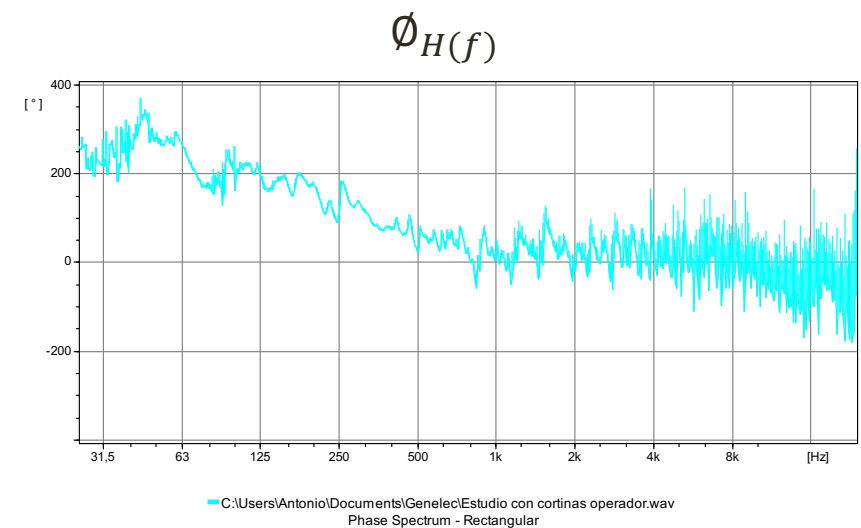
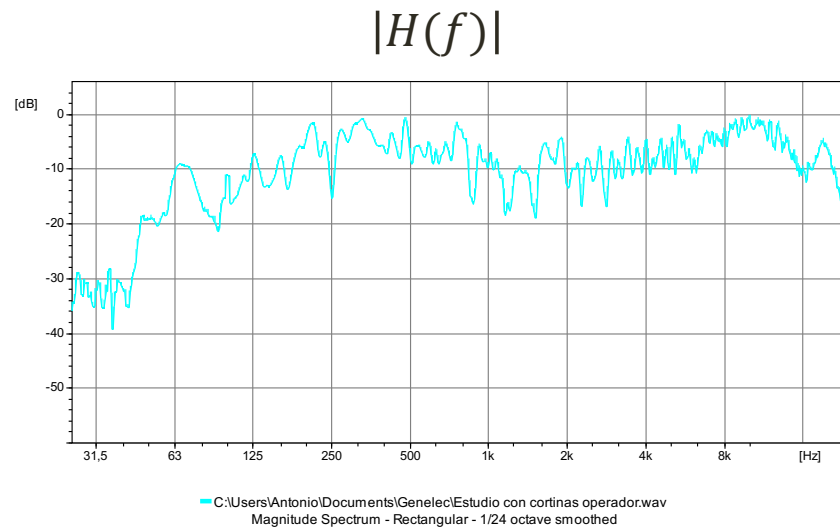


SISTEMAS LINEALES E INVARIANTES EN EL TIEMPO (LTI)



LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

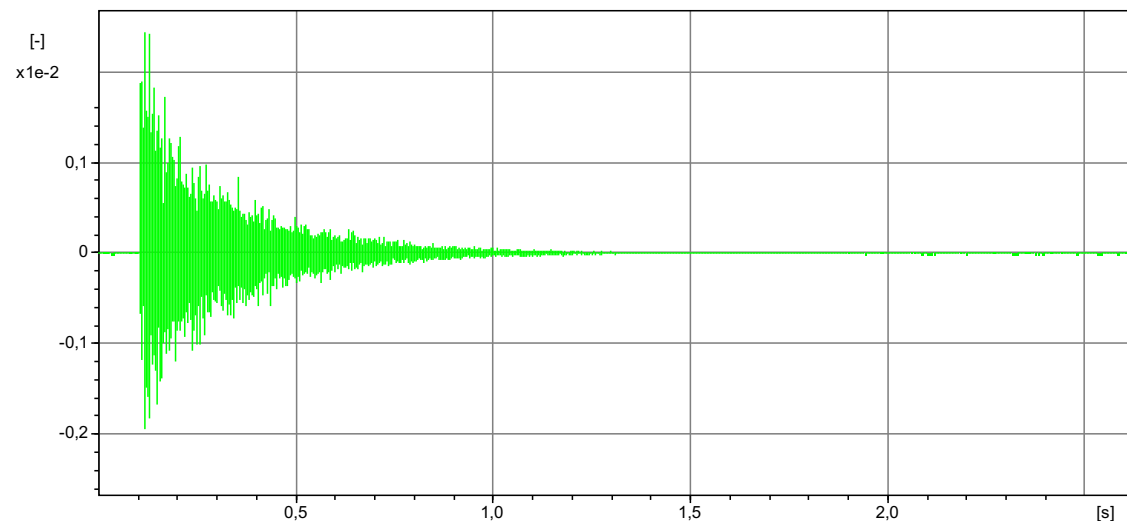
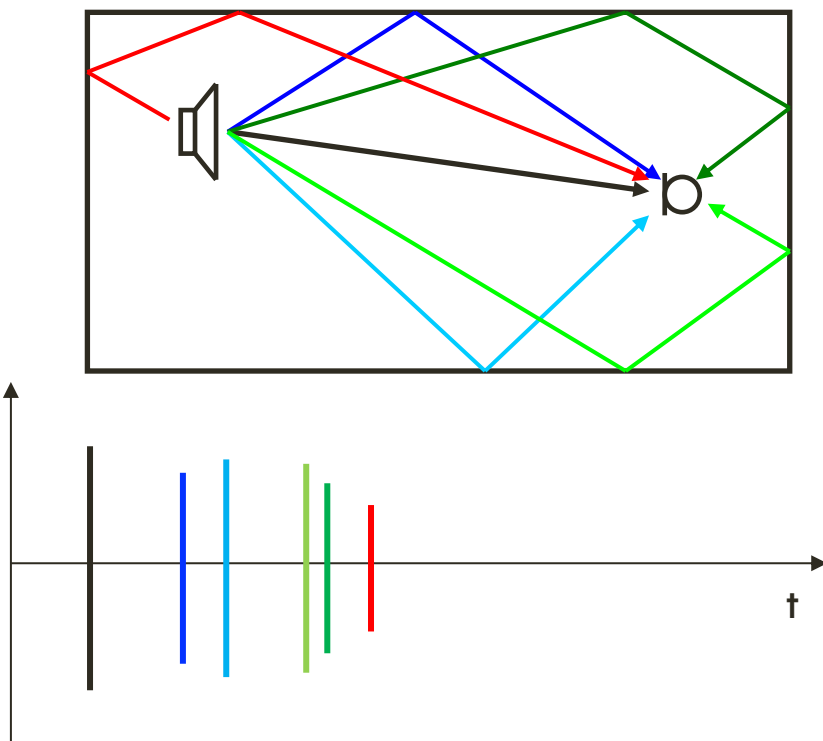
La función de transferencia $H(f)$ es una propiedad del sistema que caracteriza la forma en que el sistema modifica la señal de entrada para producir la señal de salida.



El módulo de la función de transferencia es lo que en audio denominamos **Respuesta en Frecuencia**

LA RESPUESTA AL IMPULSO

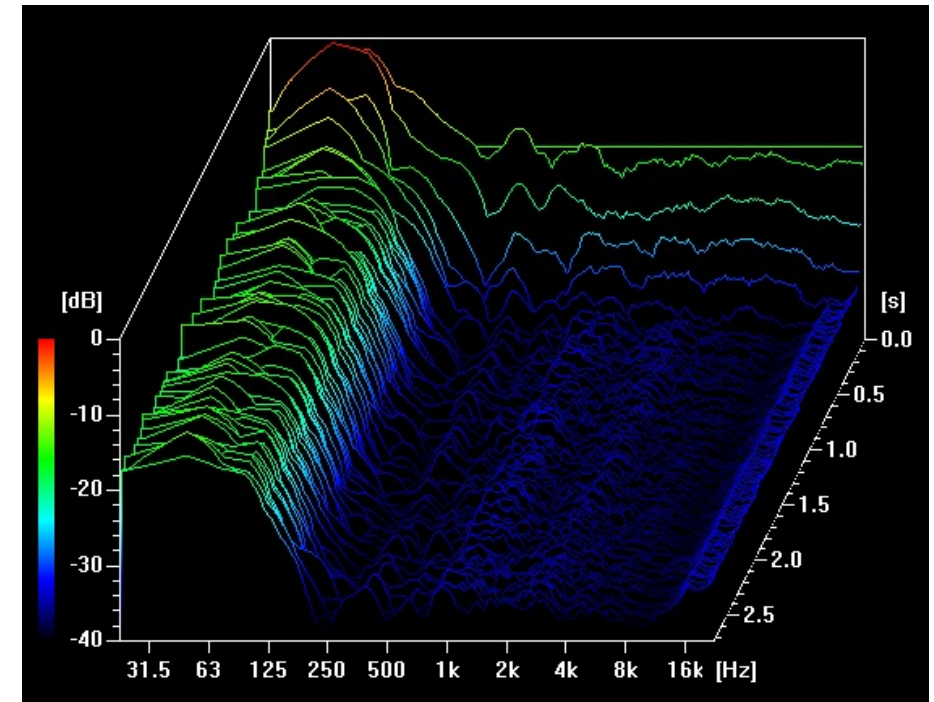
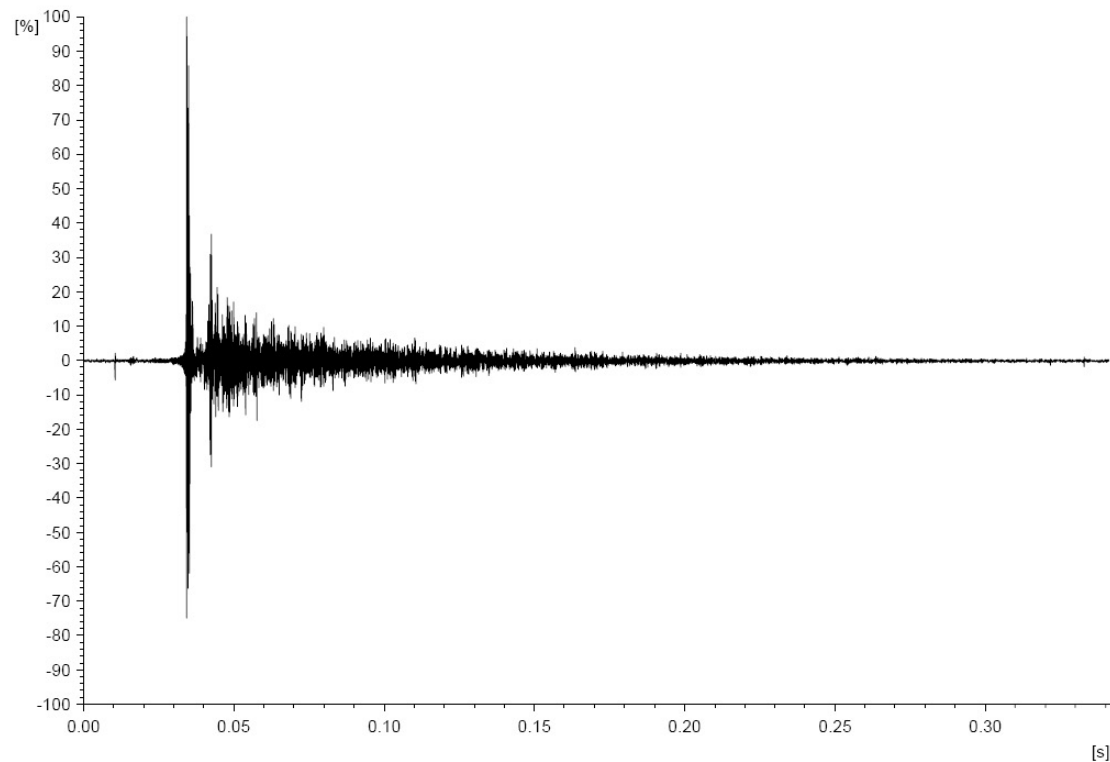
La respuesta al impulso o respuesta impulsional de un sistema es la que se presenta en la salida cuando en la entrada se introduce un pulso infinitamente corto en el tiempo.



