

TIPOS E EXEMPLOS DE TRANSDUTORES

Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ 2 possíveis classificações:

- ☑ Por princípio de funcionamento
- ☑ Por grandeza medida

Exemplos de Transdutores

⌘ Por princípio de funcionamento:

- ☑ Resistivos
- ☑ Capacitivos
- ☑ Indutivos
- ☑ Termoelétricos
- ☑ Piezoelétricos
- ☑ Piroelétricos
- ☑ Fotovoltaicos
- ☑ Eletromagnéticos

Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Por princípio de funcionamento:

☑ **Resistivos:** potenciômetro, strain gauge, RTD, termistor, LDR, etc

☑ Capacitivos

☑ Indutivos

☑ Termoelétricos

☑ Piezoelétricos

☑ Piroelétricos

☑ Fotovoltaicos

☑ Eletromagnéticos

Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Por princípio de funcionamento:

☑ Resistivos

☑ **Capacitivos:** Umidade, Nível, pressão, etc

☑ Indutivos

☑ Termoelétricos

☑ Piezoelétricos

☑ Piroelétricos

☑ Fotovoltaicos

☑ Eletromagnéticos

Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Por princípio de funcionamento:

- ☑ Resistivos
- ☑ Capacitivos
- ☑ **Indutivos:** Distância, LVDT, pressão, etc
- ☑ Termoelétricos
- ☑ Piezoelétricos
- ☑ Piroelétricos
- ☑ Fotovoltaicos
- ☑ Eletromagnéticos

Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Por princípio de funcionamento:

☑ Resistivos

☑ Capacitivos

☑ Indutivos

☑ **Termoelétricos:** termopares, fluxo de calor

☑ Piezoelétricos

☑ Piroelétricos

☑ Fotovoltaicos

☑ Eletromagnéticos

Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Por princípio de funcionamento:

- ☑ Resistivos
- ☑ Capacitivos
- ☑ Indutivos
- ☑ Termoelétricos
- ☑ **Piezoelétricos**: PZT, PVDF, etc
- ☑ Piroelétricos
- ☑ Fotovoltaicos
- ☑ Eletromagnéticos

Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Por princípio de funcionamento:

- ☑ Resistivos
- ☑ Capacitivos
- ☑ Indutivos
- ☑ Termoelétricos
- ☑ Piezoelétricos
- ☑ **Piroelétricos**: pirômetro
- ☑ Fotovoltaicos
- ☑ Eletromagnéticos

Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Por princípio de funcionamento:

- ☑ Resistivos
- ☑ Capacitivos
- ☑ Indutivos
- ☑ Termoelétricos
- ☑ Piezoelétricos
- ☑ Piroelétricos
- ☑ **Fotovoltaicos:** fotodiodo, fototransistor, optoacoplador
- ☑ Eletromagnéticos

Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Por princípio de funcionamento:

- ☑ Resistivos
- ☑ Capacitivos
- ☑ Indutivos
- ☑ Termoelétricos
- ☑ Piezoelétricos
- ☑ Piroelétricos
- ☑ Fotovoltaicos
- ☑ **Eletromagnéticos**: tacômetro, amperímetro, etc

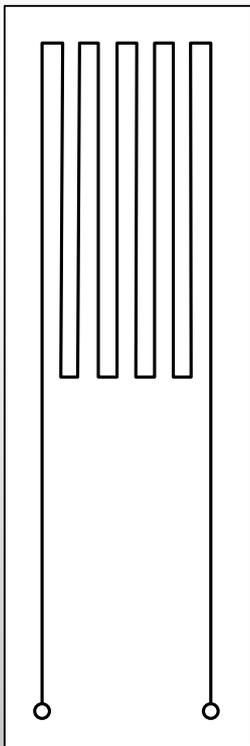
Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Por grandeza medida (exemplos):

- ☑ Tração (*Strain Gauges*)
- ☑ Posição (Transformador Diferencial)
- ☑ Força, Pressão, Vibração (Efeito Piezoelétrico)
- ☑ Temperatura (termopar, RTD, termistor)
- ☑ Campo Magnético (Magnetômetros)

Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Extensômetros (*Strain Gauges*)



Resistência de um condutor: $R = \rho \frac{L}{A}$

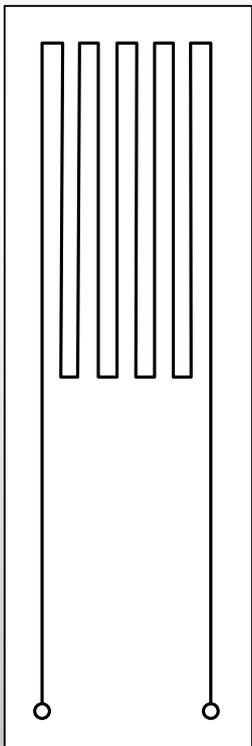
No caso: $L = N l \longrightarrow R = \rho N \frac{l}{A}$

Se $l' = l + \Delta l \longrightarrow R' = R + \Delta R$
 $A' = A - \Delta A$

Se $l' = l - \Delta l \longrightarrow R' = R - \Delta R$
 $A' = A + \Delta A$

Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Extensômetros (*Strain Gauges*)



l

$$R = \rho N \frac{l}{A} \longrightarrow \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A}$$

Extensômetro metálico: $\Delta \rho = 0$

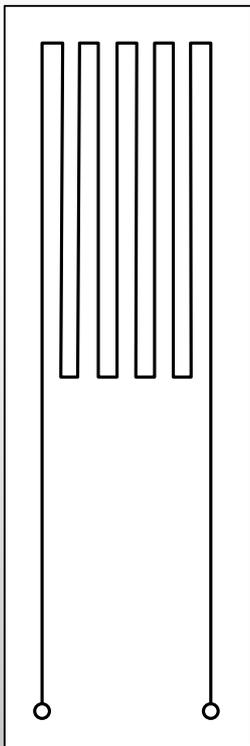
Sabe-se ainda que:

$$\boxed{\frac{\Delta A}{A} = -2\nu \frac{\Delta l}{l}}$$

ν = razão de Poisson (característica do material)

Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Extensômetros (*Strain Gauges*)



Logo, tem-se:
$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} (1 + 2\nu)$$

Fator de medida (*gauge factor*):

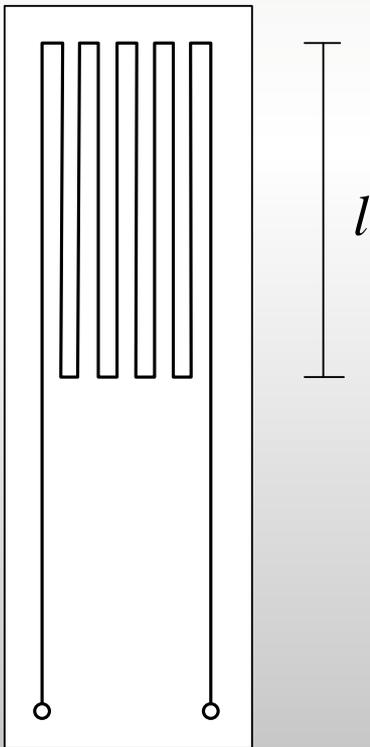
$$F = GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}$$

Ou seja:

$$F = 1 + 2\nu$$

Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Extensômetros (*Strain Gauges*)



Deformação axial específica (*strain*) :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

$\varepsilon > 0$: tração

$\varepsilon < 0$: compressão

Usualmente expressa em unidade de $\mu\varepsilon$

(embora seja adimensional: $1 \mu\varepsilon = 10^{-6} \Delta l/l$)

Ou seja:

$$F = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon}$$

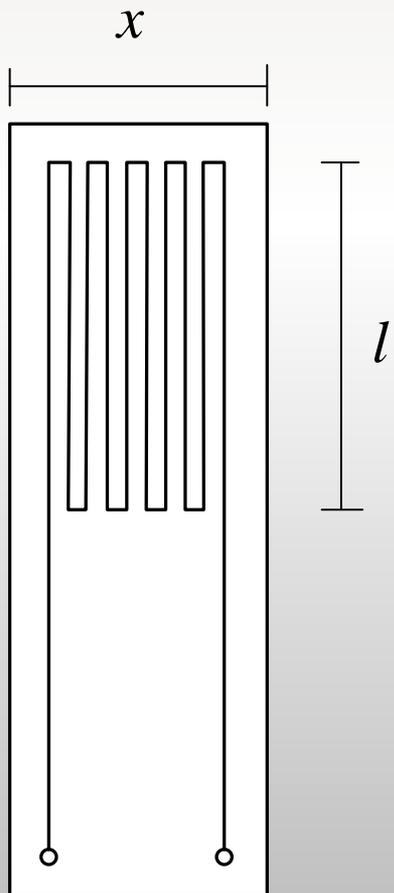
Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Extensômetros (*Strain Gauges*)

MATERIAL	F	R típico (Ω)	ΔTemp. (ppm/$^{\circ}$C)	Obs
57%Cu, 43%Ni (\approx constantan, 60/40)	≈ 2	120,350	6	F constante com ε
Si	-100 a +150	1000	50.000	F varia com ε

Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Extensômetros (*Strain Gauges*)



☑ Idealmente, deve ser sensível **somente a deformações longitudinais.**

$$F_{long} = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} \longrightarrow F_{trans} = \frac{\Delta R/R}{\Delta x/x}$$

K = Fator de Sensibilidade Transversal

$$K = \frac{F_{trans}}{F_{long}} \times 100$$

Tipicamente: $0\% \leq K \leq 10\%$

Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Extensômetros (*Strain Gauges*)

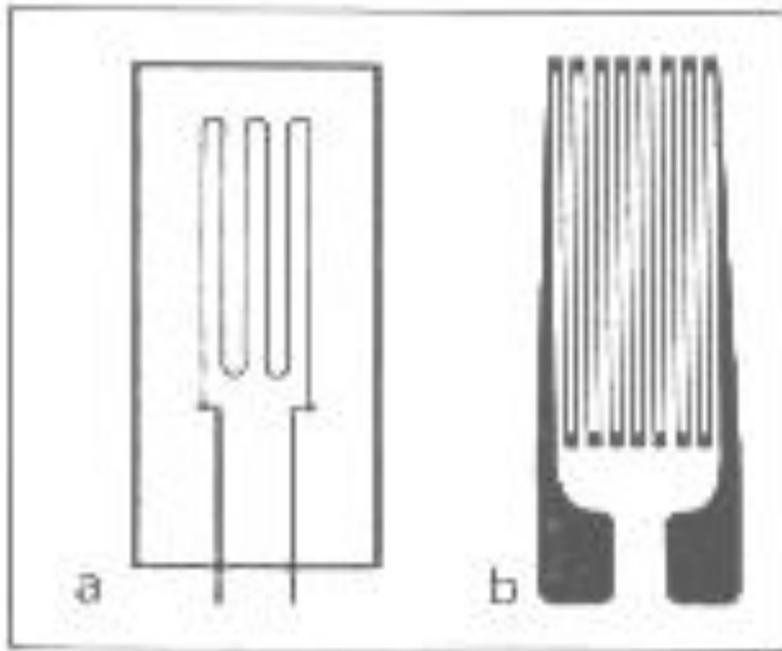


Figure 11-1 Uniaxial strain gages: (a) Wire; (b) Foil (courtesy Gould, Inc., Measurement Systems Division).

Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Extensômetros (*Strain Gauges*)

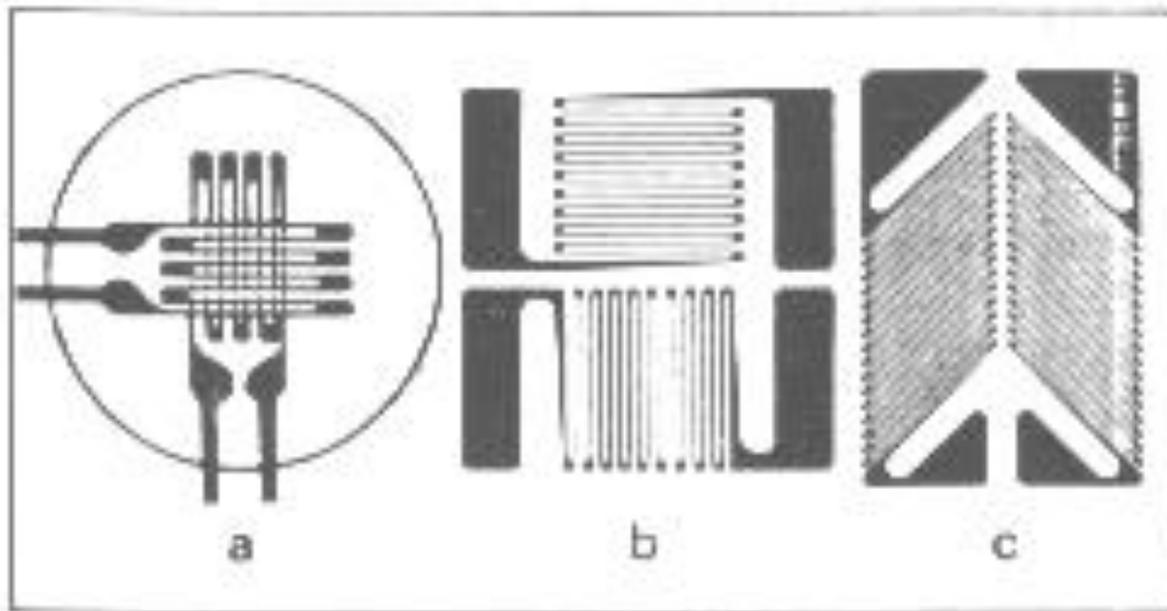


Figure 11-2 Two-element rosettes. (a) 90° stacked foil; (b) 90° planar foil; (c) 90° shear planar foil (courtesy Gould, Inc., Measurement Systems Division).

Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Extensômetros (*Strain Gauges*)

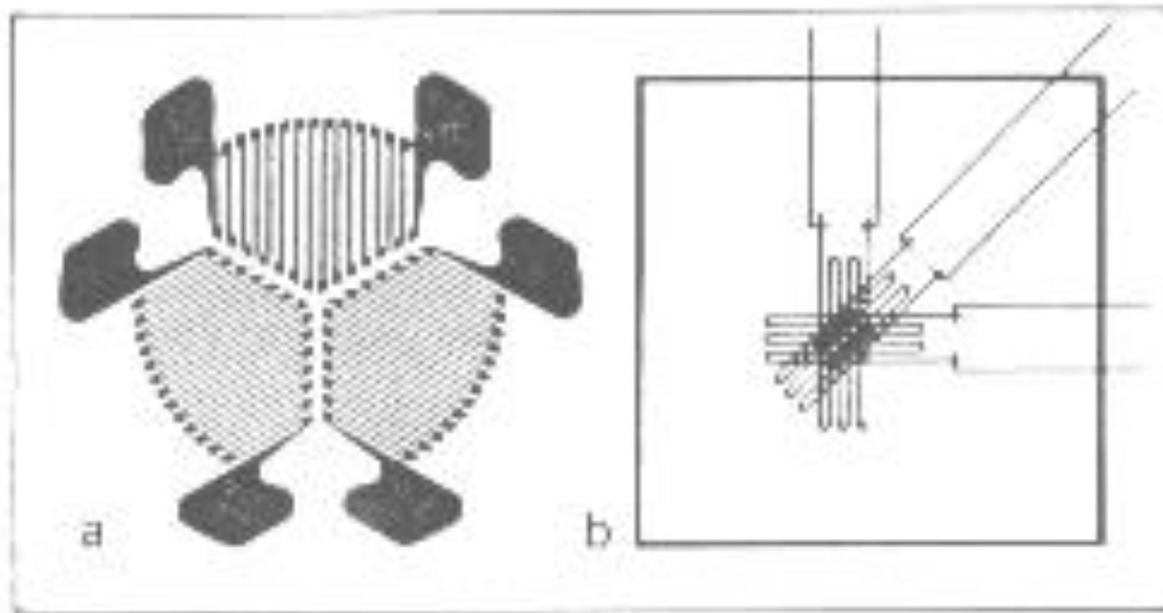
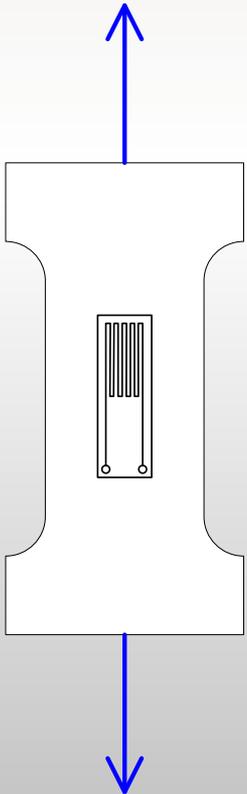


Figure 11.3 Three-element rosettes (a) 60° planar foil, (b) 45° stacked wire (courtesy Gould, Inc., Measurement Systems Division)

Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Extensômetros (*Strain Gauges*)



☒ Exemplo:

☒ $R = 120 \Omega$, $F = 2,0$

☒ Tração de $10 \mu\epsilon$

$$F = \frac{\Delta R / R}{\epsilon}$$

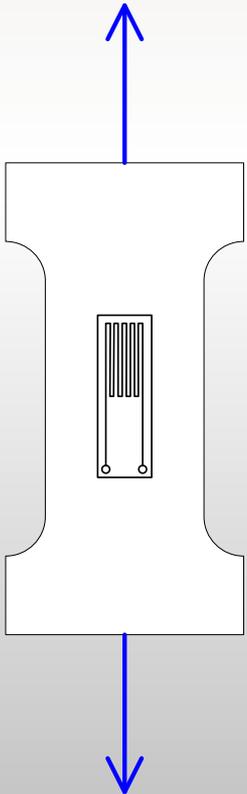
$$2,0 = \frac{\Delta R / 120}{10 \times 10^{-6}}$$



$$\Delta R = 0,0024 \Omega$$

Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Extensômetros (*Strain Gauges*)



☒ Exemplo:

☒ $R = 120 \Omega$, $F = 2,0$

☒ Tração de $1000 \mu\epsilon$

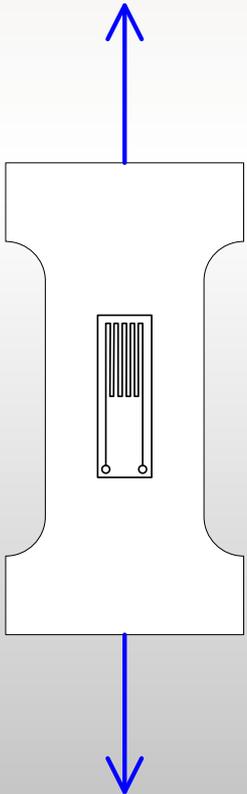
$$F = \frac{\Delta R/R}{\epsilon}$$

$$2,0 = \frac{\Delta R/120}{1000 \times 10^{-6}} \longrightarrow \boxed{\Delta R = 0,24\Omega}$$

$$\frac{\Delta l}{l} = 1000 \times 10^{-6} = 10^{-3} \longrightarrow \Delta l = 0,1\% \text{ de } l$$

Tipos e Exemplos de Transdutores

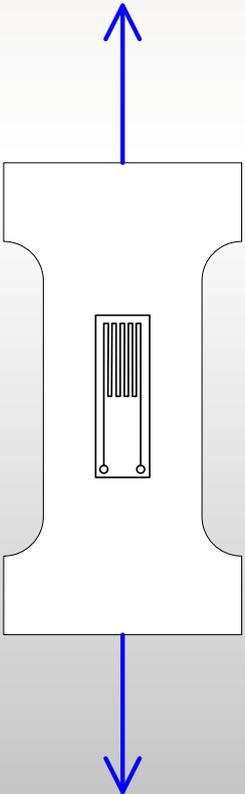
⌘ Extensômetros (*Strain Gauges*)



- ⊠ É fácil perceber que o desvio em relação ao valor nominal, o efeito da temperatura, ou a variação de resistência devido ao processo de colagem podem equivaler a deformações de centenas de $\mu\epsilon$.

