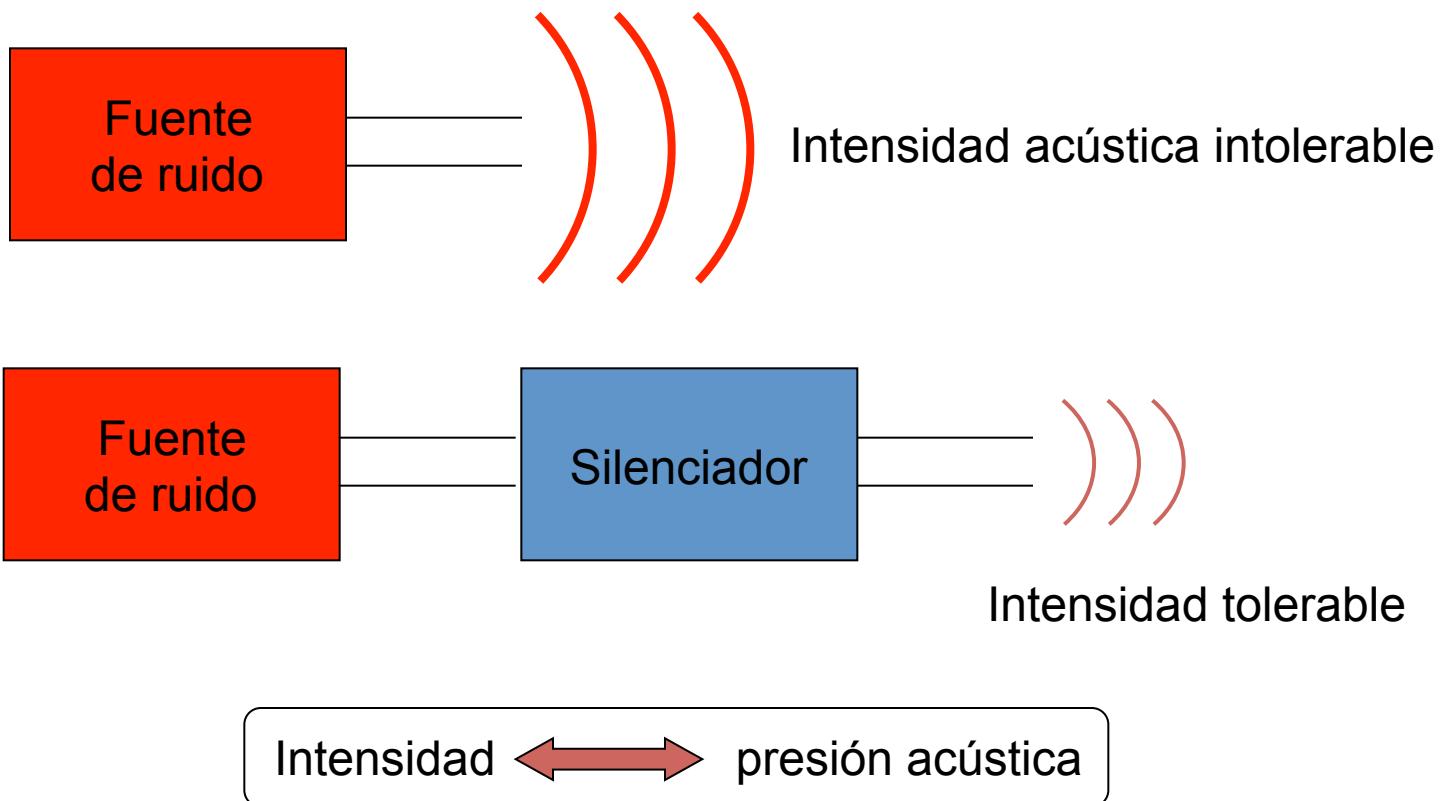


Base teórica de silenciadores reactivos.

Ana Barjau
Dep.de Ingeniería Mecánica
Universidad Politécnica de Catalunya
(ana.barjau@upc.edu)

- ▶ Introducción (definición, tipos, evaluación)
- ▶ Nociones básicas de acústica
- ▶ Acústica de tubos cilíndricos
- ▶ Impedancia
- ▶ Cálculo de silenciadores: matriz de transferencia
- ▶ Ejemplos (conexiones en serie y paralelo)
- ▶ Últimas precisiones

¿Qué es un silenciador?

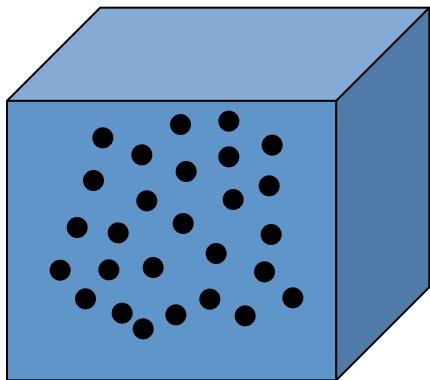


Presión acústica = cambio de presión respecto a la media atmosférica

Nociones básicas de acústica: variables acústicas

Sin campo acústico y sin caudal medio:

Volumen de aire



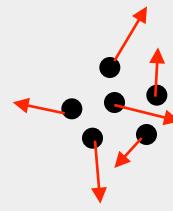
Valores medios en un volumen pequeño

densidad
 $\rho(punto, t)$



$$\rho = \rho_0$$

velocidad
 $v(punto, t)$



$$v = 0$$

presión
 $p(punto, t)$



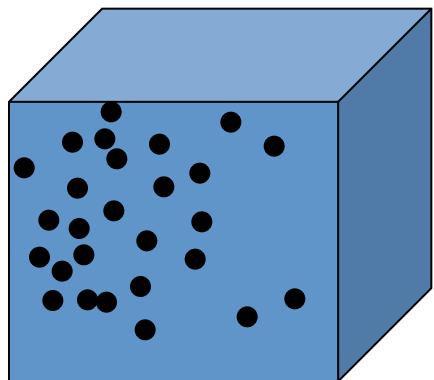
$$p = p_{atm}$$

Estado acústico → dos variables

Nociones básicas de acústica: variables acústicas

Con campo acústico y sin caudal medio:

Volumen de aire



Valores de referencia

densidad
 $\rho(\text{punto}, t)$
 ρ_0

velocidad
 $\mathbf{v}(\text{punto}, t)$
 $\mathbf{v} = \mathbf{0}$

presión
 $p(\text{punto}, t)$
 $p = p_{atm}$

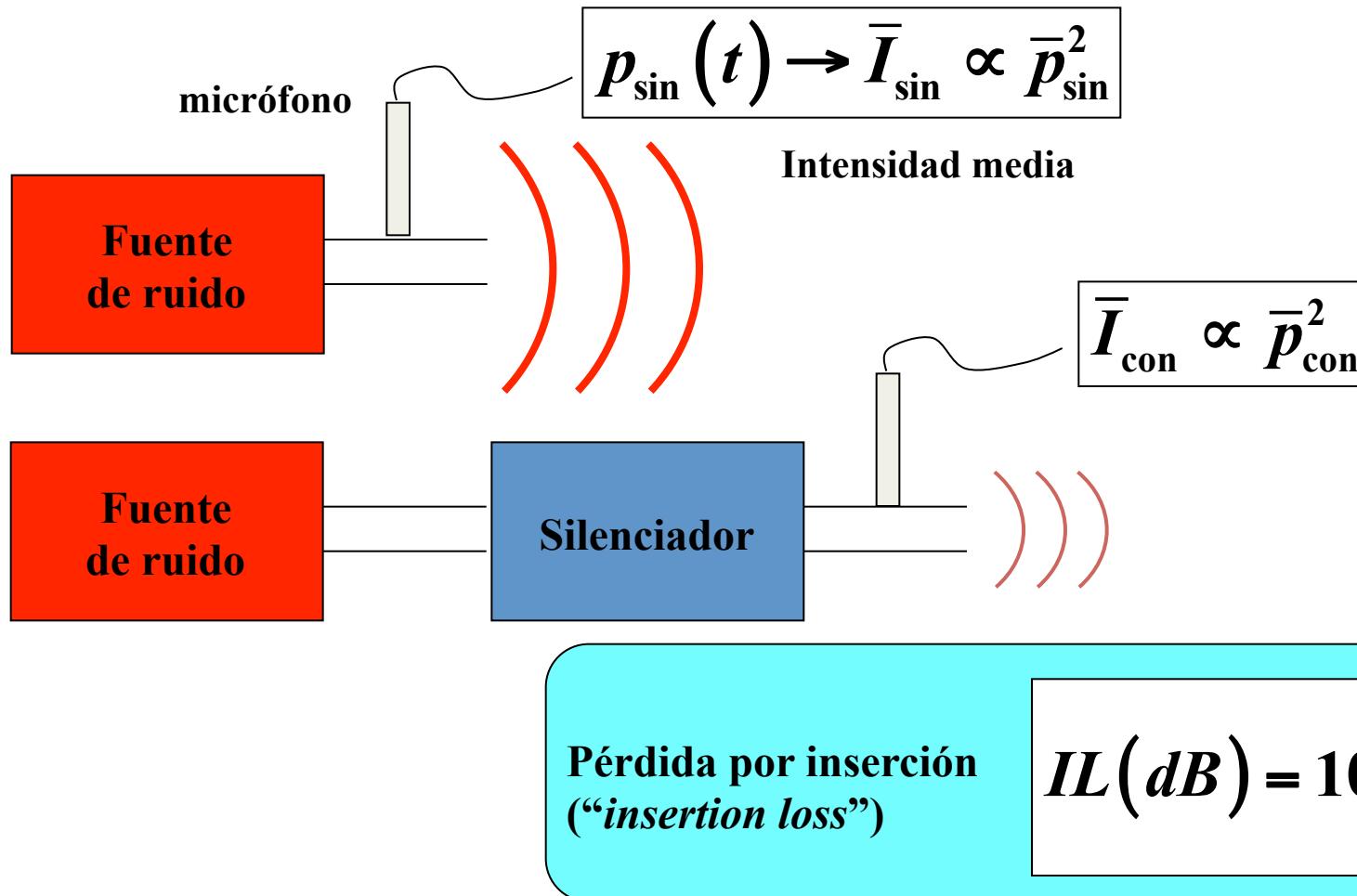
Variables acústicas:
Diferencia media en un volumen pequeño

$\rho_{ac} > 0$
 $\rho_{ac} < 0$

$(+)$
 $(-)$

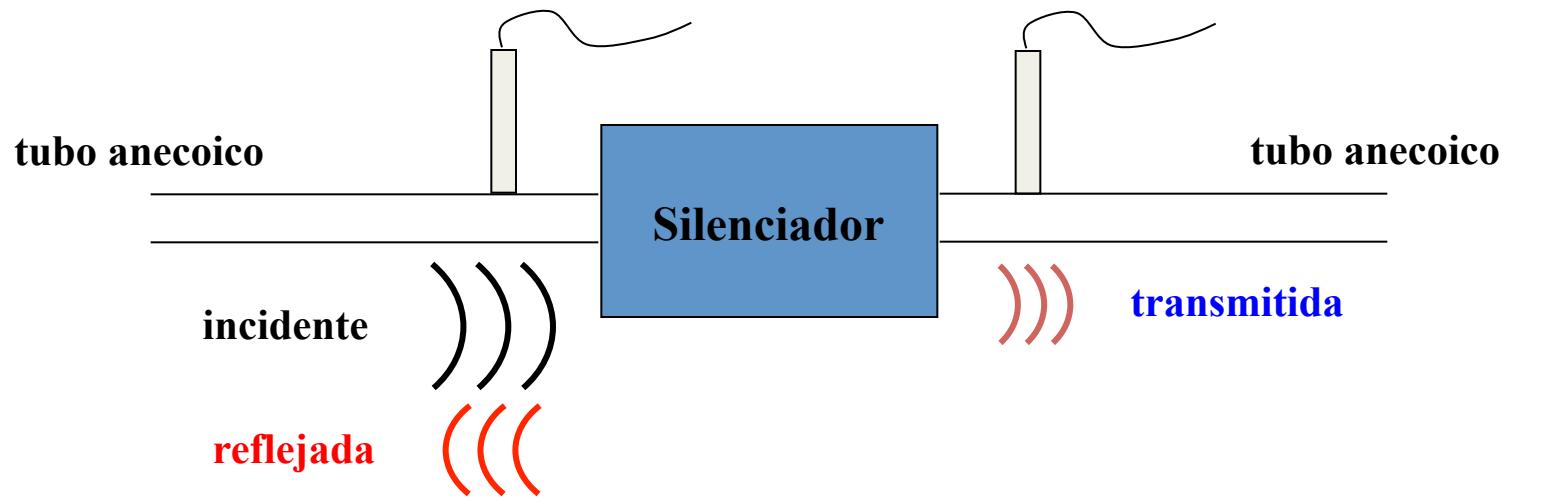
$p_{ac} > 0$
 $p_{ac} < 0$

Parámetros de evaluación: IL



Parámetros de evaluación: TL

$$p_{izq}(t) = p_{inc}(t) + p_{ref}(t)$$



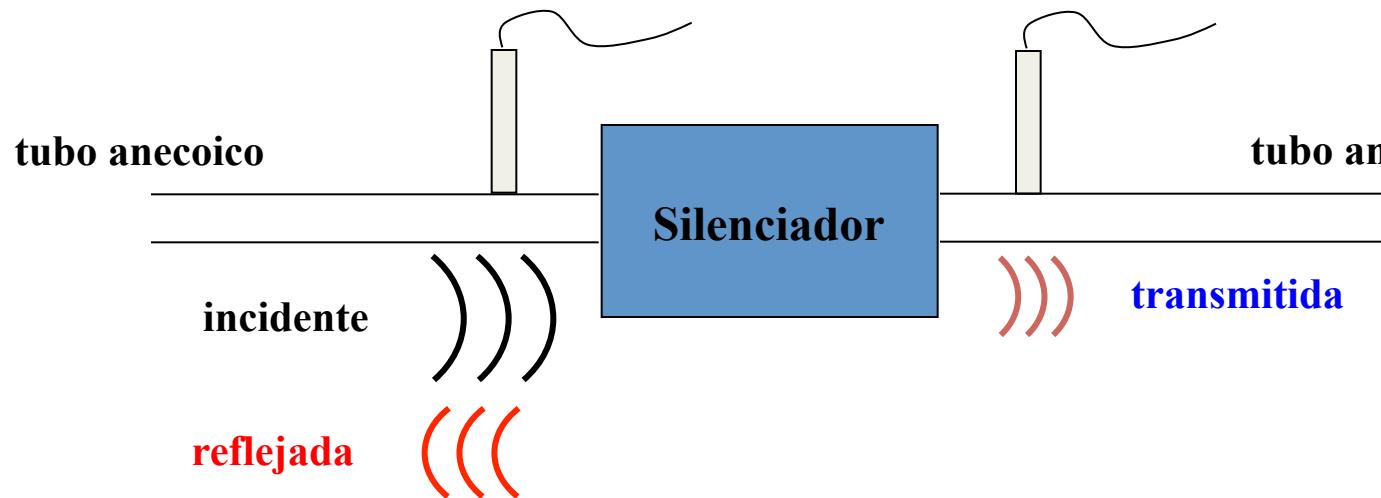
$$p_{der}(t) = p_{trans}(t)$$

Pérdida por transmisión
("transmission loss")

$$TL(dB) = 10 \log \frac{\bar{I}_{inc}}{\bar{I}_{trans}}$$

Parámetros de evaluación: TL

$$p_{izq}(t) = p_{inc}(t) + p_{ref}(t)$$



$$p_{der}(t) = p_{trans}(t)$$

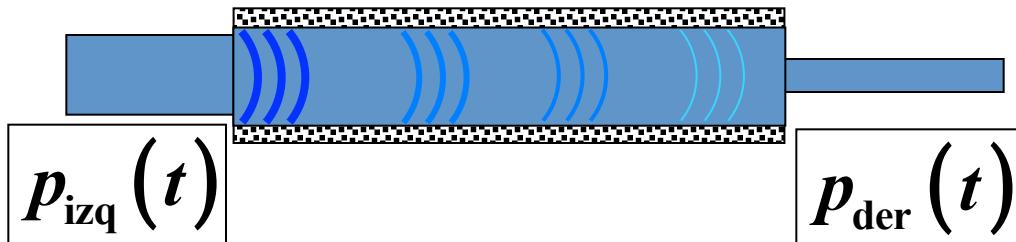
$$TL = 10 \log \left(\frac{1}{T_E} \right)$$