C:\Users\Antonio\Desktop\2021] Museo Colecciones Reales\Respuestas Omni\F1M6.wav
Impulse Response - Allpass Hz

LA RESPUESTA AL IMPULSO

¿Qué información adicional nos proporciona la respuesta al impulso?

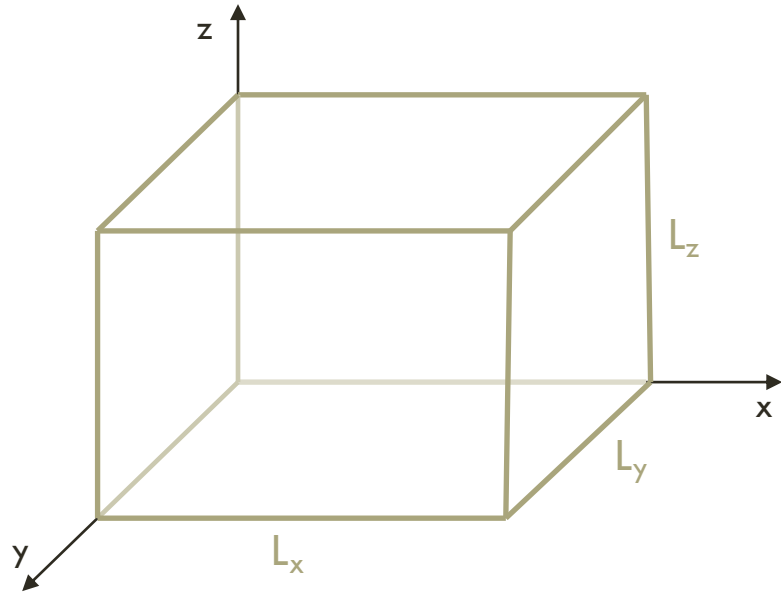




Miguel Ríos. *El Blues del autobús* (1982)

“Siento que el equipo aquel nunca suena igual, ¿qué misterio habrá? “

SALA RECTANGULAR CON PAREDES RÍGIDAS



■ Frecuencias de los modos propios

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c}{2} \left[\left(\frac{n_x}{L_x} \right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y} \right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

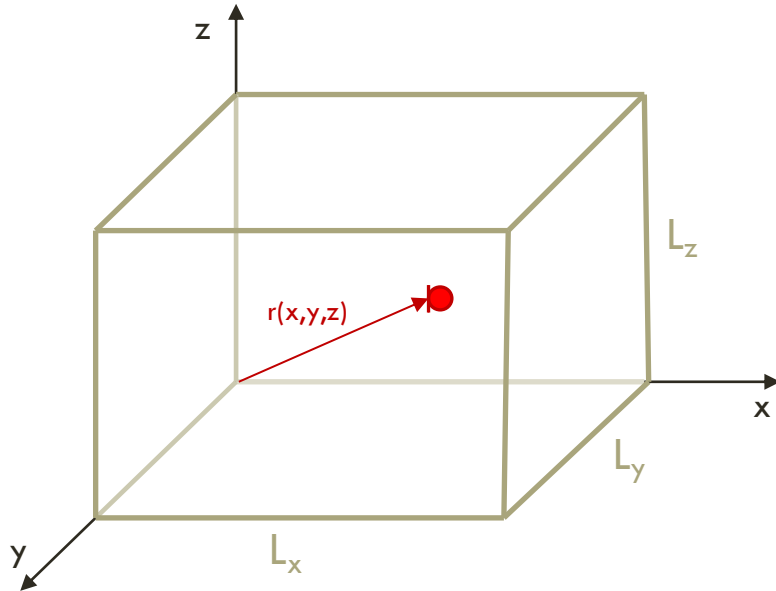
Dimensiones		
Largo, m	Ancho, m	Alto, m
4,8	3,1	2,5

n_x	n_y	n_z	Frecuencia natural, Hz
0	0	0	0,0
0	0	1	68,0
0	0	2	136,0
0	0	3	204,0
0	1	0	54,8
0	1	1	87,4
0	1	2	146,6
0	1	3	211,2
0	2	0	109,7
0	2	1	129,0
0	2	2	174,7
0	2	3	231,6
0	3	0	164,5
0	3	1	178,0
0	3	2	213,5
0	3	3	262,1
1	0	0	35,4
1	0	1	76,7
1	0	2	140,5
1	0	3	207,1
1	1	0	65,3
1	1	1	94,3
1	1	2	150,9
1	1	3	214,2
1	2	0	115,3
1	2	1	133,8
1	2	2	178,3
1	2	3	234,3
1	3	0	168,3
1	3	1	181,5
1	3	2	216,4
1	3	3	264,5

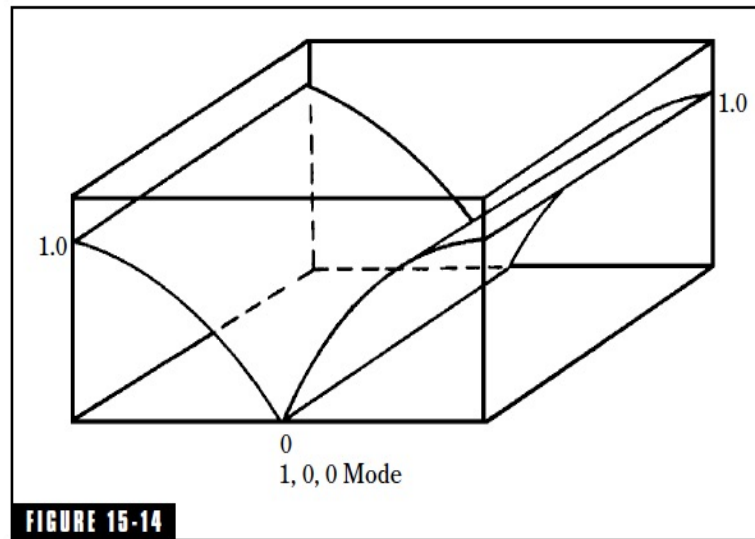
n_x	n_y	n_z	Frecuencia natural, Hz
2	0	0	70,8
2	0	1	98,2
2	0	2	153,3
2	0	3	215,9
2	1	0	89,6
2	1	1	112,5
2	1	2	162,9
2	1	3	222,8
2	2	0	130,6
2	2	1	147,2
2	2	2	188,5
2	2	3	242,2
2	3	0	179,1
2	3	1	191,6
2	3	2	224,9
2	3	3	271,5
3	0	0	106,3
3	0	1	126,1
3	0	2	172,6
3	0	3	230,0
3	1	0	119,6
3	1	1	137,6
3	1	2	181,1
3	1	3	236,5
3	2	0	152,7
3	2	1	167,2
3	2	2	204,5
3	2	3	254,8
3	3	0	195,8
3	3	1	207,3
3	3	2	238,4
3	3	3	282,8



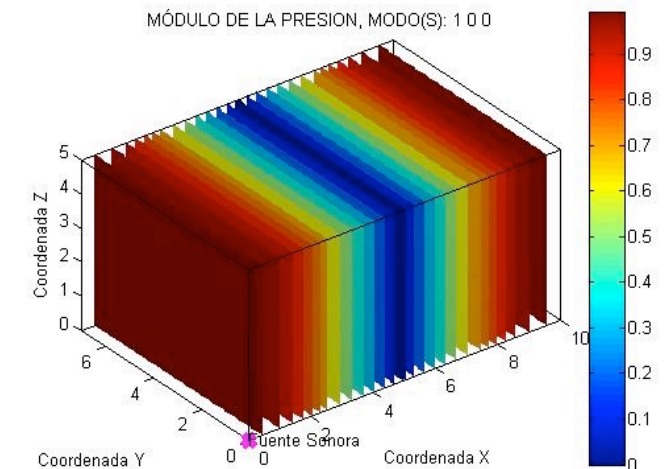
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PRESIÓN SONORA



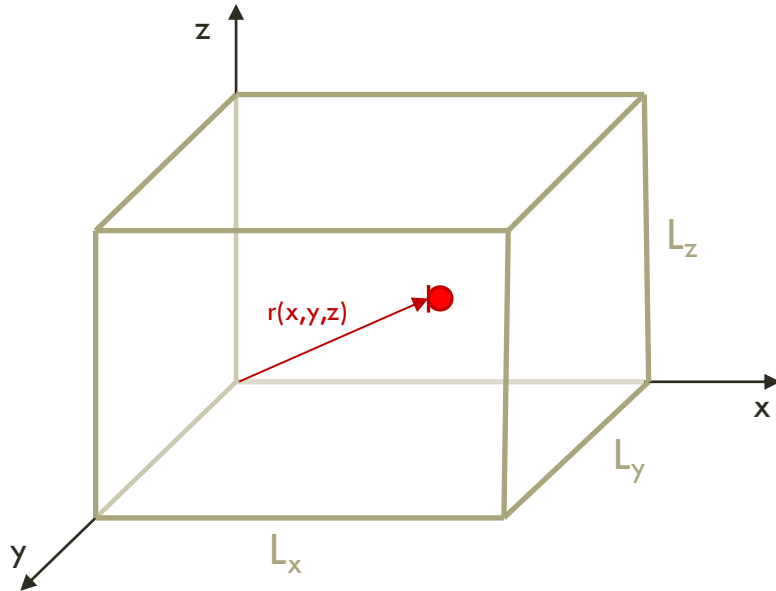
$$p_{n_x, n_y, n_z}(x, y, z) = C \cdot \cos\left(\frac{n_x \pi x}{L_x}\right) \cdot \cos\left(\frac{n_y \pi y}{L_y}\right) \cdot \cos\left(\frac{n_z \pi z}{L_z}\right)$$



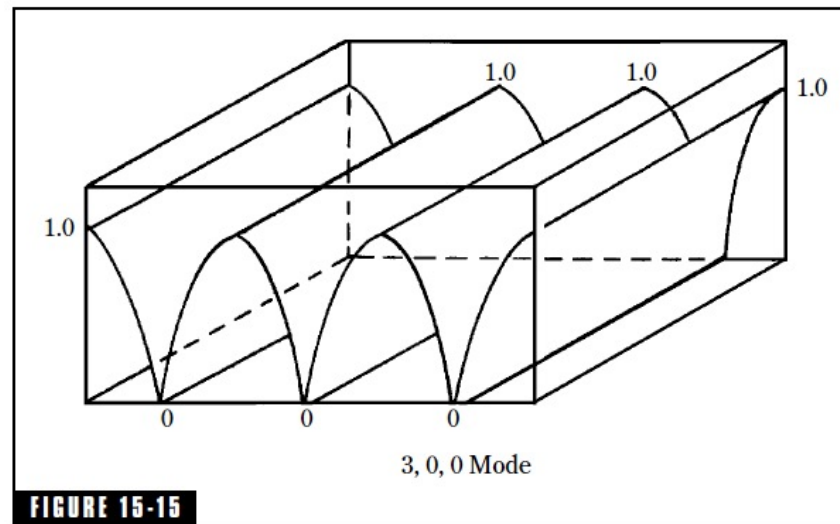
Fuente: Everest, F. A. Master handbook of acoustics. McGraw-Hill Education.



