

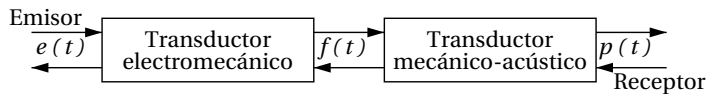
## Tema 4

# Transducción

### 4.1 Transductores electroacústicos

Un *transductor* es un dispositivo que convierte una forma de energía en otra

Un *transductor electroacústico* convierte la energía eléctrica en acústica y viceversa



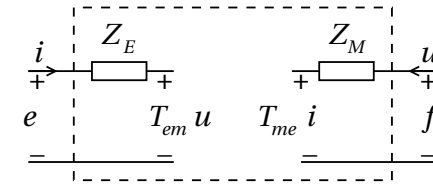
El *transductor mecánico-acústico* convierte energía mecánica en acústica y viceversa. Es el más sencillo y se reduce a una superficie que vibra en un medio acústico

El *transductor electromecánico* convierte energía eléctrica en mecánica y viceversa. Es más complejo y en él reside básicamente la responsabilidad de la transducción

### 4.1 Transductores electroacústicos

#### Acoplamiento electromecánico

Sea un circuito eléctrico que se acopla, a través de una “caja negra” llamada transductor, a un circuito mecánico. Si el transductor es lineal, su comportamiento se puede describir usando un cuadripolo. Por ejemplo



$\hat{T}_{em}$  es el *coeficiente de transducción electromecánico*. Proporciona la tensión eléctrica que se induce por unidad de velocidad mecánica

$\hat{T}_{me}$  es el *coeficiente de transducción mecánico-eléctrico*. Proporciona la fuerza mecánica que se genera por unidad de corriente eléctrica

$\hat{Z}_M$  es la *impedancia mecánica* del transductor en ausencia de intensidad en el circuito eléctrico

$$\hat{Z}_M = \left. \frac{\hat{f}}{\hat{u}} \right|_{\hat{i}=0}$$

#### 4.1 Transductores electroacústicos

$\widehat{Z}_E$  es la impedancia eléctrica del transductor en ausencia de movimiento en la parte mecánica

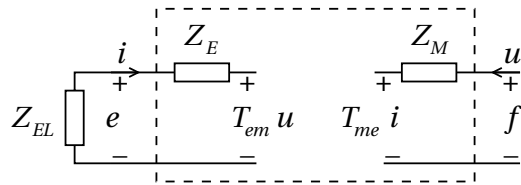
$$\widehat{Z}_E = \left. \frac{\widehat{e}}{\widehat{i}} \right|_{\widehat{u}=0}$$

Las *ecuaciones canónicas* que describen el comportamiento del sistema son

$$\begin{aligned} \widehat{e} &= \widehat{Z}_E \widehat{i} + \widehat{T}_{em} \widehat{u} \\ \widehat{f} &= \widehat{T}_{me} \widehat{i} + \widehat{Z}_M \widehat{u} \end{aligned}$$

#### Impedancia de entrada

La *impedancia mecánica de entrada*  $\widehat{Z}_{mm}$  al transductor se define como la razón compleja entre la fuerza y la velocidad en el lado mecánico, cuando no existen fuentes en el lado eléctrico



#### 4.1 Transductores electroacústicos

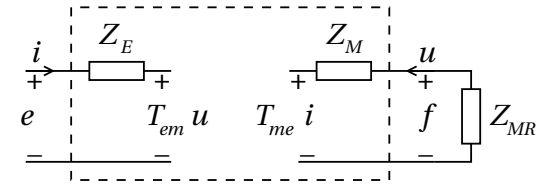
De la figura se deduce que

$$\begin{aligned} \widehat{f} &= \widehat{Z}_M \widehat{u} + \widehat{T}_{me} \widehat{i} \\ \widehat{T}_{em} \widehat{u} &= -\widehat{i} (\widehat{Z}_E + \widehat{Z}_{EL}) \end{aligned}$$

Combinando estas ecuaciones se obtiene

$$\widehat{Z}_{mm} = \widehat{Z}_M - \frac{\widehat{T}_{em} \widehat{T}_{me}}{\widehat{Z}_E + \widehat{Z}_{EL}}$$

La *impedancia eléctrica de entrada*  $\widehat{Z}_{ee}$  al transductor se define como la razón compleja entre la tensión y la intensidad en el lado eléctrico, cuando no existen fuentes en el lado mecánico



En este caso resulta

$$\widehat{Z}_{ee} = \widehat{Z}_E + \widehat{Z}_{MOV} = \widehat{Z}_E - \frac{\widehat{T}_{em} \widehat{T}_{me}}{\widehat{Z}_M + \widehat{Z}_{MR}}$$

donde  $\widehat{Z}_{MOV}$  recibe el nombre de *impedancia de movimiento* del sistema