Coeficientes de reflexión y transmisión energéticos

$$R_E = \frac{\bar{I}_{ref}}{\bar{I}_{inc}} = \left(\frac{\bar{p}_{ref}}{\bar{p}_{inc}} \right)^2 ; \quad T_E = \frac{\bar{I}_{trans}}{\bar{I}_{inc}} = \left(\frac{\bar{p}_{trans}}{\bar{p}_{inc}} \right)^2$$

Tipos de silenciadores

Silenciadores disipativos

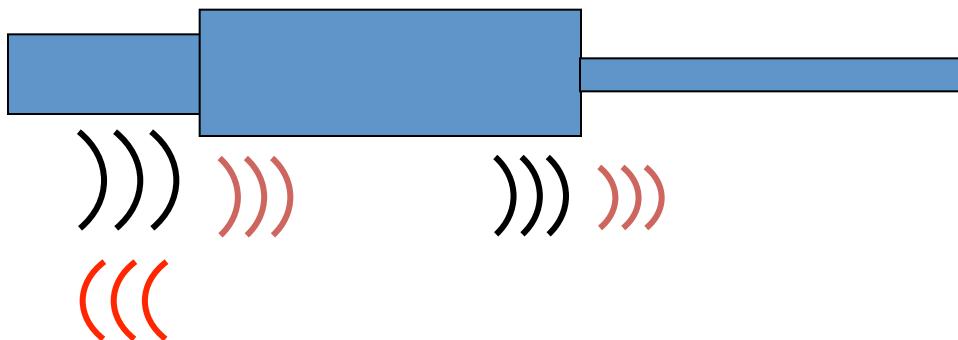


$$\Delta p = p_{der} - p_{izq} = \text{"pressure drop"}$$

Recubrimiento absorbente

Transformación de
energía acústica en calor

Silenciadores reactivos

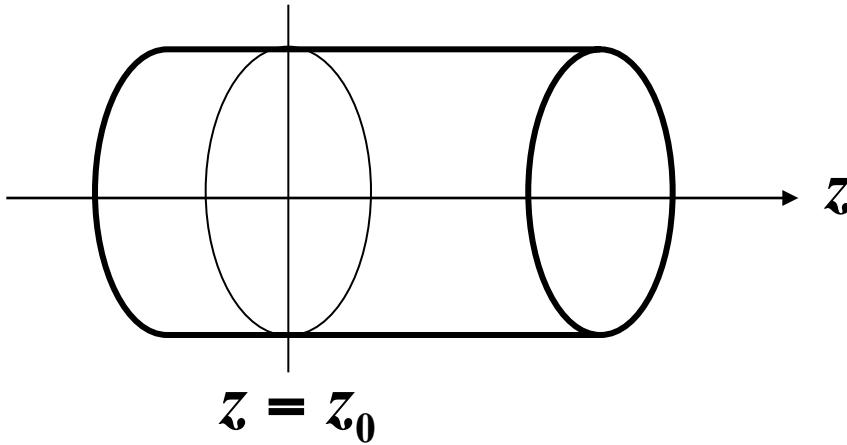


Discontinuidad

Reflexión
Cambio de **impedancia**

Acústica de tubos cilíndricos

El tubo cilíndrico Elemento básico de los silenciadores reactivos



Bajo ciertas condiciones (*)

$$p(z,t) , v(z,t)$$

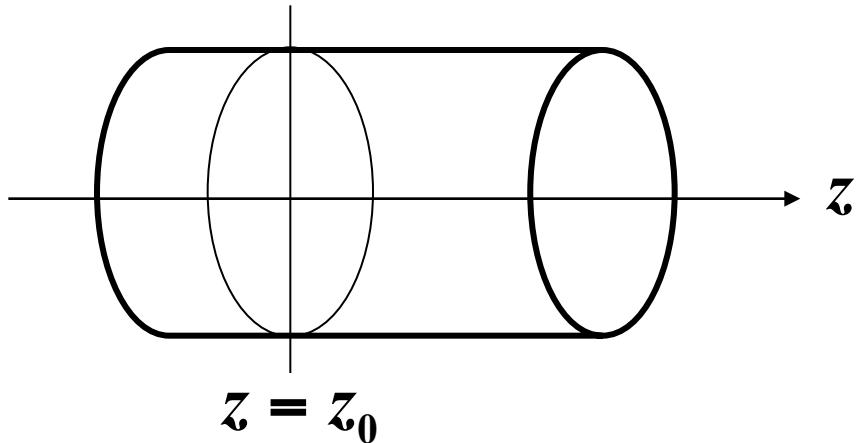
- Excitación uniforme sobre una sección
- Sin disipación
- ... (*)



Acústica de tubos cilíndricos

El tubo cilíndrico

Elemento básico de los silenciadores reactivos



$$\mathbf{p}(z,t) = \mathbf{p}_+(z,t) + \mathbf{p}_-(z,t)$$

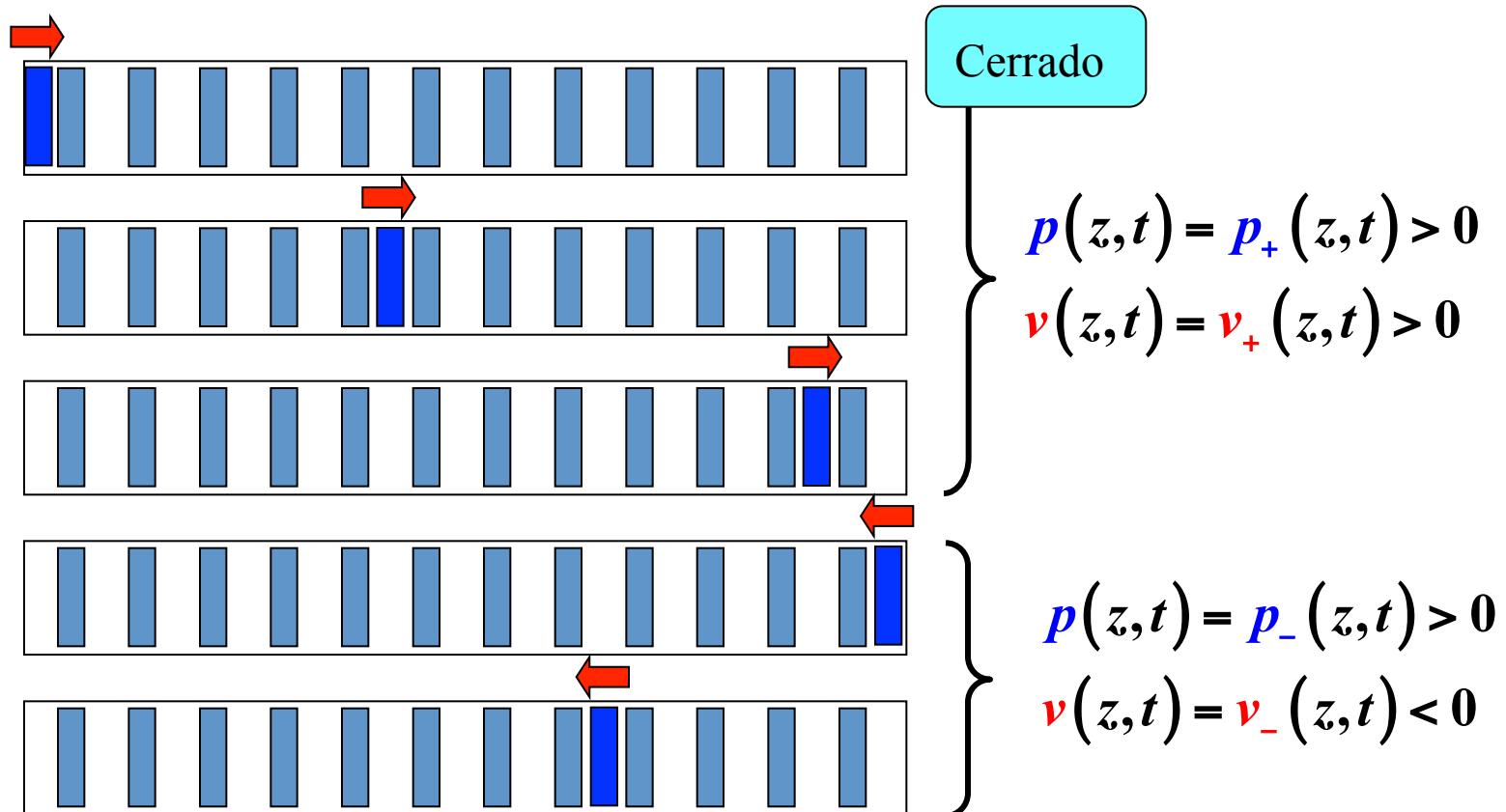
$$\mathbf{v}(z,t) = \mathbf{v}_+(z,t) + \mathbf{v}_-(z,t)$$

$onda_+$ = propagativa hacia la derecha

$onda_-$ = propagativa hacia la izquierda

Acústica de tubos cilíndricos

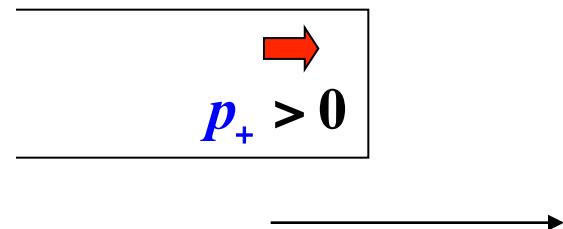
Propagación (velocidad c) y reflexión



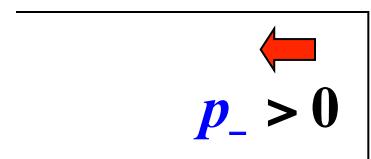
Acústica de tubos cilíndricos

Reflexión en un extremo cerrado

justo antes:



justo después:



$$p = p_{inc} + p_{ref} = 2p_{inc}$$

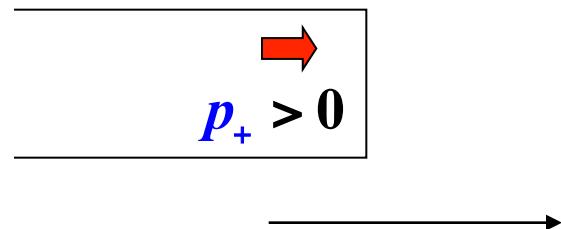
$$v = v_{inc} + v_{ref} = 0$$

$$R_E = \frac{I_{ref}}{I_{inc}} = \left(\frac{p_{ref}}{p_{inc}} \right)^2 = 1$$

Acústica de tubos cilíndricos

Reflexión en un extremo cerrado

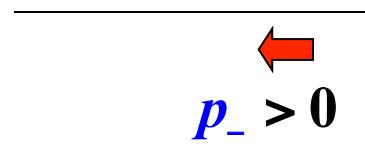
justo antes:



$$p = p_{inc} + p_{ref} = 2p_{inc}$$

$$v = v_{inc} + v_{ref} = 0$$

justo después:



$$R_E = \frac{I_{ref}}{I_{inc}} = \left(\frac{p_{ref}}{p_{inc}} \right)^2 = 1$$

Conservación de la energía

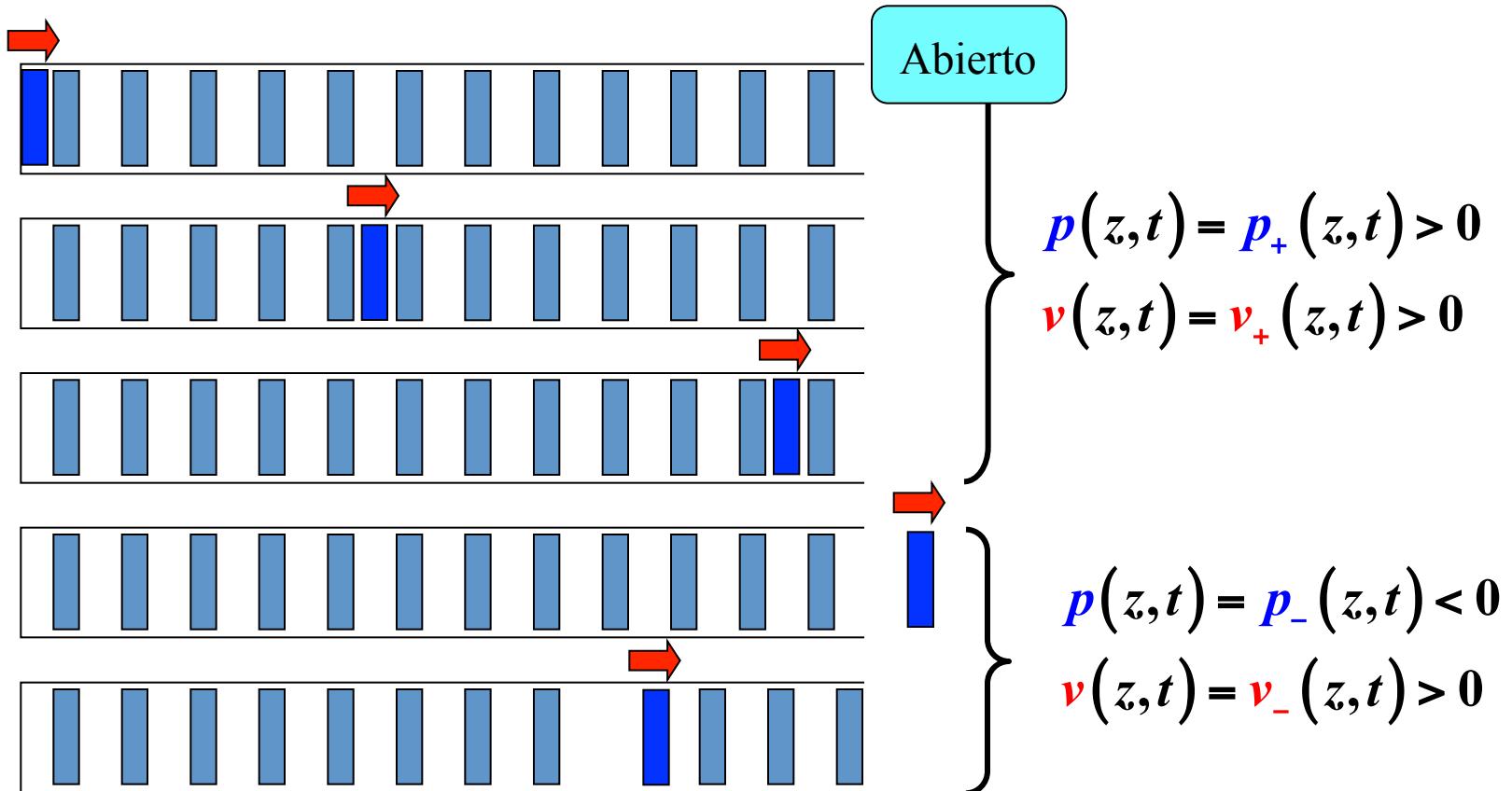
$$I_{inc} = I_{ref} + I_{trans} \Rightarrow T_E = 1 - R_E$$