Tipos e Exemplos de Transdutores

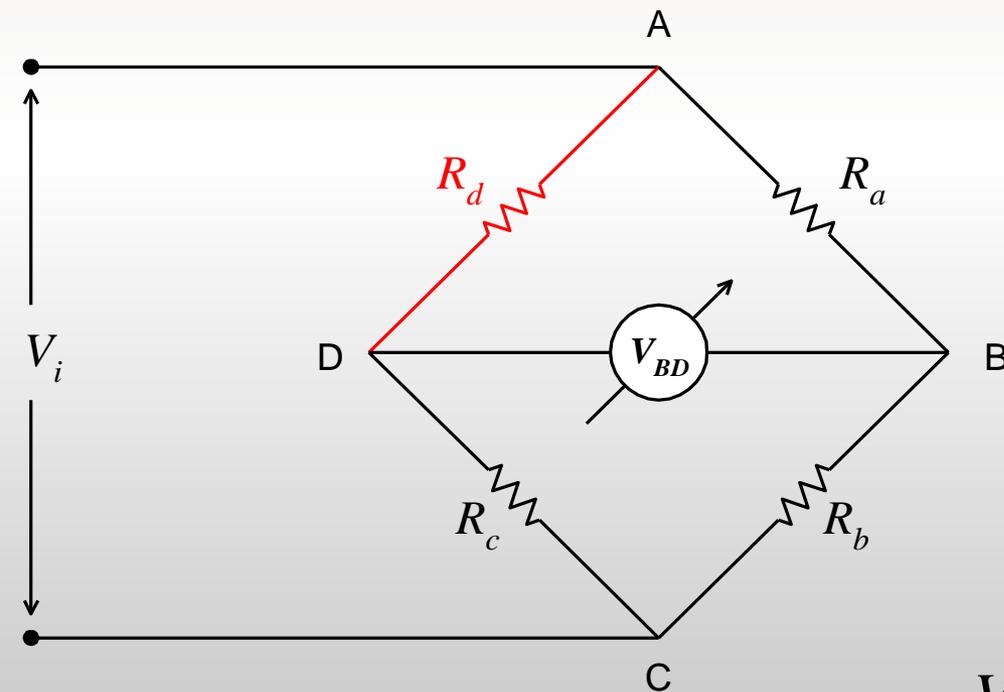
⌘ Extensômetros (*Strain Gauges*)



- ⊞ Contudo, as medições devem ser imunes a estas variações:
 - ⊞ Efeitos térmicos: Leitura em ponte, compensação térmica;
 - ⊞ Desvio inicial, colagem: leitura relativa, ajuste externo de *offset*.

Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Extensômetros (*Strain Gauges*) :



$$V_{BD} = V_i \left(\frac{R_b}{R_a + R_b} - \frac{R_c}{R_c + R_d} \right)$$

$$R_a = R_b = R_c = R_d$$

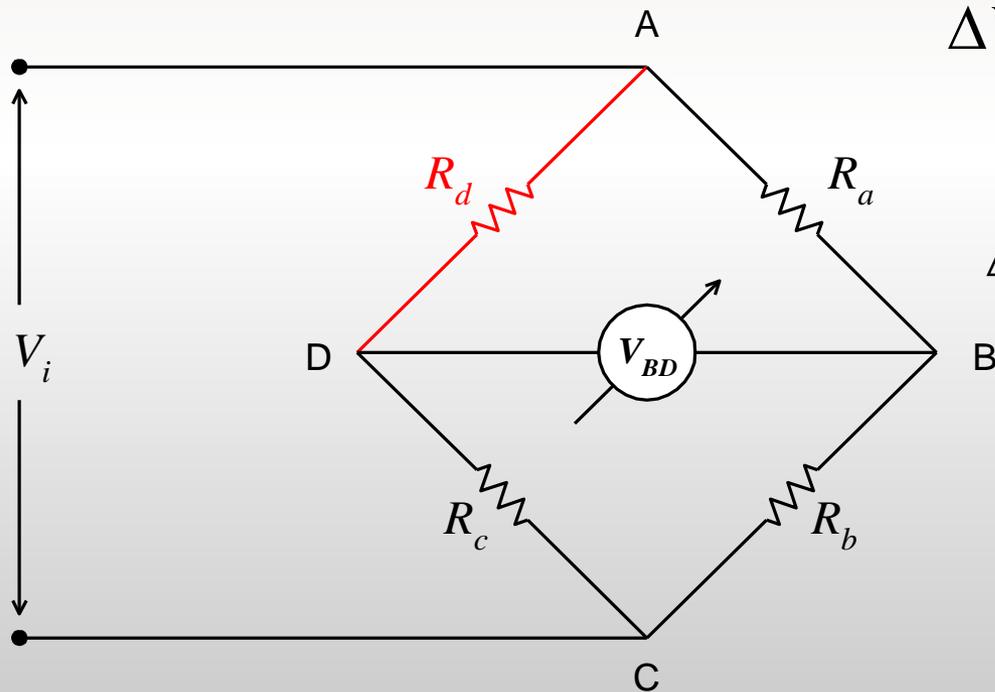
$$R'_d = R_d + \Delta R_d$$



$$V'_{BD} = V_i \left(\frac{R_b}{R_a + R_b} - \frac{R_c}{R_c + R_d + \Delta R_d} \right)$$

Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Extensômetros (*Strain Gauges*) :



$$\Delta V_{BD} = V_i \left(\frac{R_c}{R_c + R_d} - \frac{R_c}{R_c + R_d + \Delta R_d} \right)$$

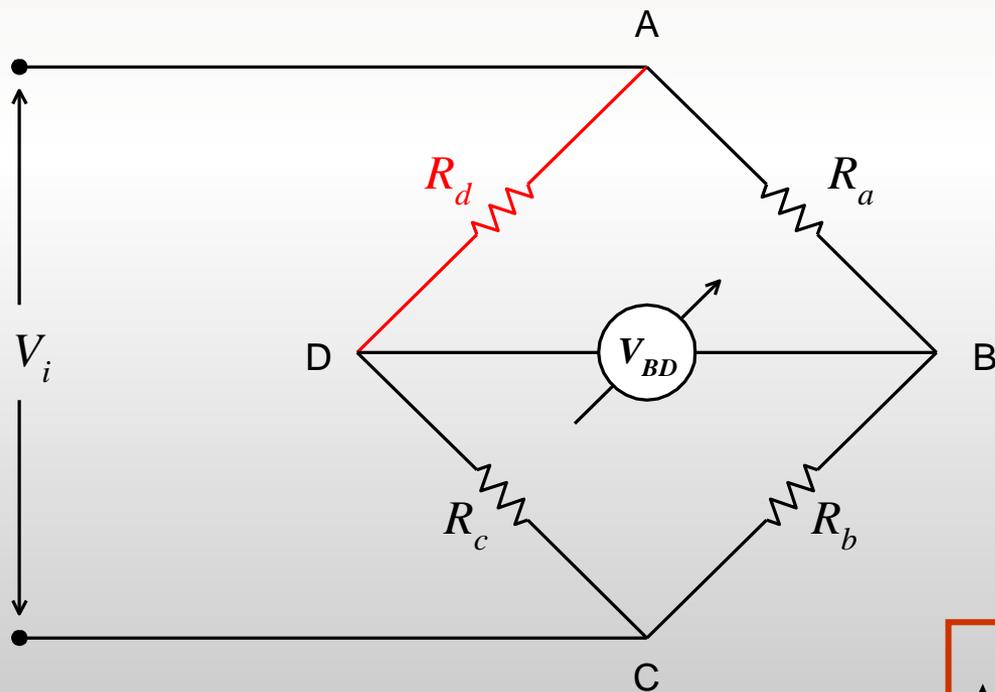
$$\Delta V_{BD} = V_i \frac{R_c \Delta R_d}{(R_c + R_d + \Delta R_d)(R_c + R_d)}$$

$$\Delta R_d \ll R_d$$

$$\Delta V_{BD} = V_i \frac{R_c \Delta R_d}{(R_c + R_d)^2}$$

Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Extensômetros (*Strain Gauges*) :



$$\Delta V_{BD} = V_i \frac{R_c \Delta R_d}{(R_c + R_d)^2}$$

$$\Delta V_{BD} = V_i \underbrace{\left(\frac{\Delta R_d}{R_d} \right)}_{F \varepsilon} \frac{R_c R_d}{(R_c + R_d)^2}$$

$$\Delta V_{BD} = \frac{V_i F \varepsilon}{4}$$

$$\varepsilon = \frac{4 \Delta V_{BD}}{V_i F}$$

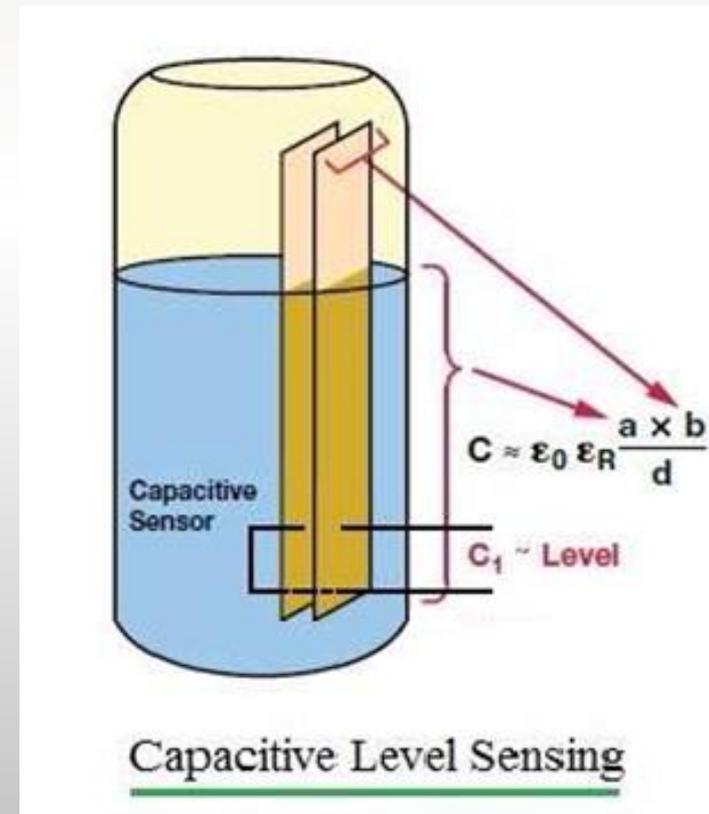
Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Sensores de nível capacitivos :

☑ Duas placas de área $a \times b$, separadas por uma distância d possuem uma capacitância C , que depende da permissividade ϵ do meio entre as placas.

