

# Instrumentação 1

## Sensores Resistivos

Professor Cicero Martelli

DAELN/CPGEI

[profmartelli.instrumentacao@gmail.com](mailto:profmartelli.instrumentacao@gmail.com)

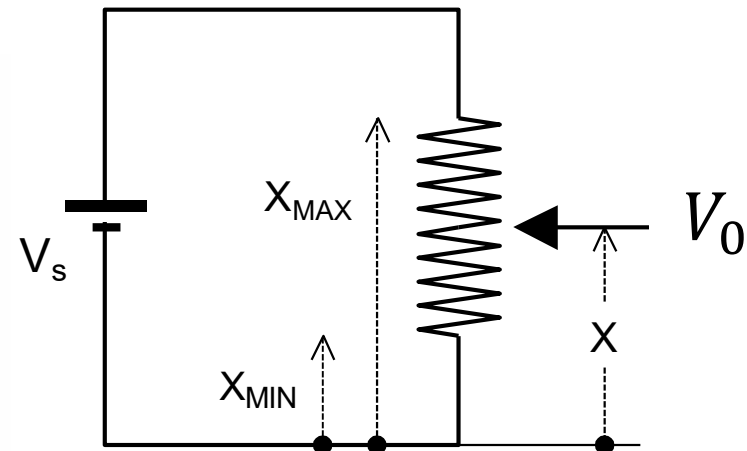
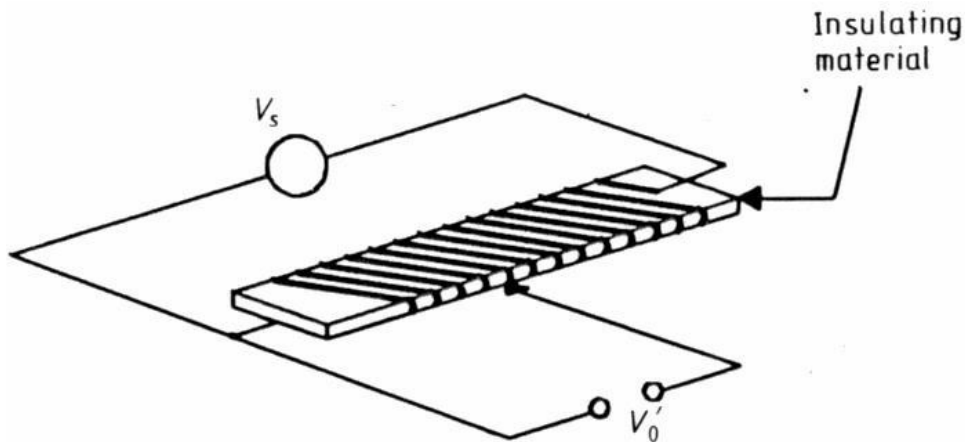


# Sensores Resistivos

- |     |                                      |  |
|-----|--------------------------------------|--|
| 1.  | Sensores resistivos                  | Resistive Sensors                      |
| 2.  | Potenciômetros                       | Potentiometers                         |
| 3.  | Dispositivos medidores de deformação | Strain Gages                           |
| 4.  | Detectores de temperatura resistivos | Resistive Temperature Detectors (RTDs) |
| 5.  | Termistores                          | Thermistors                            |
| 6.  | Magnetoresistores                    | Magnetoresistors                       |
| 7.  | Resistores dependentes de luz (LDRS) | Light-Dependent Resistors (LDRs)       |
| 8.  | Higrômetros resistivos               | Resistive Hygrometers                  |
| 9.  | Sensores de gás resistivos           | Resistive Gas Sensors                  |
| 10. | Sensores líquidos de condutividade   | Liquid Conductivity Sensors            |

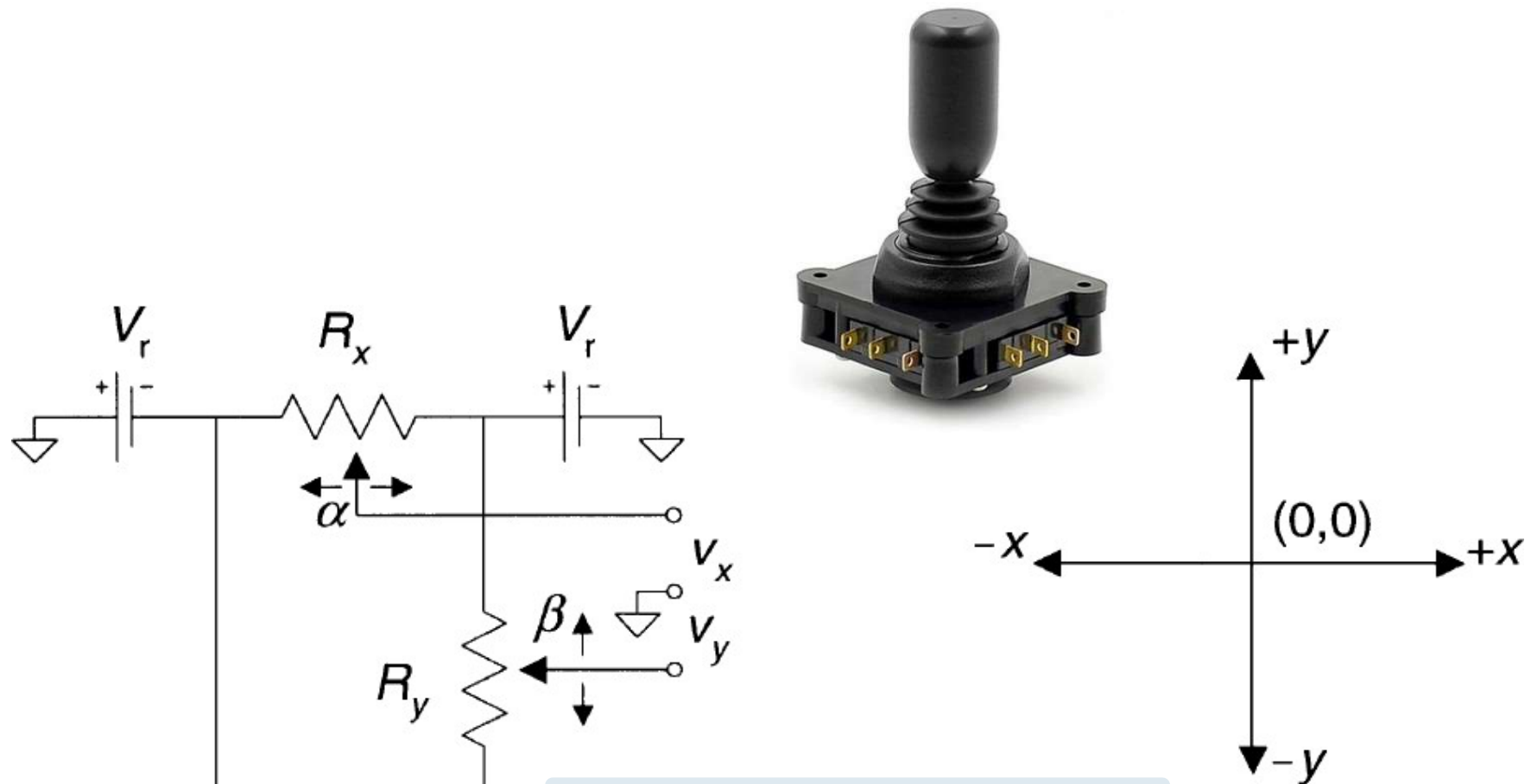
# Potenciômetros

- Uma resistência com um contato móvel (um potenciômetro) pode ser usada para medir deslocamentos lineares ou rotacionais.
  - Uma tensão conhecida é aplicada às extremidades do resistor
  - O contato é anexado ao objeto em movimento de interesse
  - A tensão de saída no contato é proporcional ao deslocamento
- **Notas**
  - Não linearidades como resultado de efeitos de carregamento
  - Resolução devido ao número limitado de voltas por unidade de distância
  - Desgaste de contato por fricção