$$T_E = \frac{I_{trans}}{I_{inc}} = 0$$

$$TL = 10 \log \left(\frac{1}{T_E} \right)$$

Acústica de tubos cilíndricos

Propagación (velocidad c) y reflexión



Acústica de tubos cilíndricos

Reflexión en un extremo abierto (idealizado)

justo antes:

$$p_+ > 0$$



justo después:

$$p_- < 0$$

$$p = p_{inc} + p_{ref} = 0$$

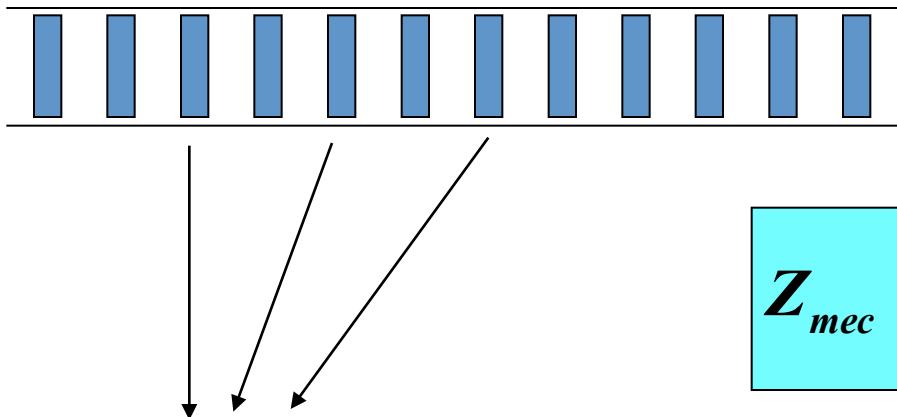
$$v = v_{inc} + v_{ref} = 2v_{inc}$$

$$R_E = \left(\frac{p_{ref}}{p_{inc}} \right)^2 = 1 \Rightarrow T_E = 0$$

$$TL = 10 \log \left(\frac{1}{T_E} \right) \rightarrow \infty \dots$$

Inciso sobre la impedancia

Ejemplo mecánico rígido



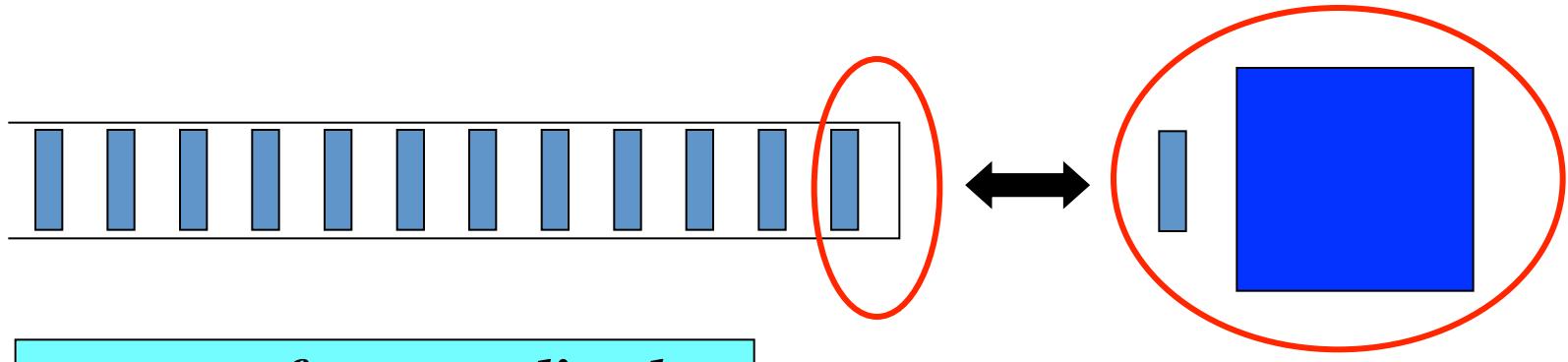
$$Z_{mec} = \frac{\text{fuerza aplicada}}{\text{velocidad generada}}$$

Misma impedancia

Impedancias iguales: transferencia total de energía, reflexión nula

Inciso sobre la impedancia

Ejemplo mecánico rígido



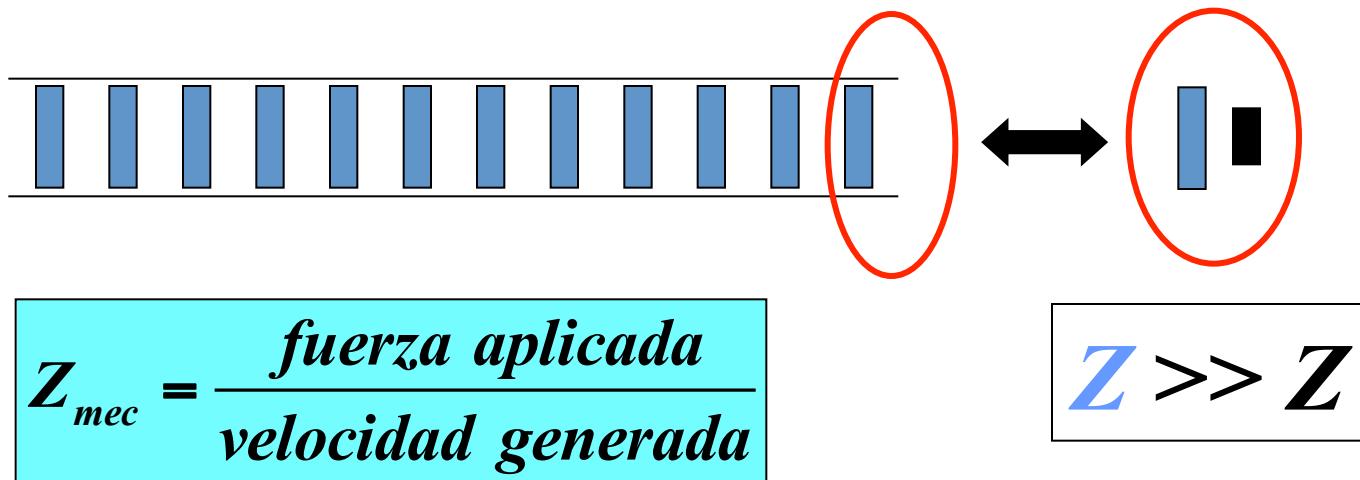
$$Z_{mec} = \frac{\text{fuerza aplicada}}{\text{velocidad generada}}$$

$$Z \ll Z$$

Impedancias muy distintas: reflexión total de energía, transferencia nula

Inciso sobre la impedancia

Ejemplo mecánico rígido



Impedancias muy distintas: reflexión total de energía, transferencia nula

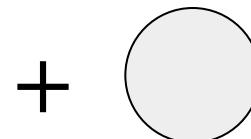
Inciso sobre la impedancia

Otros ejemplos rígidos



Inciso sobre la impedancia

Combinaciones inhabituales...



$$Z_{bs} \gg Z_{pp}$$

Mínima transferencia de energía: la pelota “se va” inmediatamente, el bate se queda con prácticamente todo su movimiento

Inciso sobre la impedancia

Combinaciones inhabituales...



+



$$Z_{pp} \ll Z_{bs}$$

Mínima transferencia de energía: la pelota casi no se mueve aunque el impulso dado a la raqueta sea grande (la raqueta rebota!)

Inciso sobre la impedancia

Combinaciones inhabituales...



+

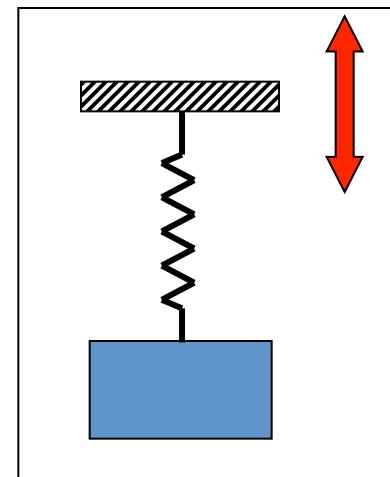
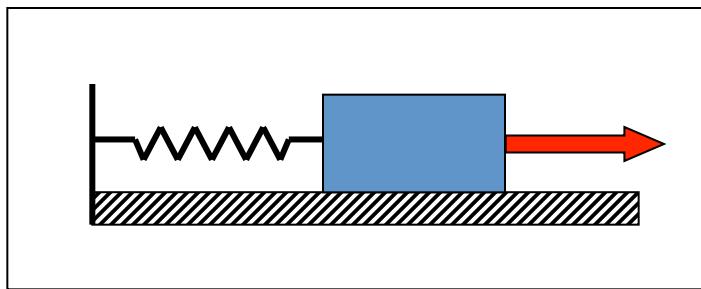


$$Z_{bs} ; Z_{pp+bs}$$

Transferencia de energía eficaz: el impulso del bate pasa casi íntegramente al conjunto de las dos bolas

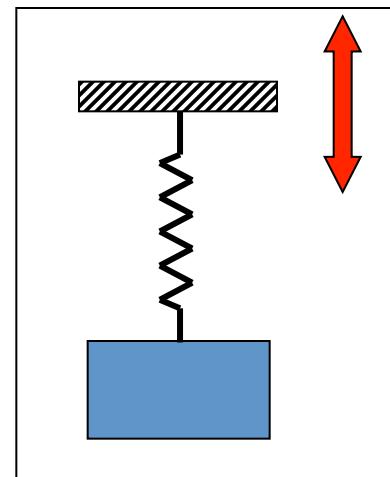
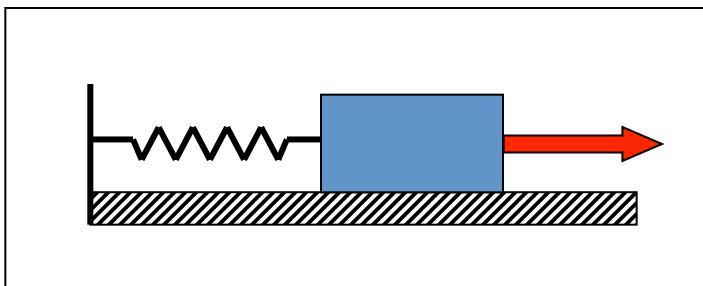
Inciso sobre la impedancia

Ejemplo mecánico flexible



Inciso sobre la impedancia

Ejemplo mecánico flexible



La impedancia depende de la frecuencia!

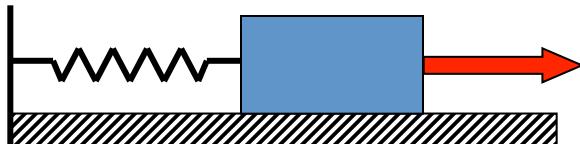
$$Z(f = f_0) \rightarrow \text{minima}$$

→ **Frecuencia propia**

$$Z(f) = \frac{F(f)}{v(f)}$$

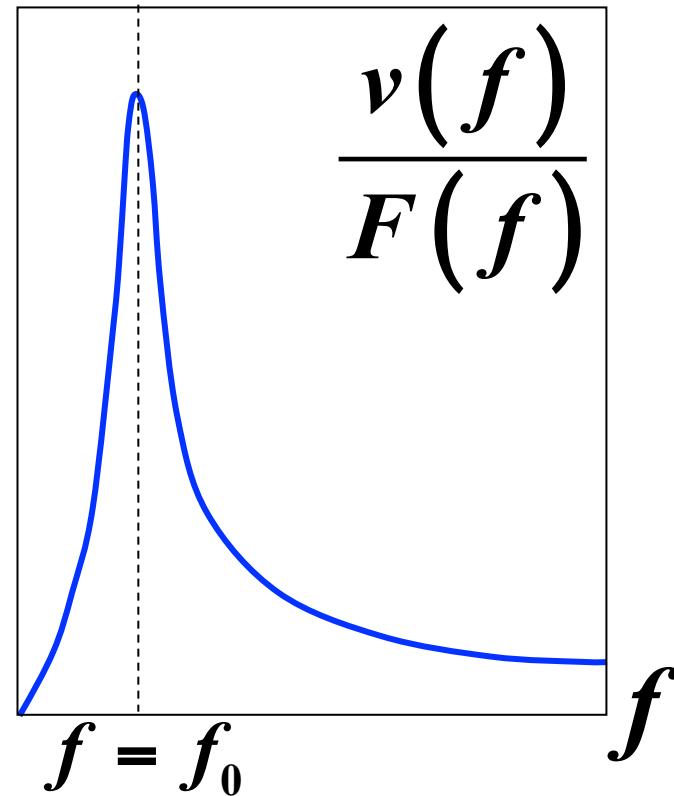
Inciso sobre la impedancia

Ejemplo mecánico flexible



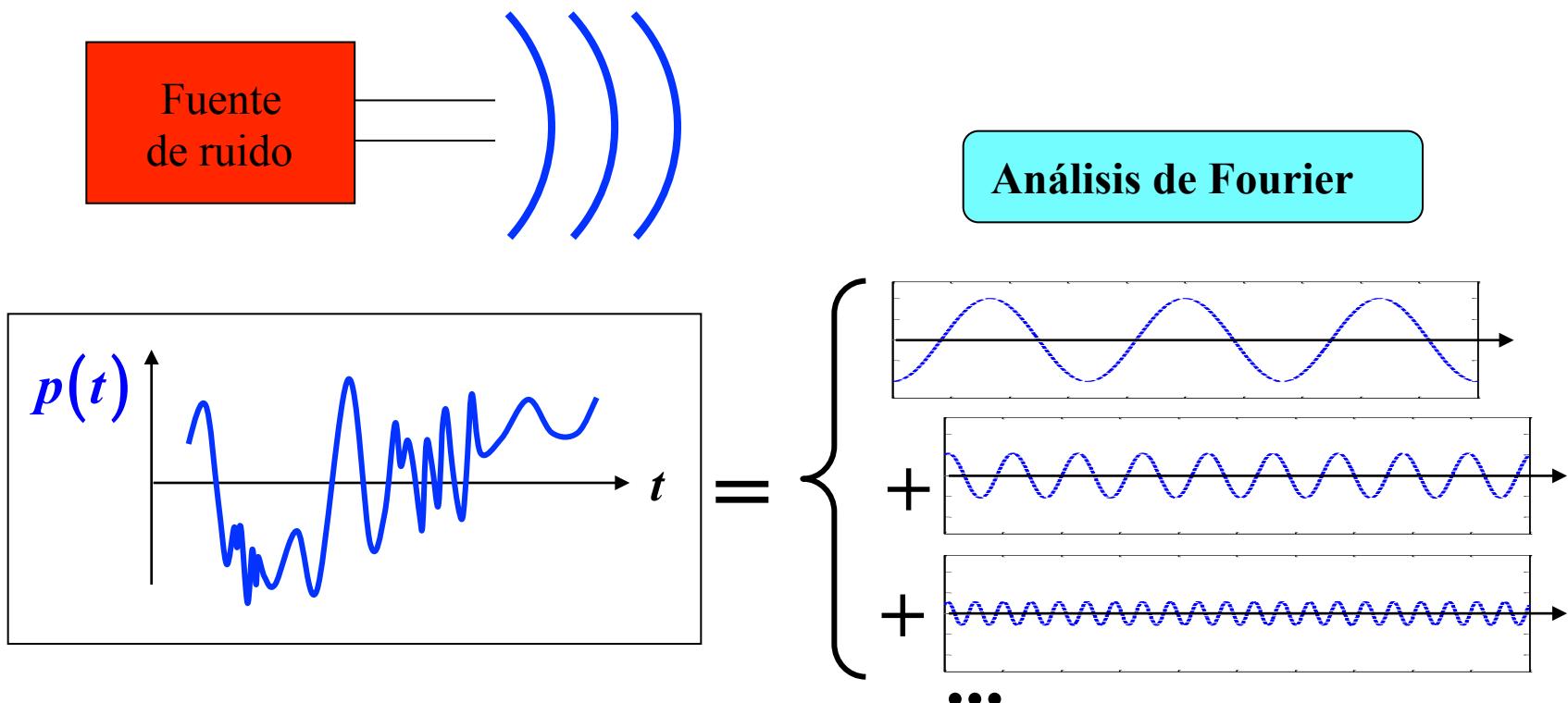
$$Z(f \text{ Hz}) = \frac{F(f)}{v(f)}$$

$$\omega \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 2\pi f \Rightarrow Z(\omega) = \dots$$