#### 4.1 Transductores electroacústicos

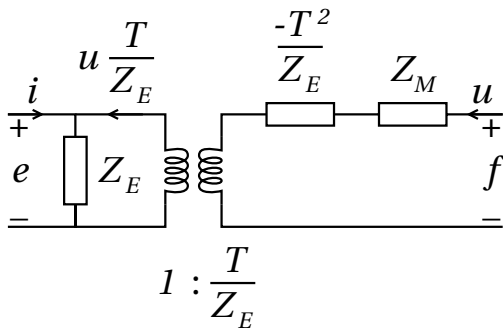
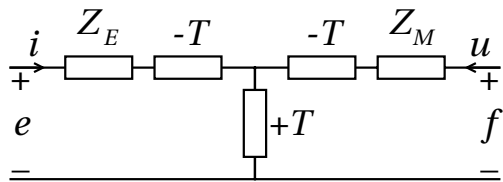
##### Reciprocidad y circuitos equivalentes

Los *transductores recíprocos* son los que cumplen

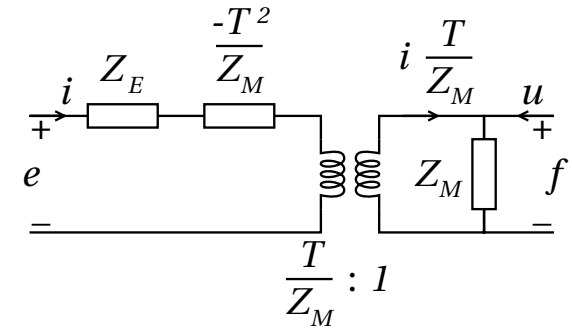
$$\hat{T}_{em} = \hat{T}_{me} = \hat{T}$$

Es sencillo encontrar una red eléctrica pasiva que cumpla las ecuaciones canónicas en este caso

$$\begin{aligned} \hat{e} &= \hat{Z}_E \hat{i} + \hat{T} \hat{u} \\ \hat{f} &= \hat{T} \hat{i} + \hat{Z}_M \hat{u} \end{aligned}$$



#### 4.1 Transductores electroacústicos



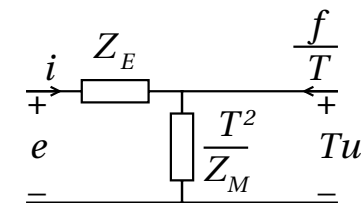
##### Antirreciprocidad y circuitos equivalentes

Los *transductores antirrecíprocos* cumplen

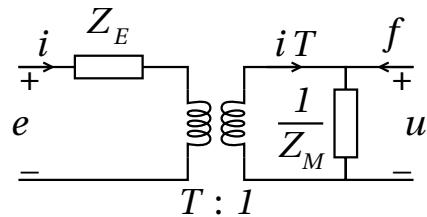
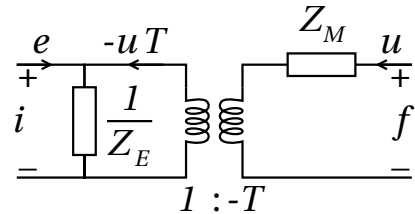
$$\hat{T}_{em} = -\hat{T}_{me} = \hat{T}$$

Es sencillo encontrar una red eléctrica pasiva que cumpla las ecuaciones canónicas en este caso

$$\begin{aligned} \hat{e} &= \hat{Z}_E \hat{i} + \hat{T} \hat{u} \\ \hat{f} &= -\hat{T} \hat{i} + \hat{Z}_M \hat{u} \end{aligned}$$

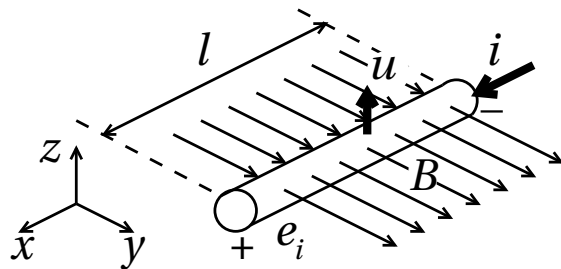


## 4.2 Transductores dinámicos



## 4.2 Transductores dinámicos

Se basan en la vibración de un conductor por el que circula una corriente en el interior de un campo magnético