☑ ϵ_0 é a permissividade do ar e ϵ_R a permissividade relativa do líquido entre as placas

☑ Para aumentar a sensibilidade pode-se utilizar circuito em ponte

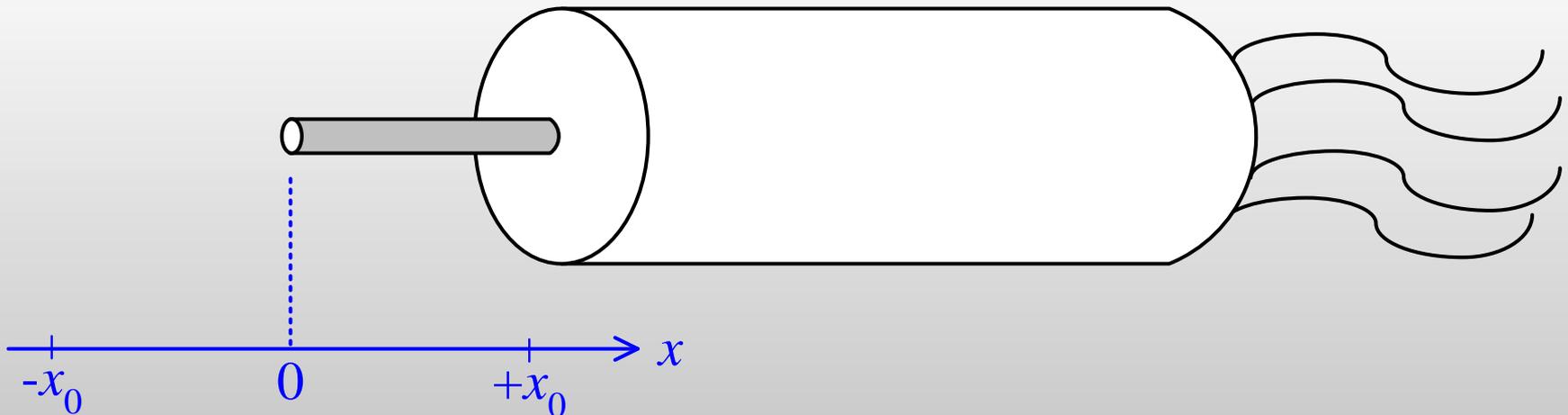


Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Transformador Diferencial

☑ LVDT - Linear Variable Differential Transformer

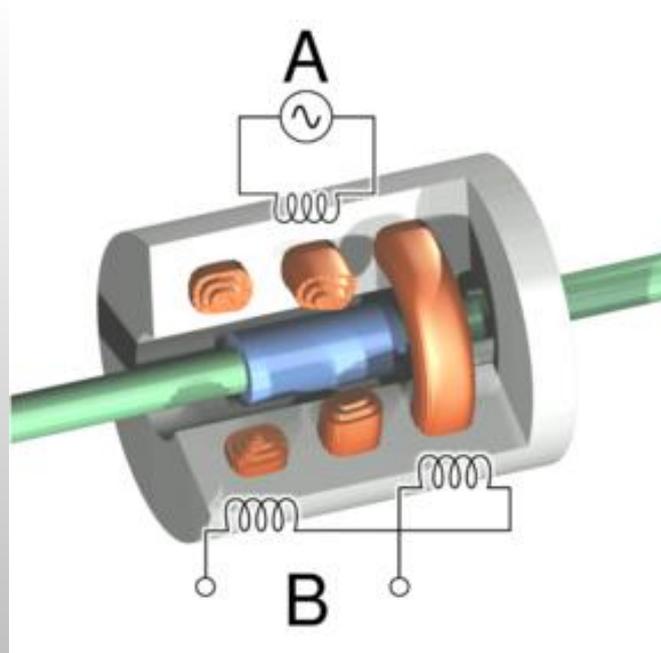
☑ Medição de posição e deslocamento



Tipos e Exemplos de Transdutores

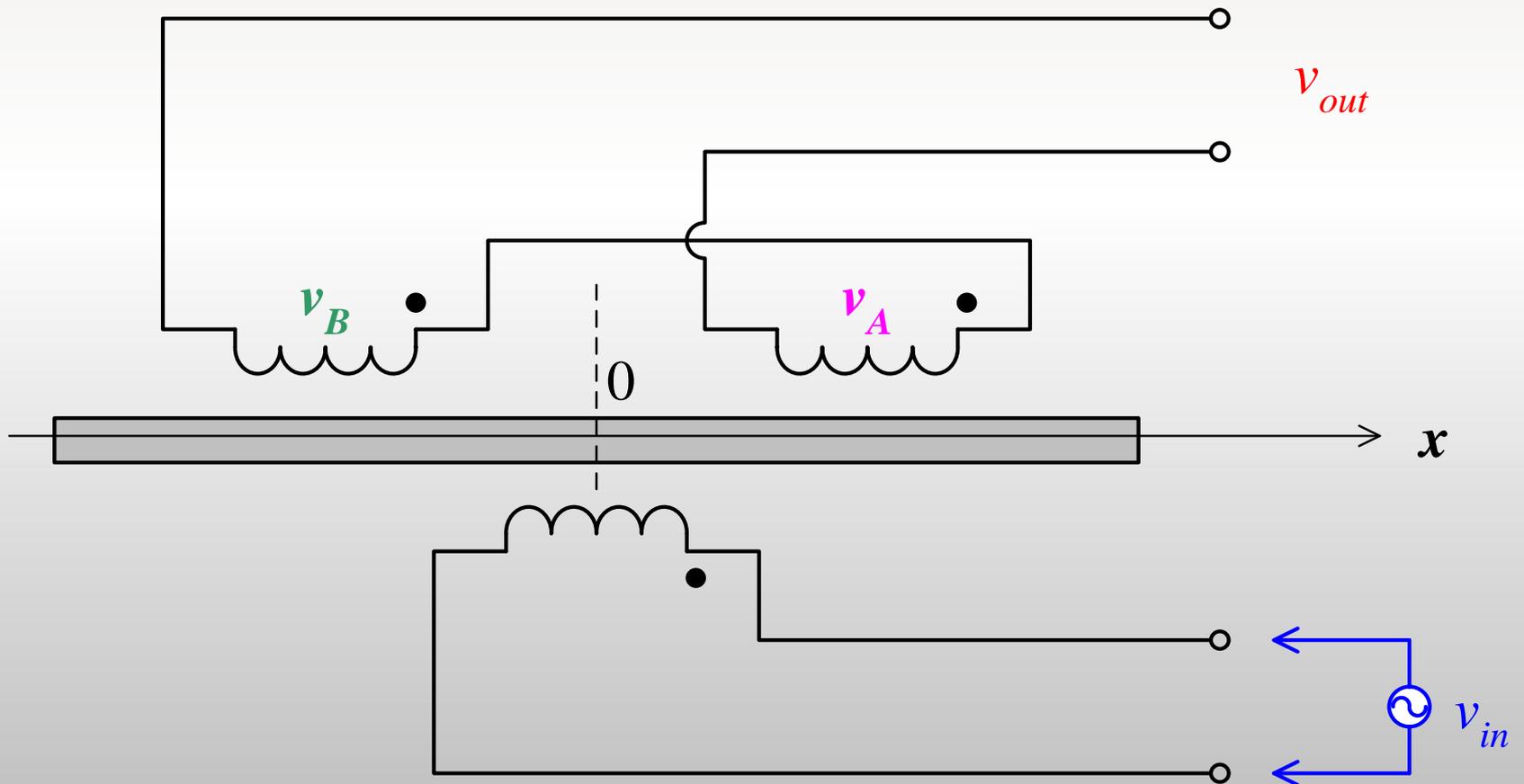
⌘ Transformador Diferencial

- ☑ LVDT - Linear Variable Differential Transformer
- ☑ Medição de posição e deslocamento



