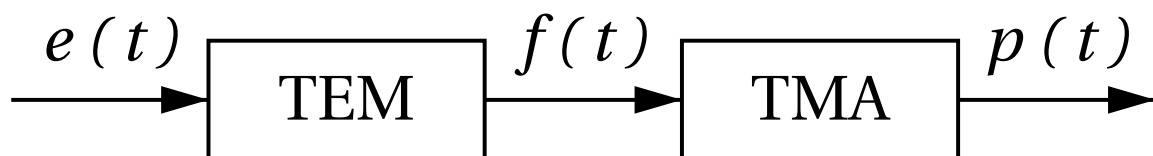


Tema 6

Altavoces

6.1 Introducción

Un altavoz es un transductor electroacústico que convierte señales eléctricas en señales acústicas



El transductor mecánico-acústico está formado, generalmente, sólo por el diafragma que, al moverse, produce variaciones de presión en el medio

El transductor electromecánico constituye el núcleo del sistema

En la práctica totalidad de los altavoces que se construyen, el mecanismo de transducción electromecánica que se utiliza es el de bobina móvil

6.1 Introducción

Clasificación

Woofers Son los altavoces de mayor tamaño (15–45 cm diámetro) y reproducen las frecuencias más bajas del espectro (20–500 Hz)

Midrange Son los altavoces medios (10–15 cm diámetro) y se utilizan para reproducir las frecuencias medias (500–3000 Hz)

Tweeters Son los altavoces más pequeños (2, 5–10 cm diámetro) y reproducen las frecuencias más altas (3–20 kHz)

Potencia eléctrica

Es un indicador de cuanto puede absorber un altavoz antes de sufrir desperfectos

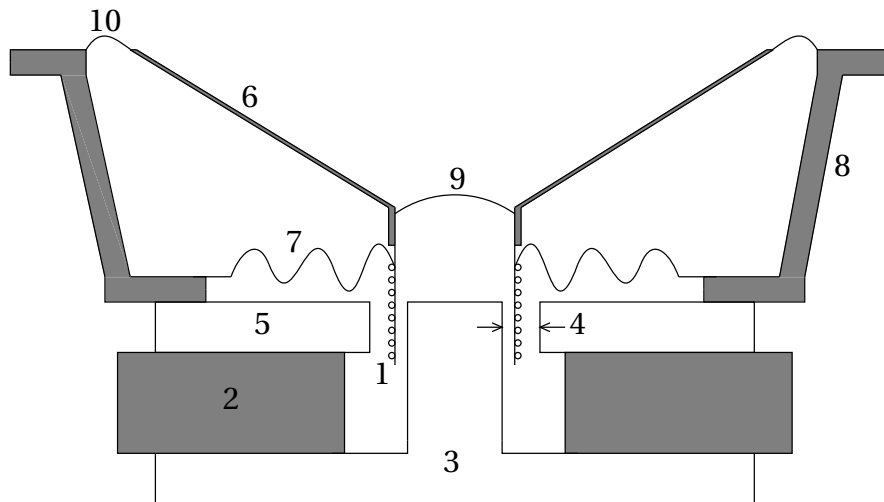
La potencia *musical* o *de pico* sirve de guía para los picos que se pueden reproducir

La potencia *nominal*, *eficaz* o *RMS* se determina tras horas de reproducción continua

En ambos casos es importante conocer el ancho de banda, la señal y la duración de las pruebas

6.1 Introducción

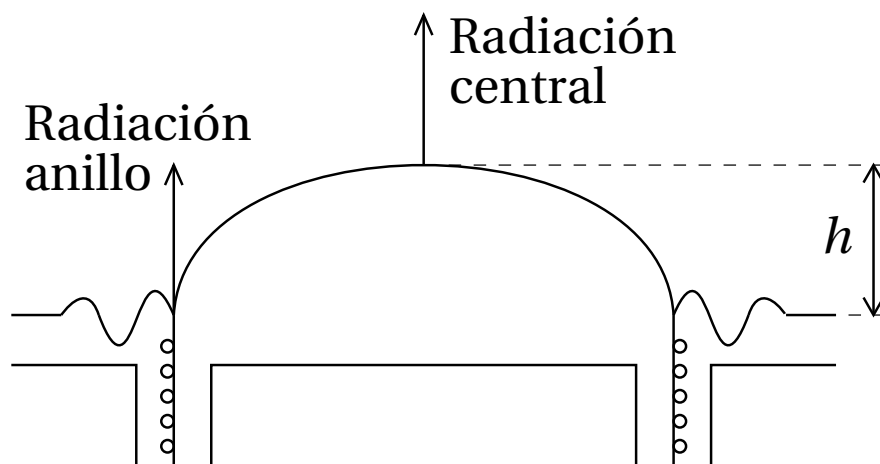
Elementos constitutivos



- | | |
|------------------|---------------------|
| 1. Bobina móvil | 6. Diafragma |
| 2. Imán | 7. Araña |
| 3. Yugo o culata | 8. Carcasa |
| 4. Entrehierro | 9. Tapa para polvo |
| 5. Pieza polar | 10. Anillo elástico |

6.1 Introducción

En *tweeters* es normal la forma de cúpula (*dome*)