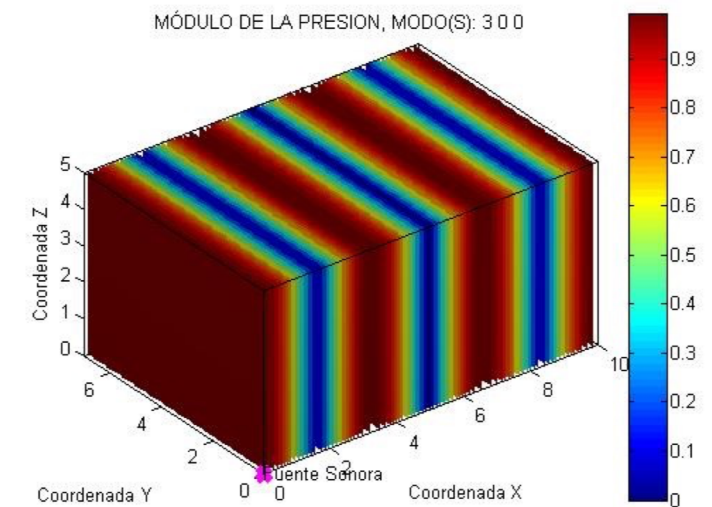
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PRESIÓN SONORA



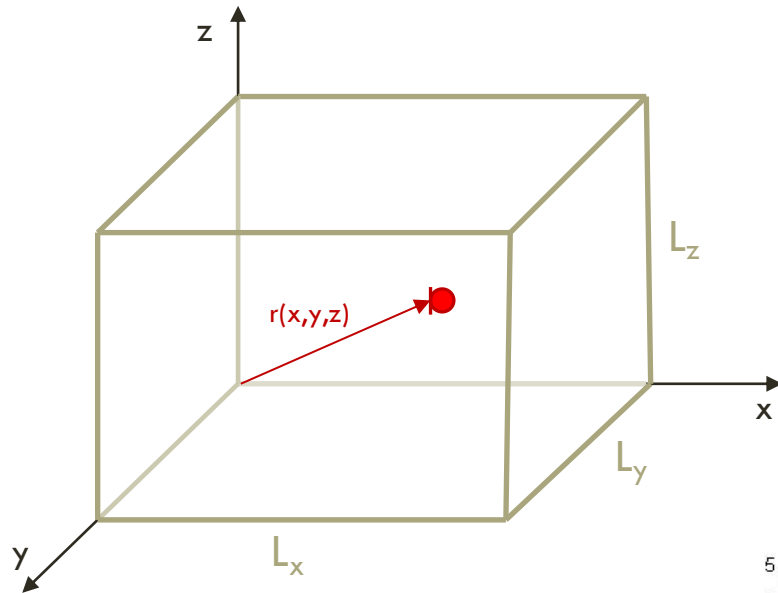
$$p_{n_x, n_y, n_z}(x, y, z) = C \cdot \cos\left(\frac{n_x \pi x}{L_x}\right) \cdot \cos\left(\frac{n_y \pi y}{L_y}\right) \cdot \cos\left(\frac{n_z \pi z}{L_z}\right)$$



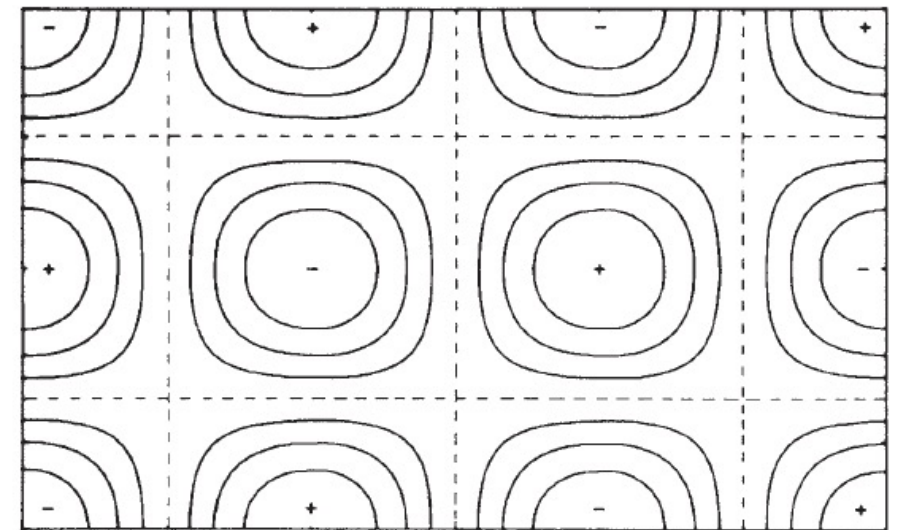
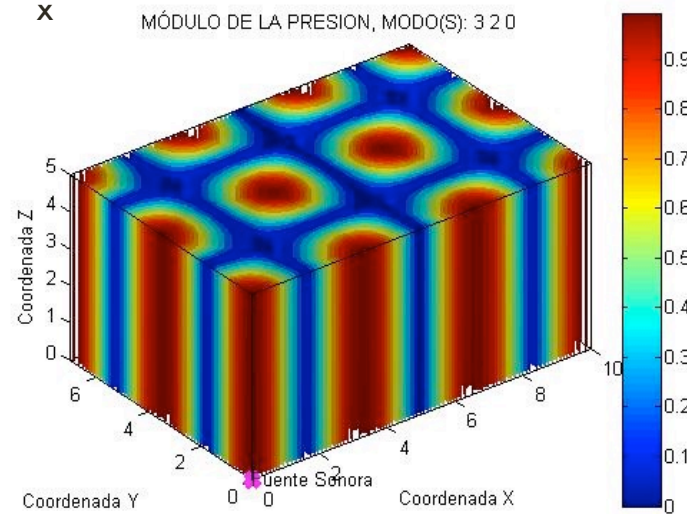
Fuente: Everest, F. A. Master handbook of acoustics. McGraw-Hill Education.



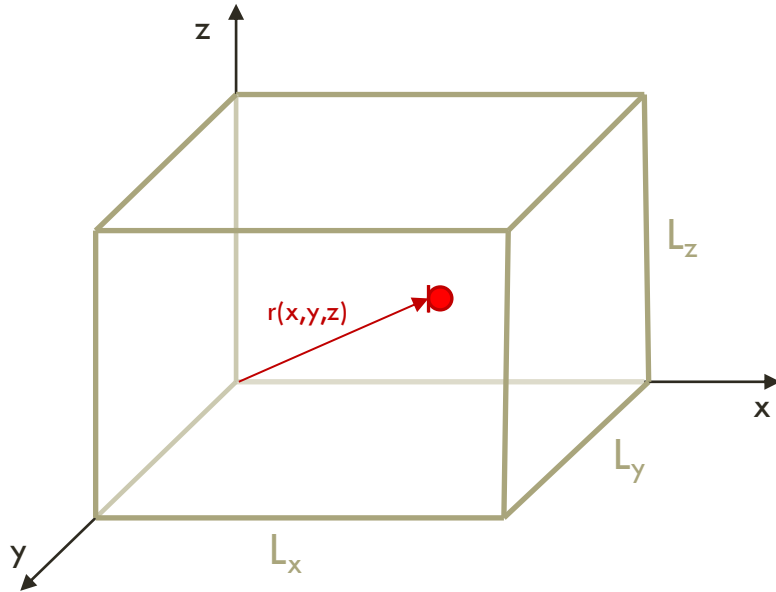
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PRESIÓN SONORA



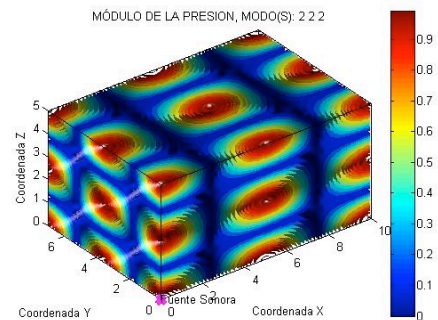
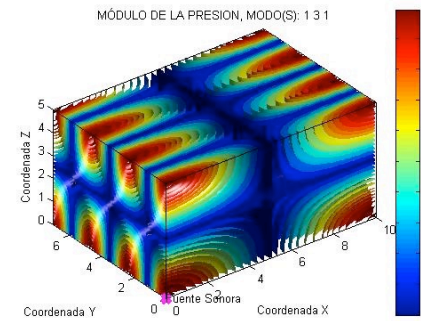
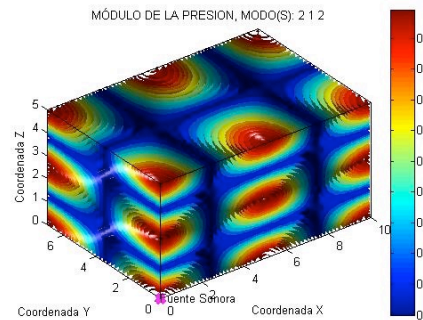
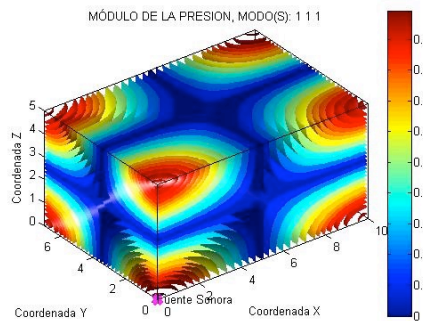
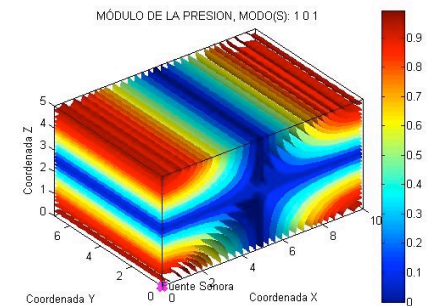
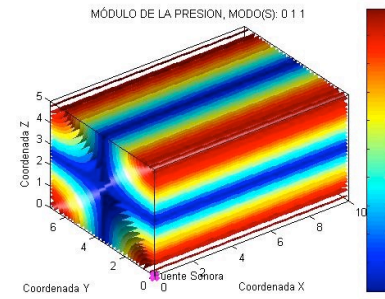
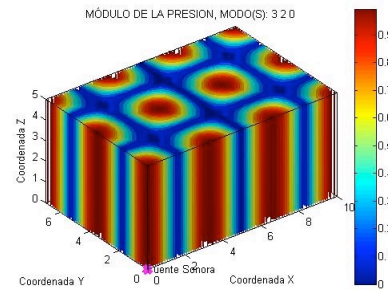
$$p_{n_x, n_y, n_z}(x, y, z) = C \cdot \cos\left(\frac{n_x \pi x}{L_x}\right) \cdot \cos\left(\frac{n_y \pi y}{L_y}\right) \cdot \cos\left(\frac{n_z \pi z}{L_z}\right)$$