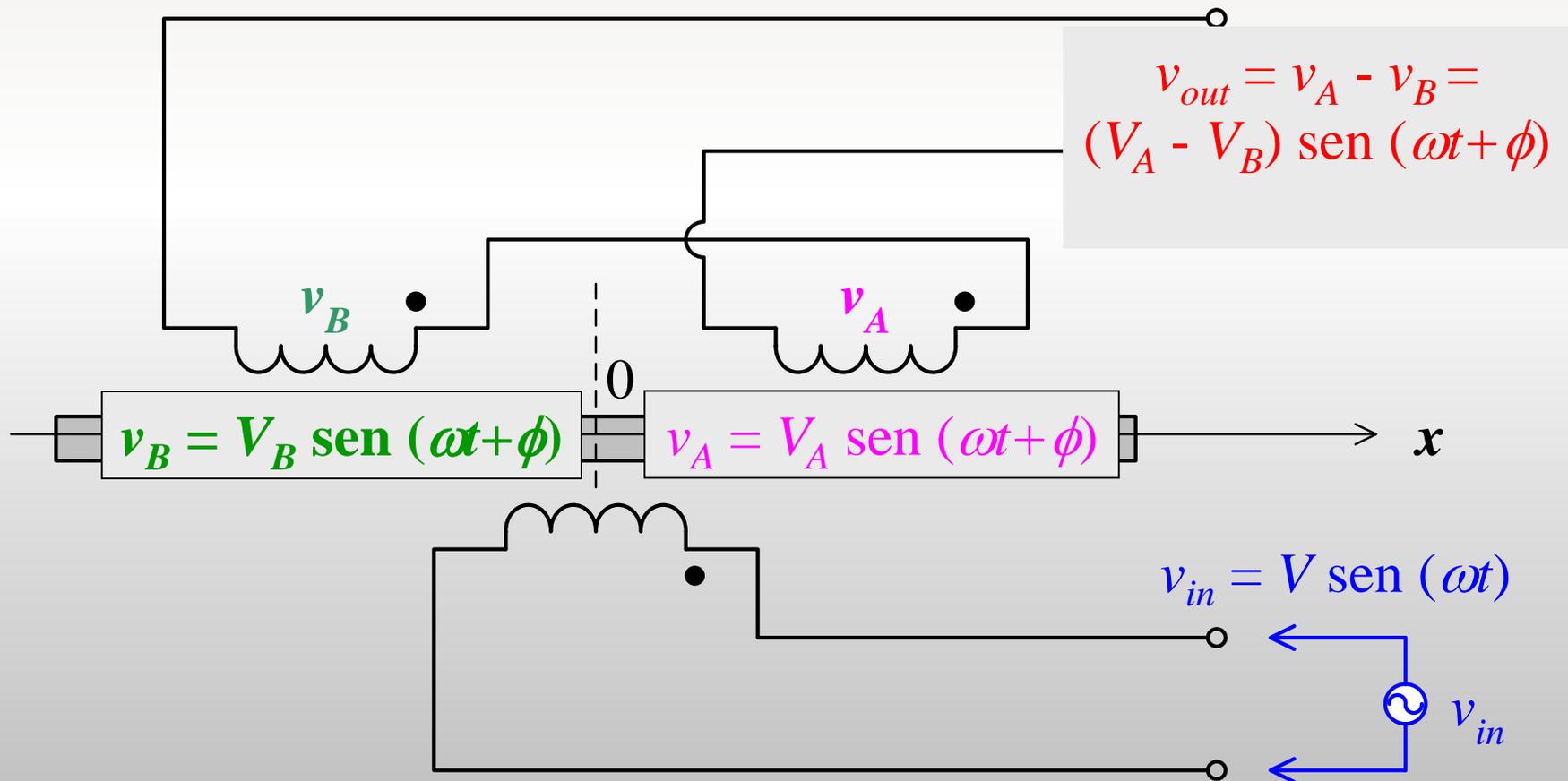
Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Transformador Diferencial



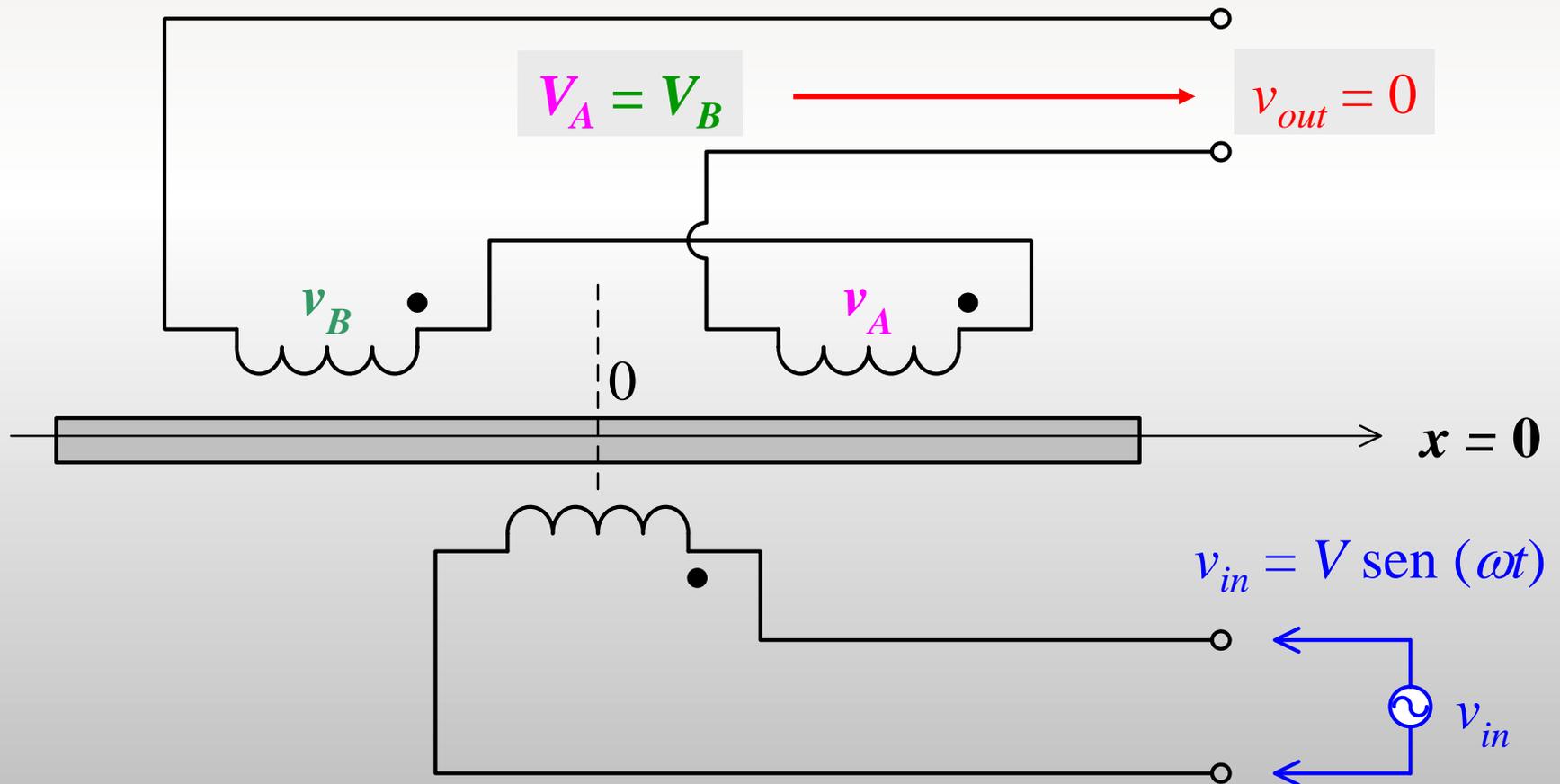
Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Transformador Diferencial



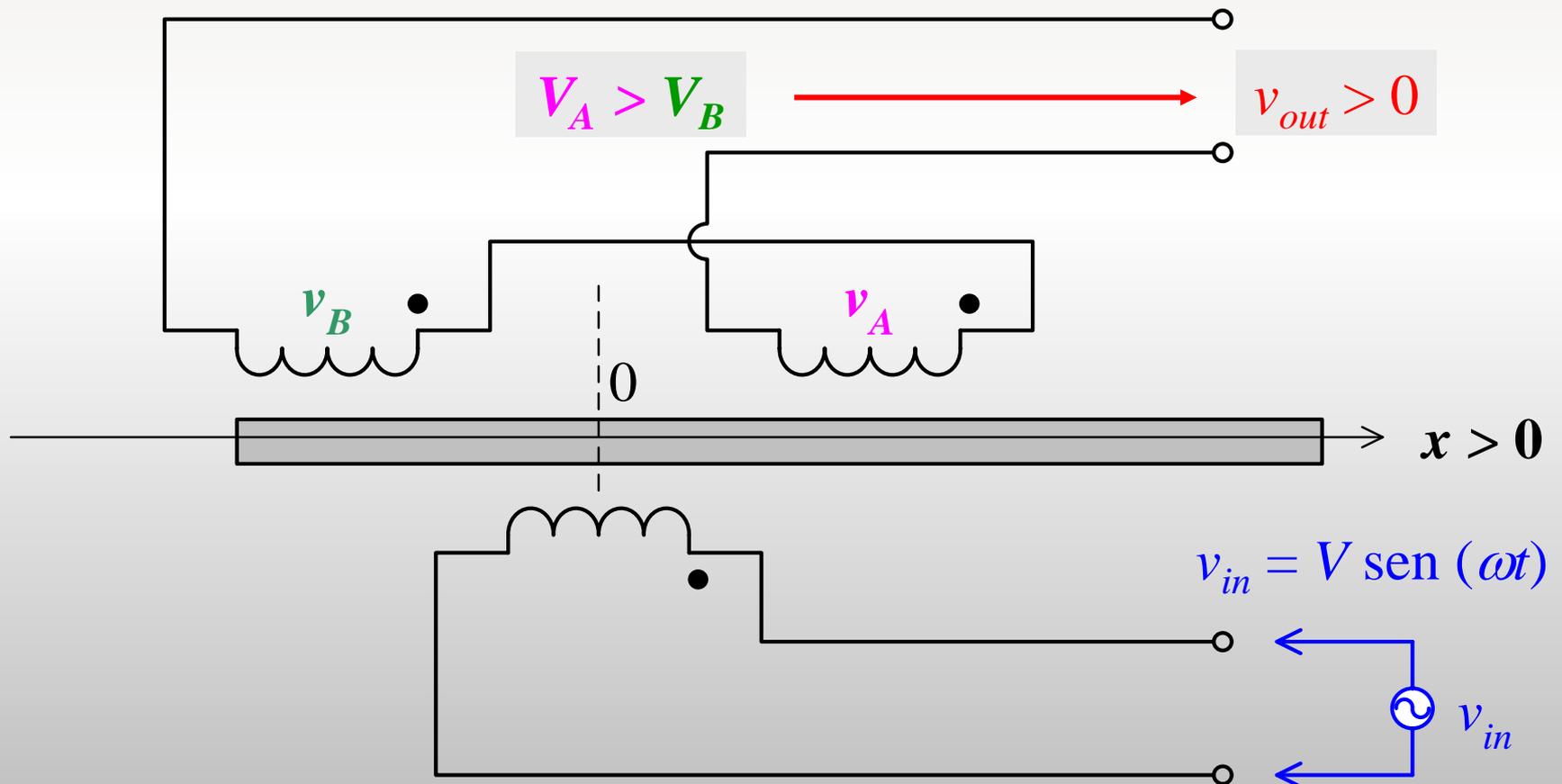
Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Transformador Diferencial