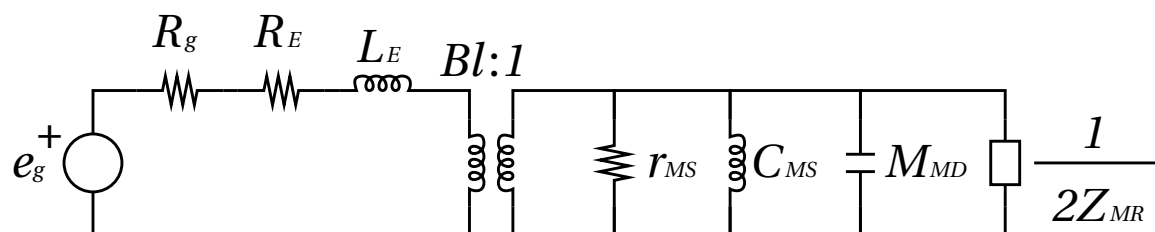
En este caso se pueden producir interferencias entre la radiación central y la de anillo cuando

$$(2n - 1) \lambda = 2h \quad , \quad n = 1, 2, \dots$$

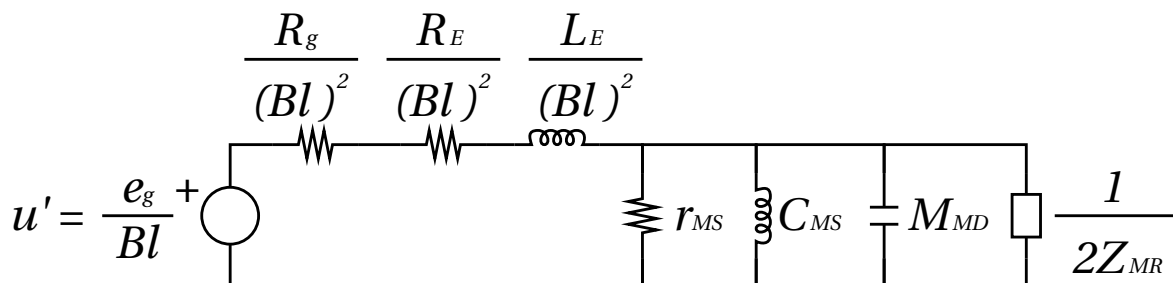
6.2 Circuito equivalente

6.2 Circuito equivalente

El circuito equivalente del sistema completo de un altavoz, incluyendo el generador, es



Eliminado los transformadores se obtiene

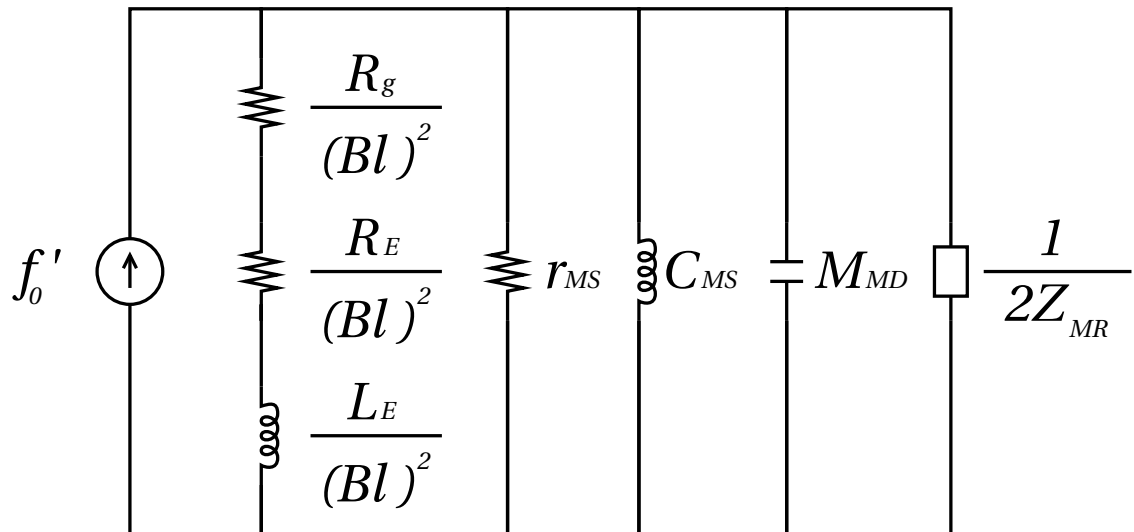


Aplicando el teorema de teoría de circuitos

Teorema Se puede convertir un generador de tensión \hat{e} en serie con una impedancia \hat{Z} en un generador de corriente $\hat{i} = \hat{e}/\hat{Z}$ en paralelo con la misma impedancia \hat{Z}

6.2 Circuito equivalente

se obtiene el circuito equivalente



donde

$$\hat{f}_0' = \frac{\hat{u}'}{\hat{Z}_{ME}}$$

$$\hat{u}' = \frac{\hat{e}_g}{Bl}$$

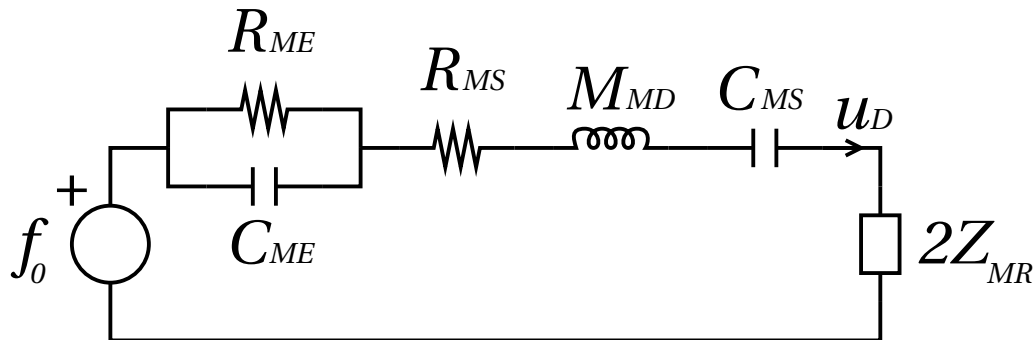
$$\hat{Z}_{ME} = \frac{R_{ET} + sL_E}{(Bl)^2}$$