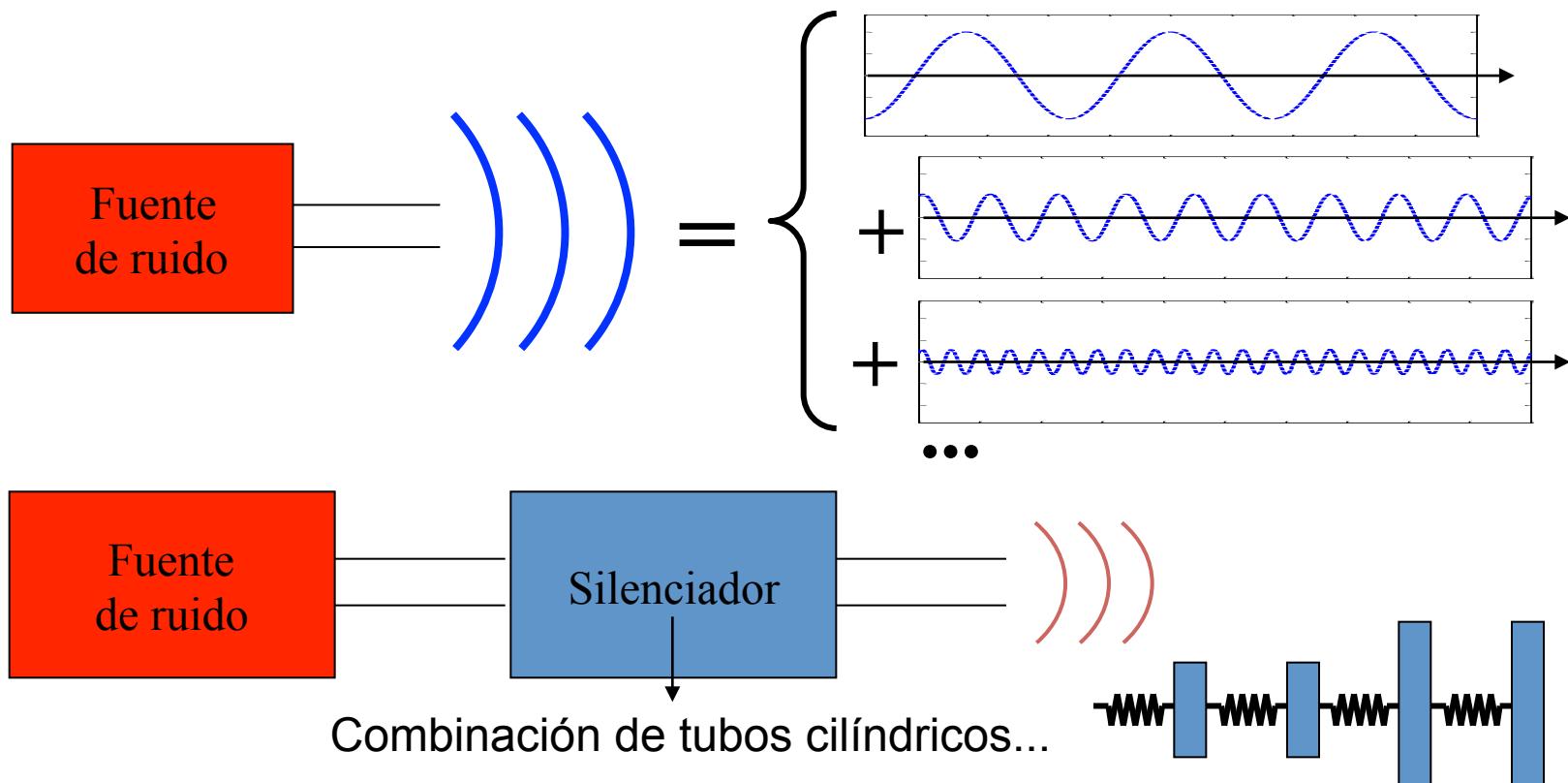
Acústica de tubos cilíndricos

Visión frecuencial



Acústica de tubos cilíndricos

Visión frecuencial



Inciso sobre la impedancia

Grandes diferencias de impedancia:

Transmisión de energía
Reflexión de energía



Igualdad de impedancia:

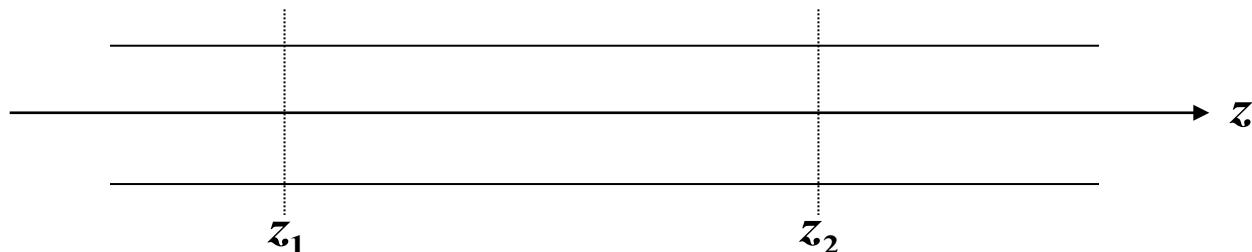
Transmisión de energía
Reflexión de energía



La impedancia caracteriza a la totalidad del sistema,
no sólo a un elemento

Acústica de tubos cilíndricos

Impedancia



$$\hat{Z}_{esp}(z, \omega) = \frac{\hat{p}(z, \omega)}{\hat{v}(z, \omega)}$$

específica

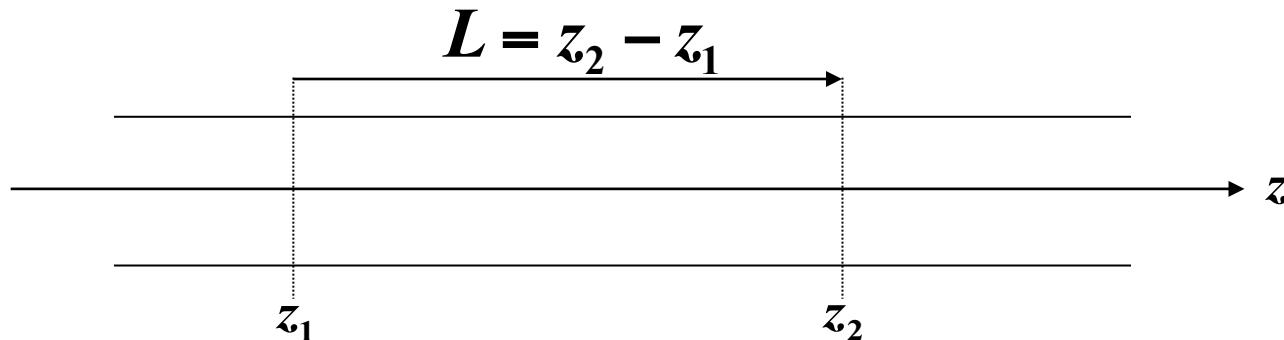
$$\hat{Z}_{ac}(z, \omega) = \frac{\hat{p}(z, \omega)}{S\hat{v}(z, \omega)} @ \frac{\hat{p}(z, \omega)}{\hat{u}(z, \omega)}$$

acústica

caudal

Matriz de transferencia

Tubo cilíndrico



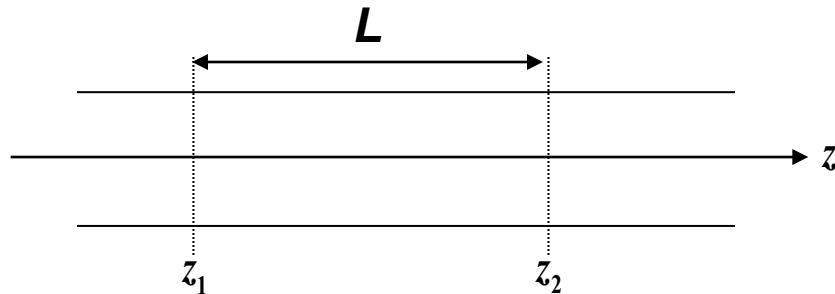
$$\begin{Bmatrix} \hat{p} \\ \hat{v} \end{Bmatrix}_1 = [C(L, \omega)] \begin{Bmatrix} \hat{p} \\ \hat{v} \end{Bmatrix}_2$$

↑
Matriz de transferencia

En dos secciones distintas, la presión y la velocidad pueden diferir en amplitud y en fase

Matriz de transferencia

Tubo cilíndrico



$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}, [\lambda] = m$$

Número de onda

longitud de onda

$$[C(kL)] = \begin{bmatrix} \cos(kL) & jZ_0 \sin(kL) \\ (j/Z_0) \sin(kL) & \cos(kL) \end{bmatrix}$$

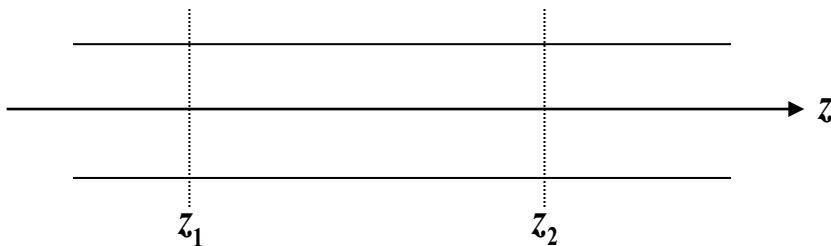
$$Z_0 = \rho_0 c ; 415 \frac{kg}{m^2 s}$$

Impedancia
característica del aire

$\omega \Rightarrow$ periodicidad temporal
 $\lambda \Rightarrow$ periodicidad espacial

Inciso: campo acústico uniparamétrico...

Tubo cilíndrico



Bajo ciertas condiciones (*)

$$\mathbf{p}(z,t) , \mathbf{v}(z,t)$$

$\omega \Rightarrow$ periodicidad temporal

$\lambda \Rightarrow$ periodicidad espacial

→ Excitación uniforme sobre una sección

→ Sin disipación

→ Radio del tubo (r) $\ll \lambda$



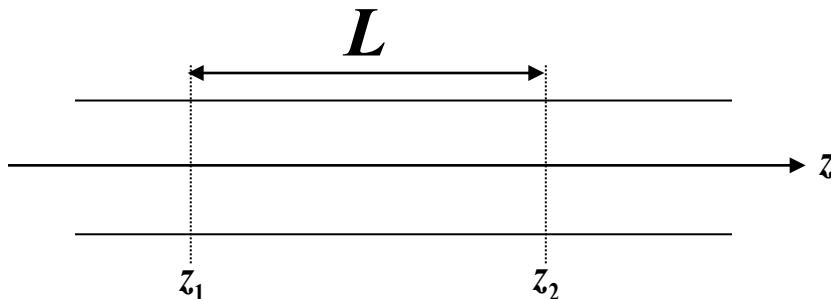
$$kr \ll 1 \quad \left(k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c} \right)$$

Inciso: grandes longitudes de onda...

Tubo cilíndrico

$$[C(kL)] = \begin{bmatrix} \cos(kL) & jZ_0 \sin(kL) \\ (j/Z_0) \sin(kL) & \cos(kL) \end{bmatrix}$$

$$L \ll \lambda \longleftrightarrow kL \ll 1$$



Aproximación “*baja frecuencia*”

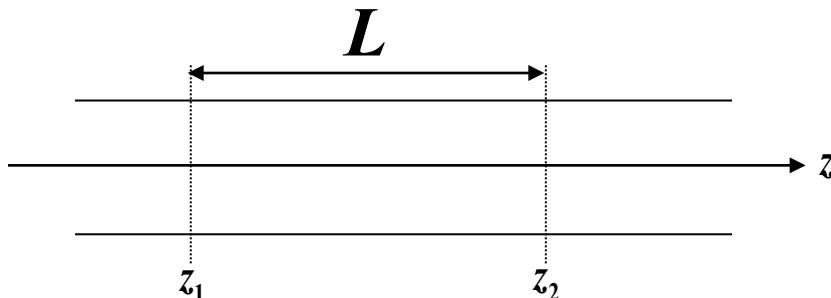
Inciso: grandes longitudes de onda...