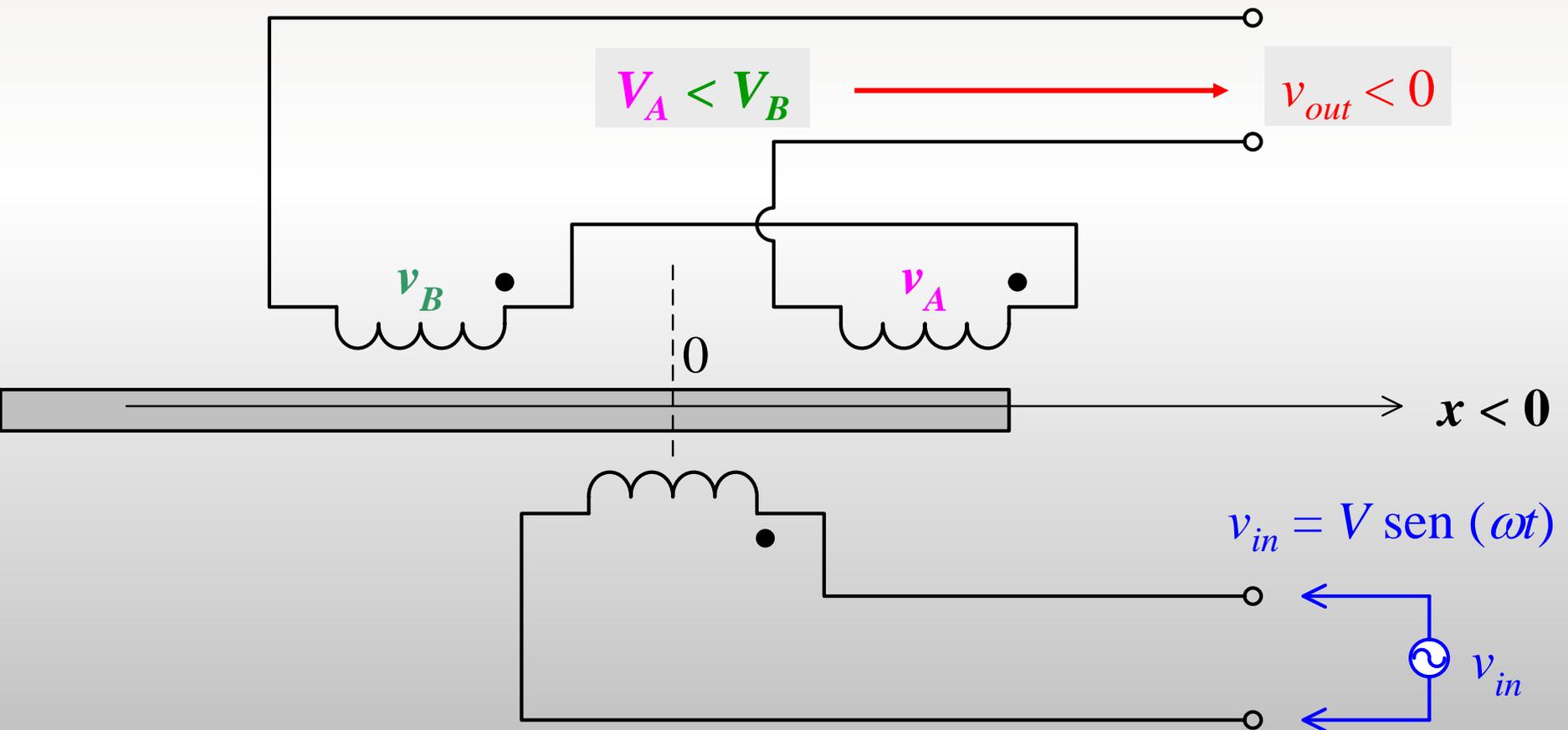
Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Transformador Diferencial



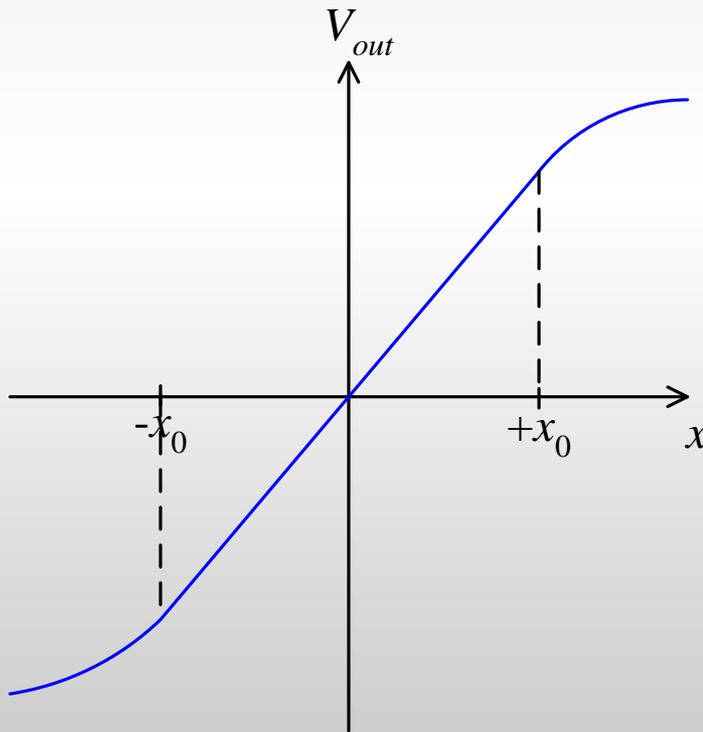
Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Transformador Diferencial



Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Transformador Diferencial



$$v_{out} = V_{out} \text{ sen } (\omega t + \phi)$$

Unidade SI: V/m
Unidade mais usual: V/mm

Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Transformador Diferencial

- ☑ próprio para **ambientes hostis**;
- ☑ apenas uma parte móvel (núcleo): **longa vida útil**;
- ☑ acurácia **$\pm 0,5\%$ FS**, linearidade **$\pm 0,2\%$ FS**
- ☑ faixa de operação: **$\pm 1,0$ mm a ± 100 mm**
- ☑ freqüência máxima de leitura **$\cong 0,1 (\omega / 2\pi)$**
- ☑ sensível a **campos magnéticos** próximos
- ☑ sensível a **distorção harmônica**

schaevitz

The Name In Sensor Technology

Accu/Sens™ LINEAR DISPLACEMENT SENSOR

DC-Operated

- **Excellent repeatability**
- **Temperature resistant**
- **Hi-tech circuitry**
- **Affordably priced**

Unique monolithic circuitry and ratiometric design make this DC-operated linear displacement sensor highly accurate and affordable.

Nominally powered by a regulated $\pm 15V$ DC supply, the Accu/Sens™ converts core displacement into proportional outputs up to $\pm 10V$ DC.

With a capacity for extremely reliable and repeatable measurement, the Accu/Sens becomes the preferred technology for thousands of applications.

Description

The Accu/Sens combines a unique monolithic chip, rather than conventional hybrid microcircuitry, with a computer-designed AC-LVDT to achieve its premium specifications. The unit possesses essentially infinite resolution with stability at 0.125% of full scale and linearity at 0.25% of full range.

The ratiometric design of the monolithic circuitry compensates for power supply

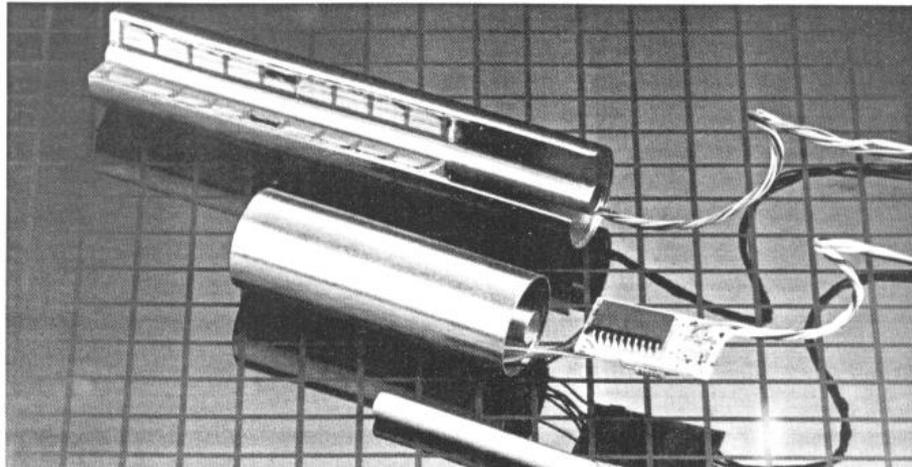
deviations for continuously stable operation. Unaffected by input variations, the transducer provides highly accurate, repeatable measurement.

This DC-LVDT also demonstrates significant resistance to temperature changes that often cause output variations. With an operating temperature range of +32 degrees to +160 degrees F, the Accu/Sens can operate efficiently in tough environments.

Innovative manufacturing techniques further enhance the DC-LVDT's operation and cost efficiency. Microminiature components used in the construction of each unit are selected for maximum stability. Vacuum encapsulation of all elements produces an assembly tolerant to shock, vibration and other forms of physical abuse. Double magnetic shielding protects against stray electrical fields.

With an internal carrier generator/signal conditioning module, the Accu/Sens requires no external conditioning. It easily interfaces with other electronics and operates with analog to digital signal converters. The Accu/Sens is available in ranges ± 0.050 inches to ± 10.00 inches. Schaevitz provides ready-made mounting blocks for LVDT installations. Quantity discounts are available.