## 4.2 Transductores dinámicos

La tensión inducida debida a la ley de Lenz es

$$\hat{e}_i = -\hat{u} \cdot Bl$$

La tensión en los extremos del conductor resulta

$$\hat{e} = \hat{Z}_E \hat{i} + Bl \hat{u}$$

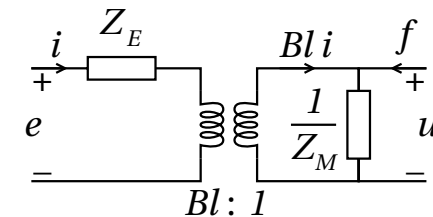
En el conductor existe una fuerza de origen magnético debido a la circulación de cargas

$$\hat{f}_B = \hat{i} Bl$$

La fuerza que actúa sobre el conductor es

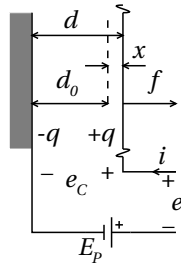
$$\hat{f} = -Bl \hat{i} + \hat{Z}_M \hat{u}$$

Estas dos son las *ecuaciones canónicas de un transductor dinámico*, que es un *transductor antirrecíproco*



### 4.3 Transductores electrostáticos

Se basan en un condensador de placas paralelas que pueden alejarse o acercarse como consecuencia de una onda sonora o de la aplicación de una tensión variable



La capacidad del condensador es

$$C(t) = \epsilon_0 \frac{S}{d(t)} = \epsilon_0 \frac{S}{d_0} \frac{d_0}{d_0 + x(t)} = C_0 \frac{1}{1 + \frac{x(t)}{d_0}}$$

donde  $S$  es la superficie de una armadura y  $C_0$  la capacidad del condensador en reposo. La tensión en bornes del condensador resulta

$$\begin{aligned} e_C(t) &= \frac{q(t)}{C(t)} \\ &= \frac{q(t)}{C_0} \left[ 1 + \frac{x(t)}{d_0} \right] = \frac{q(t)}{C_0} + \frac{x(t) q(t)}{C_0 d_0} \end{aligned}$$

Sobre la placa móvil del condensador actúa una fuerza electrostática

$$f_e(t) = -\frac{q^2(t)}{2 \epsilon_0 S}$$

Las ecuaciones canónicas temporales del transductor son

$$\begin{aligned} e_C(t) &= \frac{q(t)}{C_0} + \frac{x(t) q(t)}{C_0 d_0} \\ f(t) &= \frac{q^2(t)}{2 \epsilon_0 S} + f_M(t) \end{aligned}$$

No se puede realizar una transducción adecuada porque las ecuaciones no son lineales

#### Linealización por polarización

Se aplica una tensión continua de polarización  $E_P$  muy grande de modo que

$$q_0 \gg q_a(t); \quad d_0 \gg x(t)$$

donde  $q_0$  es la carga estática cuando sólo se aplica la tensión  $E_P$ ; y  $q_a(t)$  es la carga dinámica (la variación respecto al caso estático)

### 4.3 Transductores electrostáticos

---

La tensión entre las placas del condensador se puede escribir

$$e_C(t) = \frac{q_0}{C_0} + \frac{q_a(t)}{C_0} + \frac{x(t) q_0}{C_0 d_0} + \frac{q_a(t) x(t)}{C_0 d_0}$$

Al ser las variables estáticas mucho mayores que las dinámicas

$$e_C(t) \approx \frac{q_0}{C_0} + \frac{q_a(t)}{C_0} + \frac{x(t) q_0}{C_0 d_0}$$

La capacidad estática del condensador es  $q_0/E_P$ . Se obtiene así la primera de las ecuaciones canónicas temporales linealizadas

$$e(t) = e_C(t) - E_P = \frac{1}{C_0} q_a(t) + \frac{E_P}{d_0} x(t)$$

Para la fuerza electrostática

$$f_e(t) = -\frac{q_0^2}{2 \epsilon_0 S} - \frac{q_a^2(t)}{2 \epsilon_0 S} - \frac{2 q_0 q_a(t)}{2 \epsilon_0 S}$$

Despreciando el término con  $q_a^2(t)$  y substituyendo  $\epsilon_0 S$  por  $C_0 d_0$  y  $q_0$  por  $E_P C_0$

$$f_e(t) \approx -\frac{q_0^2}{2 \epsilon_0 S} - \frac{q_0 q_a(t)}{C_0 d_0} = f_{e0} - \frac{E_P}{d_0} q_a(t)$$

### 4.3 Transductores electrostáticos

---

Se obtiene así la segunda de las ecuaciones canónicas temporales linealizadas

$$\begin{aligned} f(t) &= -f_e(t) + f_{M0} + f_M(t) \\ &= \frac{E_P}{d_0} q_a(t) + f_M(t) \end{aligned}$$

donde las fuerzas eléctrica y mecánica estáticas ( $f_{e0}$  y  $f_{M0}$ ) se anulan mutuamente

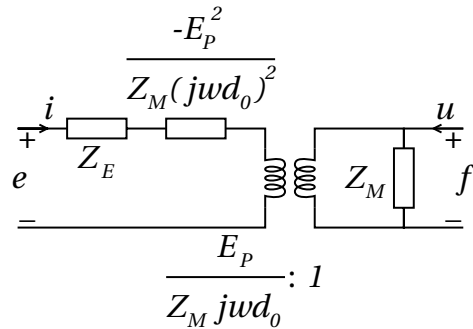
Las ecuaciones canónicas del transductor electrostático en el dominio de la frecuencia son

$$\begin{aligned} \hat{e} &= \frac{1}{j\omega C_0} \hat{i} + \frac{E_P}{j\omega d_0} \hat{u} \\ \hat{f} &= \frac{E_P}{j\omega d_0} \hat{i} + \hat{Z}_M \hat{u} \end{aligned}$$

donde  $\hat{i} = \frac{dq_a}{dt}$ .

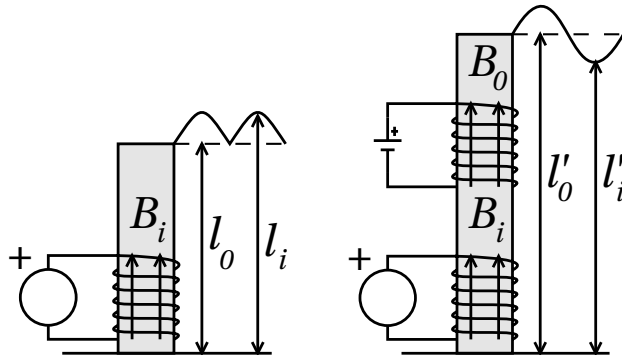
Se trata de un *transductor recíproco*

#### 4.4 Transductor magnetoestrictivo



#### 4.4 Transductor magnetoestrictivo

Se basa en el fenómeno de *magnetostricción*: un material ferromagnético, al ser magnetizado, sufre pequeños cambios en sus dimensiones, y viceversa, una deformación del material produce una variación del campo magnético



#### 4.4 Transductor magnetoestrictivo

Las deformaciones del material son independientes de la dirección del campo. Para evitar esta no linealidad, se polariza permanentemente el material con un campo magnético continuo  $B_0$

Las ecuaciones canónicas del transductor son

$$\hat{e} = \hat{Z}_E \hat{i} + \frac{\Lambda \mu S_0 N}{l} \hat{u}$$

$$\hat{f} = \frac{\Lambda \mu S_0 N}{l} \hat{i} + \hat{Z}_M \hat{u}$$

donde

$\Lambda$  es la *constante de magnetostricción* que depende del material y del campo magnético estático

$\mu$  es la permeabilidad del material

$S_0$  es la sección de la barra de material

$N$  es el número de espiras

$l$  es la longitud de la barra de material

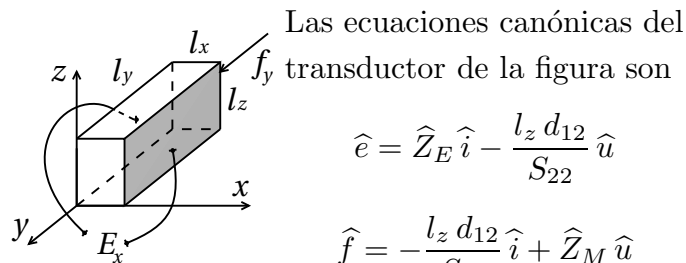
Son transductores *recíprocos* que se usan principalmente en emisión y recepción de *ultrasonidos*

## 4.5 Transductores piezoeléctricos

---

### 4.5 Transductores piezoeléctricos

Se basan en el efecto *piezoeléctrico*: al comprimir ciertos cristales se provoca una polarización eléctrica en las caras normales. Si esta compresión se convierte en tracción las cargas inducidas invierten su signo. El proceso es inversible: provocada una polarización externa el cristal sufre deformaciones que varían con la polarización



$$\hat{e} = \hat{Z}_E \hat{i} - \frac{l_z d_{12}}{S_{22}} \hat{u}$$

$$\hat{f} = -\frac{l_z d_{12}}{S_{22}} \hat{i} + \hat{Z}_M \hat{u}$$

donde

$d_{12}$  es el *coeficiente piezoeléctrico*

$S_{22}$  es el coeficiente de rigidez según  $y$

Son transductores *recíprocos* que se usan principalmente en emisión y recepción de *ultrasonidos*