$$R_{ET} = R_E + R_g$$

$$s = j\omega$$

6.2 Circuito equivalente

Pasando el circuito a analogía de impedancia se obtiene



donde

$$\hat{f}_0 = \frac{\hat{e}_g Bl}{R_{ET} + s L_E}$$

$$R_{ME} = \frac{(Bl)^2}{R_{ET}}$$

$$C_{ME} = \frac{L_E}{(Bl)^2}$$

Este circuito mecánico se puede convertir en acústico aplicando las conocidas relaciones

$$\hat{p} = \frac{\hat{f}}{S_D}; \quad \hat{U}_D = \hat{u}_D \cdot S_D$$

$$\hat{Z}_A = \frac{\hat{Z}_M}{S_D^2}$$

6.2 Circuito equivalente

Aproximación en baja frecuencia

En la banda inferior de frecuencias ($kr_D \lesssim 1$) se pueden realizar las siguientes aproximaciones

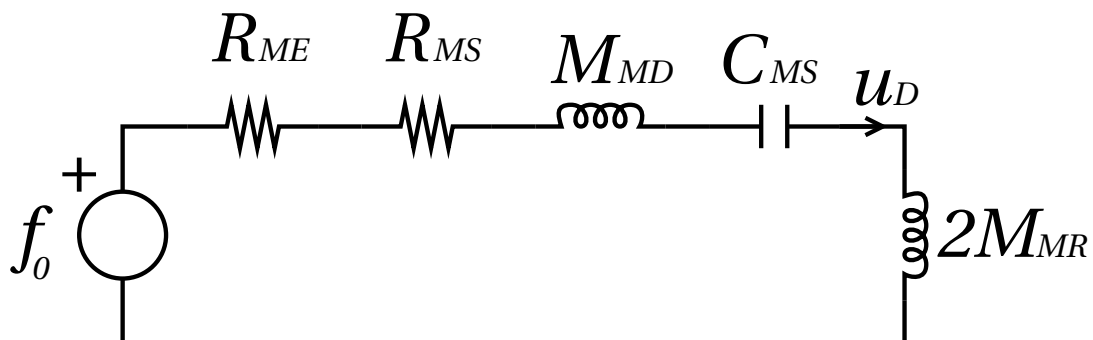
1. El condensador C_{ME} es un circuito abierto
2. El generador de fuerza es simplemente

$$\hat{f}_0 = \frac{\hat{e}_g Bl}{R_{ET}}$$

3. Modelando el diafragma del altavoz como un pistón en pantalla infinita, la carga de aire en una cara corresponde a una masa mecánica

$$M_{MR} = \frac{8}{3} \rho_0 r_D^3$$

Se obtiene así el siguiente circuito simplificado



6.2 Circuito equivalente

De este circuito se deduce que la velocidad con que se mueve el diafragma es

$$\begin{aligned}\hat{u}_D(s) &= \frac{\frac{\hat{e}_g Bl}{R_{ET}}}{R_{MT} + s M_{MS} + \frac{1}{s C_{MS}}} \\ &= \frac{\hat{e}_g Bl}{R_{ET}} \frac{\frac{1}{M_{MS}}}{\frac{R_{MT}}{M_{MS}} + s + \frac{1}{s C_{MS} M_{MS}}} \\ &= \frac{\hat{e}_g Bl}{M_{MS} R_{ET}} \frac{s}{s^2 + s \frac{R_{MT}}{M_{MS}} + \frac{1}{C_{MS} M_{MS}}}\end{aligned}$$

donde

$$R_{MT} = R_{ME} + R_{MS}$$

$$M_{MS} = M_{MD} + 2 M_{MR}$$

Se obtiene la expresión de una función de transferencia paso banda de segundo orden

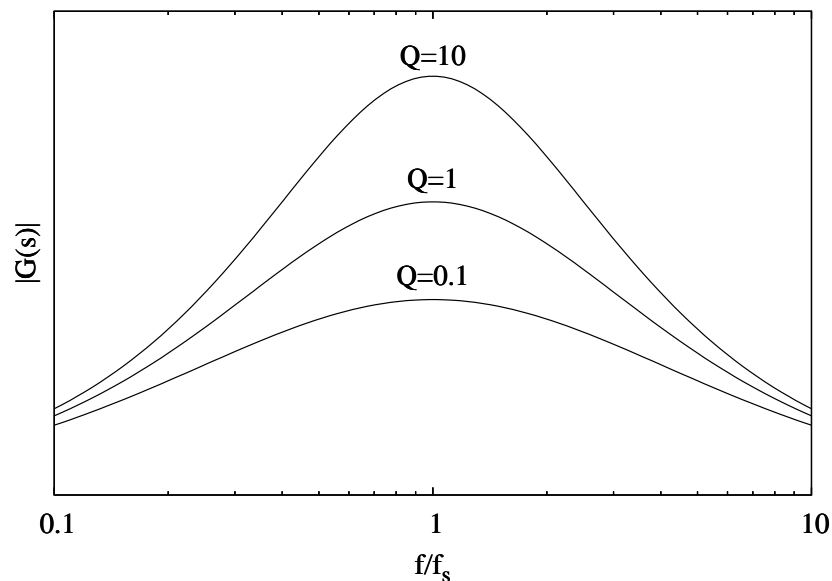
$$\hat{u}_D(s) = \hat{K} \frac{s}{s^2 + \frac{\omega_s}{Q_{TS}} s + \omega_s^2}$$

donde ω_s es la *frecuencia de resonancia*

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{M_{MS} C_{MS}}}$$

y Q_{TS} el *factor de calidad*

6.2 Circuito equivalente



$$Q_{TS} = \omega_s \frac{M_{MS}}{R_{MT}} = \frac{f_s}{f_2 - f_1}$$

siendo f_2 y f_1 las frecuencias en que la amplitud de la velocidad es $1/\sqrt{2}$ del valor máximo