Grid Scale: 3/8" x 3/8"



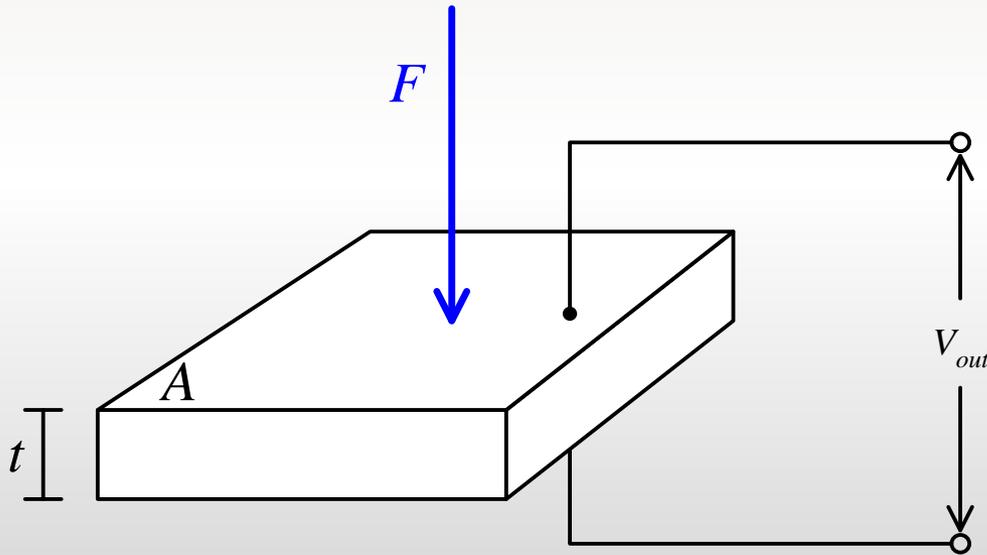
LVDT:

DISPLACEMENT



Tipos e Exemplos de Transdutores

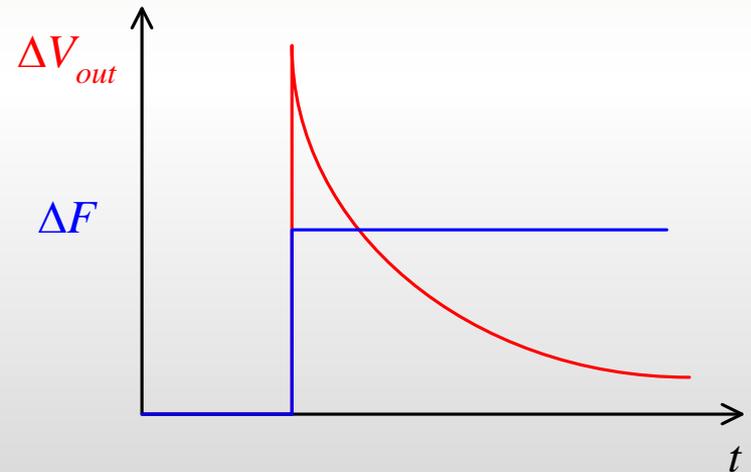
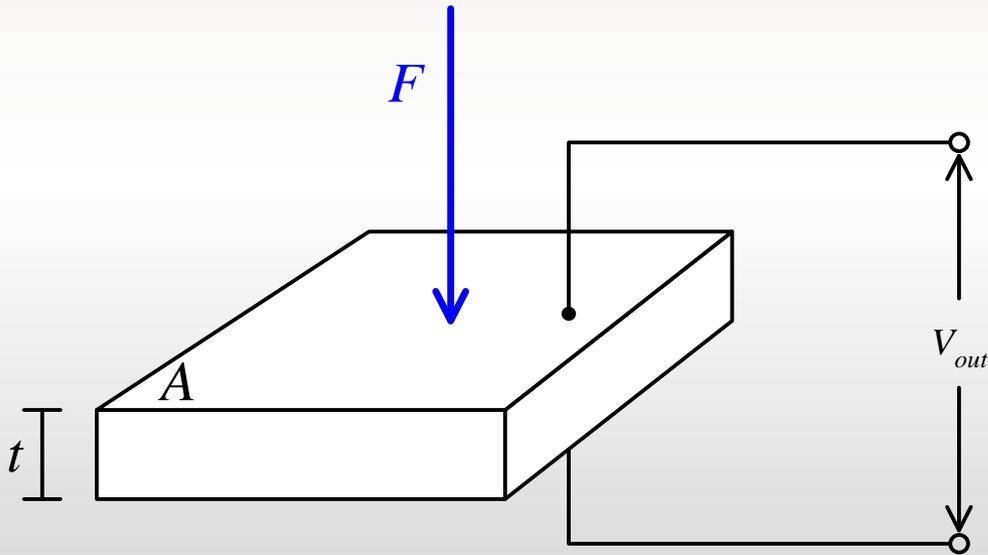
⌘ Efeito Piezoelétrico



A **deformação** do cristal provoca o aparecimento **momentâneo** de uma **carga** entre as superfícies, a qual é medida sob a forma de uma **vtagem** entre os dois **eletrodos**

Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Efeito Piezoelétrico

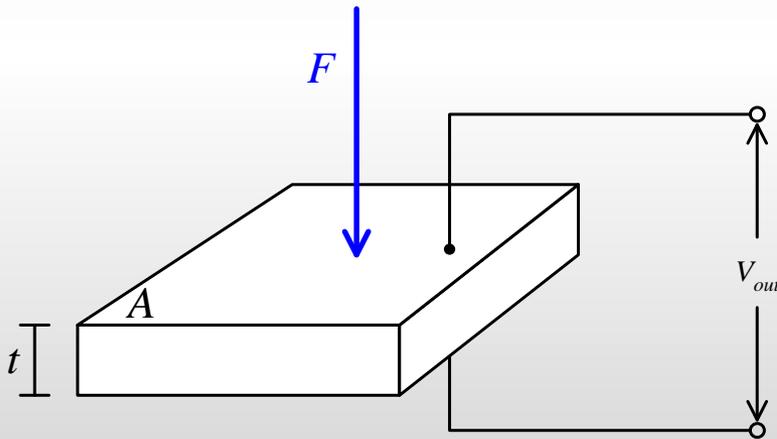


Aplicações:

- sensores de **pressão** ou **força** (cápsulas de toca-discos, microfones)
- **acelerômetros**

Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Efeito Piezoelétrico



$$\Delta V_{out} = \frac{d \cdot l \cdot \Delta P}{\epsilon}$$

$$\Delta V_{out} = \frac{d \cdot l \cdot \Delta F / A}{\epsilon}$$

$$\Delta V_{out} = g \cdot l \cdot \Delta P$$

$$g = \frac{d}{\epsilon}$$

d : constante piezoelétrica [C/N]

ϵ : permissividade [F/m]

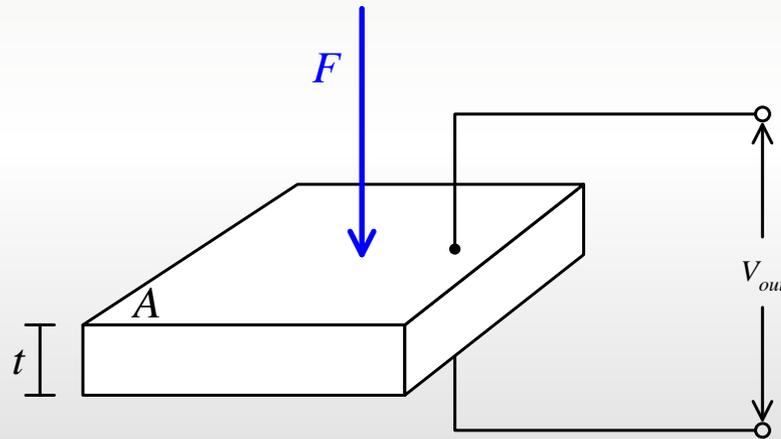
P : pressão [N/m²]

F : força [N]

g : sensibilidade piezoelétrica [V.m/N]

Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Efeito Piezoelétrico



Material

Quartzo (natural)

Fosfato de amônia (sintético)

g

-0,05 a +0,11

0,177 a 0,354

Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Efeito Piezoelétrico

☑ baixo custo

☑ vida útil longa

☑ sensível a variações de temperatura

☑ histerese

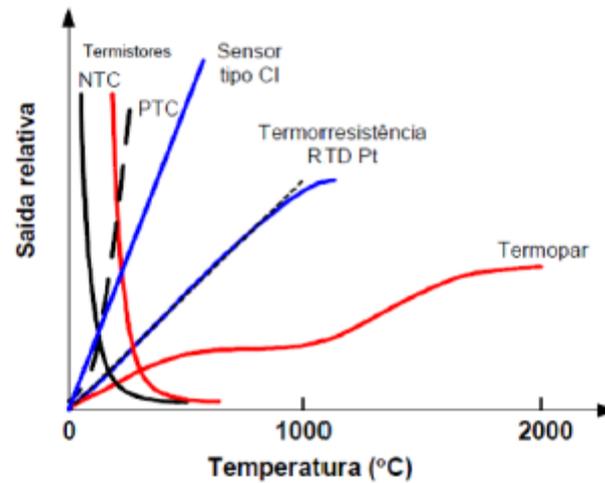
☑ impedância muito alta: sensível a ruído elétrico

☑ como a carga tende a desaparecer com o tempo, o cristal não pode ser usado para medições estáticas

2.3) Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Termopares

- ☒ formados pela junção entre dois metais distintos
- ☒ diferenças eletrônicas geram uma diferença de potencial
- ☒ Esta ddp depende da temperatura



Tipo de transdutor	Temperatura de Operação
Termopares	-200°C a 1700°C
Termômetros de Resistência	-200°C a 850°C
Termômetro de Líquido em Vidro	-100°C a 70°C (álcool etílico)
Termômetro Bimetálico	-50°C a 800°C
Termômetro a Gás	-60°C a 600°C
Termistor	-50°C a 150°C
Pirômetro	acima de 600°C

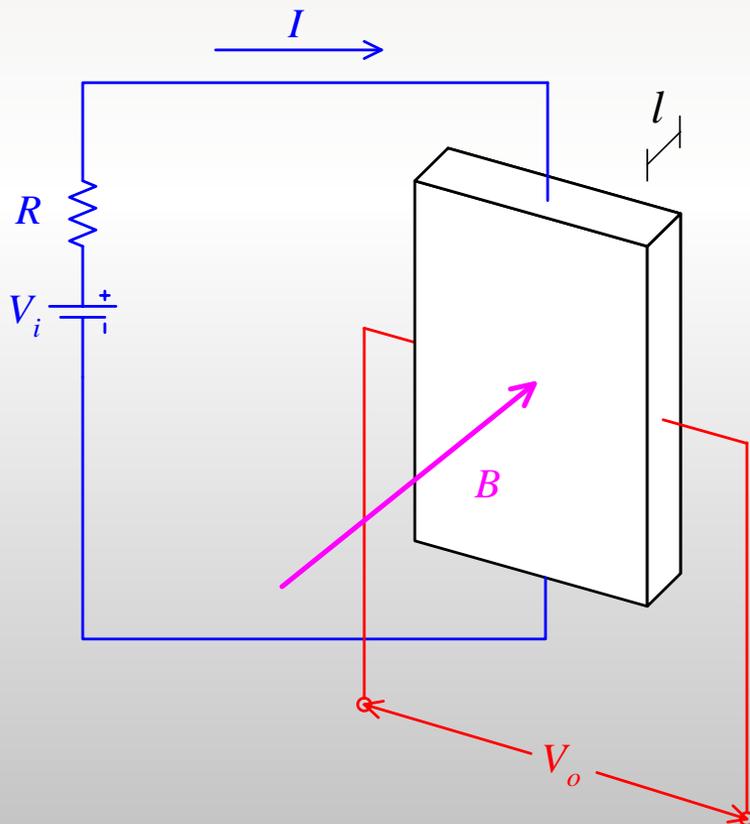
2.3) Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Magnetômetros por Ordem de Sensibilidade

