

T3. Micrófonos

Características de los micrófonos

Sensibilidad

La sensibilidad de un micrófono es la **relación entre la tensión eléctrica generada y la presión acústica incidente** (en circuito abierto, campo libre, a 1 kHz).

$$S = \frac{E_{c.a.}}{p} \quad [V \text{ Pa}^{-1}]$$
$$= 20 \log \left(\frac{|S|}{1 \text{ V Pa}^{-1}} \right) \quad [\text{dB re. } 1 \text{ V Pa}^{-1}]$$

La sensibilidad de referencia es la sensibilidad medida en el eje del micrófono.

$$S_0 = S(\theta = 0^\circ)$$

Respuesta en frecuencia

La respuesta en frecuencia de un micrófono es la **variación de la sensibilidad con la frecuencia** [$S = S(f)$]. Se suele representar la respuesta relativa con respecto a la sensibilidad de referencia en decibelios.

$$S(f) - S_0 = 20 \log \left(\frac{|S(f)|}{|S_0|} \right) \quad \text{dB}$$

La presencia del micrófono afecta a su respuesta. La respuesta del diafragma en alta frecuencia aumenta la presión frente a la cápsula.

Distorsión lineal

- **Coloraciones.** La respuesta en frecuencia no es plana.
- **Vibraciones parciales del diafragma.** Debidas a modos propios. Los micros de condensador no tienen este problema.
- **Resonancias mecánicas o acústicas.** Sobre todo en micros dinámicos.
- **Ancho de banda limitado por componentes eléctricos.**
- **Distorsión de fase.**

Distorsión no lineal

- **Saturación.** Sobrecarga de presión. Si saturan fácilmente se llaman micros *blandos*. Si no, *duros*.
- **Pop.** Chorros de aire (no sonido). Suele ser por fonemas “explosivos”.

Directividad

Generalmente, su supone simetría cilíndrica de los micrófonos, por lo que la directividad no depende del plano azimutal φ .

$$D(\theta, \varphi) \equiv \text{Directividad}$$

$$Q(\theta, \varphi) \equiv \text{Factor de directividad}$$

$$Q_{ax} \equiv \text{Factor de directividad axial (en el eje)}$$

$$DI \equiv \text{Índice de directividad}$$

$$DI_{ax} \equiv \text{Índice de directividad axial (en el eje)}$$

$$REE \equiv \text{Eficiencia de energía aleatoria}$$

$$DSF \equiv \text{Factor de distancia}$$

$$E_d \equiv \text{Tensión directa}$$

$$E_r \equiv \text{Tensión reverberante}$$

$$E_{ro} \equiv \text{Tensión reverberante del equivalente omnidireccional}$$

Si especifican que se ha medido en cámara anecoica, entonces se refiere a que $E_{c.a.}$ es también el valor de E_d .

$$p_d(r) = \frac{p(1 \text{ m})}{r} \quad E_d = p_d(r)S$$
$$E_r = \frac{p_r S_0}{\sqrt{Q_{ax}}} \quad \langle E_d^2(\theta, \varphi) \rangle = E_r^2 \quad E_{ro} = p_r S$$

La distancia crítica r_c es la distancia a partir de la cual la presión reverberante es igual a la directa. En ella sucede que:

$$p_r = p_d = \sqrt{2} p_{r+d} \quad E_{r+d} = \sqrt{E_r^2 + E_d^2}$$

Recordamos que es suma no coherente por ser campo difuso.

$$D(\theta) = \frac{S(\theta)}{S_0} \quad Q(\theta, \varphi) = Q_{ax} D^2(\theta, \varphi)$$

$$Q(\theta, \varphi) = \frac{S^2(\theta, \varphi)}{\langle S^2(\theta, \varphi) \rangle} = \frac{S^2(\theta, \varphi)}{\frac{1}{4\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} S^2(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi}$$

$$Q_{ax} = Q(\theta = 0^\circ) = \frac{2}{\int_{\theta=0}^{\pi} D^2(\theta) \sin(\theta) d\theta} \approx \frac{2}{\frac{\pi}{N} \sum_{i=1}^N D^2(\theta_i) \sin(\theta_i)}$$

$$Q_{ax} = \frac{E_{ro}^2}{E_r^2} \quad \left|_{\text{campo difuso}} \quad DI = 10 \log [Q(\theta, \varphi)] \quad DI_{ax} = 10 \log (Q_{ax})$$

$$REE = \frac{1}{Q_{ax}} \quad DSF = \sqrt{Q_{ax}}$$

Nota 1: En la fórmula de Q_{ax} para N valores, si nos dicen que supongamos simetría de revolución se usan los valores entre $\theta = 0^\circ$ y $\theta = 180^\circ$, sin incluir este último. Si da tiempo (y en entornos reales), se calculan tanto en el intervalo $[0, 180)$ como en $[180, 360)$ y se hace la media entre ambos Q_{ax} obtenidos.

Nota 2: Si nos piden sacar la directividad sabiendo que es de familia cardioide y no dicen nada más, debemos suponer orden $n = 1$.