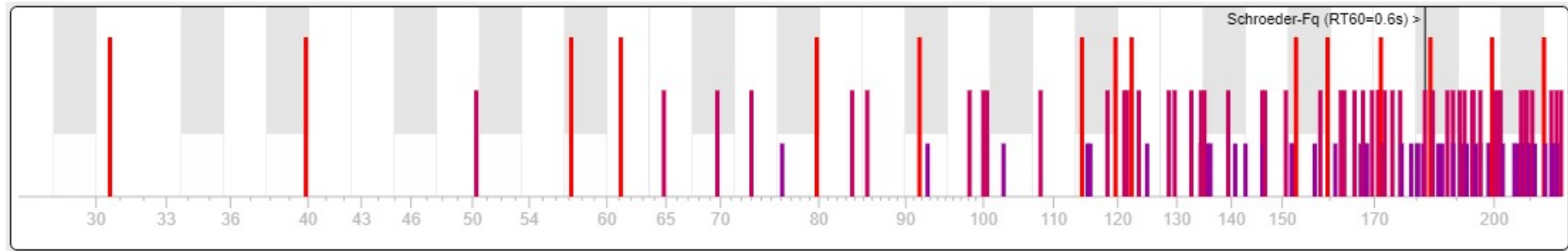
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PRESIÓN SONORA



$$p_{n_x, n_y, n_z}(x, y, z) = C \cdot \cos\left(\frac{n_x \pi x}{L_x}\right) \cdot \cos\left(\frac{n_y \pi y}{L_y}\right) \cdot \cos\left(\frac{n_z \pi z}{L_z}\right)$$



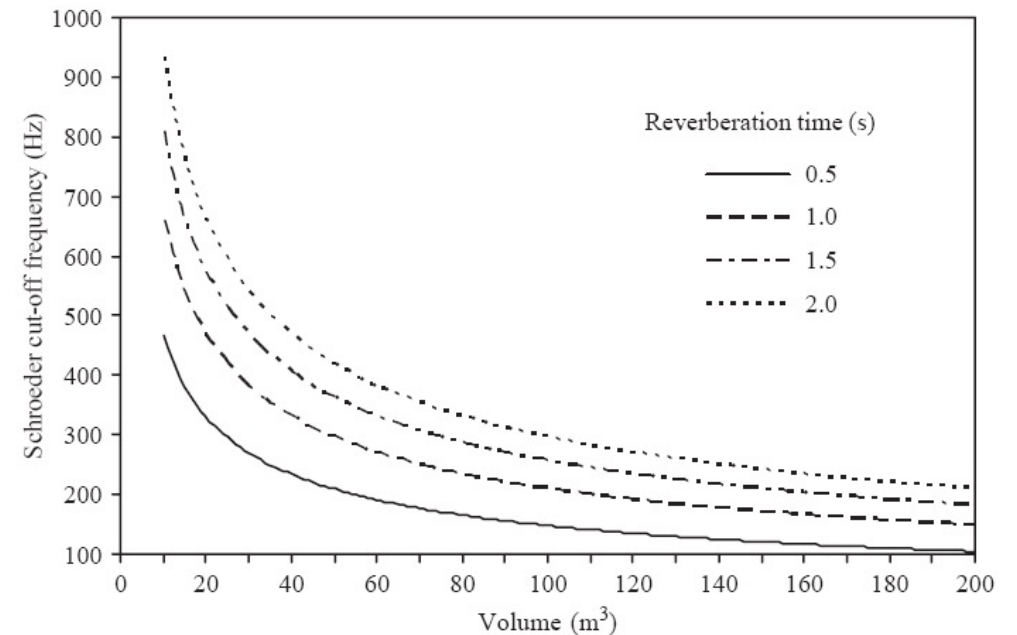
DISTRIBUCIÓN FRECUENCIAL DE LOS MODOS PROPIOS



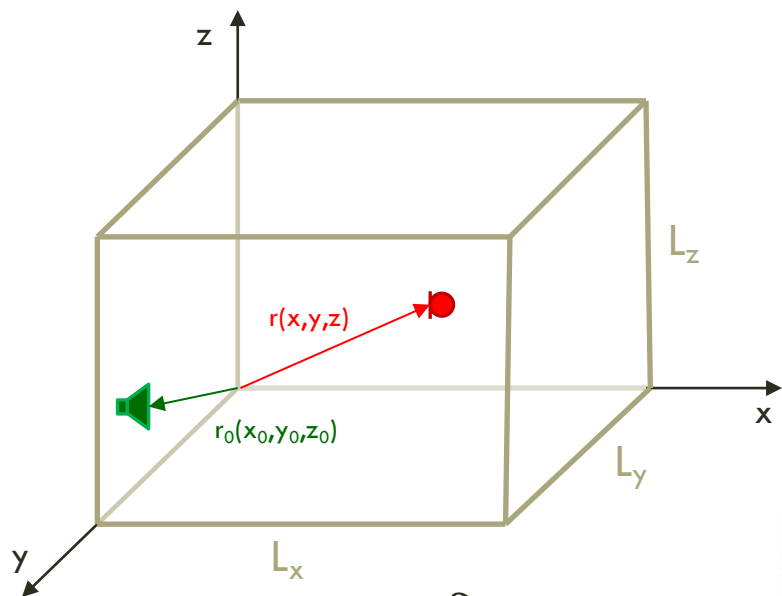
$$\frac{\Delta N_f}{\Delta f} \approx \boxed{4\pi V \frac{f^2}{c^3}}$$

- Frecuencia de Schroeder

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}}$$



OSCILACIONES FORZADAS: RESONANCIA



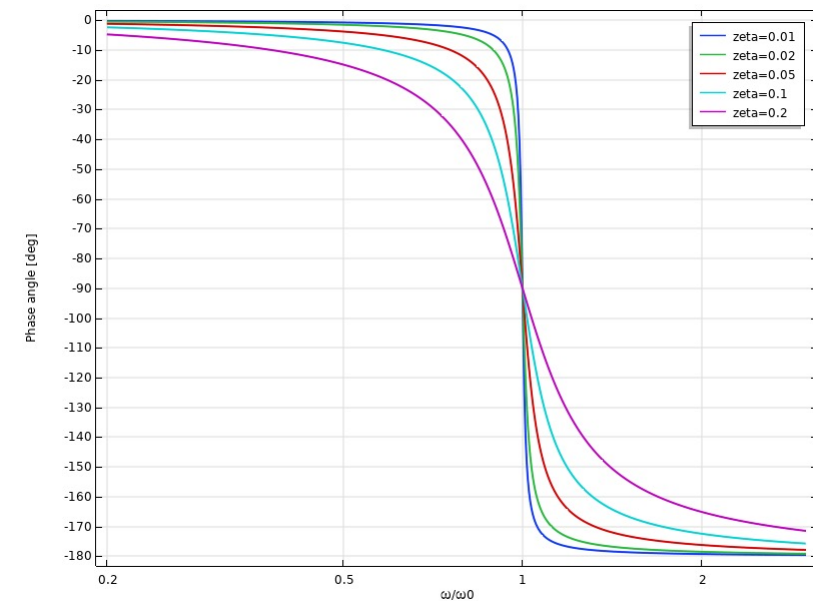
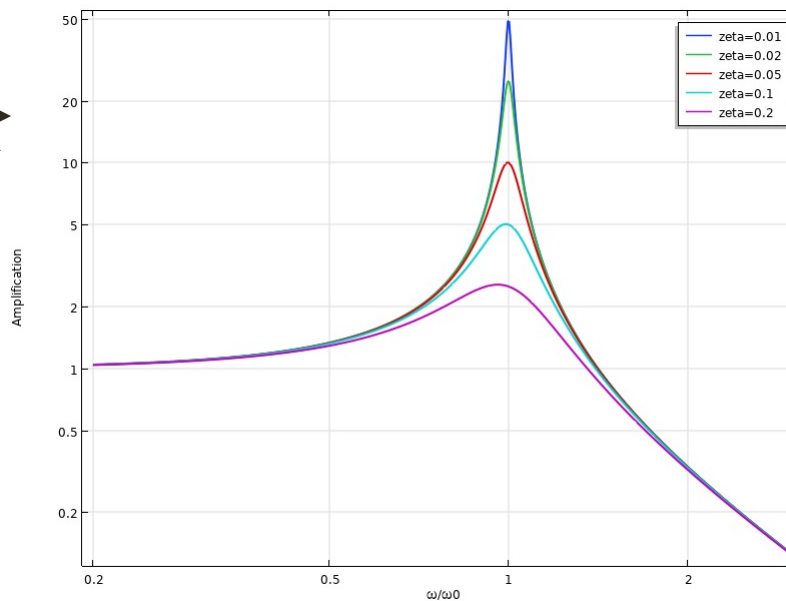
$$(\Delta f)_n = \frac{\delta_n}{\pi}$$

Valores típicos

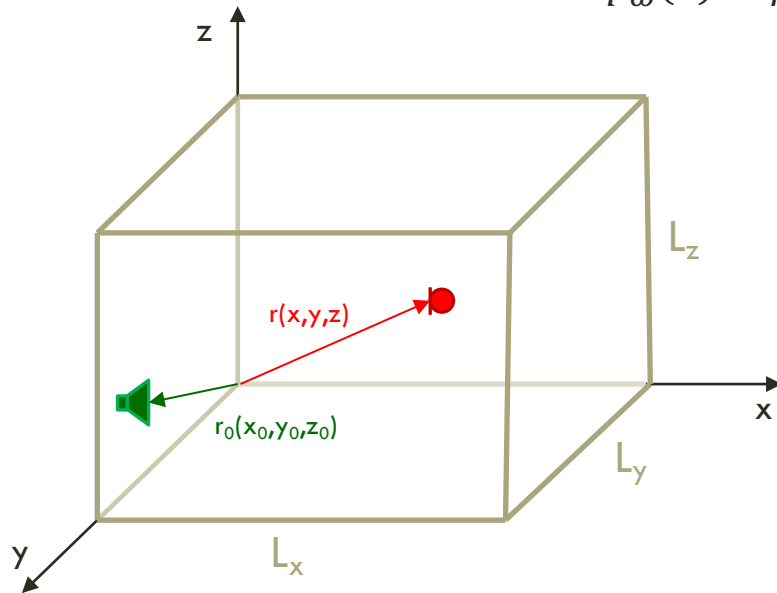
$$1 \text{ s}^{-1} < \delta_n < 20 \text{ s}^{-1}$$