- ☒ SQUID (Superconducting QUantum Interference Device)
- ☒ GMI (Magnetoimpedância Gigante)
- ☒ Fluxgate
- ☒ **Efeito Hall**
- ☒ Bobina de Indução

2.3) Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Efeito Hall (Magnetômetro)



$$V_o = K \frac{IB}{l}$$

K : coeficiente de Hall

Unidade SI:

V.m/AT

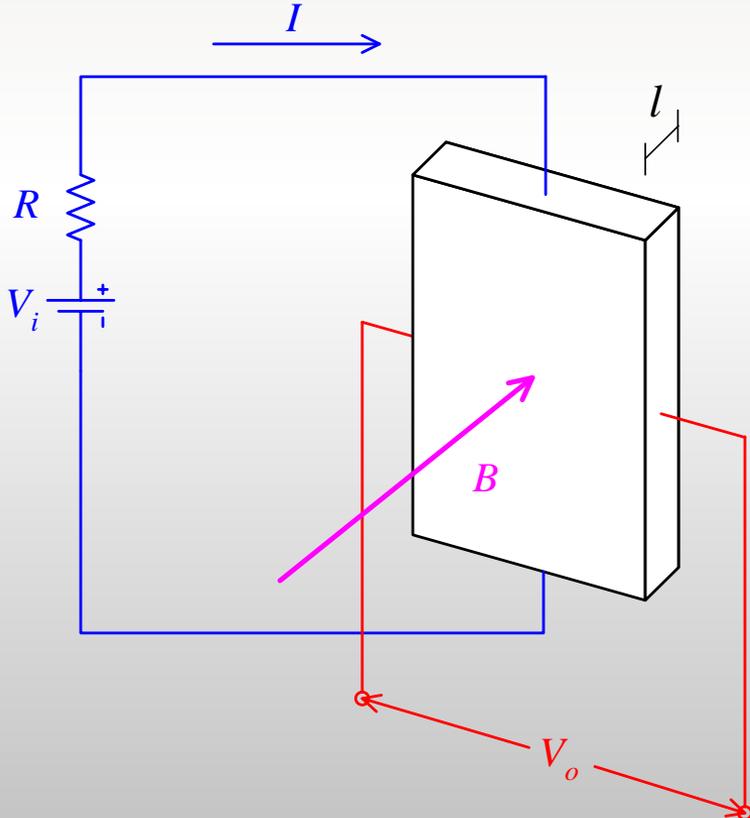
Unidade mais usual:

V.cm / AG

1 T = 10^4 G

2.3) Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Efeito Hall (Magnetômetro)



Material

Cu

Fe

Si

Ge

K

$-5,2 \times 10^{-15}$

$1,1 \times 10^{-13}$

$4,1 \times 10^{-11}$

$-8,0 \times 10^{-7}$

Sensibilidade:

$$S = \frac{\Delta V_o}{\Delta B} = \frac{KI}{l}$$

Unidade SI: **V/T**

2.3) Tipos e Exemplos de Transdutores

⌘ Efeito Hall (Magnetômetro)

- ☒ utilizados como sensores de **campo magnético**
- ☒ também utilizados como sensores para indicação de **posição ou movimento** (associado a um **ímã**)
- ☒ **imunes a contaminação** pelo ambiente
- ☒ **larga faixa de temperatura** de operação (-40°C a +150°C)
- ☒ sensores mais modernos utilizam **AsGa**

Efeito Hall:

LINEAR INTEGRATED CIRCUITS

TYPES TL173I, TL173C LINEAR HALL-EFFECT SENSORS

D2526, MARCH 1979—REVISED NOVEMBER 1983

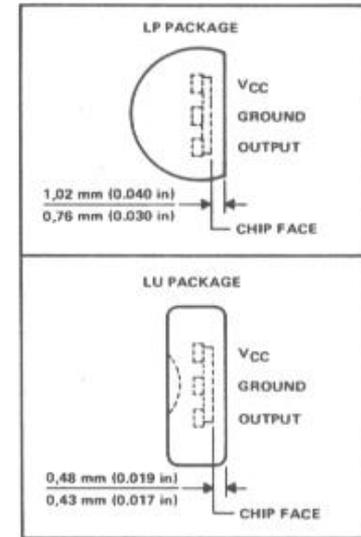
- Output Voltage Linear with Applied Magnetic Field
- Sensitivity Constant Over Wide Operating Temperature Range
- Solid-State Technology
- Three-Terminal Device
- Senses Static or Dynamic Magnetic Fields

description

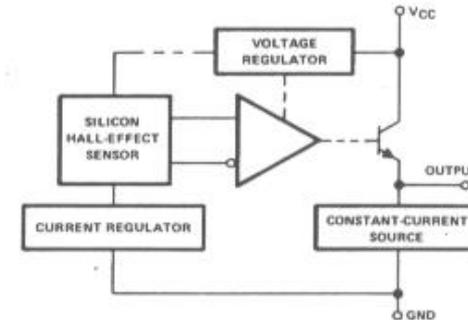
The TL173I and TL173C are low-cost magnetic-field sensors designed to provide a linear output voltage proportional to the magnetic field they sense. These monolithic circuits incorporate a Hall element as the primary sensor along with a voltage reference and a precision amplifier. Temperature stabilization and internal trimming circuitry yield a device that features high overall sensitivity accuracy with less than 5% error over its operating temperature range.

The TL173I is characterized for operation from -20°C to 85°C . The TL173C is characterized for operation from 0°C to 70°C .

TOP VIEWS



functional block diagram



absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

Supply voltage, V_{CC} (see Note 1)	25 V
Continuous total dissipation at (or below) 25°C free-air temperature (see Note 2)	775 mW
Operating free-air temperature range: TL173I	-20°C to 85°C
TL173C	0°C to 70°C
Storage temperature range	-65°C to 150°C
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds	260°C
Magnetic flux density	unlimited

- NOTES: 1. Voltage values are with respect to network ground terminal.
2. For operation above 25°C free-air temperature, derate linearly at the rate of $6.2\text{ mW}/^{\circ}\text{C}$.

TYPES TL173I, TL173C LINEAR HALL-EFFECT SENSORS

recommended operating conditions

	TL173I			TL173C			UNIT
	MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX	
Supply voltage, V_{CC}	10.8	12	13.2	10.8	12	13.2	V
Magnetic flux density, B	±50			±50			mT
Output current, I_O	Sink		0.5	0.5		mV/Δ	
	Source		-2	-2			
Operating free-air temperature, T_A	-20		85	0		70	°C

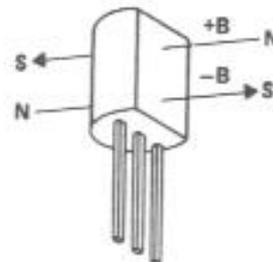
electrical characteristics over full range of recommended operating conditions (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS ¹	MIN	TYP ²	MAX	UNIT	
V_O Output voltage	$I_O = -2 \text{ mA to } 0.5 \text{ mA}$,	5.8	6	6.2	V	
k_{SVS} Supply voltage sensitivity ($\Delta V_O / \Delta V_{CC}$)	$B = 0 \text{ mT}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	18			mV/V	
S Magnetic sensitivity ($\Delta V_O / \Delta B$)	$B = -50 \text{ to } 50 \text{ mT}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	13.5	15	18	V/T	
ΔS Magnetic sensitivity change with temperature	$\Delta T_A = 25^\circ\text{C}$ to MIN or MAX	±5			%	
I_{CC} Supply current	$B = 0 \text{ mT}$, $I_O = 0$	8			12	mA
f_{max} Maximum operating frequency		100			kHz	

¹For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.

²Typical values are at $V_{CC} = 12 \text{ V}$ and $T_A = 25^\circ\text{C}$.

³The unit of magnetic flux density in the International System of Units (SI) is the tesla (T). The tesla is equal to one weber per square meter. Values expressed in milliteslas may be converted to gauss by multiplying by ten, e.g., 50 milliteslas = 500 gauss.



The north pole of a magnet is the pole that is attracted by the geographical north pole. The north pole of a magnet repels the north-seeking pole of a compass. By accepted magnetic convention, lines of flux emanate from the north pole of a magnet and enter the south pole.

FIGURE 1—DEFINITION OF
MAGNETIC FLUX POLARITY

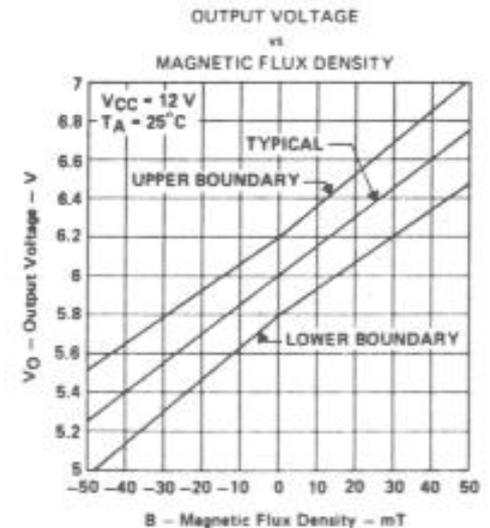


FIGURE 2

⌘ Efeito Hall: