

# Unidad II: Altavoz en Caja Cerrada

## Parte 1

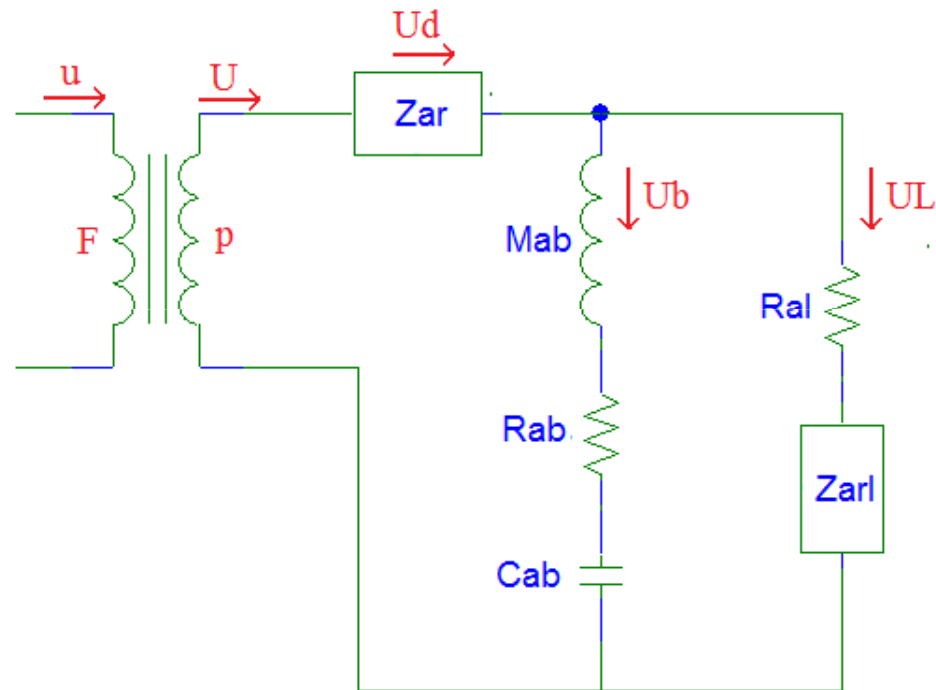
### Diseño en Caja Vacía

Recinto para Altavoces  
Prof. Ing. Andrés Barrera A.  
2010

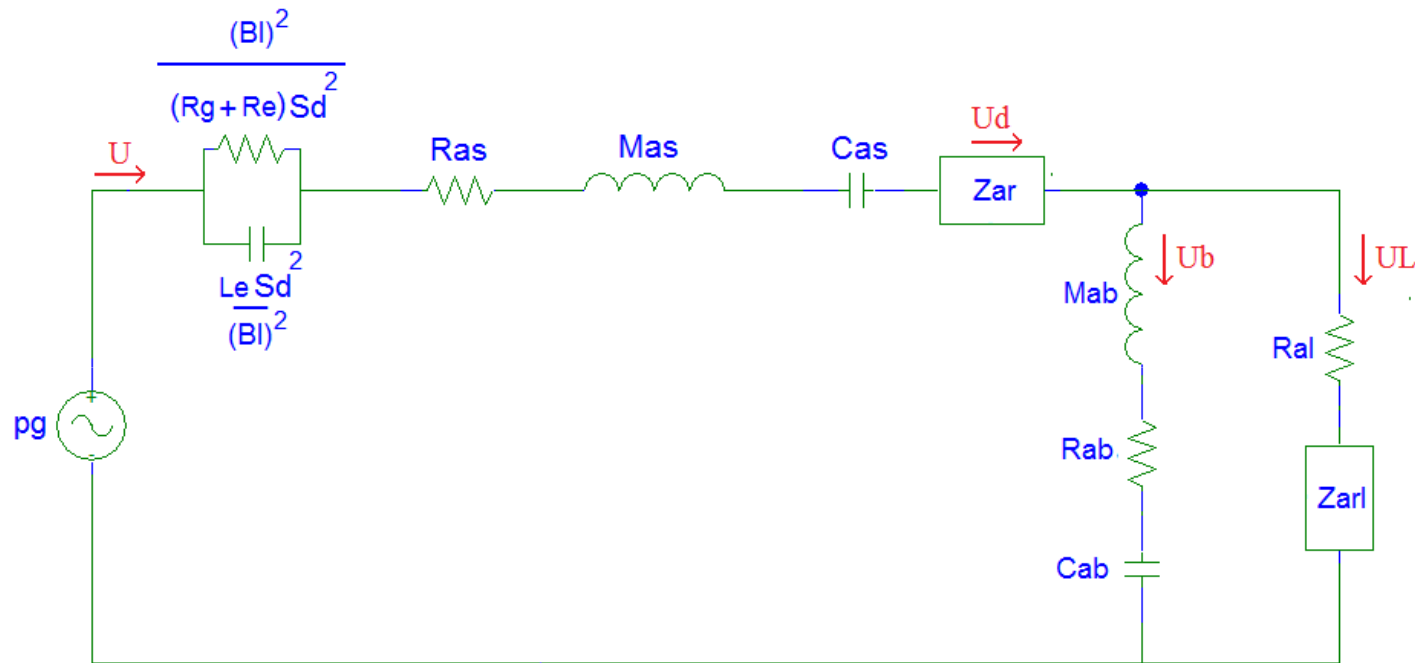
# 1.- Modelo Caja Cerrada

## 1.1.- Nuevos elementos

- $M_{ab}$ : Masa acústica de aire detrás del diafragma [ $\text{kg/m}^4$ ]
- $R_{ab}$ : Resistencia acústica del material absorbente de relleno [ $\text{Ns/m}^5$ ]
- $C_{ab}$ : Compliancia acústica de la caja [ $\text{m}^5/\text{N}$ ]
- $R_{al}$ : Resistencia acústica de las fugas [ $\text{Ns/m}^5$ ]
- $Z_{ar}$ : Impedancia acústica de radiación de fugas [ $\text{Ns/m}^5$ ]

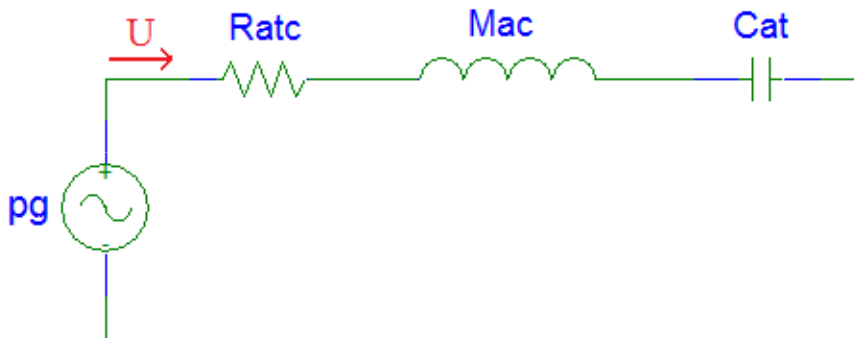


## 2.- Circuito Acústico Equivalente



$$p_g = \frac{eg \cdot Bl}{[(Rg + Re) + j\omega Le]Sd} \quad [Pa]$$

### 3.- Circuito Acústico Aproximado



$$p_g = \frac{eg \cdot Bl}{(Rg + Re)Sd}$$

$$Ratc = Ras + Rab + \frac{(Bl)^2}{(Rg + Re)Sd^2}$$

$$Mac = Mas + Mab$$

$$Cat = \frac{CasCab}{Cas + Cab}$$

## 4.- Parámetros Thiele-Small del Sistema Caja Cerrada

### 4.1.- Frecuencia de Resonancia del Sistema

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{MacCat}}$$

### 4.2.- Factor de Pérdidas del Sistema considerando sólo las pérdidas mecánicas ( $Q_{mc}$ )

$$Q_{mc} = \frac{\omega_c Mac}{R_{as} + R_{ab}}$$

## 4.- Parámetros Thiele-Small del Sistema Caja Cerrada

4.3.- Factor de Pérdidas del Sistema considerando sólo las pérdidas eléctricas ( $Q_{ec}$ )

$$Q_{ec} = \frac{\omega_c M_{ac}}{(Bl)^2 \frac{(R_g + R_e) S_d^2}{}}$$

4.4.- Factor de Pérdidas Total del Sistema ( $Q_{tc}$ )