$$0,32 \text{ Hz} < (\Delta f)_n < 6,37 \text{ Hz}$$

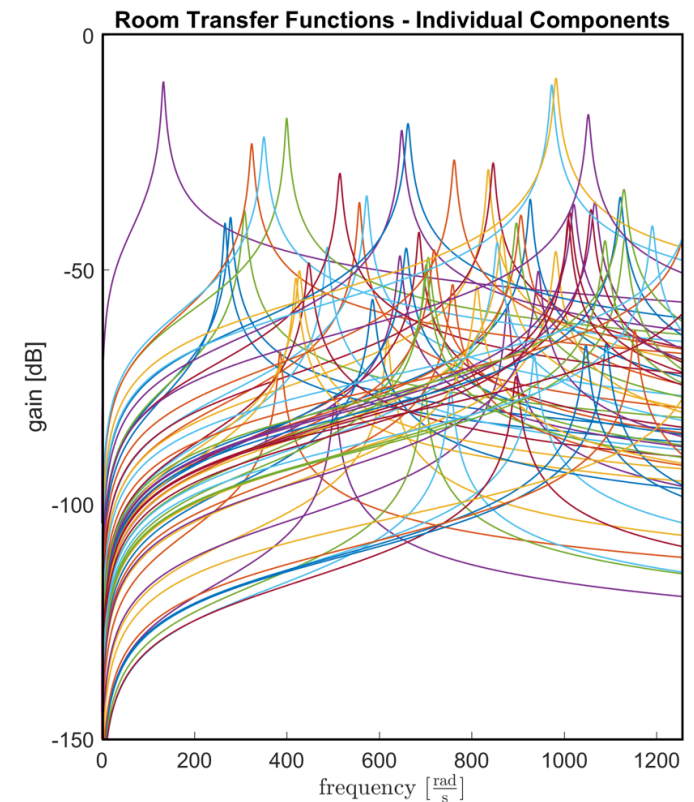
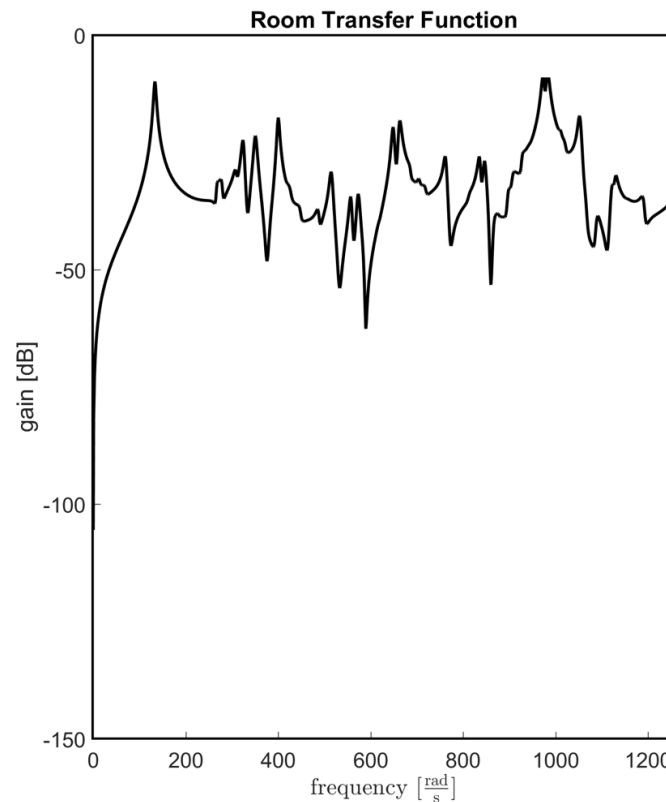
$$|p_\omega|_n \approx \frac{|A_n|}{[(\omega^2 - \omega_n^2)^2 + 4\omega^2 \delta_n^2]^{1/2}}$$



FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA SALA



$$p_\omega(\mathbf{r}) = \rho_0 c^2 \omega Q \sum_n \frac{\cos(\frac{n_x \pi}{L_x} \cdot x) \cos(\frac{n_y \pi}{L_y} \cdot y) \cos(\frac{n_z \pi}{L_z} \cdot z) \cos(\frac{n_x \pi}{L_x} \cdot x_0) \cos(\frac{n_y \pi}{L_y} \cdot y_0) \cos(\frac{n_z \pi}{L_z} \cdot z_0)}{[2\delta_n \omega_n + j(\omega^2 - \omega_n^2)] K_n}$$



Fuente: Tukuljac, H. P., Lissek, H., & Vandergheynst, P. (2017)



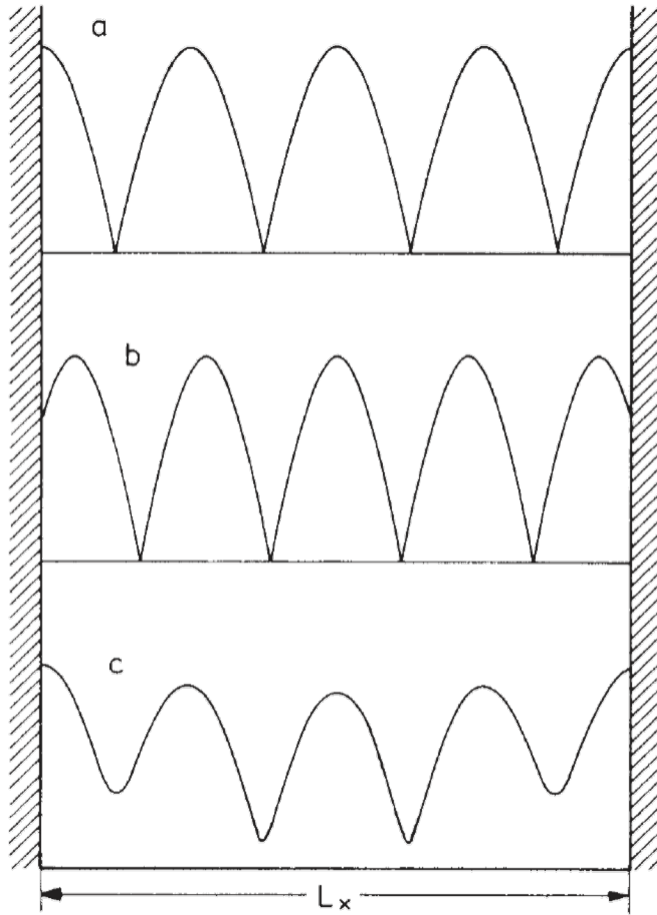
UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

Antonio Pedrero González

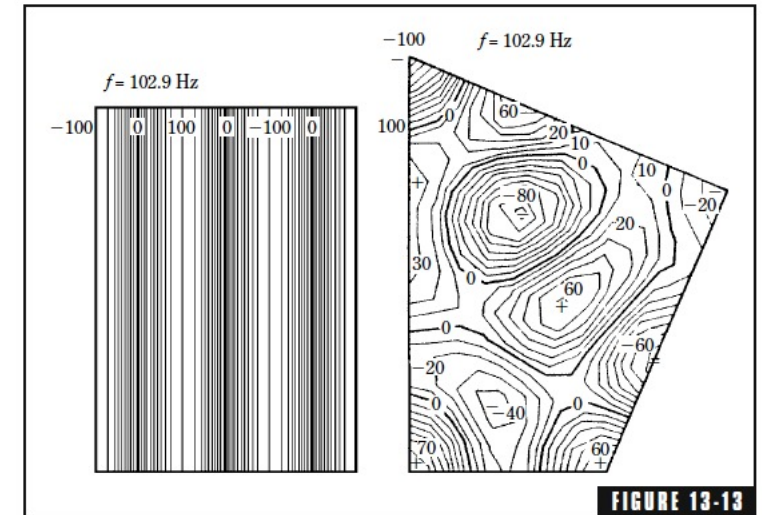
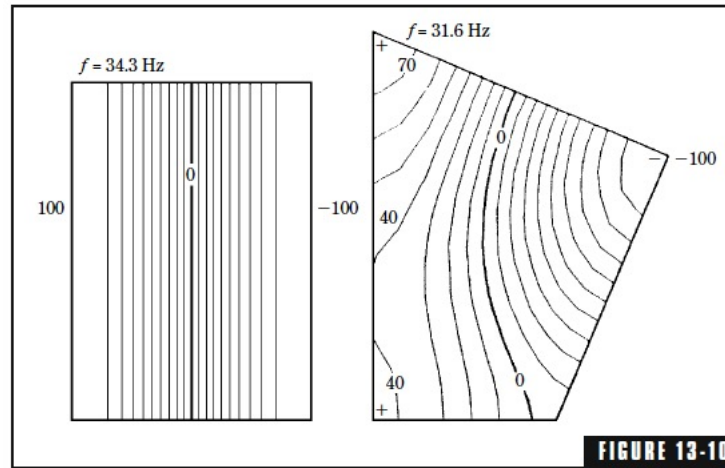
¿Cómo medir tu sistema de monitoreo?

18

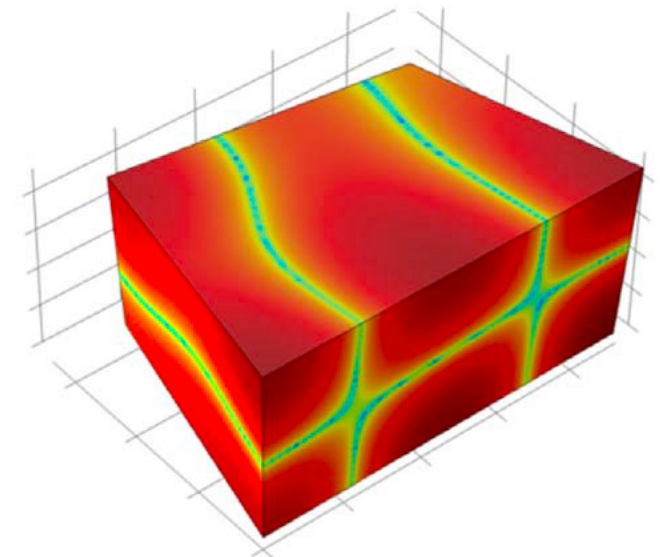
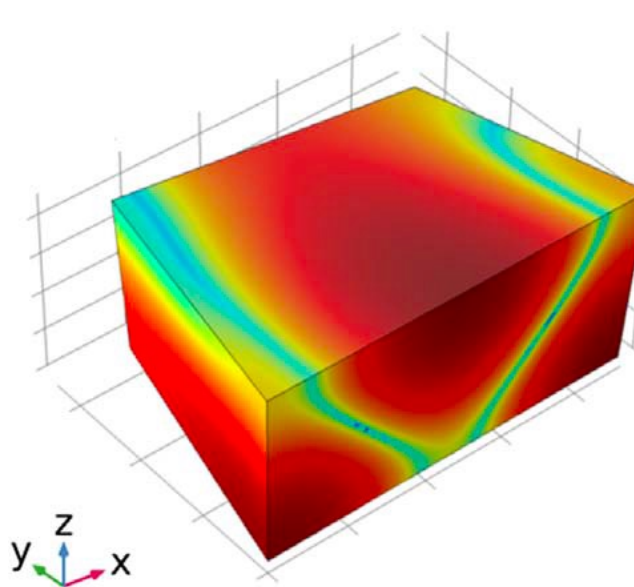
¿POR QUÉ MEDIR?



Fuente: Kuttruff, H. (2016). Room acoustics. CRC Press.

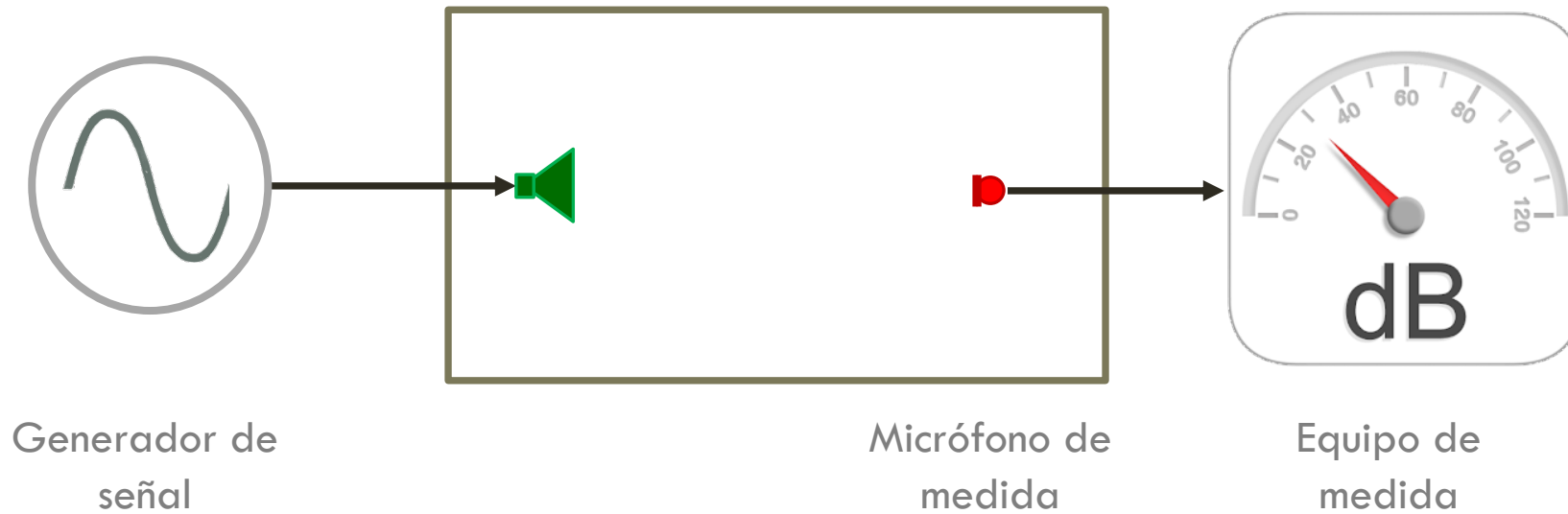


Fuente: Everest, F. A. Master handbook of acoustics. McGraw-Hill Education.



Fuente: T. P. Vu, E. Rivet, H. Lissek; Sound Field Reconstruction In Low-Frequency Room Acoustics: A Benchmark Study With Simulation

¿CÓMO MEDIR LA RESPUESTA EN FRECUENCIA?

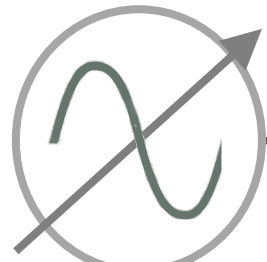


➤ Métodos para medir la respuesta en frecuencia

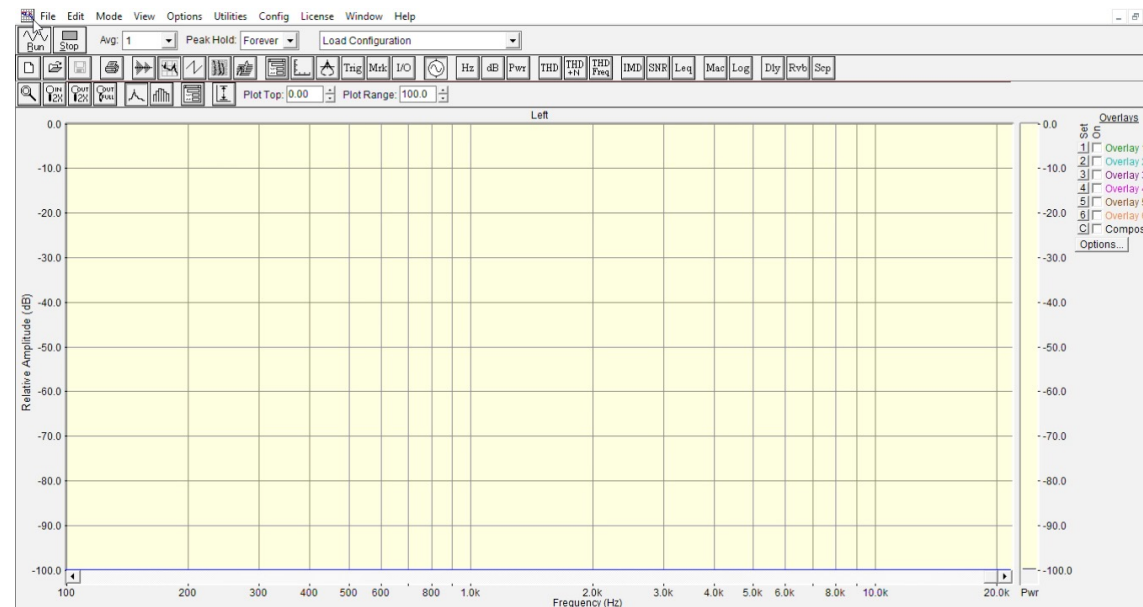
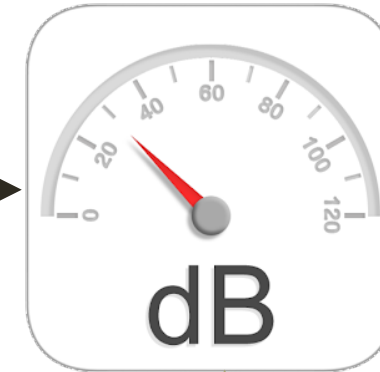
- Barridos de tonos
- Análisis de espectro (RTA o FFT)
- Medida de la función de transferencia
- Medida de la respuesta al impulso
- ...

BARRIDOS DE TONOS

Generador de barridos

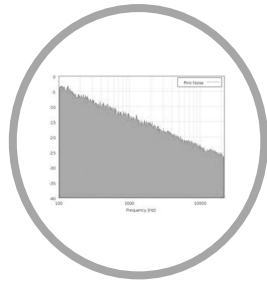


Registrador de nivel sonoro

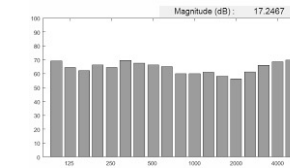


ANÁLISIS RTA

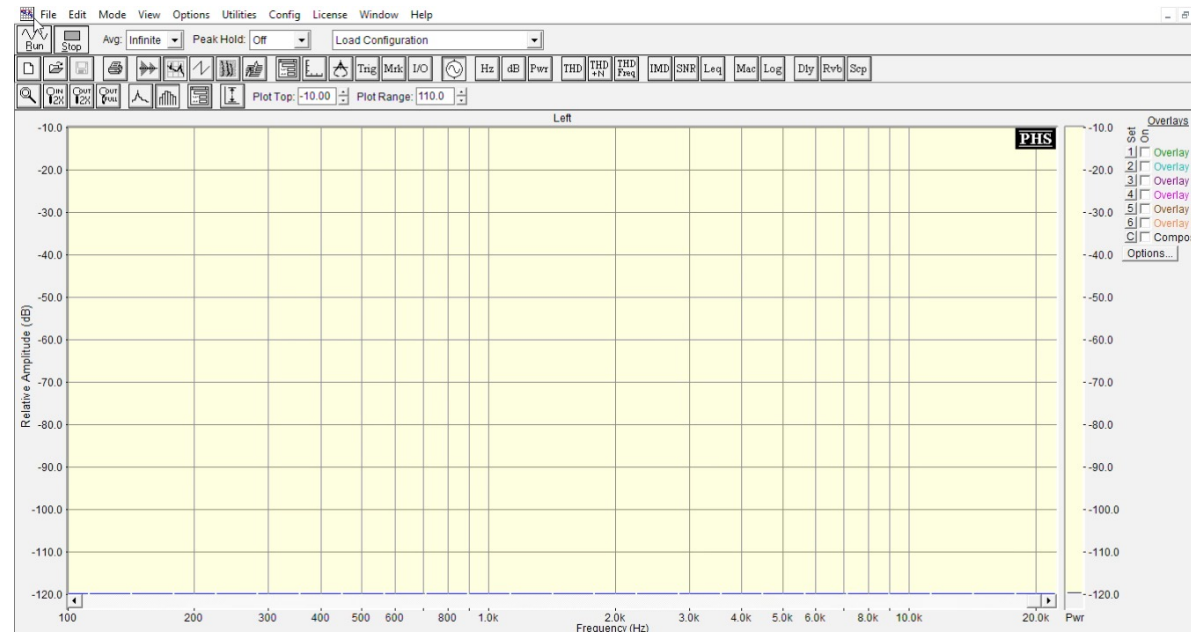
Generador de ruido rosa



Analizador RTA (1/3 oct)

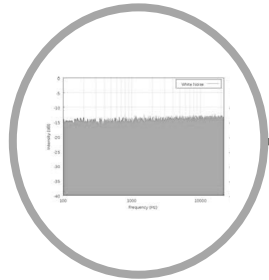


RTA

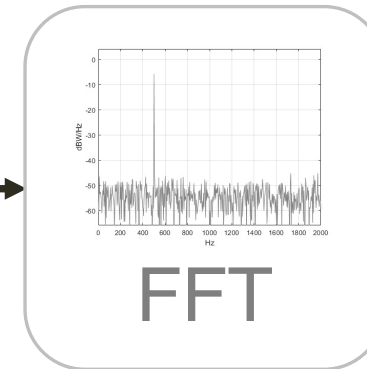


ANÁLISIS FFT

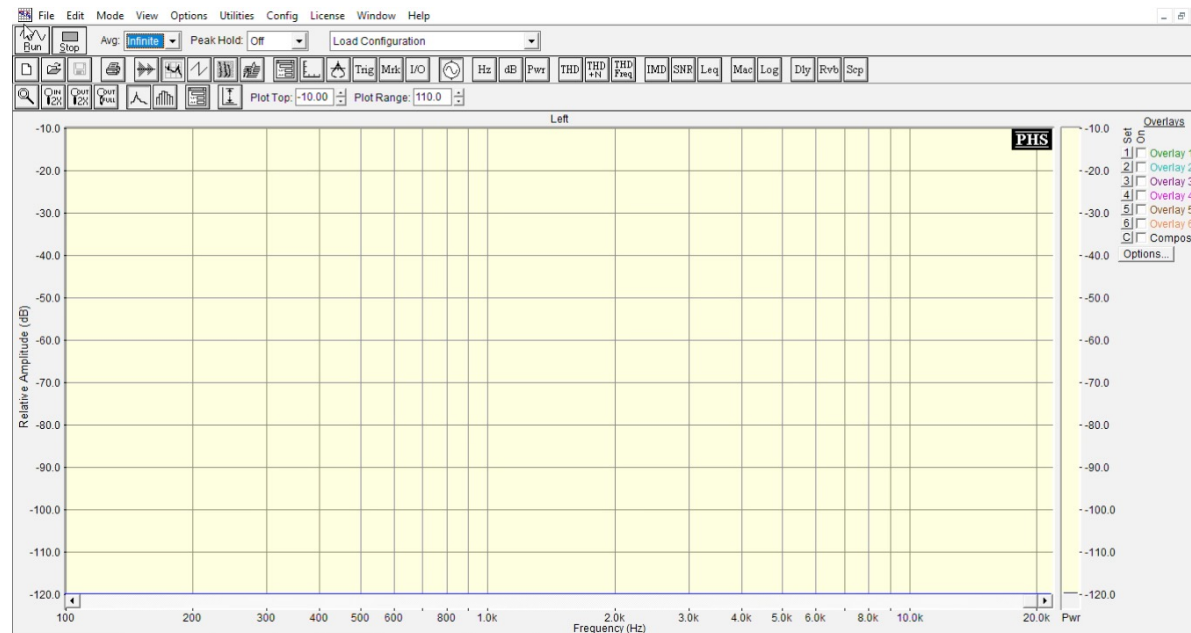
Generador de ruido blanco



Analizador FFT

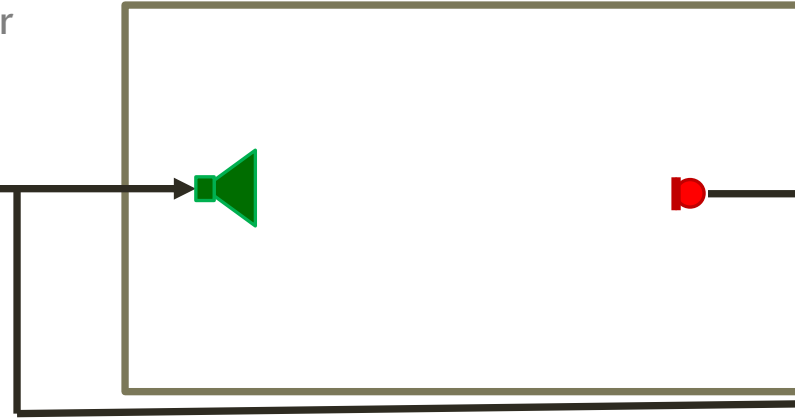
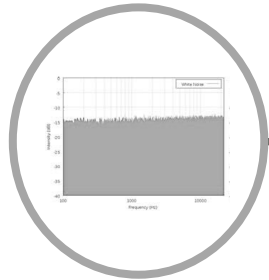


FFT

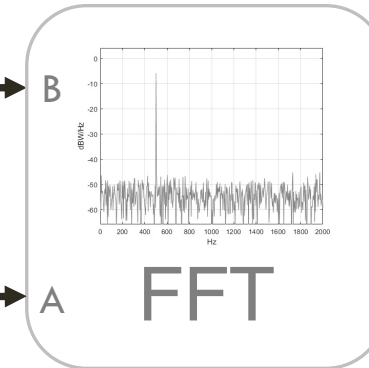


MEDIDA DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

Cualquier generador



Analizador FFT Bicanal



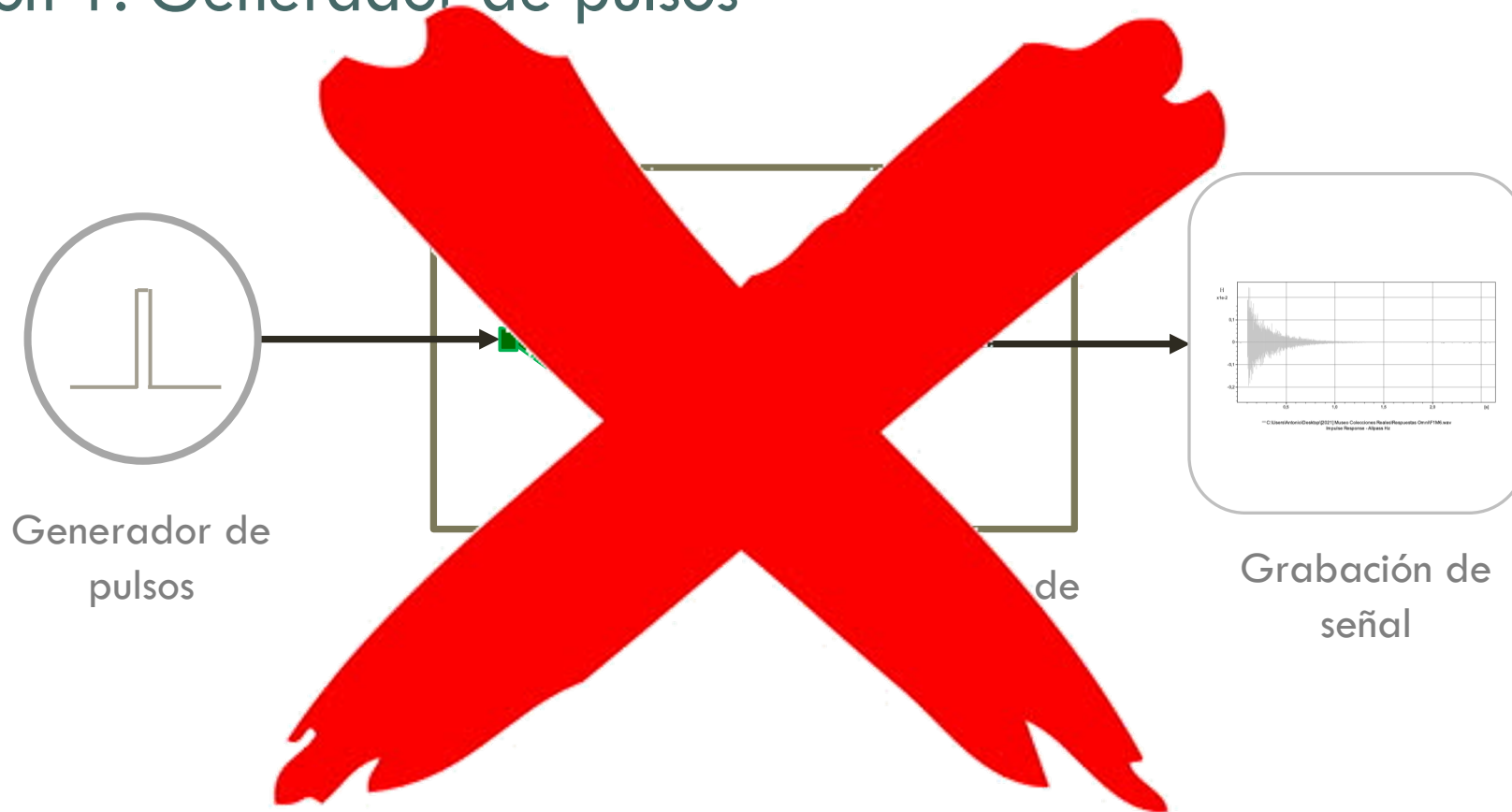
$$H(f) = \frac{B(f)}{A(f)}$$

$$\begin{aligned} A^*(f) \cdot B(f) &= H(f) \cdot A(f) \cdot A^*(f) \\ S_{AB} &= H(f) \cdot S_{AA} \\ H(f) &= \frac{G_{AB}}{G_{AA}} = H_1(f) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B^*(f) \cdot B(f) &= H(f) \cdot A(f) \cdot B^*(f) \\ S_{BB} &= H(f) \cdot S_{BA} \\ H(f) &= \frac{G_{BB}}{G_{BA}} = H_2(f) \end{aligned}$$

MEDIDA DE LA RESPUESTA AL IMPULSO

Opción 1: Generador de pulsos

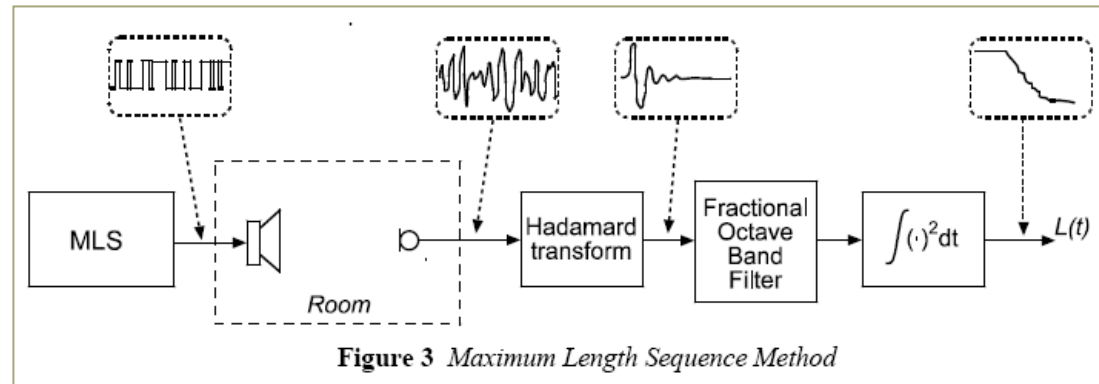


MEDIDA DE LA RESPUESTA AL IMPULSO

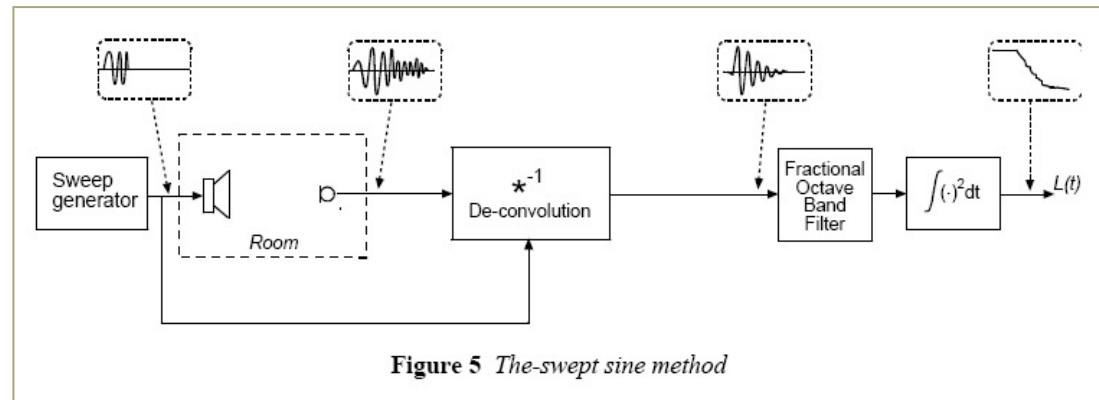
Opción 2: Procesado de señal

$$R_{xy}(k) = R_{xx} * h(k)$$

- Señales MLS



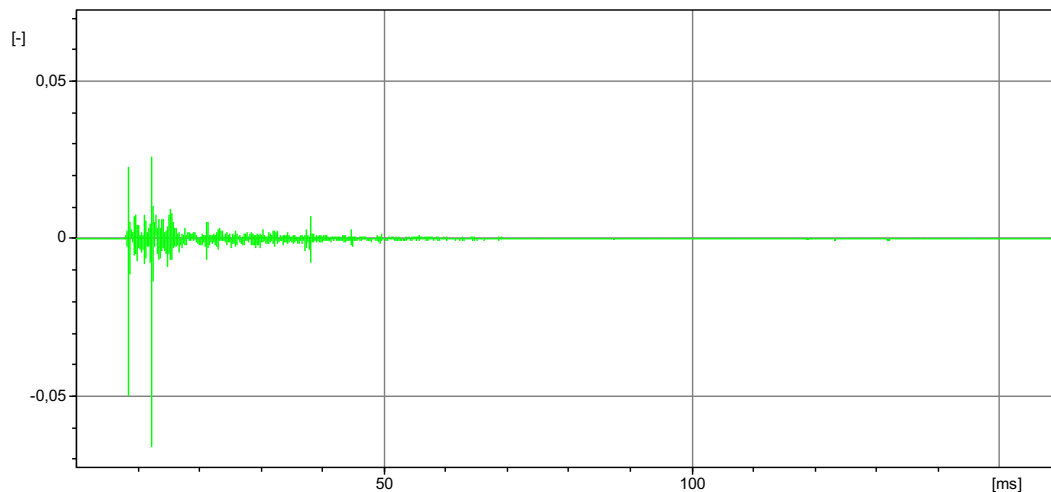
- Barridos de tonos



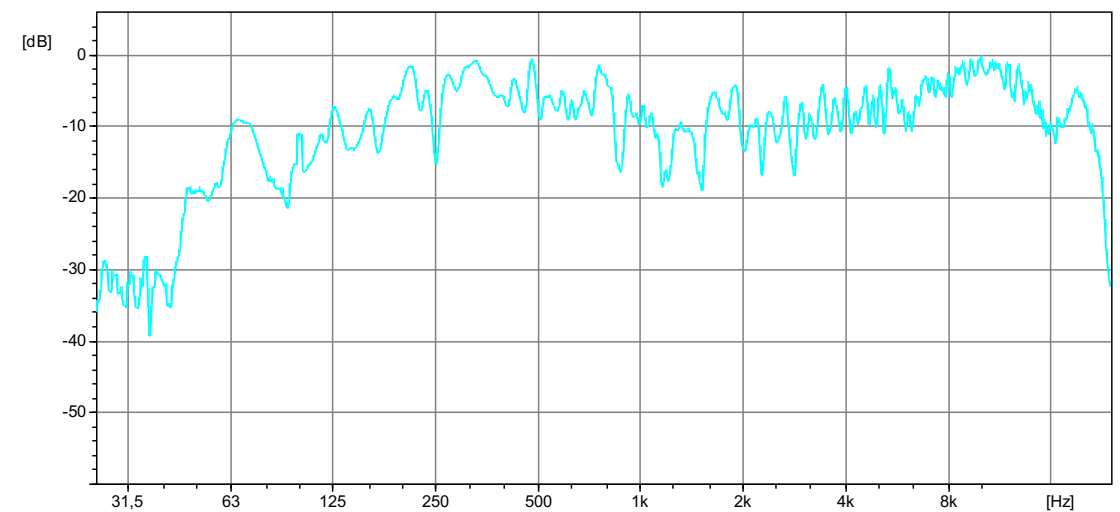
Angelo Farina, "Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept-sine technique", J.AES, vol. 48, p. 350, 108th AES Convention, Paris 2000,

MEDIR PARA CORREGIR

¿Cuál es el objetivo de la corrección?



C:\Users\Antonio\Documents\Genelec\Estudio con cortinas operador.wav
Impulse Response - Allpass Hz



C:\Users\Antonio\Documents\Genelec\Estudio con cortinas operador.wav
Magnitude Spectrum - Rectangular - 1/24 octave smoothed



MEDIR PARA CORREGIR

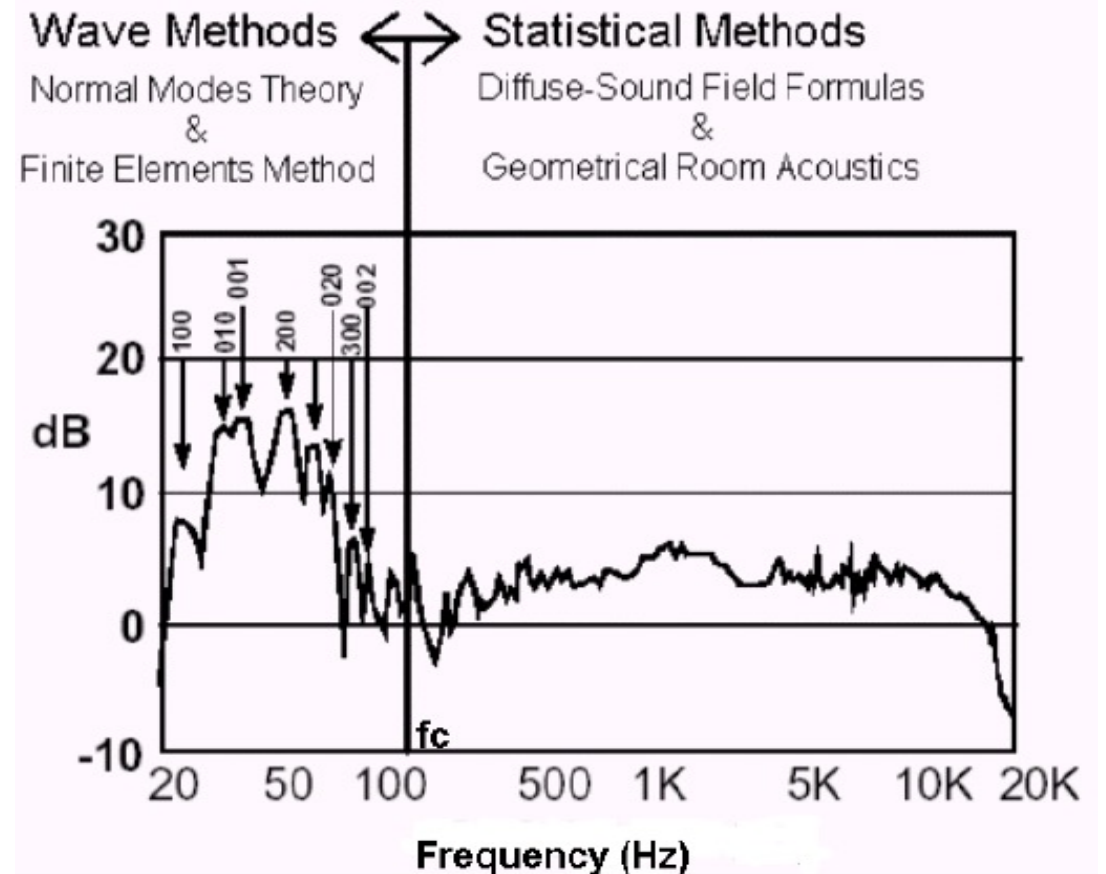
¿Corrección acústica o electrónica?



Manfred Robert Schroeder
(12/07/1926 – 28/12/2009)

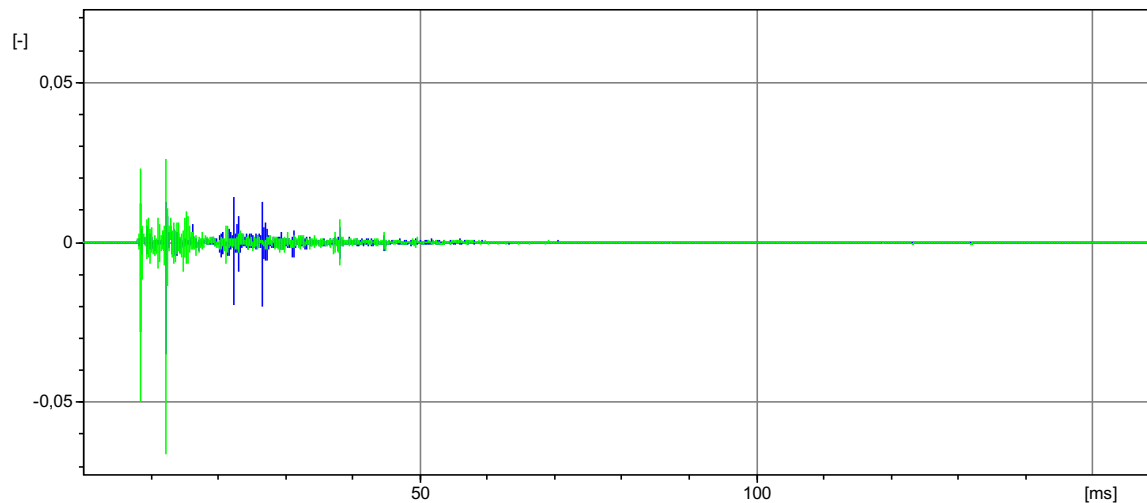
▪ Frecuencia de Schroeder

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}}$$

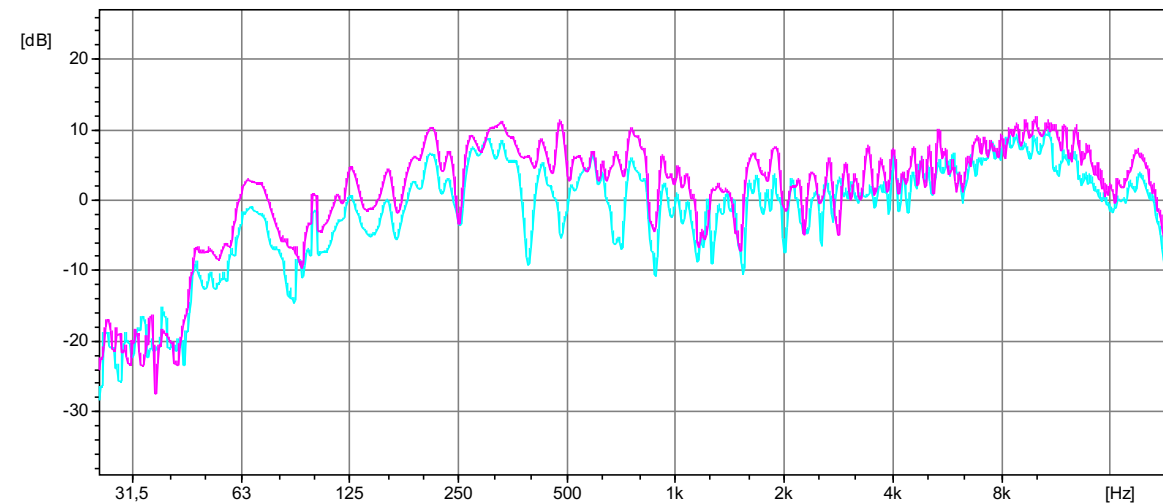


MEDIR PARA CORREGIR

¿Corrección acústica o electrónica?



— C:\Users\Antonio\Documents\Genelec\Estudio con cortinas operador.wav
— C:\Users\Antonio\Documents\Genelec\Estudio sin cortinas.wav
Impulse Response - Allpass Hz



— C:\Users\Antonio\Documents\Genelec\Estudio sin cortinas.wav
— C:\Users\Antonio\Documents\Genelec\Estudio con cortinas operador.wav
Magnitude Spectrum - Rectangular - 1/24 octave smoothed

[CONCLUSIONES

- La interacción entre los monitores y la sala produce alteraciones de la respuesta en frecuencia que pueden dar lugar a coloraciones indeseables.
- La complejidad del campo sonoro en los entornos reales hace que la mejor opción para la determinación de la respuesta en frecuencia sea la medición.
- Los métodos de medida a partir de la respuesta al impulso producen resultados rápidos y fiables.
- Es necesario evaluar todas las alternativas de cara a la corrección del sistema.

[MUCHAS GRACIAS POR SU
ATENCIÓN

Antonio PEDRERO GONZÁLEZ
antonio.pedrero@upm.es



**Grupo de Investigación en
Acústica Arquitectónica**
Universidad Politécnica de Madrid