Directividad de la familia cardioide

A es el componente omnidireccional, B el componente bidireccional y n el orden de la directividad.

$$\begin{cases} D(\theta) = [A + B \cos(\theta)] \cos^{n-1}(\theta) \\ A + B = 1 \end{cases}$$

A	B	Tipo
0.50	0.50	Cardioide
0.75	0.25	Subcardioide
0.25	0.75	Hipercardioide

Si $n = 1$, el valor de Q_{ax} viene dado por la resolución de la integral de su definición, el resultado es este:

$$Q_{ax} = \frac{3}{4B^2 - 6B + 3}$$

Ruido eléctrico

- **Ruido eléctrico.** Tensión de salida del micrófono cuando no recibe excitación acústica. Causado por:

- Agitación térmica de moléculas de aire o del diafragma.
- Agitación térmica electrónica, debi principalmente a resistencias altas.

$$E_N = \sqrt{4kTR\Delta f} \quad [V]$$

Donde k es la constante de Boltzmann, T la temperatura, R la resistencia y Δf el ancho de banda. Se suele expresar en dB_{SPL} y se denomina “nivel de presión sonora equivalente al ruido”:

$$ENL = 20 \log \left(\frac{p_N}{p_{ref}} \right) = 20 \log \left(\frac{E_N}{p_{ref} S_0} \right)$$

Donde $p_{ref} = 20 \mu\text{Pa}$. Para usar esta expresión, mencionar que se debería filtrar E_N con un filtro de ponderación A.

- **Ruido por zumbido electromagnético (*hum*).**
- **Ruido por viento.**

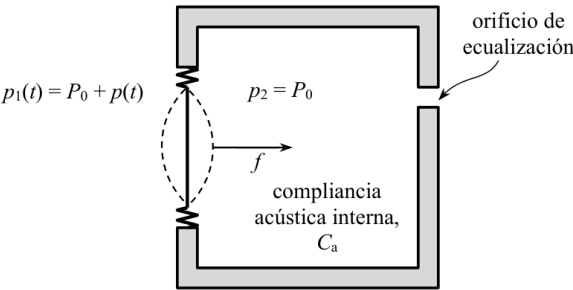
Márgenes dinámicos

Margen dinámico	DR = SPL _{máx} – ENL
Margen de sobrecarga	HR = SPL _{máx} – 94 (viene de p_{ref})
Relación señal a ruido	SNR = DR – HR = 94 – ENL

Tipos de micrófonos

TAM: Micrófonos de presión

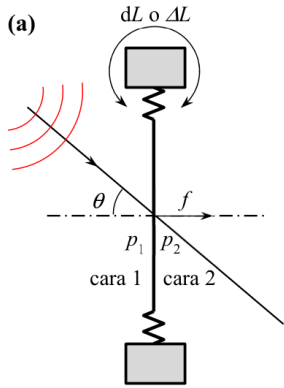
La cápsula está compuesta por un diafragma y un pequeño orificio de ecualización, que sirve para regular la presión interna. La vibración del diafragma es proporcional a la presión acústica externa ejercida sobre el diafragma.



Presentan un comportamiento omnidireccional, excepto a alta frecuencia debido a difracción cuando $\lambda \gg D$, siendo D la mayor dimensión del micrófono. Para $\theta = \pm 90^\circ$, la directividad disminuye ligeramente por falta de uniformidad. Para $\theta = 180^\circ$, la directividad disminuye ligeramente por la sombra que genera la cápsula.

TAM: Micrófonos de gradiente de presión

La presión en la cara interna del diafragma es aproximadamente igual que en la cara externa. La diferencia de caminos acústicos entre ambas caras es la que hace que no sean iguales. Por lo tanto existe un incremento muy pequeño de presión entre ambas caras, es decir, un diferencial. De ahí viene el término gradiente de presión.



$$\begin{cases} kdL \ll 1 \rightarrow D(\theta) = \frac{K + \cos(\theta)}{K + 1} \\ kdL \gg 1 \rightarrow |D(\theta)| = \left| \sin\left(\frac{k\Delta L [\cos(\theta) + K]}{2}\right) \right| \end{cases}$$

$$\begin{cases} K = 1 \rightarrow \text{cardioide} \\ K = \frac{1}{3} \rightarrow \text{hipercardiode} \\ K = 0 \rightarrow \text{bidireccional} \\ K > 1 \rightarrow \text{subcardioides} \end{cases} \quad A = \frac{K}{K + 1} \quad B = \frac{1}{K + 1}$$

$$F = 2jpe^{-\frac{jk\Delta L \cos(\theta)}{2}} \sin\left(\frac{k\Delta L \cos(\theta)}{2}\right) S_d$$

TME: Micrófonos de bobina móvil

TME: Micrófonos de cinta

TME: Micrófonos electrostáticos de condensador

TME: Micrófonos electrostáticos de electret (o prepolarizados)

TME: Micrófonos MEMS

Especiales: Micrófonos de doble diafragma

Especiales: Micrófonos superdirectivos

Especiales: Micrófonos lavalier

Especiales: Micrófonos de superficie o de zona de presión

Especiales: Micrófonos inalámbricos

Técnica M/S

Un micro cardioide y otro bidireccional.