Tubo cilíndrico

$$[C(kL)] = \begin{bmatrix} \cos(kL) & jZ_0 \sin(kL) \\ (j/Z_0) \sin(kL) & \cos(kL) \end{bmatrix}$$

$$L \ll \lambda \longleftrightarrow$$

$$kL \ll 1$$

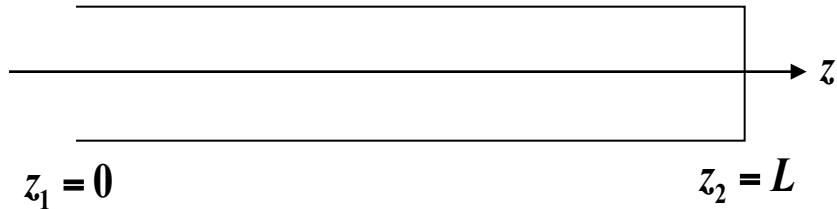


$$[C(kL)] ; \begin{bmatrix} 1 & jZ_0 kL \\ (j/Z_0) kL & 1 \end{bmatrix}$$

Aproximación “*baja frecuencia*”

Matriz de transferencia

Tubo cilíndrico cerrado



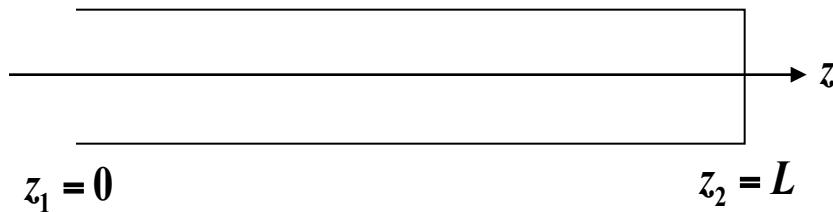
$$\begin{Bmatrix} \hat{p} \\ \hat{v} \end{Bmatrix}_1 = [C] \begin{Bmatrix} \hat{p} \\ \hat{v} = 0 \end{Bmatrix}_2$$

$$\begin{Bmatrix} \hat{p} \\ \hat{v} \end{Bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} \cos(kL) & jZ_0 \sin(kL) \\ (j/Z_0) \sin(kL) & \cos(kL) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{p} \\ \hat{v} = 0 \end{Bmatrix}_2 = \begin{Bmatrix} \cos(kL) \\ (j/Z_0) \sin(kL) \end{Bmatrix} \hat{p}_2$$

$$\hat{Z}_{esp,1} = \frac{\hat{p}_1}{\hat{v}_1} = -jZ_0 \frac{1}{\tan(kL)}$$

Matriz de transferencia

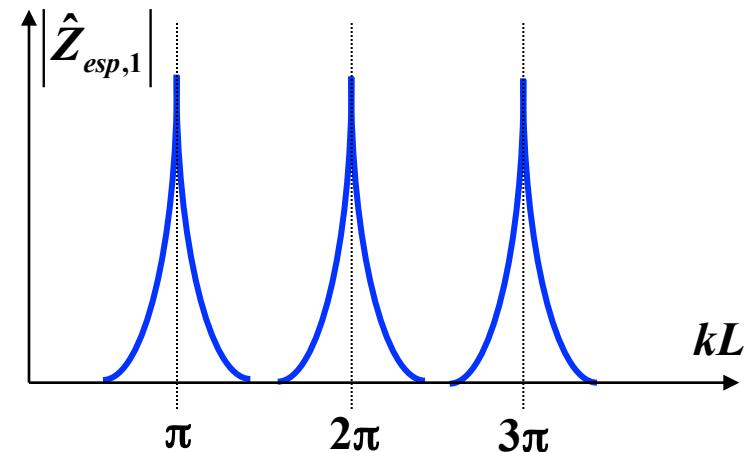
Tubo cilíndrico cerrado



$$\begin{Bmatrix} \hat{P} \\ \hat{\nu} \end{Bmatrix}_1 = [C] \begin{Bmatrix} \hat{P} \\ \hat{\nu} = 0 \end{Bmatrix}_2$$

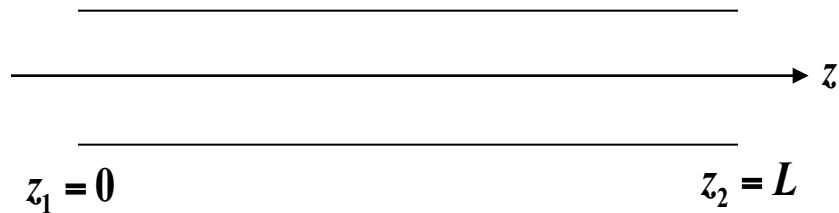
$$\hat{Z}_{esp,1} = -jZ_0 \frac{1}{\tan(kL)} , \quad k = \frac{2\pi f}{c}$$

$$(f_n)_{\max} = n \frac{c}{2L}, \quad (f_{2n-1})_{\min} = (2n-1) \frac{c}{2L}$$
$$c = 345 \text{ m/s}$$



Matriz de transferencia

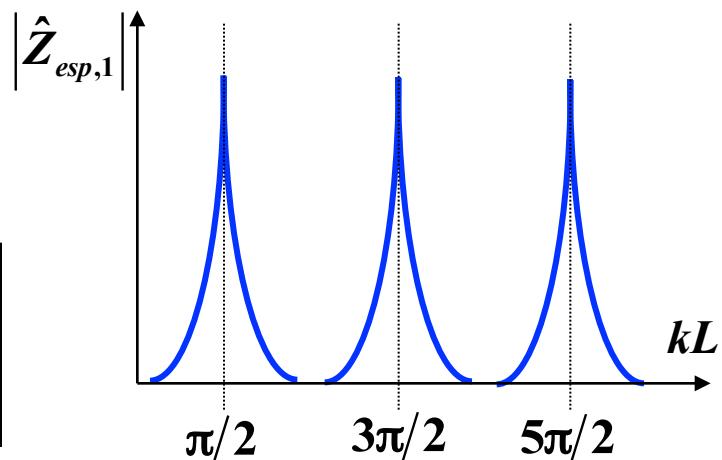
Tubo cilíndrico abierto



$$\begin{Bmatrix} \hat{p} \\ \hat{v} \end{Bmatrix}_1 = [C] \begin{Bmatrix} \hat{p} ; 0 \\ \hat{v} \end{Bmatrix}_2$$

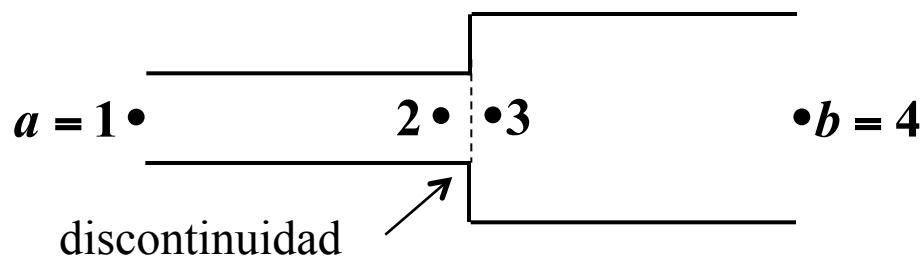
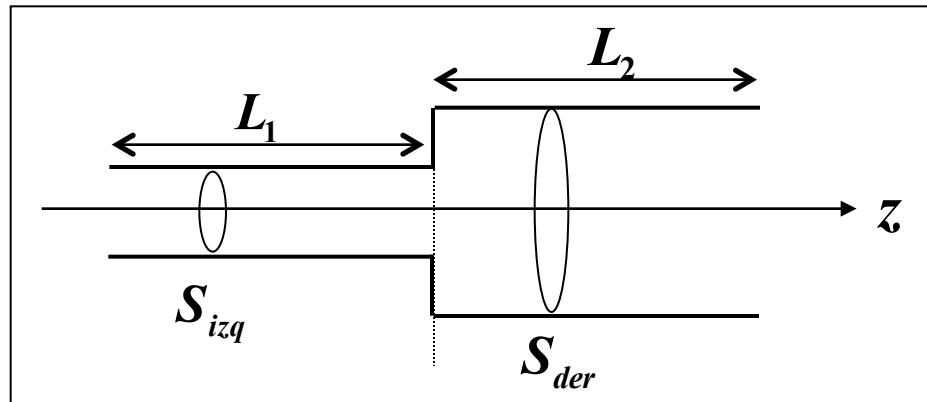
$$\hat{Z}_{esp,1} = jZ_0 \tan(kL)$$

$$(f_{2n-1})_{\max} = (2n-1) \frac{c}{2L} , \quad (f_n)_{\min} = n \frac{c}{2L}$$
$$c = 345 \text{ m/s}$$



Matriz de transferencia

Cambio de diámetro



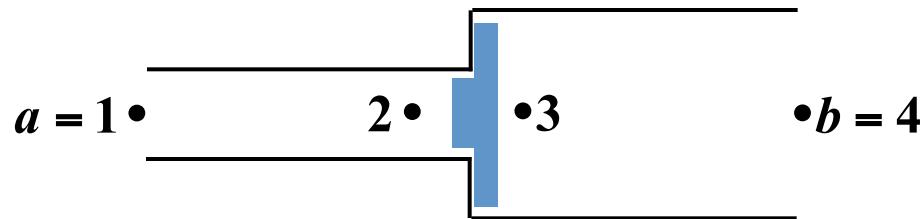
$$\begin{Bmatrix} \hat{p} \\ \hat{v} \end{Bmatrix}_1 = [C(kL_1)] \begin{Bmatrix} \hat{p} \\ \hat{v} \end{Bmatrix}_2$$
$$\begin{Bmatrix} \hat{p} \\ \hat{v} \end{Bmatrix}_3 = [C(kL_2)] \begin{Bmatrix} \hat{p} \\ \hat{v} \end{Bmatrix}_4$$

$$\boxed{\begin{Bmatrix} \hat{p} \\ \hat{v} \end{Bmatrix}_2 = [?] \begin{Bmatrix} \hat{p} \\ \hat{v} \end{Bmatrix}_3}$$

$$\begin{Bmatrix} \hat{p} \\ \hat{v} \end{Bmatrix}_a = [C_1][?] \llbracket C_2 \rrbracket \begin{Bmatrix} \hat{p} \\ \hat{v} \end{Bmatrix}_b @ [T] \begin{Bmatrix} \hat{p} \\ \hat{v} \end{Bmatrix}_b$$

Matriz de transferencia

Cambio de diámetro

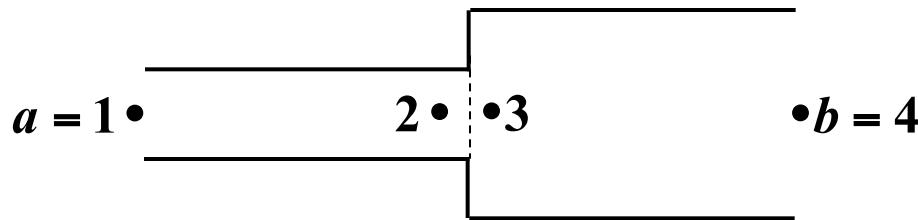


Ley de Newton $\Rightarrow \sum F = (\text{masa de fluido } \textit{dentro}) \times \text{aceleración}$
 $(\text{fluido izq}) - (\text{fluido der}) = (\text{fluido } \textit{dentro})$

Cuando la ventana se "estrecha" $\Rightarrow \hat{p}_2 = \hat{p}_3$
 $S_{izq} \hat{v}_2 = S_{der} \hat{v}_3$

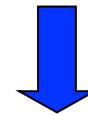
Matriz de transferencia

Cambio de diámetro



$$\begin{aligned}\hat{p}_2 &= \hat{p}_3 \\ S_{izq} \hat{v}_2 &= S_{der} \hat{v}_3\end{aligned}$$

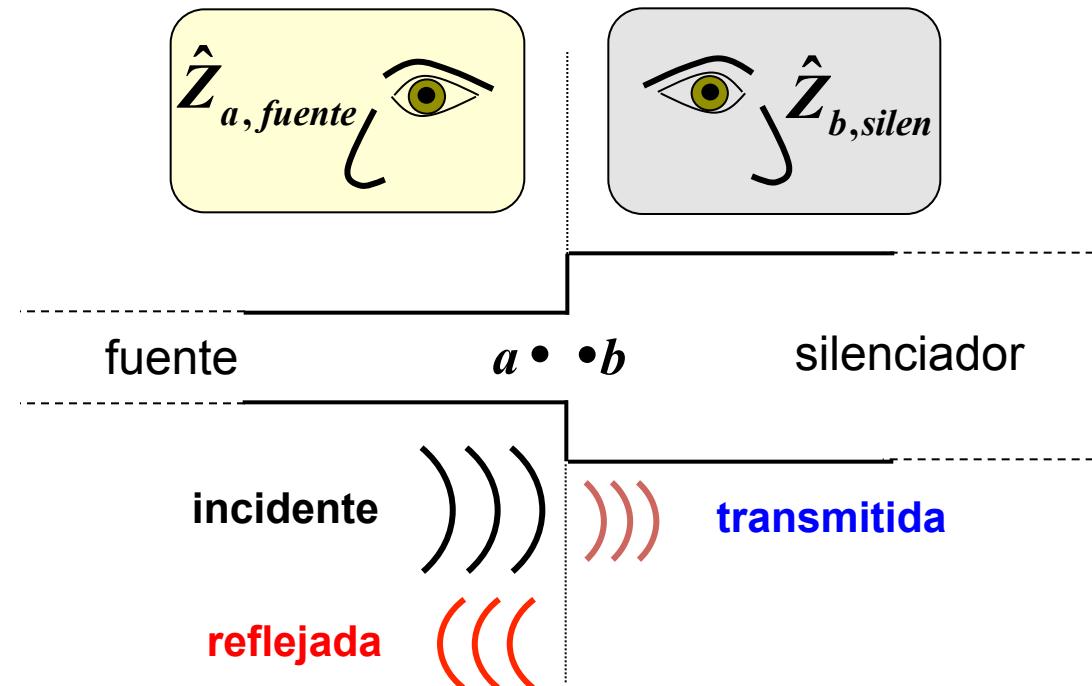
$$\begin{Bmatrix} \hat{p} \\ \hat{v} \end{Bmatrix}_a = [C_1] \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & S_{der}/S_{izq} \end{bmatrix} [C_2] \begin{Bmatrix} \hat{p} \\ \hat{v} \end{Bmatrix}_b @ [T] \begin{Bmatrix} \hat{p} \\ \hat{v} \end{Bmatrix}_b$$



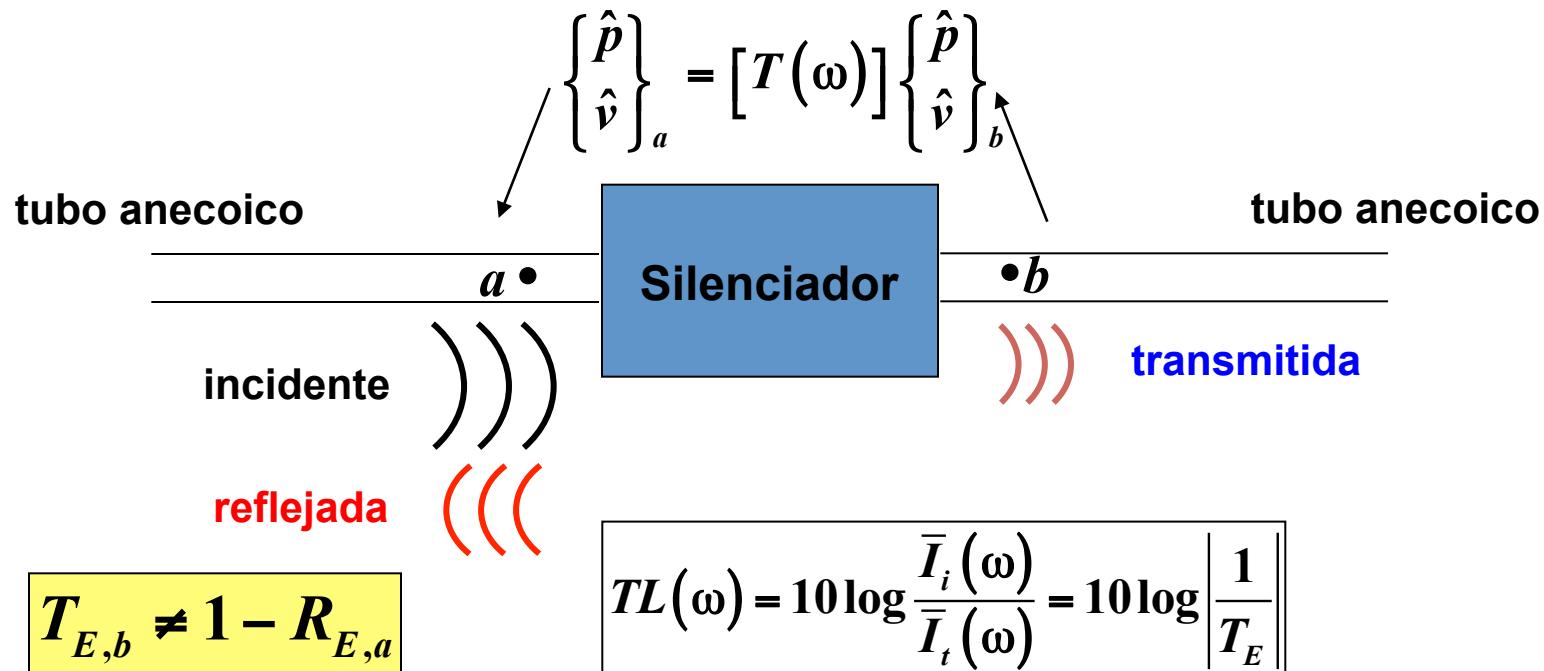
$$\begin{Bmatrix} \hat{p} \\ \hat{v} \end{Bmatrix}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & S_{der}/S_{izq} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{p} \\ \hat{v} \end{Bmatrix}_3$$