$$V_0 = V_S \frac{X - X_{MIN}}{X_{MAX} - X_{MIN}}$$

# Example of application “Joy” stick



$$v_x = V_r(1 - 2\alpha)$$
$$v_y = V_r(1 - 2\beta)$$

# Strain gauges (Extensômetros)

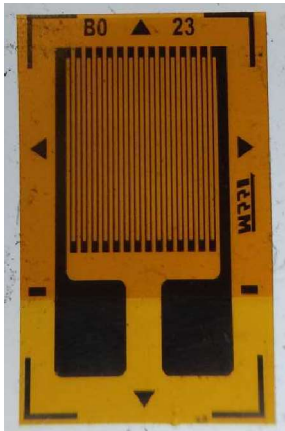
**Strain gauges são dispositivos cuja resistência muda com o estresse (efeito piezoresistivo)**

- Deformação (Strain) é uma mudança fracionária ( $\Delta L/L$ ) nas dimensões de um objeto como resultado de estresse mecânico (força/área)
- A resistência  $R$  de uma tira de material de comprimento  $L$ , seção transversal  $A$  e resistividade  $\rho$ , é então:  $R = \rho L/A$
- Diferenciando, o fator gauge  $G$  vem a ser:

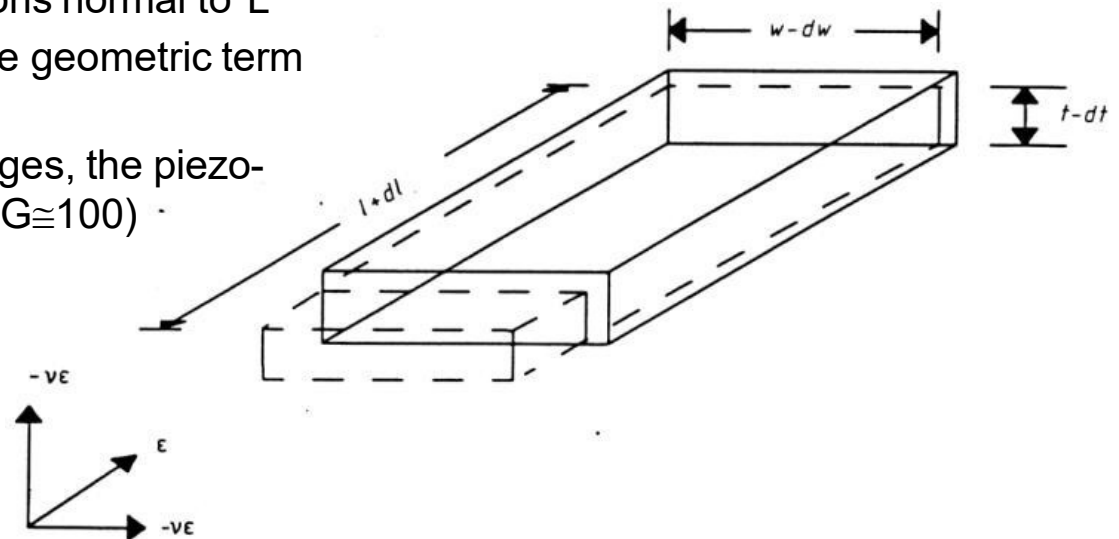
$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \cong (1+2\nu) \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \Rightarrow G = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \underbrace{(1+2\nu)}_{\text{GEOMETRIC EFFECT}} + \underbrace{\frac{\Delta \rho}{\rho \Delta L}}_{\text{PIEZO-RESISTIVE EFFECT}}$$

- Where  $\nu$  is the Poisson's ratio ( $\nu \cong 0.3$ ), which determines the strain in directions normal to  $L$

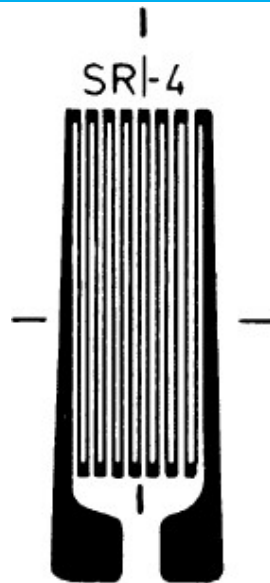
- In **metal** foil gauges, the geometric term dominates ( $G \cong 2$ )
- In **semiconductor** gauges, the piezo-resistive term dominates ( $G \cong 100$ )



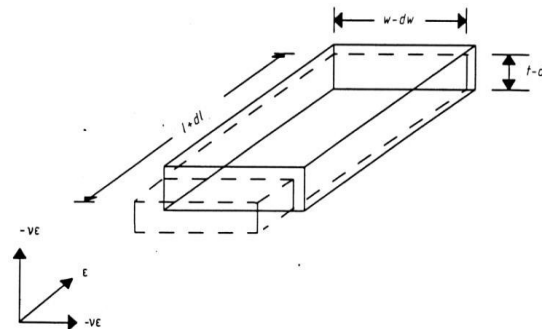
Foil Strain gauge



# Strain gauges



$$R = R_0 + dR = R_0 \left( 1 + \frac{dR}{R_0} \right) \cong R_0 (1 + G\varepsilon)$$



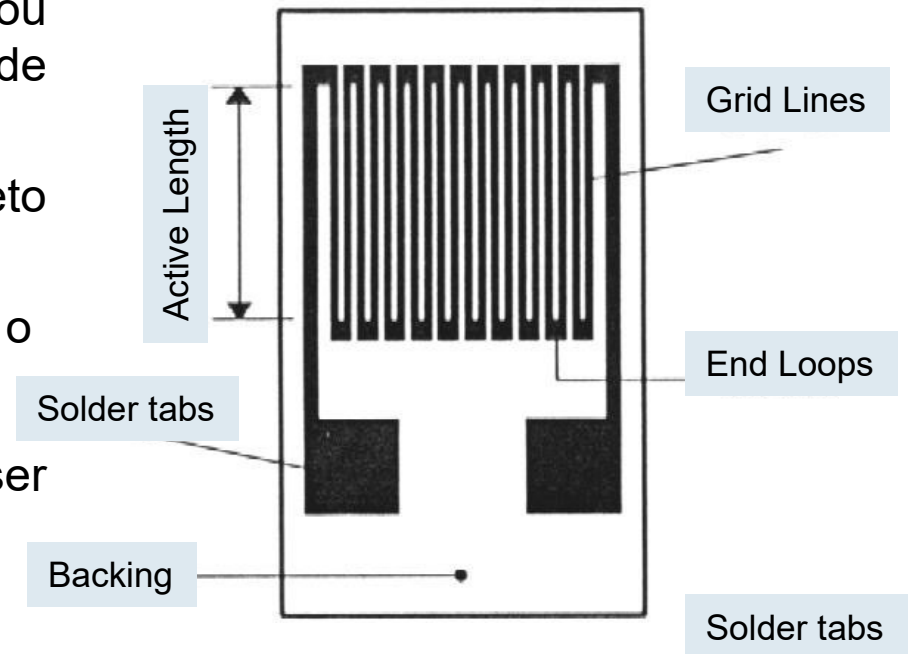
**TABLE 2.2 Typical Characteristics of Metal and Semiconductor Strain Gages**

Parameter	Metal	Semiconductor
Measurement range	0.1 $\mu\varepsilon$ to 50,000 $\mu\varepsilon$	0.001 $\mu\varepsilon$ to 3000 $\mu\varepsilon$
Gage factor	1.8 to 4.5	40 to 200
Nominal resistance, $\Omega$	120, 250, 350, 600, ..., 5000	1000 to 5000
Resistance tolerance	0.1 % to 0.35 %	1 % to 2 %
Active grid length, mm	0.4 to 150 Standard: 3 to 10	1 to 5

# Strain gauges

## Fabricação e uso

- Os strain gages típicos consistem em uma folha ou grade de arame coberta por duas folhas de isolamento (poli-imida)
- O *gauge* (transmissor/medidor) é fixado ao objeto desejado com um adesivo
- Os segmentos longitudinais estão alinhados com o
- direção do estresse
- A sensibilidade à tensão transversal pode ser desprezada

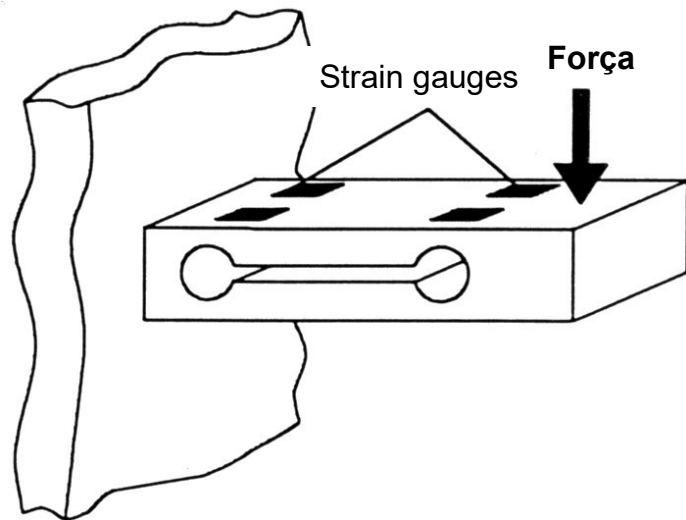


## Notas

- Os efeitos da temperatura são bastante pronunciados em *gauges* semicondutores
- Para compensar, é comum colocar “dummy” *gauges* que estão sujeitos às mesmas mudanças de temperatura, mas sem estresse mecânico
- As mudanças de resistência são tipicamente muito pequenas
- Strain gauges são quase invariavelmente usados em uma ponte de Wheatstone



# Sensores de força e aceleração



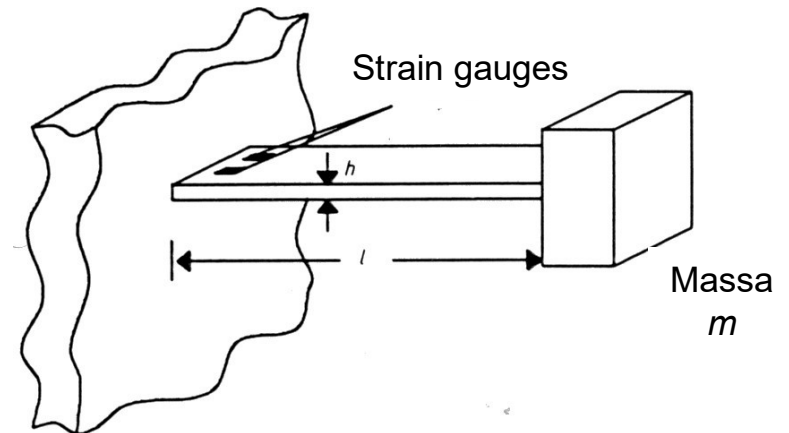
## Sensores de força

- A célula de carga de duplo feixe acoplado
- O recorte de sino de halteres fornece áreas de tensão máxima para os medidores
- A viga em balanço se dobra em forma de S
  - Isso induz tanto deformações de compressão quanto de tração que podem ser facilmente medidas em um arranjo em ponte.

## Sensores de aceleração

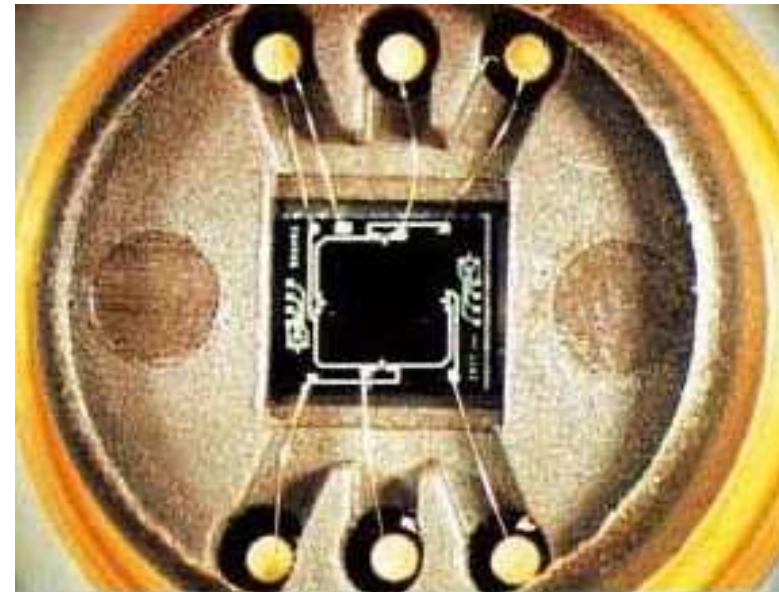
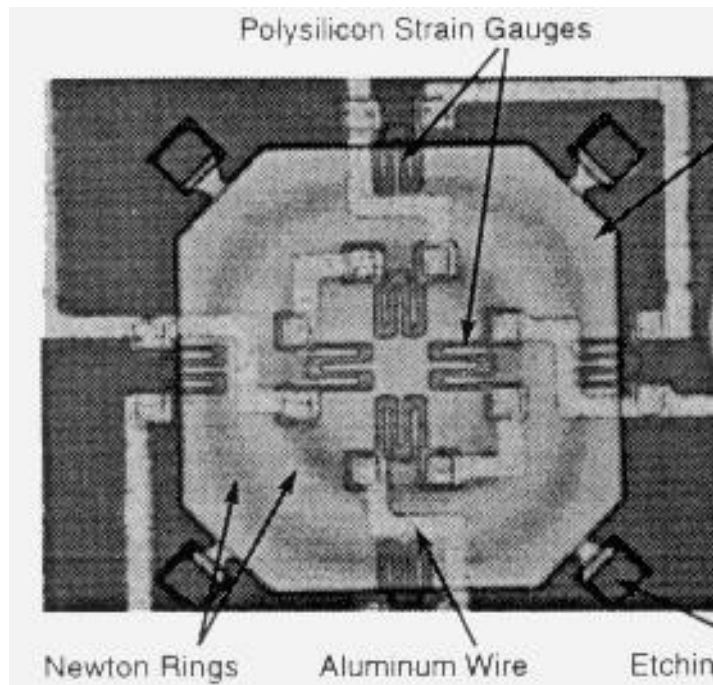
### Acelerômetro mola-massa-amortecedor

- Viga (cantilever) em balanço com extensômetros
- Uma massa sísmica é anexada à extremidade da viga
- O amortecimento geralmente é realizado com fluidos viscosos ou ímãs permanentes





# Sensor de pressão piezoresistivo



## Piezoresistive Pressure Sensors

### Wheatstone Bridge configuration

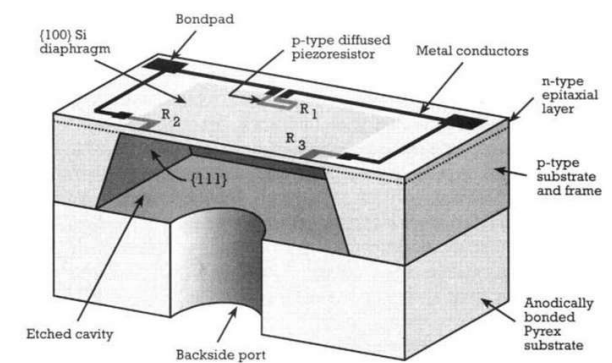
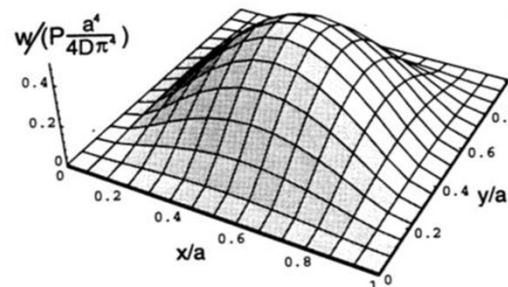
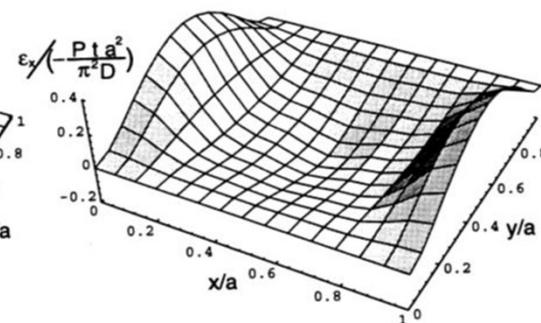


Illustration from "An Introduction to MEMS Engineering", N. Maluf

displacement

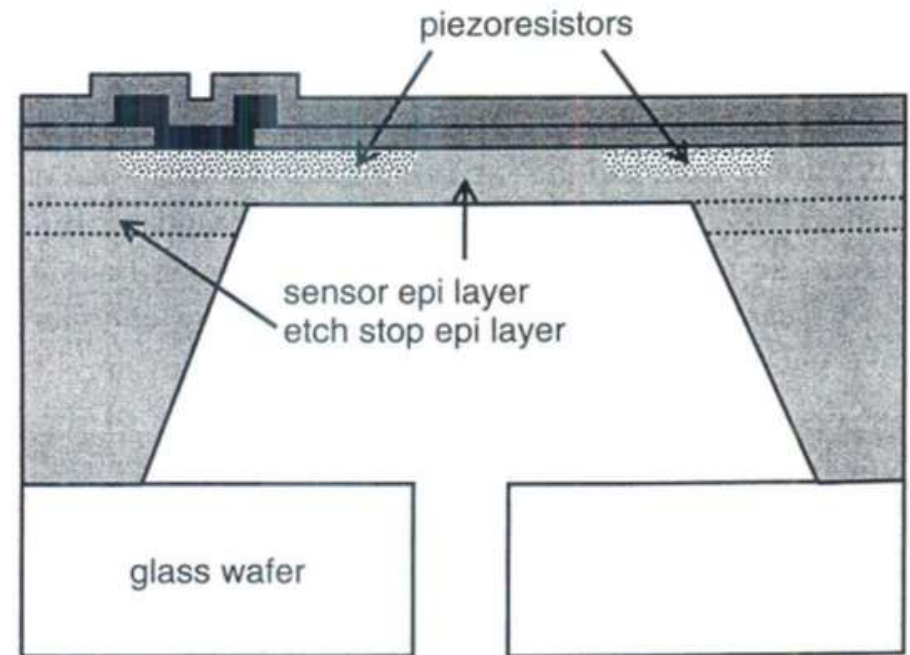
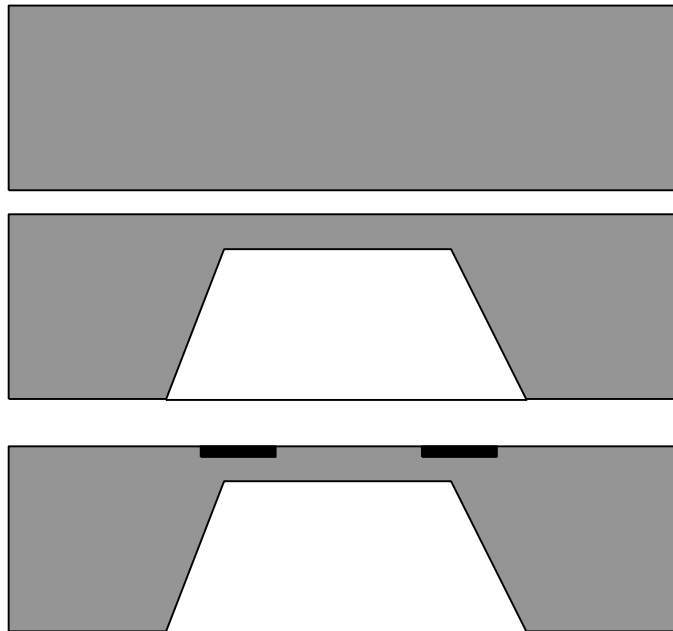


Stress

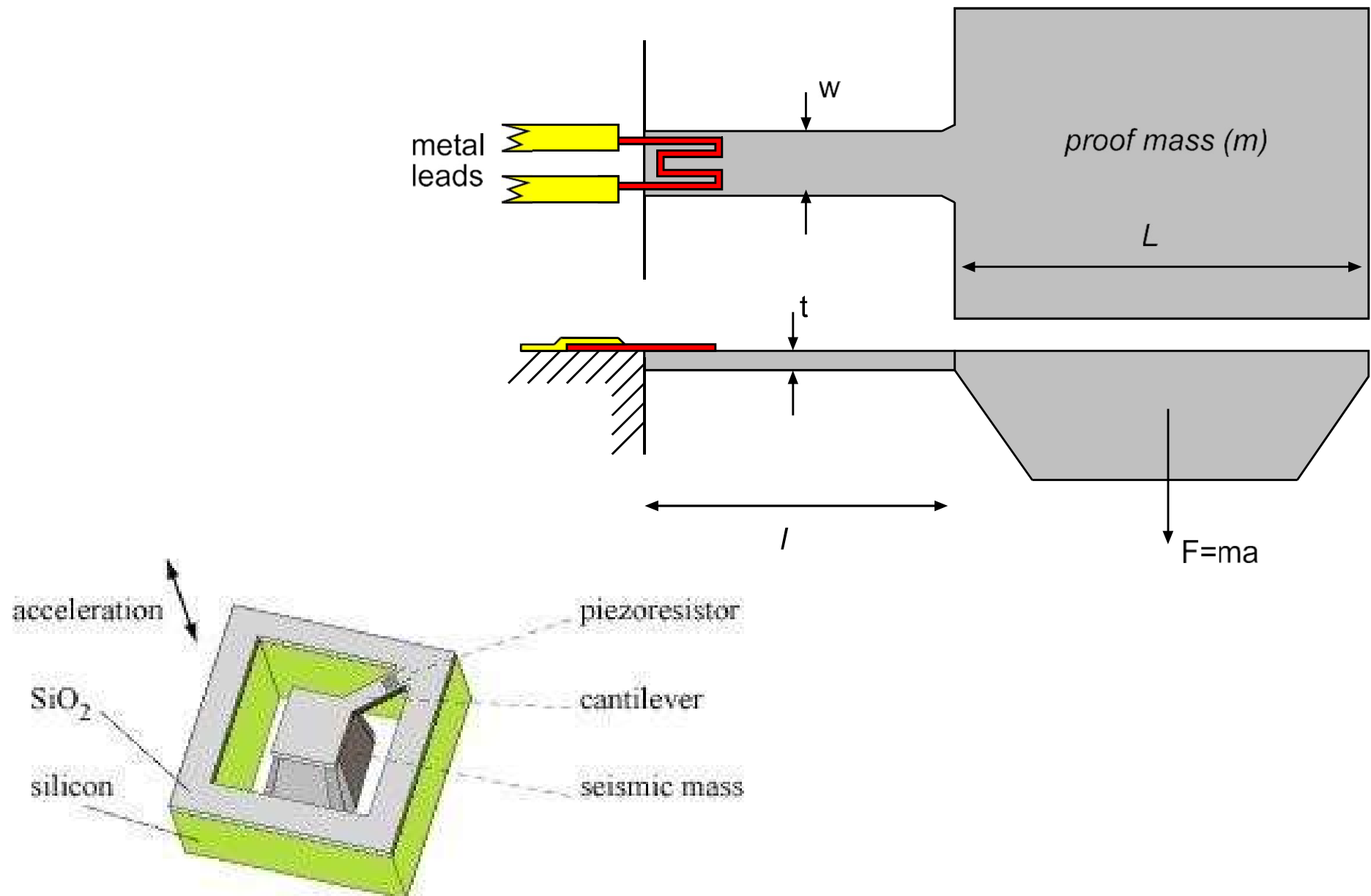


# Sensor de pressão piezoresistivo

## Processo de gravação (Etching process)



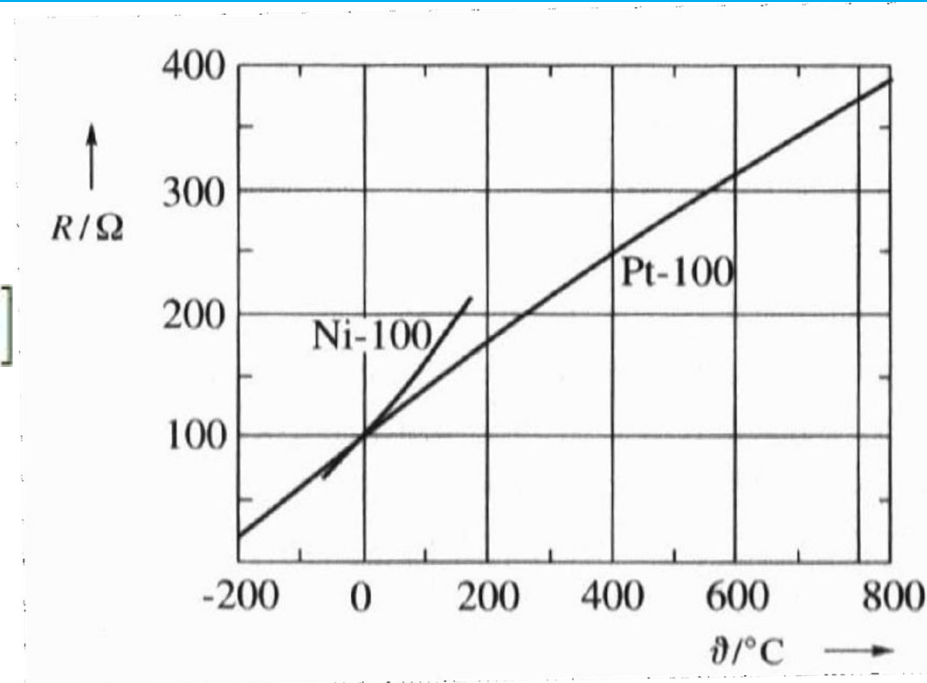
# Acelerômetro piezoresistivo



# Detectores de Temperatura Resistivos

## Termoresistor ou Termistor

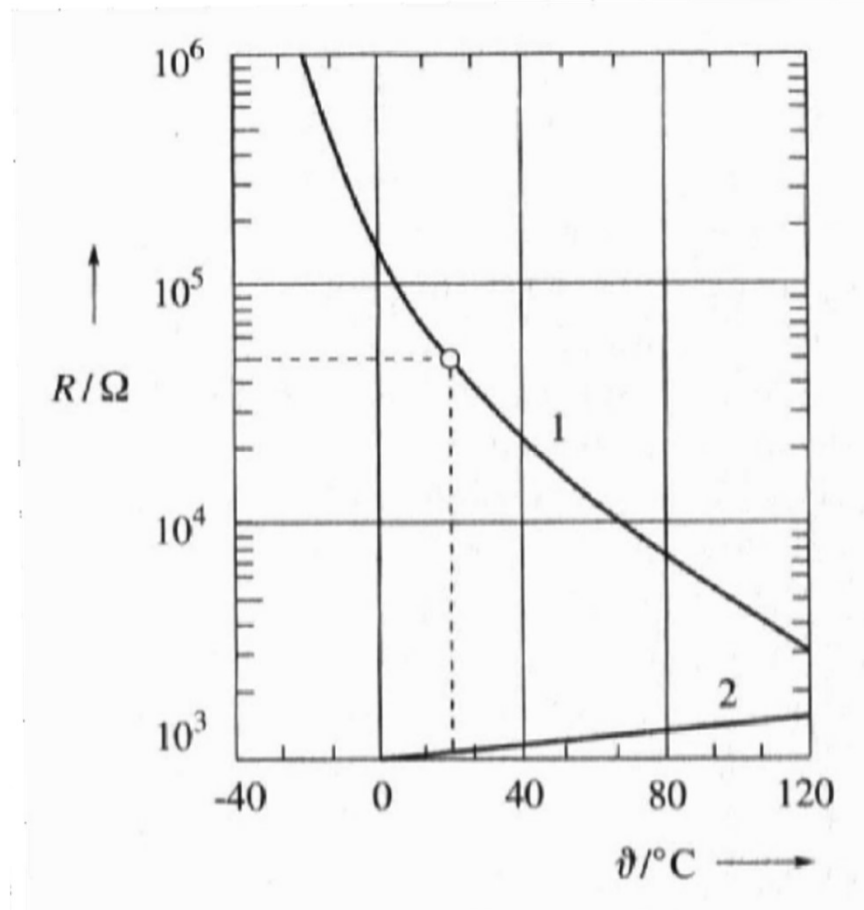
$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$



**TABLE 2.3 Specifications for Some Different Resistance Temperature Detectors**

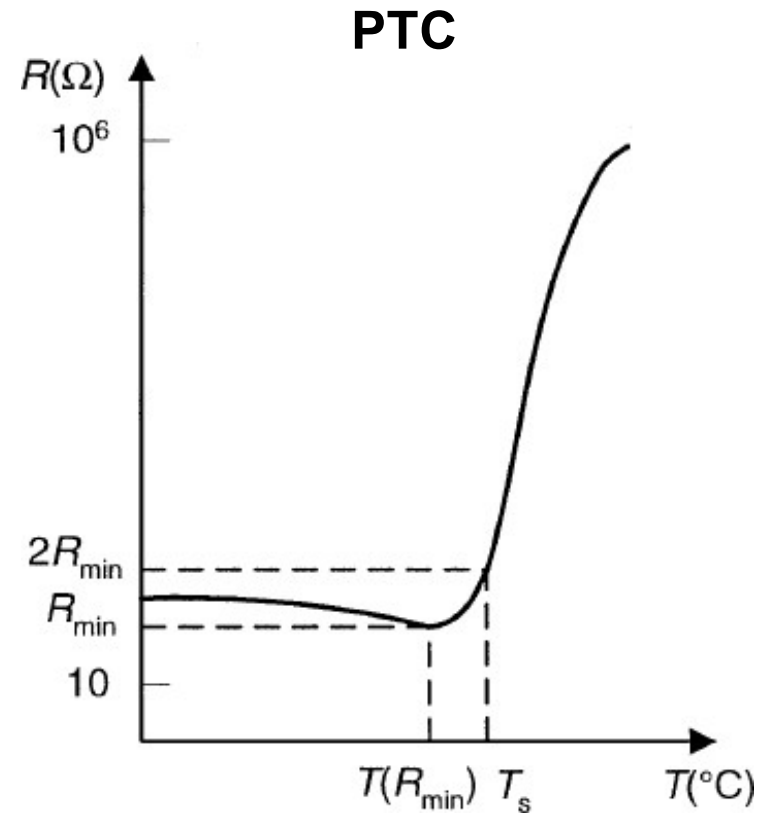
Parameter	Platinum	Copper	Nickel	Molybdenum
Span, °C	-200 to +850	-200 to +260	-80 to +320	-200 to +200
$\alpha^a$ at 0°C, (Ω/Ω)/K	0.00385	0.00427	0.00672	0.003786
$R$ at 0°C, Ω	25, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000	10 (20°C)	50, 100, 120	100, 200, 500, 1000, 2000

# Termoresistor ou Termistor



1: NTC  $R = R_0 e^{b\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$

2: RTD  
(Platinum)





# Magnetoresistores

A **magnetoresistência** é a tendência de um material alterar o valor de sua resistência elétrica quando um campo magnético é aplicado externamente.

AMR - resistor magnetorresistivo anisotrópico

GMR - O Giant efeito magnetorresistivo aparece quando constitui-se uma multicamada feita de camadas finas não magnéticas e magnéticas intercaladas.

**TABLE 2.5 General Characteristics of AMR, GMR, and Hall Effect Sensors**

Parameter	AMR Sensor	GMR Sensor	Hall Effect Sensor
Input range	25 mT	2 mT	60 mT
Maximal output	2 % to 5 % <sup>a</sup>	4 % to 20 % <sup>a</sup>	0.5 V/T
Frequency range	Up to 50 MHz	Up to 100 MHz	25 kHz typical 1 MHz feasible
Temperature coefficient	Fair	Good	Depends on model
Maximal temperature	200 °C	200 °C	150 °C
Cost (2000)	Medium–high	Low–medium	Low

# Magnetoresistores - Exemplos

**TABLE 2.6** Some Characteristics of Commercial Magnetoresistive Sensors

Parameter	KMZ10A <sup>a</sup>	DM 208 <sup>b</sup>	GMR B6 <sup>c</sup>	NVS 5B50 <sup>d</sup>
Field span, kA/m <sup>e</sup>	−0.5 to +0.5	—	−15 to +15	−4 to +4
Sensitivity, (mV/V)/(kA/m)	14.0	3.5	8	11 to 16
$R_{\text{bridge}}$ , k $\Omega$	1.2	0.65	0.7	5
Maximal operating voltage, V	10	13	7	24
Operating temperature, °C	−40 to +150	—	−40 to 150	−50 to 150

<sup>a</sup> AMR, Philips Semiconductors.

<sup>b</sup> AMR, Sony.

<sup>c</sup> GMR, Infineon (Siemens).

<sup>d</sup> GMR, Nonvolatile Electronics.

<sup>e</sup> In air, 1 kA/m corresponds to 1.26 mT.

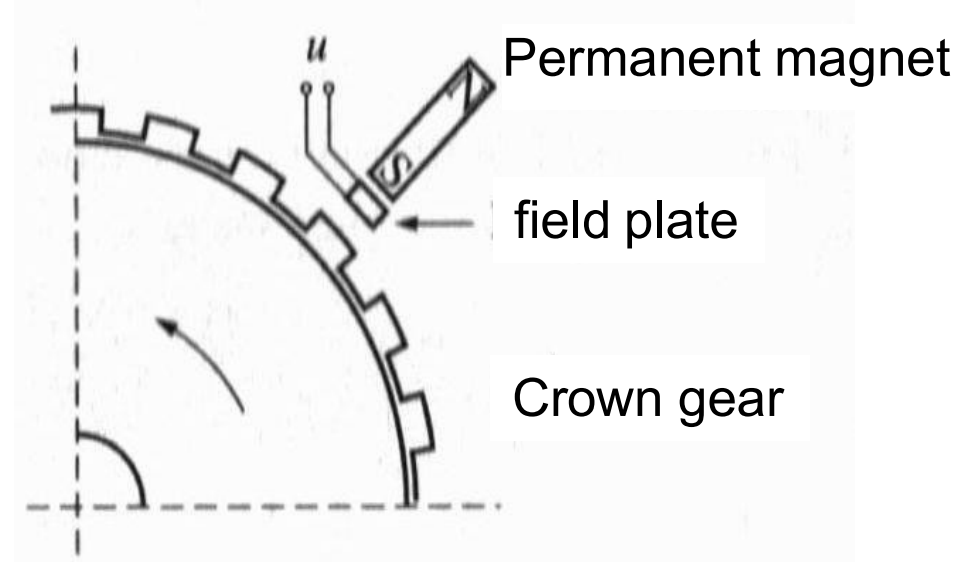


# Magnetoresistores - Exemplos

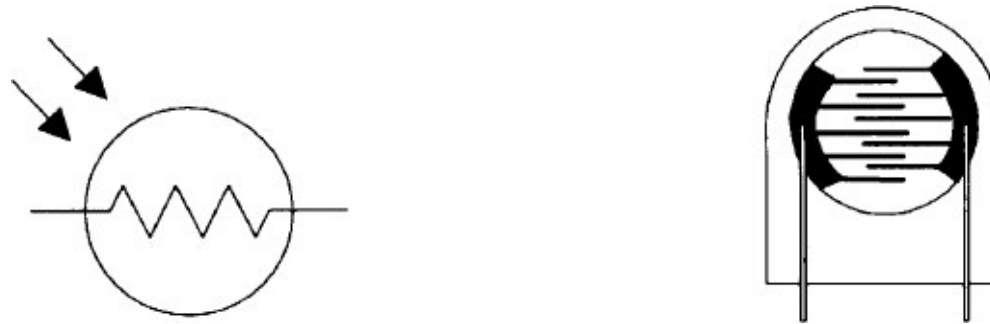
## Medição de Velocidade: Sensor Magnetoresistivo

Com uma placa de campo, utiliza-se da dependência da resistência elétrica de um resistor na força de um campo magnético.

Utilizando-se de sequências de fendas de dentes não simétricas, até mesmo a direção da velocidade pode ser recuperada.