Se define el *factor eléctrico* como

$$Q_{ES} = \omega_s \frac{M_{MD} + 2 M_{MR}}{R_{ME}}$$

y el *factor mecánico* como

$$Q_{MS} = \omega_s \frac{M_{MD} + 2 M_{MR}}{R_{MS}}$$

de tal manera que

$$Q_{TS} = \frac{Q_{ES} Q_{MS}}{Q_{ES} + Q_{MS}} = \omega_s \frac{M_{MD} + 2 M_{MR}}{R_{ME} + R_{MS}}$$

6.2 Circuito equivalente

Aproximación en alta frecuencia

En alta frecuencia ($ka > 1$) los circuitos equivalentes pierden precisión y únicamente sirven para estimar la respuesta asintótica

Se pueden realizar las siguiente aproximaciones

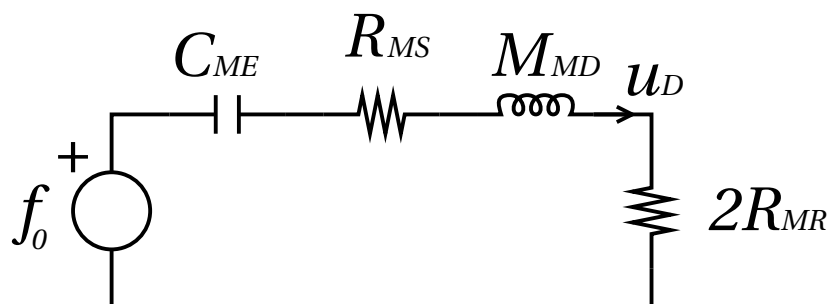
1. C_{MS} puede despreciarse en el circuito
2. R_{ME} es un C. A. comparado con C_{ME}
3. El generador de fuerza se puede expresar

$$\hat{f}_0 = \frac{\hat{e}_g Bl}{s L_E}$$

4. Modelando el diafragma del altavoz como un pistón en pantalla infinita, la carga de aire en cada cara es una resistencia mecánica

$$R_{MR} = \pi r_D^2 \rho_0 c$$

Se obtiene así el circuito simplificado



6.2 Circuito equivalente

Se deduce entonces la velocidad del diafragma

$$\begin{aligned}\hat{u}_D(s) &= \frac{\frac{\hat{e}_g Bl}{s L_E}}{R'_{MT} + s M_{MD} + \frac{1}{s C_{ME}}} \\ &= \frac{\hat{e}_g Bl}{L_E} \frac{1}{M_{MD} s^2 + R'_{MT} s + \frac{1}{C_{ME}}} \\ &= \frac{\hat{e}_g Bl}{L_E M_{MD}} \frac{1}{s^2 + s \frac{R'_{MT}}{M_{MD}} + \frac{1}{C_{ME} M_{MD}}}\end{aligned}$$

donde

$$R'_{MT} = R_{MS} + 2 R_{MR}$$

Se obtiene la expresión de una función de transferencia paso bajo de segundo orden

$$\hat{u}_D(s) = \hat{K} \frac{1}{s^2 + \frac{\omega_{em}}{Q_{em}} s + \omega_{em}^2}$$

donde ω_{em} es la frecuencia de resonancia *electromecánica*

$$\omega_{em} = \frac{1}{\sqrt{M_{MD} C_{ME}}} = \frac{Bl}{\sqrt{M_{MD} L_E}}$$

y Q_{em} el factor de calidad *electromecánico*

$$Q_{em} = \omega_{em} \frac{M_{MD}}{R'_{MT}} = \omega_{em} \frac{M_{MD}}{R_{MS} + 2 R_{MR}}$$

6.2 Circuito equivalente

Extensión a alta frecuencia

Las aproximaciones de baja y alta frecuencia predicen comportamientos parecidos si $\omega \longrightarrow \infty$

$$\hat{u}_{D(LF)} \longrightarrow \frac{\hat{e}_g Bl}{M_{MS} R_{ET}} \frac{1}{\omega}$$

$$\hat{u}_{D(HF)} \longrightarrow \frac{\hat{e}_g Bl}{L_E M_{MD}} \frac{1}{\omega^2}$$

Se puede modelar el comportamiento a todas las frecuencias con una única función, que se obtiene al multiplicar la aproximación de baja frecuencia por la función de transferencia paso bajo

$$H(s) = \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_u}}$$

donde

$$\omega_u = \frac{M_{MS} R_{ET}}{L_E M_{MD}}$$

es la *pulsación de cruce*

6.2 Circuito equivalente

Parámetros de pequeña señal

Para fines de análisis y diseño, supone un gran avance describir el altavoz en función de cuatro parámetros básicos: los *parámetros de Thiele-Small* o TS

f_s Frecuencia de resonancia del altavoz en pantalla infinita

Q_{MS} Factor de calidad mecánico

Q_{ES} Factor de calidad eléctrico

V_{AS} Volumen de aire equivalente definido como

$$V_{AS} = \rho_0 c^2 S_D^2 C_{MS}$$

El adjetivo de pequeña señal se refiere a pequeños movimientos del diafragma, con lo que no se consideran efectos no lineales