Ruptura de impedancia

Reflexión y transmisión de intensidad energética

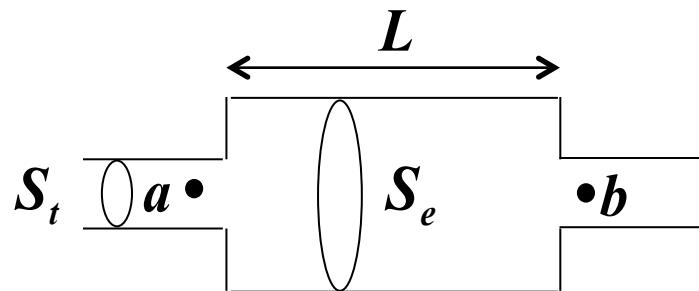


Relación entre TL y matriz de transferencia



$$T_{E,b} \neq 1 - R_{E,a}$$

Cámara de expansión

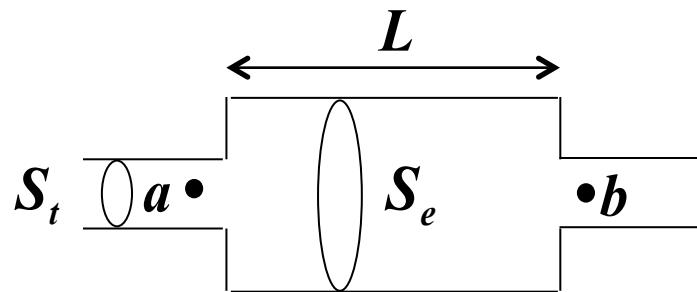


Parámetros de diseño: $\left(\sigma = \frac{S_e}{S_t}, L \right)$

Determinar (σ, L) para que TL alta (o T_E baja) para ciertas frecuencias

$$[T]_{ab} = \begin{bmatrix} \cos(kL) & jZ_0 \frac{S_t}{S_e} \sin(kL) \\ \frac{j}{Z_0} \frac{S_e}{S_t} \sin(kL) & \cos(kL) \end{bmatrix}$$

Cámara de expansión



Parámetros de diseño: $\left(\sigma = \frac{S_e}{S_t}, L \right)$

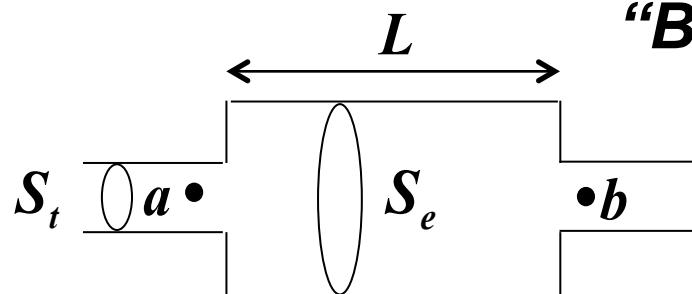
Siempre se tiene una idea de las frecuencias presentes en el problema...

$$\left[kL = 2\pi \left(\frac{L}{\lambda} \right) ; f = \frac{c}{\lambda} \right] \Rightarrow kL = 2\pi \left(\frac{L}{c} f \right)$$

• Cuando $kL \ll 1 \Leftrightarrow f$ "pequeña"

$$kL \ll 1 \Rightarrow \begin{cases} \cos(kL); & 1 \\ \sin(kL); & kL \end{cases}$$

Cámara de expansión



“Baja frecuencia”

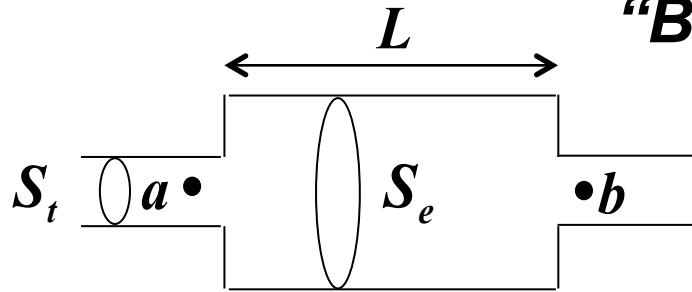
Parámetros de diseño: $\left(\sigma = \frac{S_e}{S_t}, L \right)$

Determinar (σ, L) para que TL alta (o T_E baja) para ciertas frecuencias

$$[T]_{ab} = \begin{bmatrix} 1 & jZ_0 \frac{S_t}{S_e} kL \\ \frac{j}{Z_0} \frac{S_e}{S_t} kL & 1 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{j}{Z_0} \frac{S_e}{S_t} kL & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_E(kL); \frac{1}{1 + \left(\frac{S_e}{2S_t} \right)^2 (kL)^2}$$

Cámara de expansión



“Baja frecuencia”

$$TL = 10 \log \left(\frac{1}{T_E} \right)$$

$$T_E(kL); \frac{1}{1 + \left(\frac{S_e}{2S_t} \right)^2 (kL)^2}, kL = \frac{2\pi L}{c} f$$

$$T_E(k_c L) = \frac{1}{2} \Rightarrow TL(k_c L) = 3dB$$

Frecuencia de corte (“cut-off”)

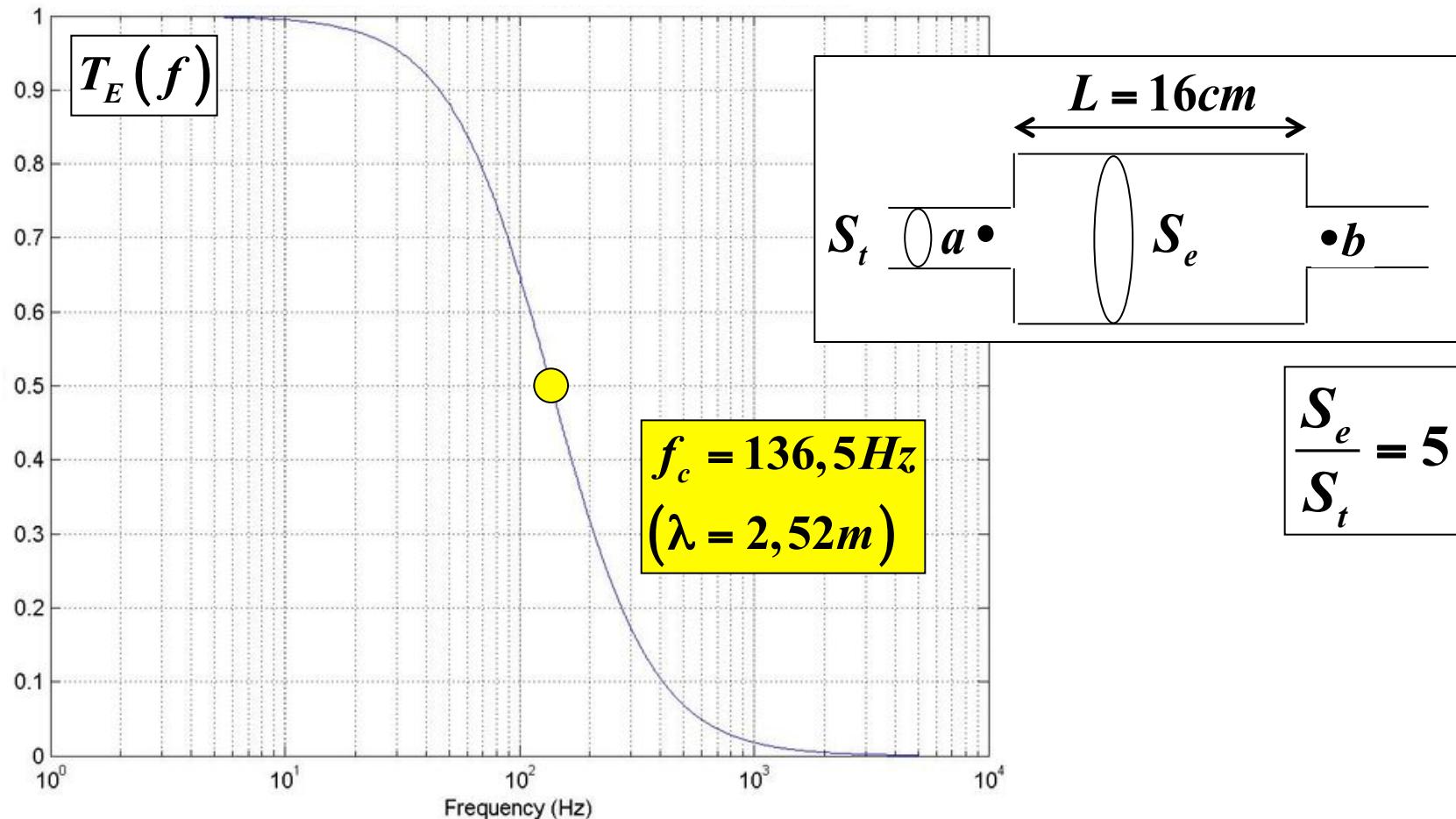
$$f_c = \frac{S_t}{S_e} \frac{c}{\pi L}$$

$$f < f_c \Rightarrow T_E > \frac{1}{2} \Rightarrow TL < 3dB$$

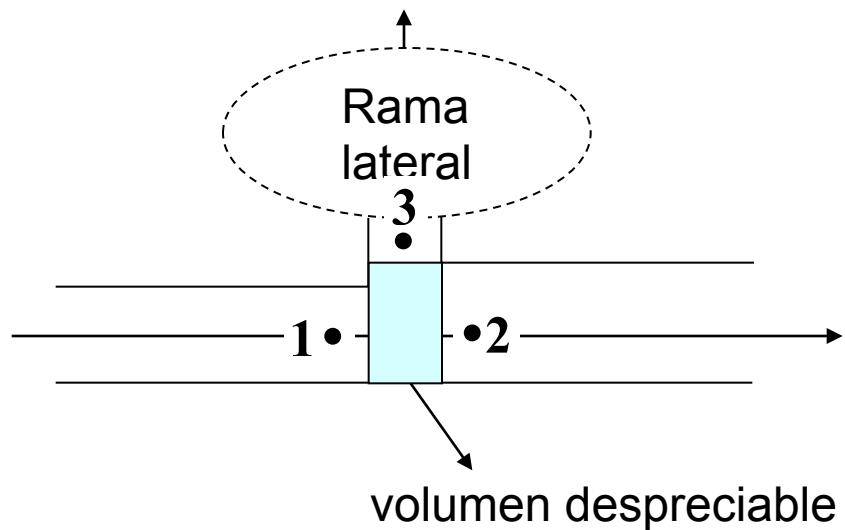
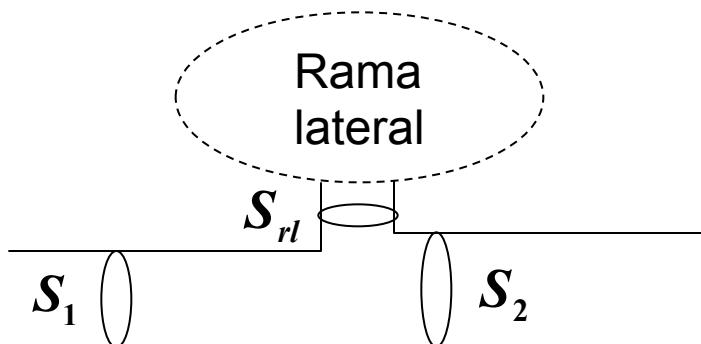
$$f > f_c \Rightarrow T_E < \frac{1}{2} \Rightarrow TL > 3dB$$

Filtro pasabajos

Cámara de expansión



Ramas laterales



Volumen
despreciable

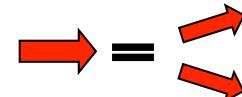
{

No se mueve \rightarrow fuerzas equilibradas

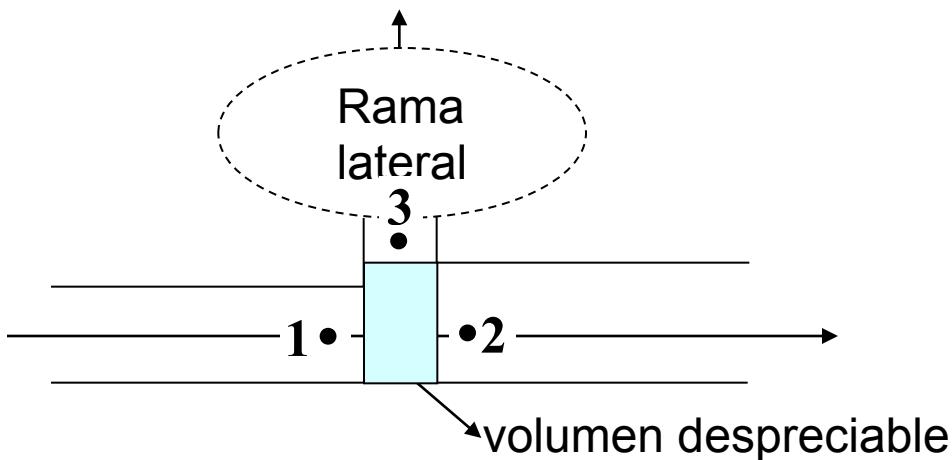
$$\hat{p}_1 = \hat{p}_2 = \hat{p}_3$$

No “cabe” nada \rightarrow caudales equilibrados

$$S_1 \hat{v}_1 = S_{rl} \hat{v}_3 + S_2 \hat{v}_2$$



Ramas laterales



$$\hat{p}_1 = \hat{p}_2 = \hat{p}_3$$

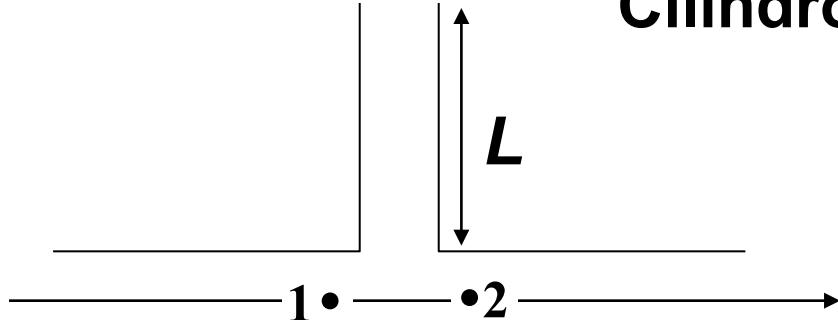
$$S_t \hat{v}_1 = S_{rl} \hat{v}_3 + S_t \hat{v}_2$$

$$\begin{Bmatrix} \hat{p} \\ \hat{v} \end{Bmatrix}_1 = \begin{Bmatrix} \hat{p}_2 \\ \frac{S_{rl}}{S_1} \hat{v}_3 + \frac{S_2}{S_1} \hat{v}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \hat{p}_2 \\ \frac{S_{rl}}{S_1} \frac{\hat{v}_3}{\hat{p}_3} \hat{p}_2 + \frac{S_2}{S_1} \hat{v}_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{S_{rl}}{S_1} \frac{1}{Z_{esp,rl}} & \frac{S_2}{S_1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{p} \\ \hat{v} \end{Bmatrix}_2$$

$$T_E(f) = 4 \left[\left(1 + \frac{S_2}{S_1} + \frac{S_{rl}}{S_1} \frac{Z_0}{\hat{Z}_{esp,rl}(f)} \right) \right]^{-2}$$

T_E mínima cuando $\hat{Z}_{esp,rl}$ mínima

Rama lateral: cilindro abierto



Cilindro abierto

$$f_c = \frac{S_{rl}}{S_t} \frac{c}{4\pi L}$$

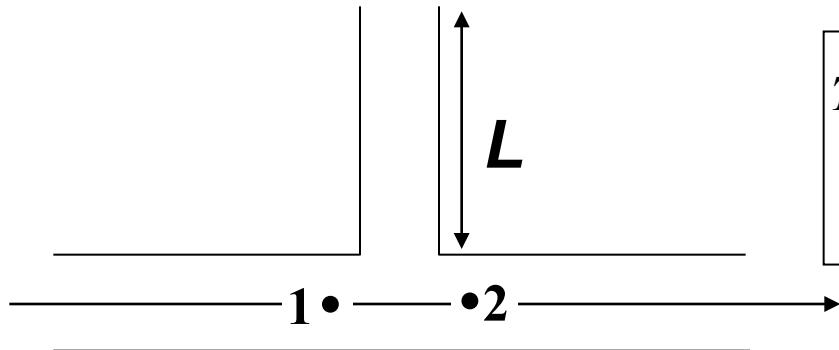
$$T_E(kL) = \frac{1}{1 + \left(\frac{S_{rl}}{2S_t}\right)^2 \frac{1}{\tan^2(kL)}}$$

“Baja frecuencia”
Frecuencia de corte (“cut-off”)

$$T_E(k_c L) = \frac{1}{2} \Rightarrow TL(k_c L) = 3dB$$

Rama lateral: cilindro abierto

Cilindro abierto



$$T_E(kL) = \frac{1}{1 + \left(\frac{S_{rl}}{2S_t}\right)^2} \frac{1}{(kL)^2}$$

“Baja frecuencia”

Frecuencia de corte (“cut-off”)

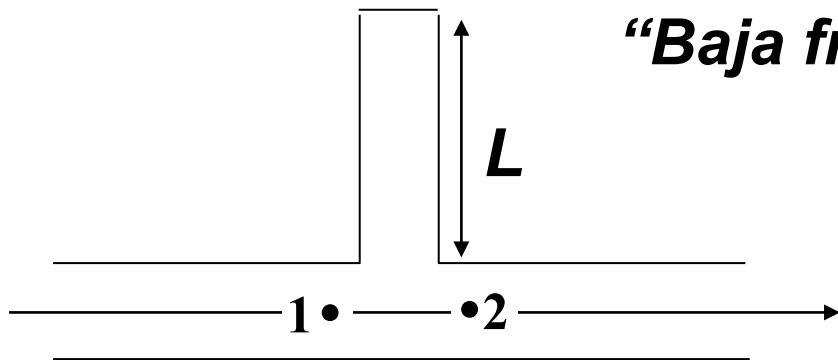
$$f_c = \frac{S_{rl}}{S_t} \frac{c}{4\pi L}$$

$$f < f_c \Rightarrow T_E < \frac{1}{2} \Rightarrow TL > 3dB$$

$$f > f_c \Rightarrow T_E > \frac{1}{2} \Rightarrow TL < 3dB$$

Filtro pasa-altos

Rama lateral: cilindro cerrado



“Baja frecuencia”

$$T_E(kL); \frac{1}{1 + \left(\frac{S_e}{2S_t}\right)^2 (kL)^2}$$

$$T_E(k_c L) = \frac{1}{2} \Rightarrow TL(k_c L) = 3dB$$

Frecuencia de corte (“cut-off”)

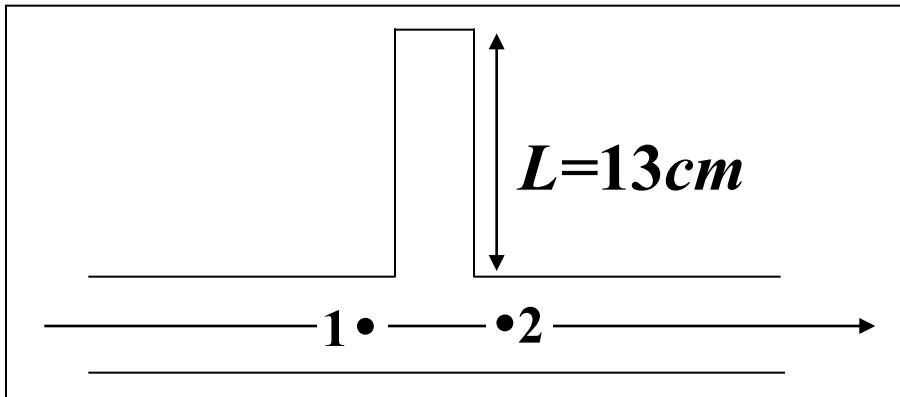
$$f_c = \frac{S_t}{S_e} \frac{c}{\pi L}$$

$$f < f_c \Rightarrow T_E > \frac{1}{2} \Rightarrow TL < 3dB$$

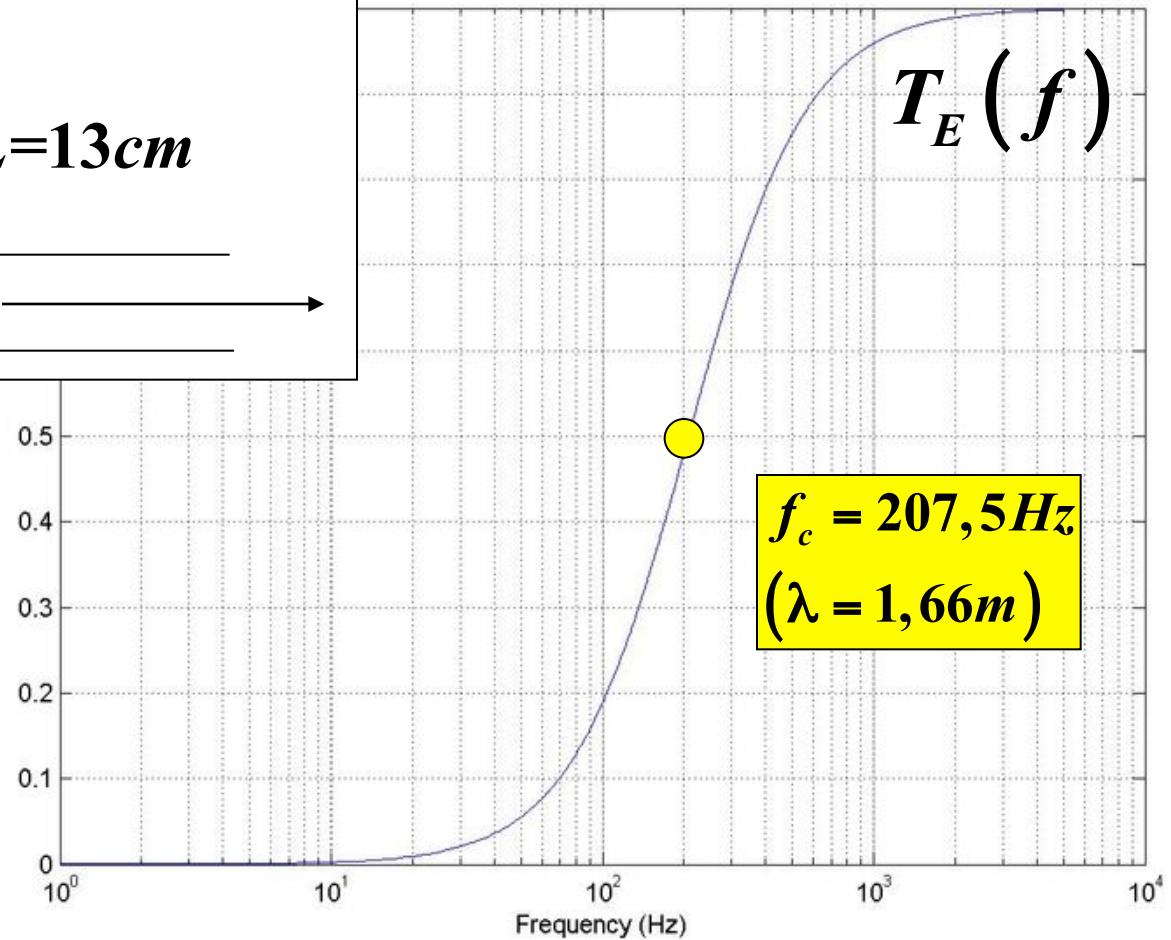
$$f > f_c \Rightarrow T_E < \frac{1}{2} \Rightarrow TL > 3dB$$

Filtro pasa-bajos

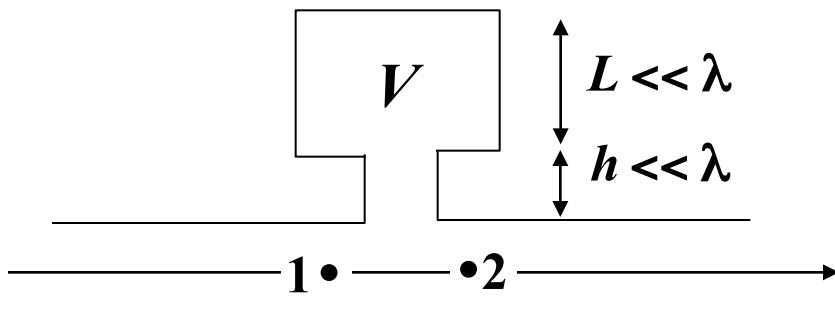
Rama lateral: cilindro cerrado



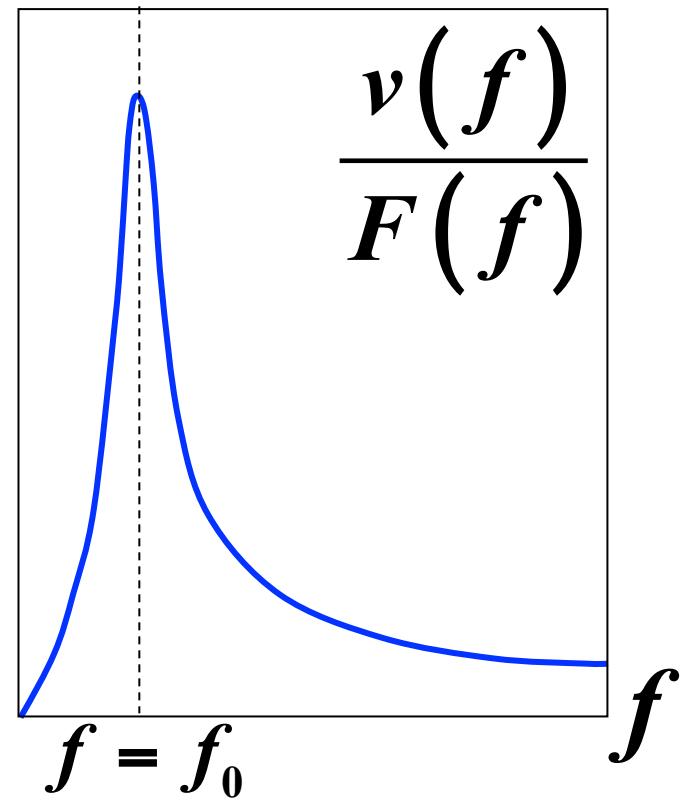
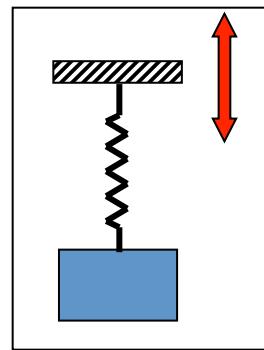
$$S_{rl} = 2,25 \text{ cm}^2$$
$$S_t = 30 \text{ cm}^2$$



Rama lateral: resonador de Helmholtz

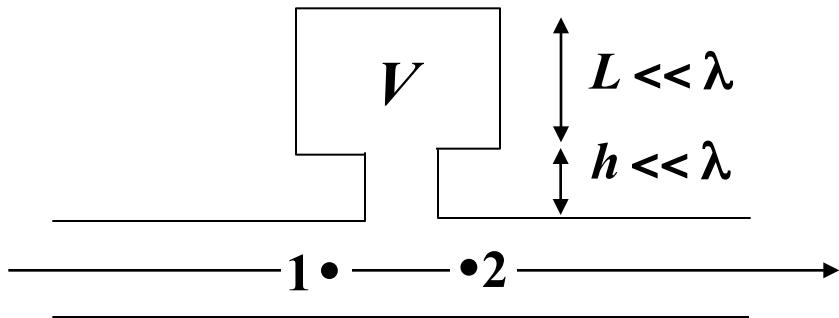


resonador de Helmholtz:
equivalente acústico del sistema (m, k)



Rama lateral: resonador de Helmholtz

“Baja frecuencia”



$$T_E(f) = \frac{1}{\left| 1 + \frac{S_{rl}}{2S_t} \frac{Z_0}{\hat{Z}_{rl}(f)} \right|^2}$$

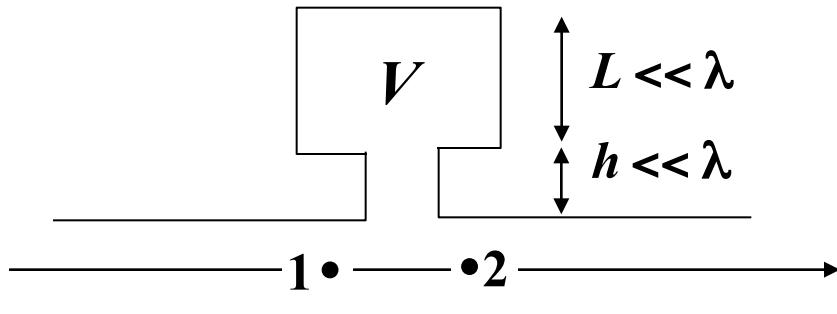
$$\hat{Z}_{esp,H}(k) = jZ_0 \left[-\frac{S_{rl}}{kV} + kh \right]$$

T_E mínima cuando \hat{Z}_{rl} mínima

$$\frac{S_{rl}}{k_H V} = k_H h \Rightarrow f_H = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_{rl}}{hV}} \Rightarrow T_E(f) = \frac{1}{|1 + \infty|^2} = 0$$

Rama lateral: resonador de Helmholtz

“Baja frecuencia”



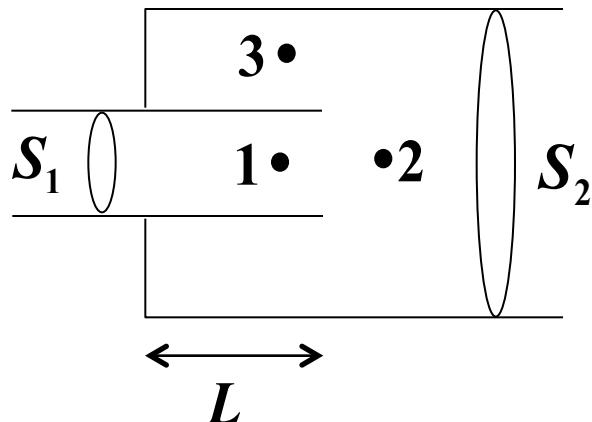
$$f_H = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_{rl}}{hV}}$$

El resonador de Helmholtz elimina **totalmente** la frecuencia que coincide con su frecuencia de resonancia.