$$Q_{tc} = \frac{Q_{mc} Q_{ec}}{Q_{mc} + Q_{ec}}$$

## 4.- Parámetros Thiele-Small del Sistema Caja Cerrada

### 4.5.- Razón de Compliancias del Sistema ( $\alpha$ )

$$\alpha = \frac{C_{as}}{C_{ab}}$$

## 5.- Tipos de Cajas Cerradas

### 5.1.- Caja IB (Infinite Baffle)

- Cajas grandes
- $C_{ab} \gg C_{as}$
- $\alpha \ll 1$

$$C_{at} = \frac{C_{as}C_{ab}}{C_{as} + C_{ab}} \approx C_{as}$$

### 5.2 Caja AS (“Air-Suspension”)

- Cajas pequeñas
- $C_{ab} \ll C_{as}$
- $\alpha \sim 1$  a  $10$

$$C_{at} = \frac{C_{as}C_{ab}}{C_{as} + C_{ab}} \approx C_{ab}$$



## 6.- Relaciones entre Sistema Caja Cerrada y Pantalla Infinita

### 6.1.- Relación $f_c/f_s$

$$\frac{f_c}{f_s} = \frac{\sqrt{M_{as}C_{as}}}{\sqrt{M_{ac}C_{at}}} \approx \sqrt{\frac{C_{as}}{C_{at}}} = \sqrt{\frac{C_{as}}{\frac{C_{as}C_{ab}}{C_{as} + C_{ab}}}} = \sqrt{1 + \frac{C_{as}}{C_{ab}}}$$

$$\therefore \frac{f_c}{f_s} = \sqrt{1 + \alpha}$$

## 6.- Relaciones entre Sistema Caja Cerrada y Pantalla Infinita

### 6.2.- Relación $Q_{ec}/Q_{es}$

$$\frac{Q_{ec}}{Q_{es}} = \frac{\frac{\omega_c Mac}{(Bl)^2}}{\frac{(Rg + Re)S_d^2}{\omega_s Mas}} \approx \frac{\omega_c}{\omega_s}$$

$$\therefore \frac{Q_{ec}}{Q_{es}} = \sqrt{1 + \alpha}$$

## 6.- Relaciones entre Sistema Caja Cerrada y Pantalla Infinita

### 6.3.- Relación $Q_{mc}/Q_{ms}$ (válida para caja vacía)

$$\frac{Q_{mc}}{Q_{ms}} = \frac{\frac{\omega_c M_{ac}}{R_{as} + R_{ab}}}{\frac{\omega_s M_{as}}{R_{as}}} \approx \frac{\omega_c}{\omega_s} \cdot \frac{R_{as}}{R_{as} + R_{ab}} = \frac{\omega_c}{\omega_s}$$

$$\therefore \frac{Q_{mc}}{Q_{ms}} = \sqrt{1 + \alpha}$$

## 6.- Relaciones entre Sistema Caja Cerrada y Pantalla Infinita

### 6.4.- Relación $Q_{tc}/Q_{ts}$

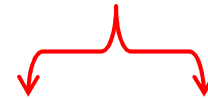
$$\frac{Q_{tc}}{Q_{ts}} = \frac{\frac{Q_{mc}Q_{ec}}{Q_{mc} + Q_{ec}}}{\frac{Q_{ms}Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}}} = \frac{Q_{ms} + Q_{es}}{Q_{mc} + Q_{ec}} \frac{Q_{mc}}{Q_{ms}} \frac{Q_{ec}}{Q_{es}} = \frac{1 + \frac{Q_{es}}{Q_{ms}} \frac{Q_{ec}}{Q_{es}}}{1 + \frac{Q_{ec}}{Q_{mc}} \frac{Q_{es}}{Q_{es}}} \approx \frac{Q_{ec}}{Q_{es}}$$

$$\therefore \frac{Q_{tc}}{Q_{ts}} = \sqrt{1 + \alpha}$$

# 7.-Relaciones de Trabajo en Pequeña Señal

## 7.1.- Eficiencia o Razón de Transferencia de Potencia

Dependiente de la  
frecuencia (Respuesta de  
frecuencia)



$$\eta_{(CB)}(\omega) = \frac{\rho_0}{2\pi c} \cdot \frac{(Bl)^2}{\text{Re} \cdot Sd^2 Mac^2} \cdot |G(j\omega)|^2$$



Independiente de la  
frecuencia (Eficiencia de  
referencia  $\eta_0$ )

## 8.-Función de Respuesta en Caja Cerrada

Inicialmente:  $G(s) = \frac{s^2 MacCat}{s^2 MacCat + sRateCat + 1}$

Transformando a parámetros TS:

FUNCIÓN DE  
RESPUESTA

$$G(s) = \frac{s^2 T_C^2}{s^2 T_C^2 + s \frac{T_C}{Qtc} + 1}$$



$$G(j\omega) = \frac{-\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)^2 + j \frac{1}{Qtc} \left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)}$$

## 9.- Respuesta de Frecuencia

Tomando el módulo:

$$|G(j\omega)| = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2\right]^2 + \frac{1}{Q^2} \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}}$$

**Análisis:**

- i) Baja Frecuencia  $\omega \rightarrow 0 \Rightarrow \lim_{\omega \rightarrow 0} |G(j\omega)| = 0 \quad (20 \log |G(j\omega)| \rightarrow -\infty dB)$
- ii) Alta Frecuencia  $\omega \rightarrow \infty \Rightarrow \lim_{\omega \rightarrow \infty} |G(j\omega)| = 1 \quad (20 \log |G(j\omega)| \rightarrow 0 dB)$
- iii) En Resonancia  $\omega = \omega_c \Rightarrow |G(j\omega)|_{\omega=\omega_c} = Q \quad (20 \log |G(j\omega)| = 20 \log Q)$

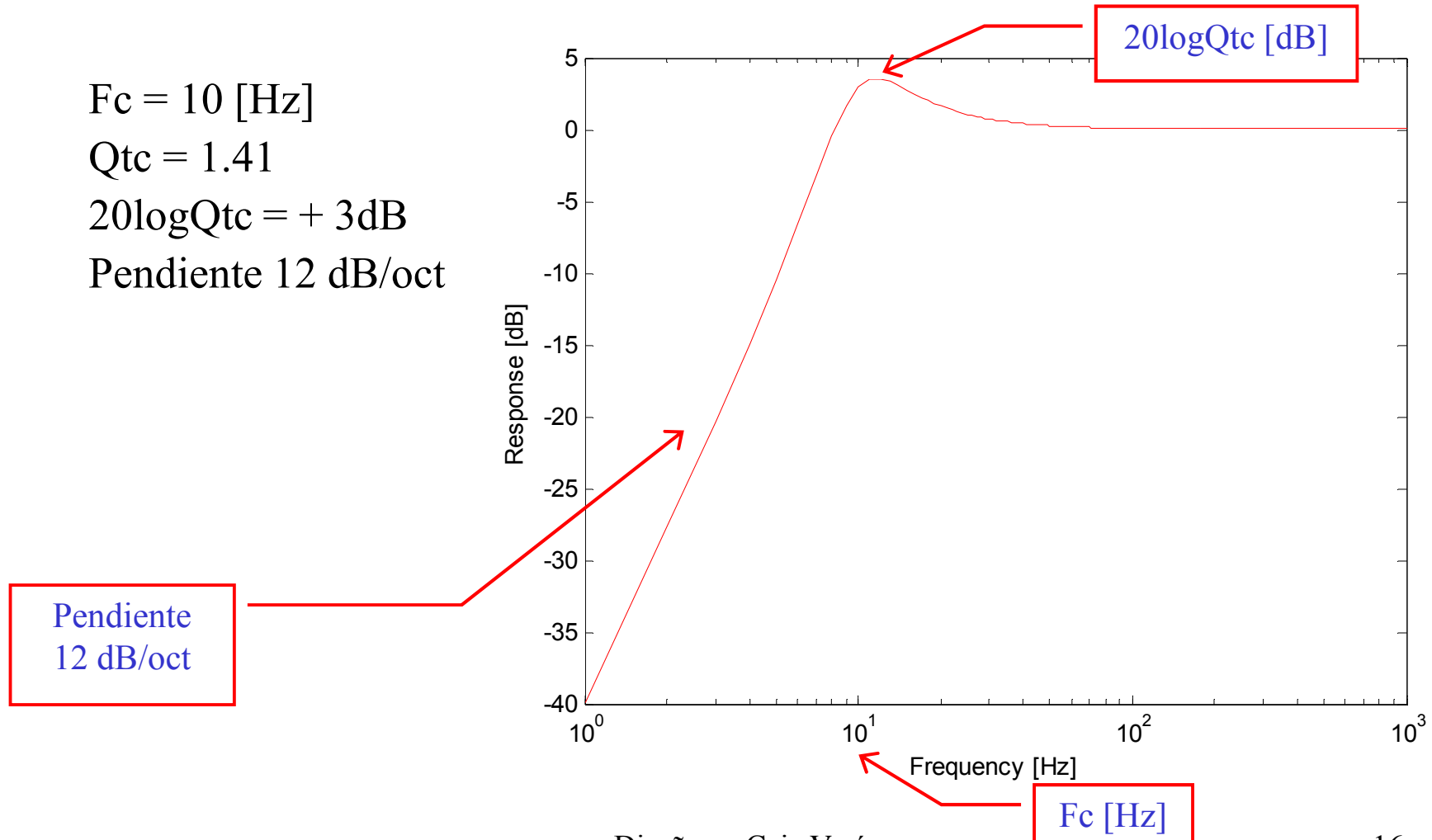
## 9.- Respuesta de Frecuencia

$$F_c = 10 \text{ [Hz]}$$

$$Q_{tc} = 1.41$$

$$20\log Q_{tc} = +3\text{dB}$$

Pendiente 12 dB/oct



Diseño en Caja Vacía



# 10.-Parámetros importantes

## 10.1.- Eficiencia de Referencia

Escrita en términos de parámetros TS.

$$\eta_0 = \frac{\rho_0}{2\pi c} \cdot \frac{(Bl)^2}{Re \cdot Sd^2 Mac^2} = \frac{4\pi^2}{c^3} \cdot \frac{fs^3 Vas}{Qes}$$

## 10.2.- Frecuencia de corte (f3) del sistema

Surge cuando:

$$20\log|G(j\omega)|_{\omega=\omega_3} = -3dB \Rightarrow \frac{f_3}{f_c} = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{Qtc^2} - 2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{Qtc^2} - 2\right)^2 + 4}}{2}}$$

# 10.-Parámetros importantes

## 10.3.- Potencias Limitadas por Desplazamiento

Para caja cerrada, Small demostró que:  $k_x = \frac{1}{1+\alpha}$

$$Per = \pi \rho_0 c^2 \frac{fc \cdot Qec \cdot V_D^2}{Vat \cdot |X(j\omega)|_{MAX}^2} \quad [Watts]$$

$$Par = \frac{4\pi^3 \rho_0}{c} \frac{fc^4 \cdot V_D^2}{|X(j\omega)|_{MAX}^2} \quad [Watts]$$

$$\begin{aligned} Qec &= Qes \sqrt{\alpha + 1} & |X(j\omega)|_{MAX} &= \sqrt{\frac{Qtc^4}{Qtc^2 - 0,25}} & si \quad Qtc > \frac{1}{\sqrt{2}} \\ Vat &= \frac{Vas}{\alpha + 1} & |X(j\omega)|_{MAX} &= 1 & si \quad Qtc \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \end{aligned}$$

# 11.-Alineamientos

## 11.1.- Filtro genérico 2º orden

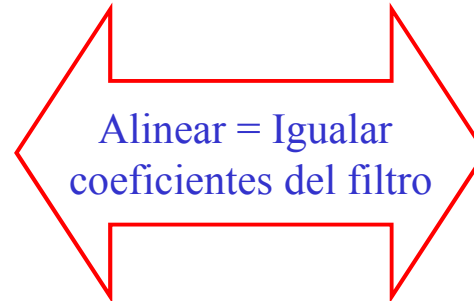
$$H(s) = \frac{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2}{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2 + a\left(\frac{s}{\omega_0}\right) + 1}$$

# 11.-Alineamientos

## 11.2.- Filtro Butterwoth 2° orden (B2)

$$H(s) = \frac{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2}{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2 + \sqrt{2}\left(\frac{s}{\omega_0}\right) + 1}$$

Filtro B2



$$G(s) = \frac{s^2 T_C^2}{s^2 T_C^2 + s \frac{T_C}{Qtc} + 1}$$

Función de Respuesta de la  
Caja

$$(1) \quad \frac{1}{\omega_0^2} = T_C^2$$

$$(2) \quad \frac{\sqrt{2}}{\omega_0} = \frac{T_C}{Qtc}$$

$$\begin{aligned} f_c &= f_0 \\ Qtc &= \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707 \end{aligned}$$

Diseño en Caja Vacía

# 11.-Alineamientos

## 11.3.- Filtro Bessel 2° orden (D2)

$$H(s) = \frac{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2}{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2 + \sqrt{3}\left(\frac{s}{\omega_0}\right) + 1}$$

Filtro D2

Alinear = Igualar  
coeficientes del filtro

$$G(s) = \frac{s^2 T_C^2}{s^2 T_C^2 + s \frac{T_C}{Qtc} + 1}$$

Función de Respuesta de la  
Caja

$$(1) \quad \frac{1}{\omega_0^2} = T_C^2$$

$$(2) \quad \frac{\sqrt{3}}{\omega_0} = \frac{T_C}{Qtc}$$

$$\begin{aligned} f_c &= f_0 \\ Qtc &= \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,577 \end{aligned}$$

Diseño en Caja Vacía

# 11.-Alineamientos

## 11.4.- Filtro Chebyshev 2° orden (C2)

$$H(s) = \frac{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2}{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2 + a\left(\frac{s}{\omega_0}\right) + 1} \quad \text{con } a < \sqrt{2}$$

Filtro C2

$$f_c = f_0$$
$$Q_{tc} > \frac{1}{\sqrt{2}}$$

# 11.-Alineamientos

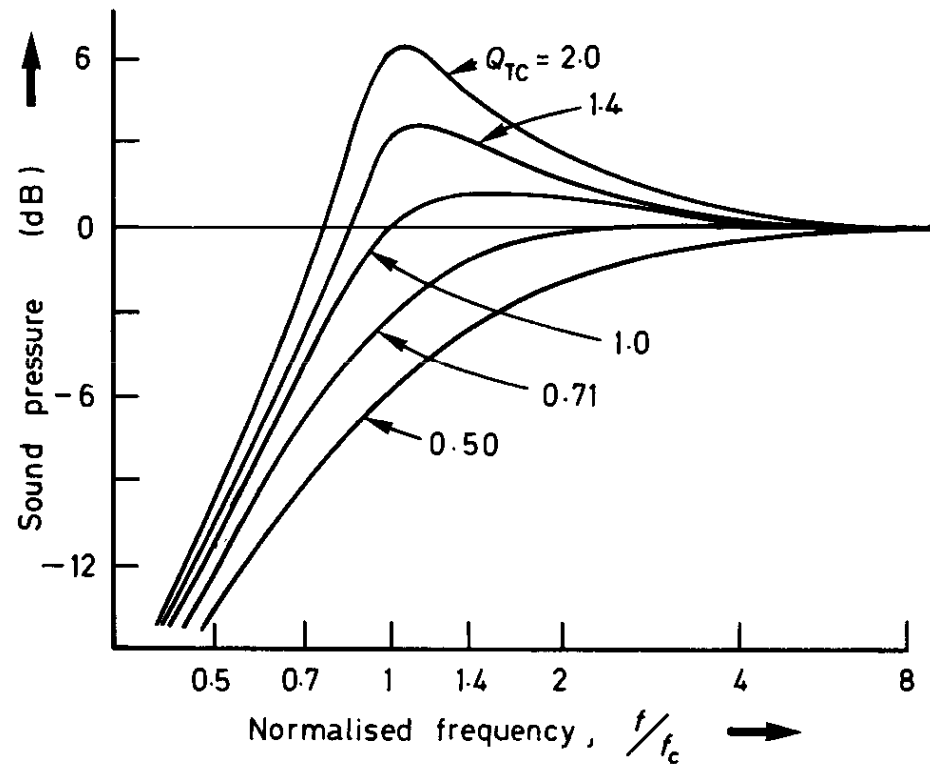


Figure 4.10(a) Amplitude versus normalised frequency response of closed-box loudspeaker system for several values of total system  $Q_{TC}$  (after Small). See Fig. 3.34. (Note the reference levels for each case are normalised.)

# 11.-Alineamientos

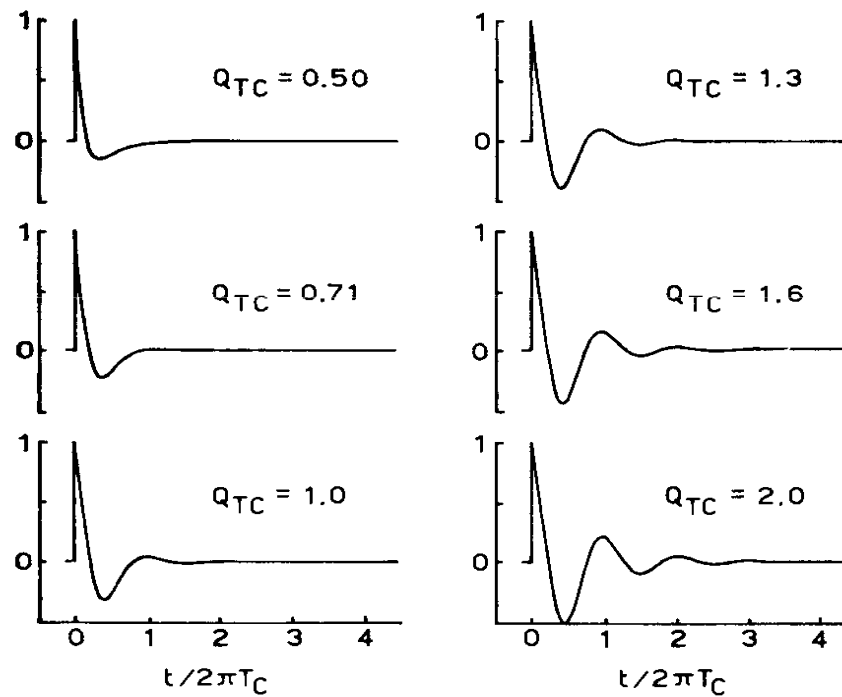


Figure 4.10(b) Normalised step response of the closed box loudspeaker system (after Small<sup>7</sup>)



# 12.-Diseño en Sistemas Caja Cerrada

## 12.1.- Selección del Altavoz

- Bajo  $f_s$
- Alta  $Mms$
- Altos valores de  $Qts > 0,30$
- Criterio de Small: **EBP (Efficiency Bandwidth Product)**

$$EBP = \frac{f_s}{Q_{es}}$$

$EBP < 50 \rightarrow$  CAJA CERRADA

$EBP = 100 \rightarrow$  BASS REFLEX

# 12.-Diseño en Sistemas Caja Cerrada

## 12.2.- Relaciones CB/IB para caja vacía

$$\frac{f_c}{f_s} = \frac{Q_{ec}}{Q_{es}} = \frac{Q_{tc}}{Q_{ts}} = \sqrt{1 + \alpha}$$

Independientes del relleno (Rab)

$$\frac{Q_{mc}}{Q_{ms}} = \sqrt{1 + \alpha}$$

Sólo si la caja es vacía/revestida (Rab  $\rightarrow$  0)

$$\alpha = \frac{V_{as}}{V_b}$$

Sólo si la caja es vacía/revestida (Rab  $\rightarrow$  0)

# 13.- Ejemplo

Para el modelo 123A, diseñar una caja cerrada vacía, determinando sensibilidad, frecuencia de corte, volumen de la caja y nivel máximo sin distorsión.

Proponga un diseño para:

- Amortiguamiento crítico  $Q_{tc} = 0,5$
- Bessel D2
- Butterworth B2
- Chebyshev C2 con  $Q_{tc} = 1,2$



JBL PROFESSIONAL

THIELE SMALL LOW FREQUENCY DRIVER  
PARAMETERS AND DEFINITIONS

March 17, 2008

Page 2 of 5

MODEL	FS	QTS	QMS	QES	VAS	EFF	PE	XMAX	RE	LE	SD	BI	MMS	FLUX
112A	40	0.21	4	0.22	34.0	0.9	60	2.79	5.8	0.3	0.018	12	22	0.95
116A	28	0.46	5	0.51	73.6	0.3	50	4.83	5.2	0.6	0.018	6.7	25	0.85
122A	17	0.23	7	0.24	339.8	0.67	50	6.86	5.7	1.5	0.053	16	100	1.08
123A	25	0.49	8.5	0.52	235.1	0.68	50	7.87	4.4	0.6	0.049	8.9	85	1
124A	16	0.14	6	0.14	399.3	1.1	100	5.08	6.3	1.4	0.053	21	100	1.2
125A	25	43	7.5	0.46	235.1	0.77	50	4.83	5.2	0.7	0.049	7.5	32	0.85

# Unidad II: Altavoz en Caja Cerrada

## Parte 1

### Diseño en Caja Vacía

Recinto para Altavoces  
Prof. Ing. Andrés Barrera A.