6.3 Respuesta de presión

Tratando el diafragma como un pistón circular en pantalla infinita se obtiene

$$\hat{p}(r, \theta) = \frac{j\omega\rho_0 \hat{u}_D S_D}{2\pi} \frac{D(\theta)}{r} e^{-jk r}$$

donde

$$D(\theta) = \frac{2 J_1(k r_D \text{sen } \theta)}{k r_D \text{sen } \theta}$$

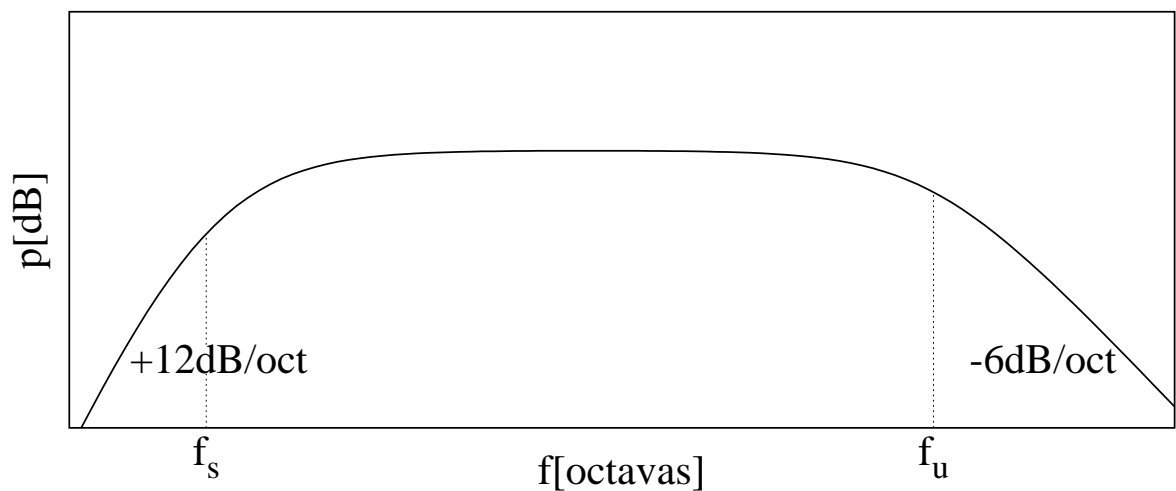
Substituyendo la expresión de \hat{u}_D el resultado es

$$\hat{p}(s, r, \theta) = \frac{\rho_0 S_D D(\theta)}{2\pi r} \frac{\hat{e}_g B l}{M_{MS} R_{ET}} G(s) H(s) e^{-s r}$$

donde $G(s)$ y $H(s)$ son las funciones de transferencia

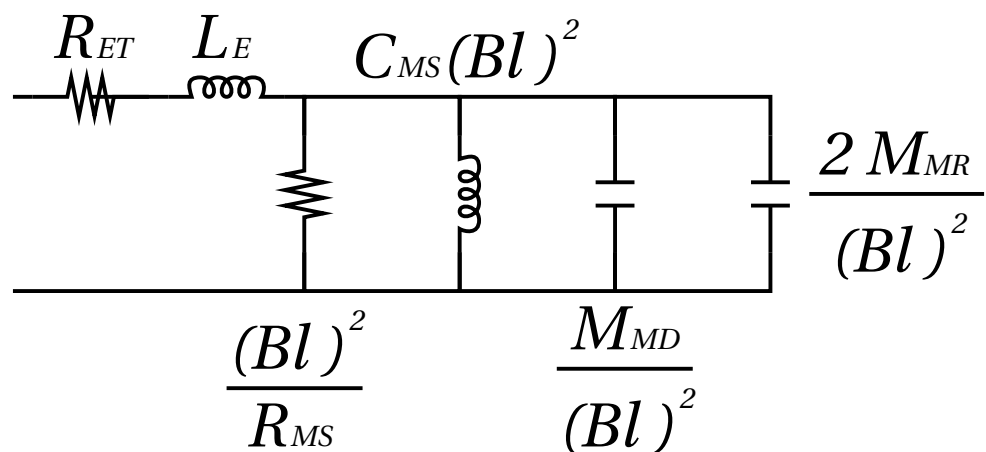
$$G(s) = \frac{s^2}{s^2 + \frac{\omega_s}{Q_{TS}} s + \omega_s^2}$$
$$H(s) = \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_u}}$$

6.4 Impedancia eléctrica



6.4 Impedancia eléctrica

Transformando la parte mecánica en eléctrica, el circuito equivalente del altavoz a bajas frecuencias, sin generador, es



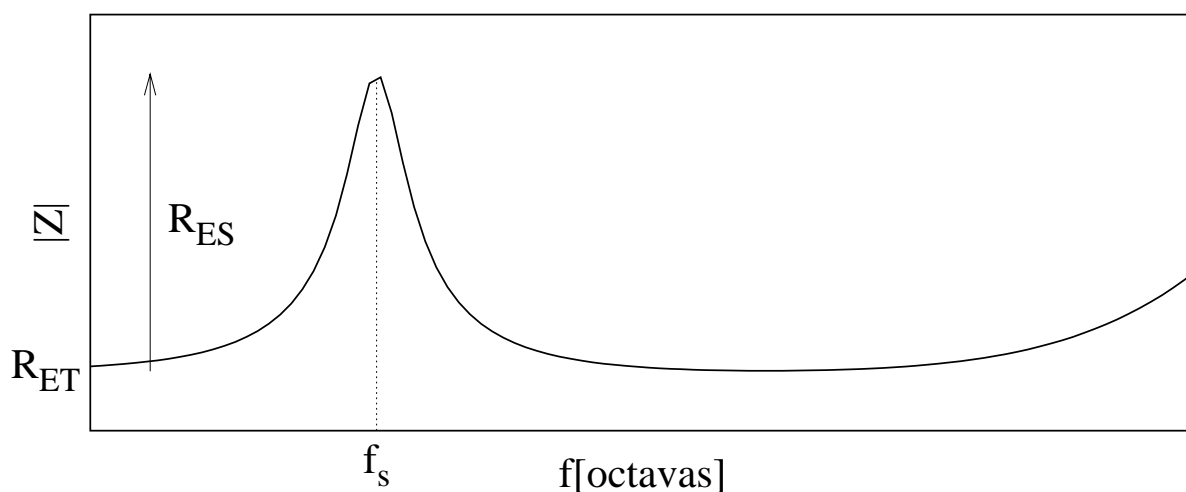
Así, la impedancia eléctrica de entrada es

$$\hat{Z}_{ee} = R_{ET} + s L_E + \hat{Z}_{mov}$$

6.4 Impedancia eléctrica

donde

$$\begin{aligned}\widehat{Z}_{mov} &= \frac{(Bl)^2}{R_{MS} + s M_{MS} + \frac{1}{s C_{MS}}} \\ &= \frac{(Bl)^2}{R_{MS}} \frac{s \frac{R_{MS}}{M_{MS}}}{s^2 + s \frac{R_{MS}}{M_{MS}} + \frac{1}{M_{MS} C_{MS}}} \\ &= \frac{(Bl)^2}{R_{MS}} \frac{\frac{\omega_s}{Q_{MS}} s}{s^2 + \frac{\omega_s}{Q_{MS}} s + \omega_s^2}\end{aligned}$$



$$R_{ES} = \frac{(Bl)^2}{R_{MS}} = R_{ET} \frac{Q_{MS}}{Q_{ES}}$$

La impedancia *nominal* \widehat{Z}_{nom} es el valor mínimo de impedancia después de la resonancia. Es la impedancia mínima en la zona de trabajo

6.5 Sensibilidad

Es el nivel de presión sonora a 1 m de distancia en el eje del altavoz en pantalla infinita, al ser excitado con 1 W de potencia eléctrica

$$\begin{aligned} S &= 20 \log \left[\frac{p_{ef}(s, \theta = 0^\circ, r = 1 \text{ m})}{2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}} \right] \\ &= 20 \log \left[\frac{\rho_0 e_{g1} Bl S_D 10^5}{4\pi M_{MS} R_{ET}} |G(s) H(s)| \right] \end{aligned}$$

donde e_{g1} es la tensión eficaz en el generador para disipar 1 W de potencia en el altavoz

A frecuencias medias, por encima f_s

$$e_{g1} \approx \sqrt{R_{ET}}$$

$$|G(s) H(s)| \approx 1$$

Entonces

$$S \approx 20 \log \left[\frac{\rho_0 Bl S_D 10^5}{4\pi M_{MS} \sqrt{R_{ET}}} \right]$$

Usando los parámetros de Thiele-Small

$$S \approx 20 \log \left[\frac{\sqrt{2\pi \rho_0} 10^5}{2c} f_s^{\frac{3}{2}} \left(\frac{V_{AS}}{Q_{ES}} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

6.6 Eficiencia o rendimiento

Con los valores típicos de las constantes

$$S \approx 20 \log \left[f_s^{\frac{3}{2}} \left(\frac{V_{AS}}{Q_{ES}} \right)^{\frac{1}{2}} \right] + 52 \text{ dB}$$

6.6 Eficiencia o rendimiento

Es la relación entre la potencia acústica que radia un altavoz y la potencia eléctrica entregada al mismo ($\sim 2\%$)

La potencia eléctrica disipada en el altavoz es

$$W_E = \frac{1}{2} |\hat{i}|^2 \Re [\hat{Z}_{ee}] = \frac{1}{2} |\hat{e}_g|^2 \Re \left[\frac{1}{\hat{Z}_{ee}} \right]$$

La potencia acústica radiada por una cara del altavoz en pantalla infinita es

$$\begin{aligned} W_{AR} &= \frac{1}{2} |\hat{u}_D|^2 R_{MR} \\ &= \frac{R_{MR}}{2} \frac{|\hat{e}_g|^2 (Bl)^2}{M_{MS}^2 R_{ET}^2} \left| \frac{s}{s^2 + \frac{\omega_s}{Q_{TS}} s + \omega_s^2} H(s) \right|^2 \end{aligned}$$

6.6 Eficiencia o rendimiento

Así, la eficiencia electroacústica resulta

$$\eta = \frac{R_{MR} (Bl)^2}{\Re \left[\widehat{Z}_{ee}^{-1} \right] M_{MS}^2 R_{ET}^2} \left| \frac{s}{s^2 + \frac{\omega_s}{Q_{TS}} s + \omega_s^2} H(s) \right|^2$$

En el rango de funcionamiento del altavoz

$$R_{MR} \approx \frac{\rho_0 \omega^2 S_D^2}{2\pi c}; \quad \Re \left[\frac{1}{\widehat{Z}_{ee}} \right] \approx \frac{1}{R_{ET}}$$

$$|G(s) H(s)|^2 \approx 1$$

Se obtiene entonces la eficiencia de referencia del altavoz

$$\eta_0 = \frac{\rho_0}{2\pi c} \frac{(Bl)^2 S_D^2}{R_{ET} M_{MS}^2} = \frac{4\pi^2}{c^3} \frac{f_s^3 V_{AS}}{Q_{ES}}$$

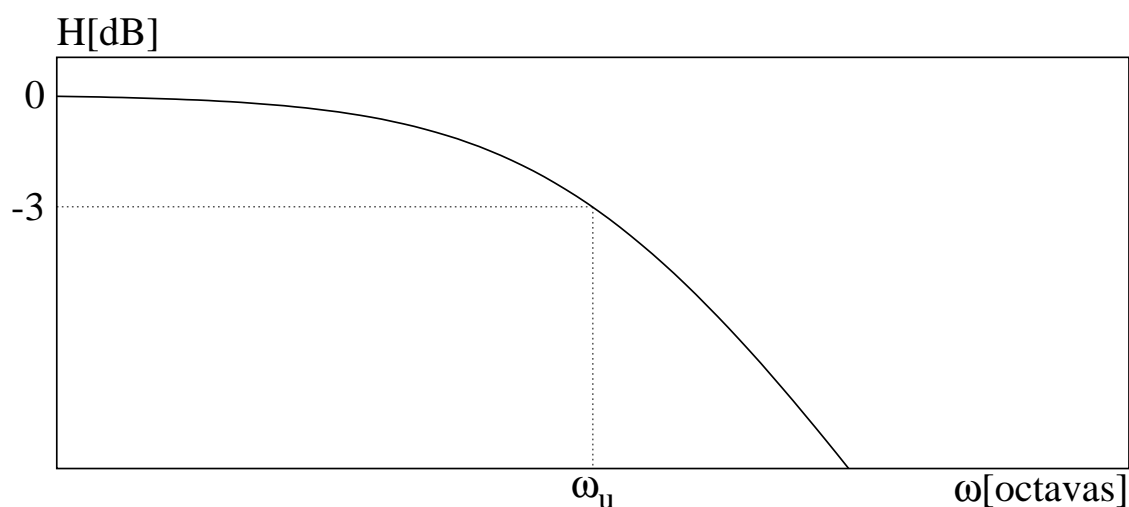
La potencia acústica radiada por el altavoz se puede expresar en función de este valor como

$$W_{AR} = \frac{\eta_0 |e_g|^2}{2 R_{ET}} |G(s) H(s)|^2$$

6.7 Funciones de transferencia

Paso bajo de primer orden

$$H(s) = \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_u}}$$



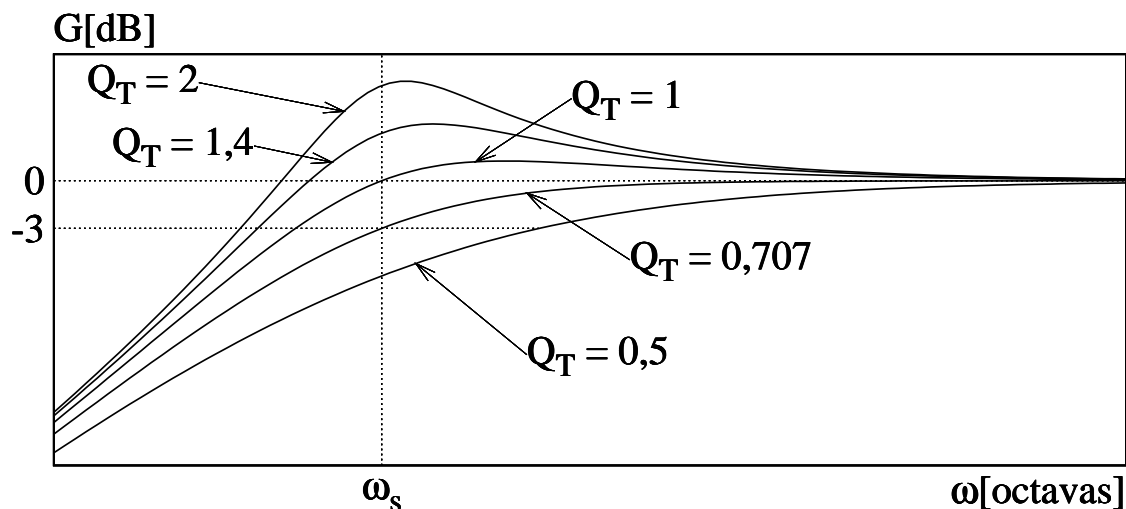
ω_u es la *frecuencia de corte superior*

Paso alto de segundo orden

$$G(s) = \frac{s^2}{s^2 + \frac{\omega_s}{Q_T} s + \omega_s^2}$$

El valor del factor de calidad Q_T determina el comportamiento del sistema en torno a la frecuencia de resonancia ω_s

6.7 Funciones de transferencia



Un *ajuste* (o *alineación*) es la selección de un valor particular de Q_T

Los ajustes más comunes tienen nombre de filtros de ingeniería eléctrica

Q_T	<i>Ajuste</i>
$1/\sqrt{3}$	Bessel (D2)
$1/\sqrt{2}$	Butterworth (B2)
$> 1/\sqrt{2}$	Chebyshev (C2)

La *frecuencia de corte inferior* ω_L es la frecuencia a la que $G(s)$ cae 3 dB

$$\omega_L = \omega_s \left[\left(\frac{1}{2Q_T^2} - 1 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{2Q_T^2} - 1 \right)^2 + 1} \right]^{\frac{1}{2}}$$

6.7 Funciones de transferencia

La *frecuencia de pico* ω_p es la frecuencia a la que ocurre el pico

$$\omega_p = \omega_s \frac{Q_T}{\sqrt{Q_T^2 - 0,5}}$$

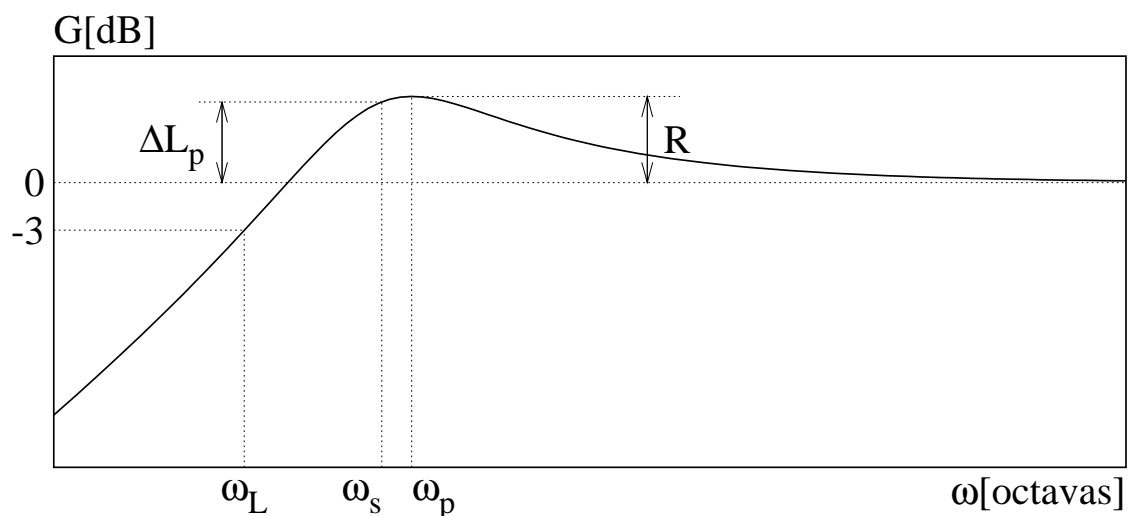
y sólo existe para $Q_T > 1/\sqrt{2}$

El *rizado* R es el valor del pico en dB

$$R = 20 \log |G(j\omega_p)| = 20 \log \frac{Q_T^2}{\sqrt{Q_T^2 - 0,25}}$$

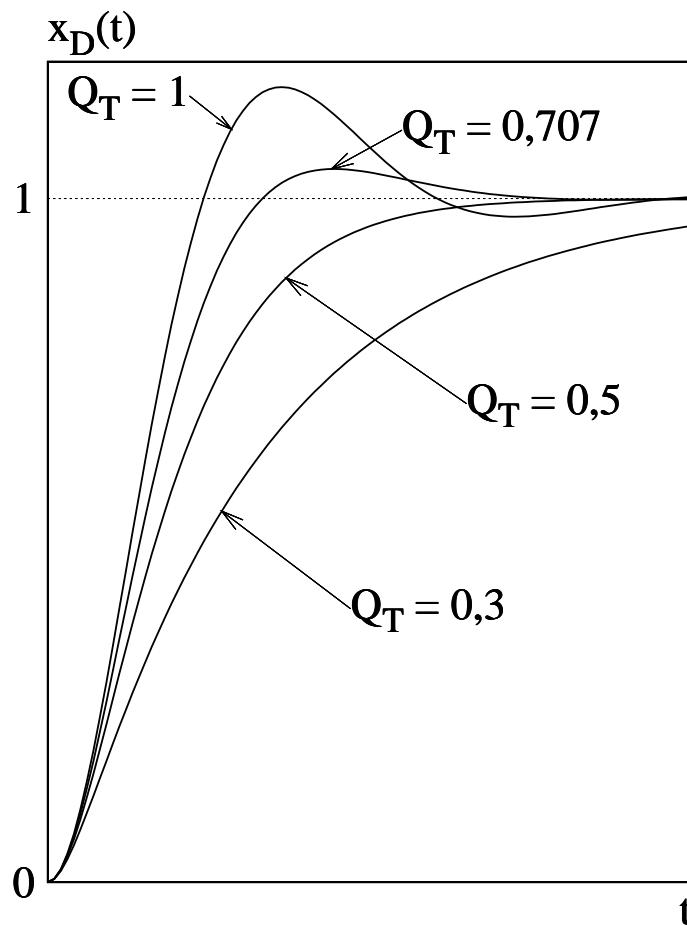
El *incremento de nivel de presión sonora* es

$$\Delta L_p = 20 \log |G(j\omega_s)| = 20 \log Q_T$$



Respuesta temporal

La respuesta temporal de $G(s)$ frente a un escalón informa de cómo es la reacción del sistema frente a una nueva excitación



La respuesta al escalón se caracteriza empleando dos parámetros

El primero es la *sobrepresión* o exceso

$$M_p = \frac{x_{max} - x(\infty)}{x(\infty)}$$

6.7 Funciones de transferencia

Expresado en función de los parámetros del altavoz vale

$$M_p = \begin{cases} \exp\left(\frac{-\pi}{\sqrt{4Q_T^2-1}}\right) & ; Q_T > 0,5 \\ 0 & ; Q_T \leq 0,5 \end{cases}$$

El segundo parámetro es el *tiempo de establecimiento* o *asentamiento*: el intervalo de tiempo que debe transcurrir para que la respuesta difiera siempre de su valor final menos de un determinado porcentaje

El tiempo de establecimiento para un $n\%$ es

$$t_s|_{n\%} = \ln\left(\frac{100}{n}\right)^2 \frac{Q_T}{\omega_s}$$

El tiempo de establecimiento para un 1% se aproxima como

$$t_s|_{1\%} \approx 10 \frac{Q_T}{\omega_s}$$