Pueden utilizarse diversos resonadores para diversas frecuencias... con las debidas precauciones.

Resonador extendido

Rama lateral \leftrightarrow cilindro cerrado de longitud y sección $(L, S_2 - S_1)$



$$T_E(kL) = \frac{1}{\left(\frac{1}{2} + \frac{S_2}{2S_1}\right)^2 + \left(\frac{S_2 - S_1}{2S_1}\right)^2 \tan^2(kL)}$$

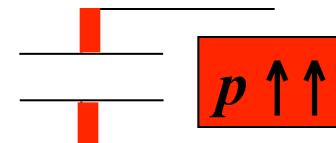
$T_E(kL)$ mínima cuando $\tan(kL)$ máxima

$$\tan(kL) \rightarrow \infty \Rightarrow k_n L = \frac{(2n-1)\pi}{2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

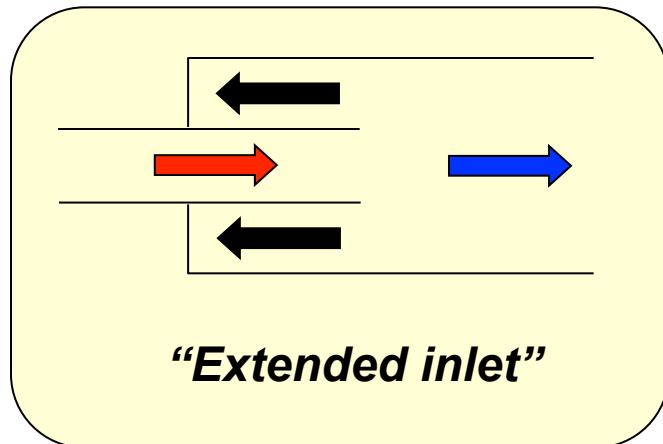
$$f_n = (2n-1) \frac{c}{4L}$$

$$k_n L = \frac{2\pi L}{\lambda_n} \Rightarrow L = \frac{\lambda_1}{4}$$

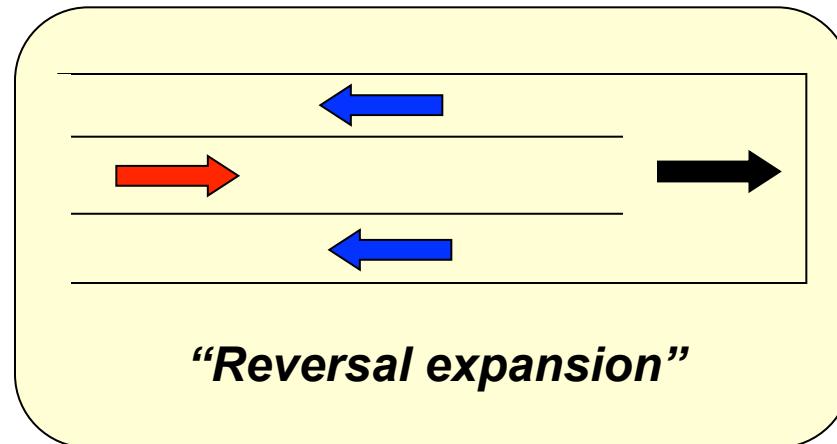
Resonador de cuarto de onda



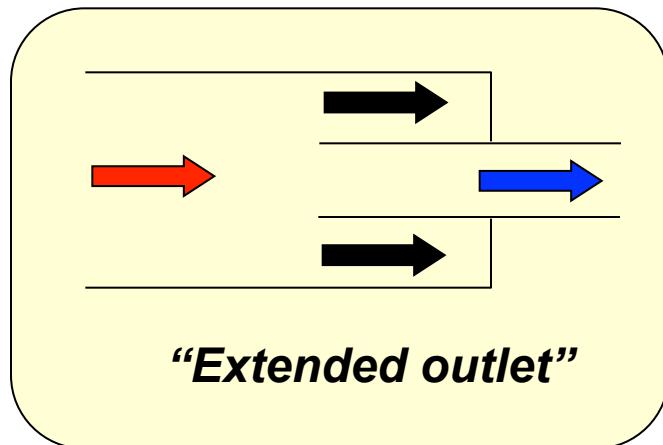
Otras configuraciones



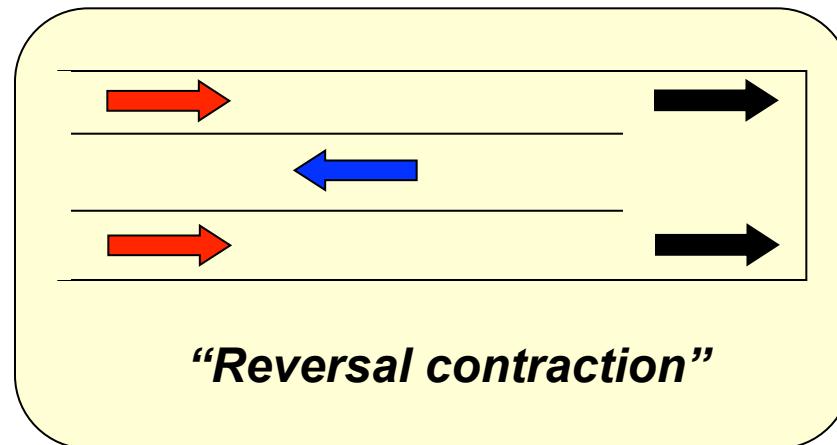
“Extended inlet”



“Reversal expansion”



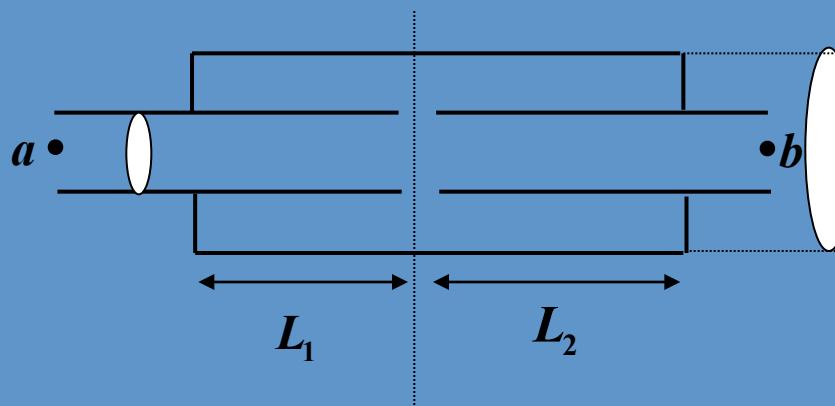
“Extended outlet”



“Reversal contraction”

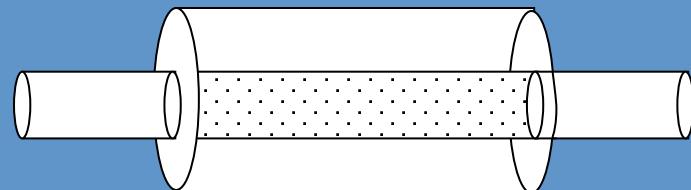
Otros elementos frecuentes

Resonador concéntrico

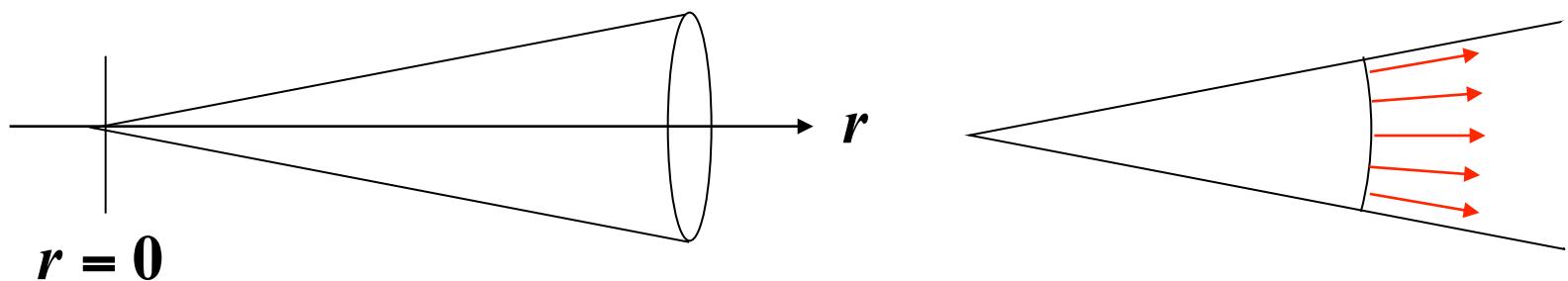


Sección con agujeros

Tubo perforado



Tubos Cónicos



Campo acústico esférico 1D

$$\begin{Bmatrix} \hat{p} \\ \hat{v} \end{Bmatrix}_1 = \begin{Bmatrix} \frac{r_1}{r_2} \cos(kL) + \frac{1}{kr_2} \sin(kL) & -jZ_0 \frac{r_1}{r_2} \sin(kL) \\ j \frac{1}{kZ_0} \frac{r_1}{r_2} \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \cos(kL) - \left(k + \frac{1}{kr_1 r_2} \right) \sin(kL) \right] & \frac{r_1}{r_2} \left[\cos(kL) - \frac{1}{kr_2} \sin(kL) \right] \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{p} \\ \hat{v} \end{Bmatrix}_2$$

$$L = r_2 - r_1$$

Filtros reactivos *versus* filtros disipativos

Reactivos

- ▶ Filtran bien frecuencias discretas
- ▶ Filtran bien frecuencias bajas
- ▶ Pueden ser filtros activos (basados en interferencia destructiva)
- ▶ Posible radiación por vibración de las paredes
- ▶ Alta reflexión: la presión reflejada actúa sobre la fuente

Disipativos

- ▶ Filtran sobre todo las frecuencias altas
- ▶ No interfieren con el funcionamiento la fuente
- ▶ Poco eficaces a frecuencias bajas
- ▶ El material absorbente se degrada

Muestra de catálogo

2007 Universal Silencer Full-Line Catalog

- blower silencers
- absorptive silencers
- vent/fan silencers
- separator silencers
- engine silencers
- industrial filters & filter/silencers
- emissions aftertreatment
- accessories



Muestra de catálogo

The absorptive type silencer is the classic dissipative design, deriving its noise control properties from the basic fact that noise energy is effectively "absorbed" by various types of fibrous packing materials. More technically, as sound waves pass through the spaces between the tightly-packed small-diameter fibers of the absorptive material, the resulting viscous friction dissipates the sound energy as small amounts of heat.

Absorptive silencers are very effective on high frequency noise (500–8,000 Hz). At frequencies above and below this range, attenuation performance progressively diminishes.

Since noise is absorbed by the packing media, absorptive silencers do not rely on internal baffles, tubes or other restrictive devices to achieve noise reduction. Consequently, absorptive silencers generally

employ "straight-through" or similar internal designs which impose very little air flow restriction.

General Information

Absorptive Silencers

Muestra de catálogo

Sizing Information, Pressure Drop Data

The flow area through the silencer must be sufficient to accommodate the maximum flow without imposing excessive pressure drop.

The following instructions enable the selection of the proper silencer size and determination of actual pressure drop. These instructions assume air as the flowing gas. For other gases, density and other corrections may be necessary—contact Universal Silencer for assistance.

Data required:

air flow rate (actual CFM)

temperature (°F)

pressure (psig)

maximum pressure drop (inches of water)

1 Determine maximum velocity.

$$V = 4005 \sqrt{\left(\frac{\Delta P}{c}\right)\left(\frac{14.7}{P + 14.7}\right)(T + 460)}$$

V = air or gas velocity, ft/min

(see note 1)

ΔP = maximum pressure drop,
inches of water

c = silencer pressure drop coefficient
(see Table 1)

T = air temperature, °F (see note 2)

P = operating pressure, psig

(If at atmospheric pressure,
pressure ratio is unity and may be
omitted from equation. If P
exceeds 15 psig, contact
Universal Silencer for
recommendations.)

Muestra de catálogo

2 Determine flow area required.

$$A = \frac{Q}{V}$$

A = flow area required, ft²

Q = air flow rate (actual CFM)

$$\text{Actual CFM} = (\text{Standard CFM}) \left(\frac{14.7}{P + 14.7} \right) \left(\frac{T + 460}{530} \right)$$

3 From Table 2, select size with flow area equal to or greater than that calculated.

4 Determine actual gas velocity in ft/min.

$$V_{\text{actual}} = \frac{Q}{A}$$

A = flow area from Table 2

5 Determine actual pressure drop.

$$\Delta P = c \left(\frac{V_{\text{actual}}}{4005} \right)^2 \left(\frac{530}{T + 460} \right) \left(\frac{P + 14.7}{14.7} \right)$$

c = silencer pressure drop coefficient
(see Table 1)

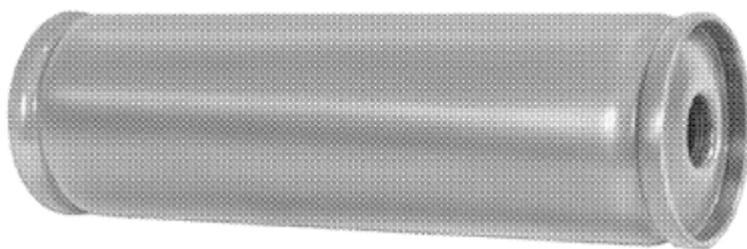
1 Pressure Drop Coefficients

Silencer Series	Pressure Drop Coefficient (C)
U5, U2	.25
SU5	.75
SU3, SU4	.85

2 Flow Area Size

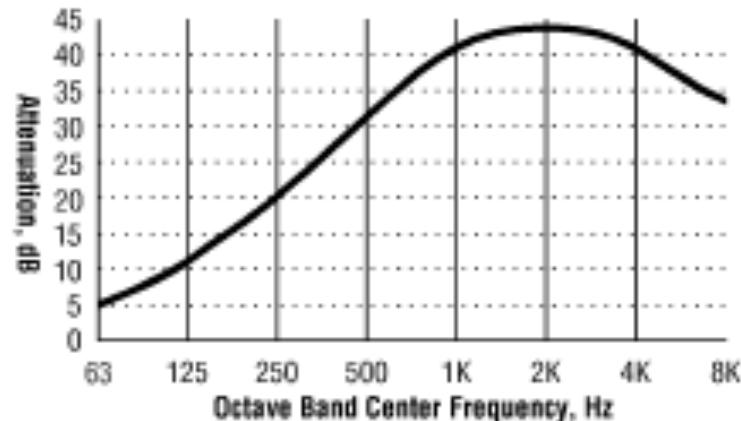
Flow Area (ft ²)	Diameter Size (in)	Flow Area (ft ²)	Diameter Size (in)
0.0014	1/2	2.6	22
0.0031	3/4	3.1	24
0.0055	1	3.7	26
0.012	1 1/2	4.3	28
0.022	2	4.9	30
0.034	2 1/2	5.6	32
0.049	3	6.3	34
0.067	3 1/2	7.1	36
0.087	4	7.9	38
0.136	5	8.7	40
0.196	6	9.6	42
0.349	8	10.6	44
0.55	10	11.5	46
0.79	12	12.6	48
1.07	14	15.9	54
1.4	16	19.6	60
1.8	18	23.8	66
2.2	20	28.3	72

Muestra de catálogo



U5 Series
Straight-Through
Absorptive Silencer

Typical Attenuation Curve



Bibliografía

MUNJAL, M.L. (1987)

**“Acoustics of ducts and mufflers,
with application to exhaust and ventilation design”**
John Wiley and Sons