$$S_R(\theta) = S_M(\theta) + S_S(\theta)$$

$$S_L(\theta) = S_M(\theta) - S_S(\theta)$$

Técnica XY

Micros coincidentes, con ángulo de separación α .

$$S_R(\theta) = S(\theta - \alpha)$$

$$S_L(\theta) = S(\theta + \alpha)$$

Para obtener canales M y S:

$$S_{M0} = 2S_0 [A + B \cos(\alpha)]$$

$$S_{S0} = 2S_0 B \sin(\alpha)$$

$$S_M(\theta) = S_R(\theta) + S_L(\theta) = S_{M0} [A + B \cos(\theta)]$$

$$S_S(\theta) = S_R(\theta) - S_L(\theta) = S_{S0} \sin(\theta)$$

Conexión eléctrica de los micrófonos

Impedancias características

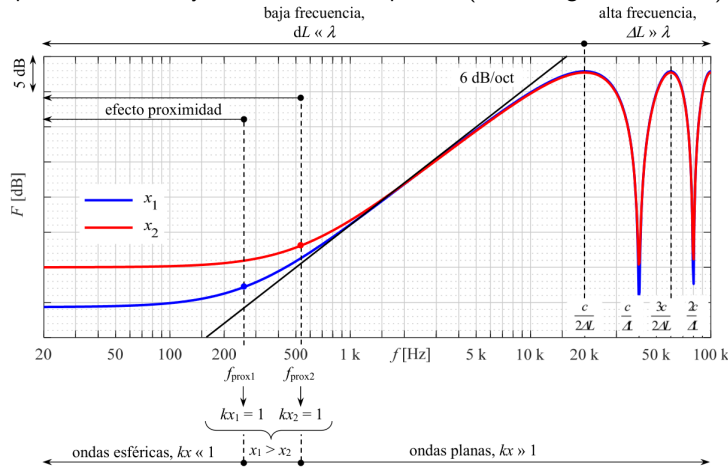
Efecto del cable en la banda de frecuencias transmitida

Línea microfónica balanceada

Alimentación de micrófonos electrostáticos

Adaptadores, conversores y distribuidores microfónicos

El **efecto proximidad** sucede cuando $kx \ll 1$ e implica que para bajas frecuencias (o micro muy cerca de la fuente) las ondas presentan divergencia esférica. Es decir, acercar el micro a la fuente incrementará la tensión generada. Esto no sucede para agudos porque $kx \gg 1$ y las ondas son planas (sin divergencia esférica).



$$\begin{cases} \lambda \gg \Delta L \rightarrow D(\theta) = \cos(\theta) \\ \lambda \ll \Delta L \rightarrow |D(\theta)| = \left| \sin\left(\frac{k\Delta L \cos(\theta)}{2}\right) \right| \end{cases}$$

Como el efecto proximidad sucede si $kx \ll 1$, entonces $f_{\text{prox}} = \frac{c}{2\pi x}$. Teniendo que F es la fuerza ejercida sobre el diafragma, entonces:

$$F = 2jpe^{-\frac{jk\Delta L \cos(\theta)}{2}} \sin\left(\frac{k\Delta L \cos(\theta)}{2}\right) S_d$$

$$G_{\text{prox}} = \frac{F}{F_{\text{ondas planas}}} = \frac{1 + jkx}{jkx}$$

TAM: Micrófonos combinados de presión/gradiente de presión

Son como los micrófonos de presión cambiando el orificio de equalización por una abertura de mayor tamaño, conformando un sistema acústico. El principio de funcionamiento es el mismo que los micrófonos de gradiente de presión.

$$(kdL \ll 1) \equiv (dL \ll \lambda)$$

T4. Sistemas de Refuerzo Sonoro

Niveles acústicos

Niveles de presión directo y reverberante

Constante acústica de la sala

Modificadores acústicos

Distancia crítica

Campo semirreverberante

Niveles debidos a varias fuentes

Potencia acústica

Respuesta temporal

Molestia por ecos

Efecto precedencia

Respuesta temporal mediante simulación

Auralización

Inteligibilidad

Índice de inteligibilidad del habla

Pérdida de articulación de consonantes

Índice de transmisión del habla

Configuraciones de altavoces

Sistema centralizado con un altavoz o un cluster

Clusters y arrays de altavoces

Sistema distribuidos de altavoces

Realimentación acústica

Modelo

Realimentación por un solo camino y en campo libre

Realimentación cuando existe reverberación

Condición de oscilación según los niveles acústicos en los micrófonos

Respuesta temporal de la realimentación

Control de la realimentación acústica

Ganancia acústica

Distancia acústica equivalente

Ganancia acústica necesaria y ganancia acústica potencial

Uso de la ganancia acústica para el diseño de un sistema de refuerzo sonoro

Amplificación

Amplificación de baja impedancia

Amplificación de alta impedancia, líneas de tensión constante

Conexión de amplificadores

Clases de amplificación

Fuentes de alimentación