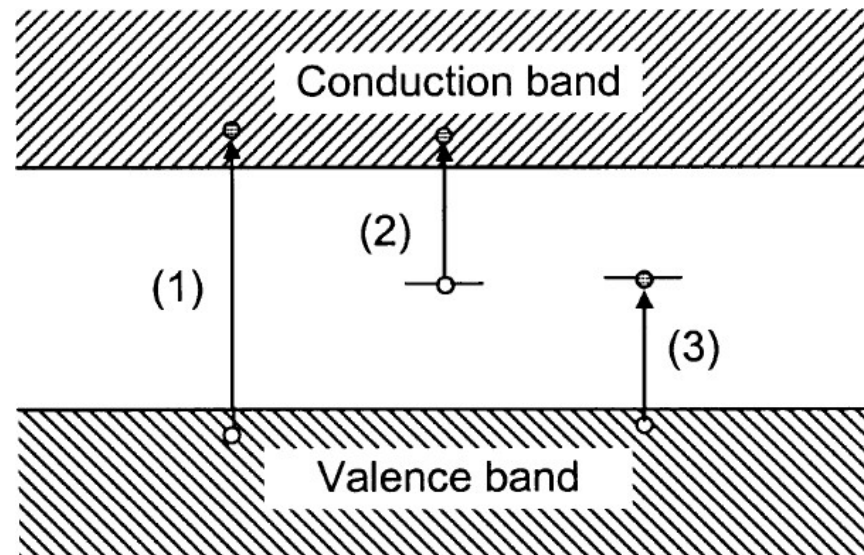


# Light-dependent resistor (LDR)

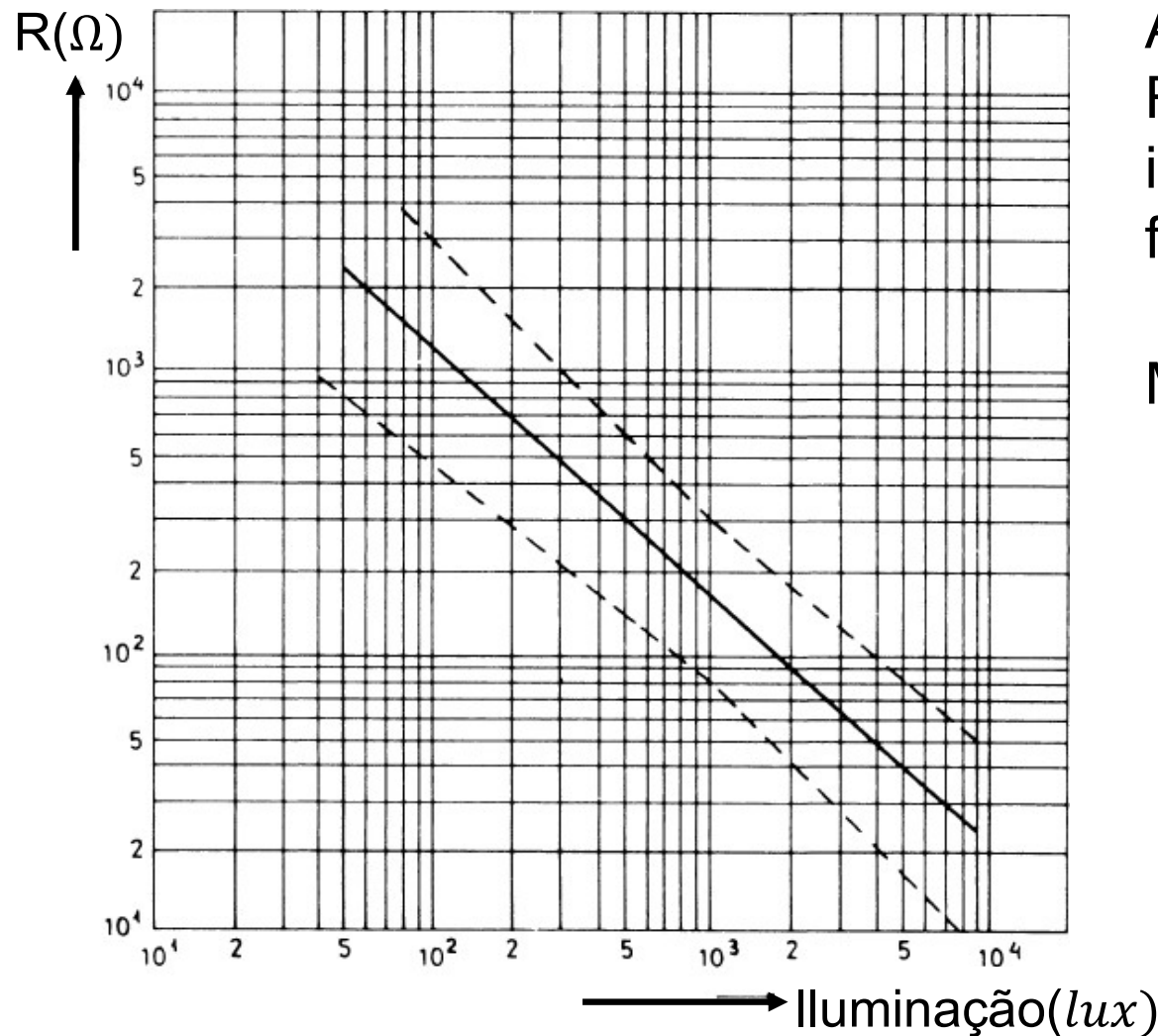


Princípio de funcionamento: efeito fotoelétrico interno

$$E = h \times f$$



# LDRs – Comportamento

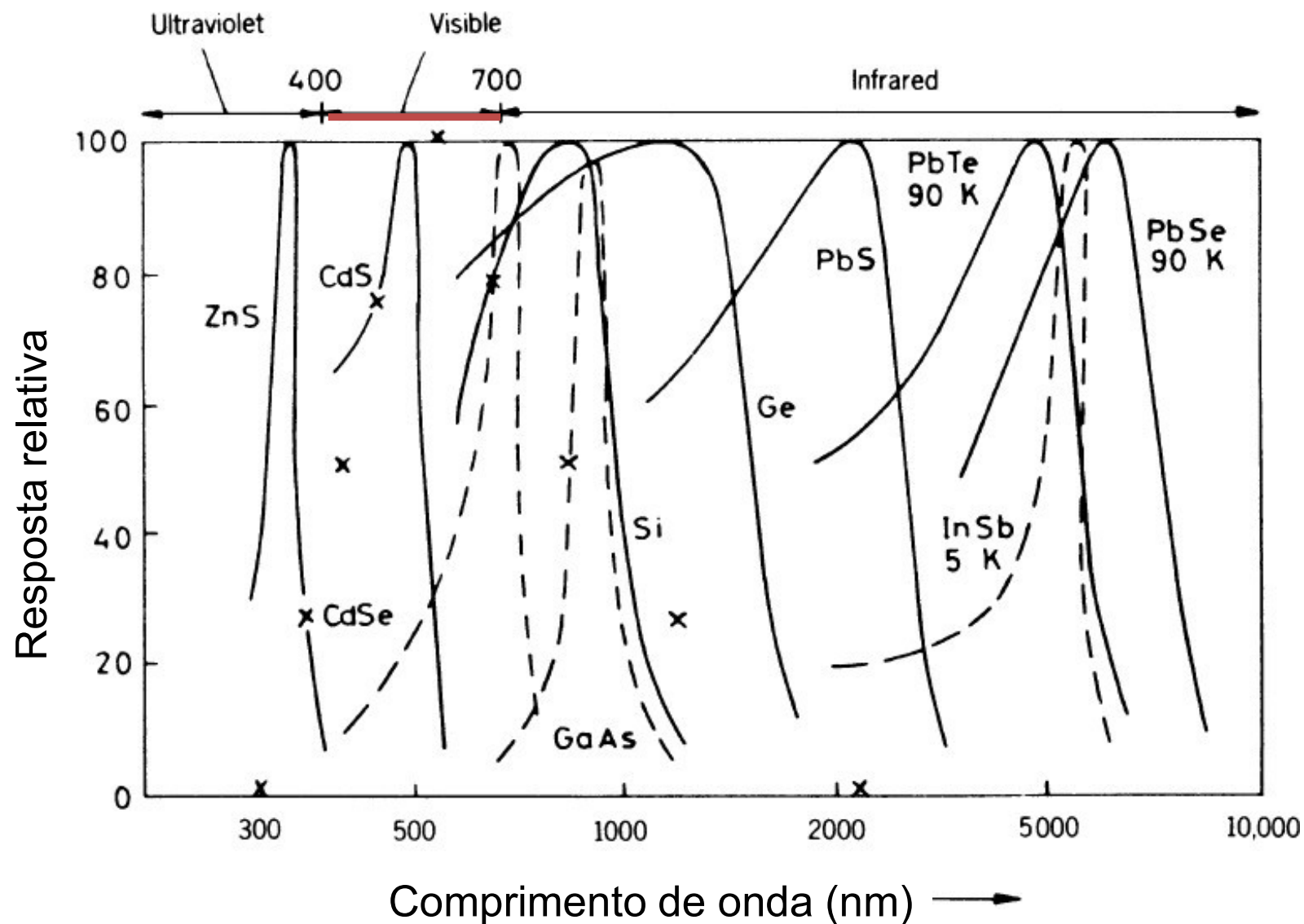


A relação entre a resistência  $R$  para um fotocondutor e a iluminação  $E_v$  (e.g. in lux) é fortemente não linear.

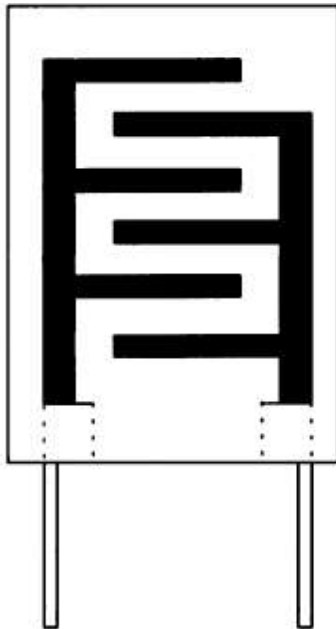
Modelo simples:

$$R = A \times E_v^{-\alpha}$$

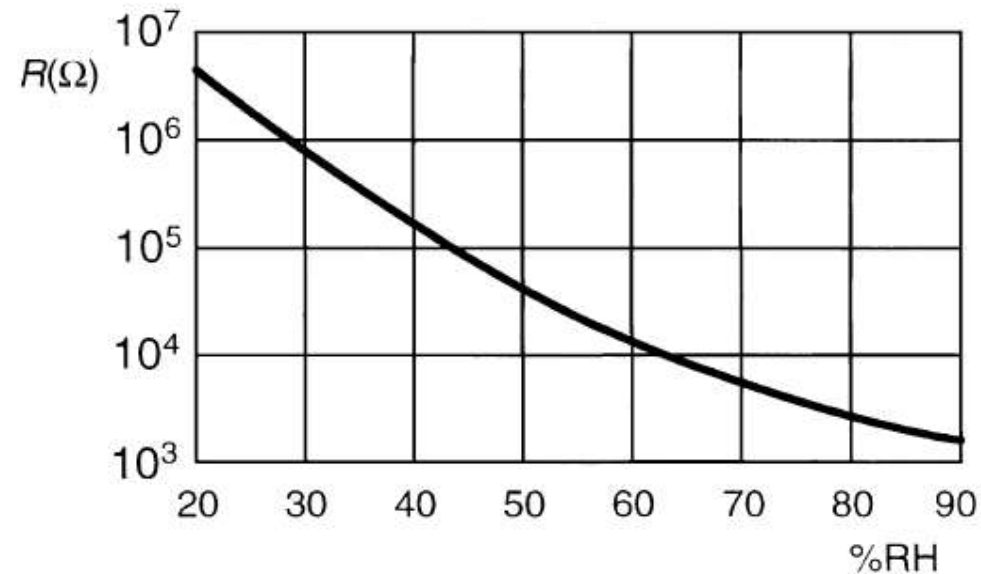
# LDRs – Dependência do comprimento de onda



# Higrômetros Resistivos



(a)



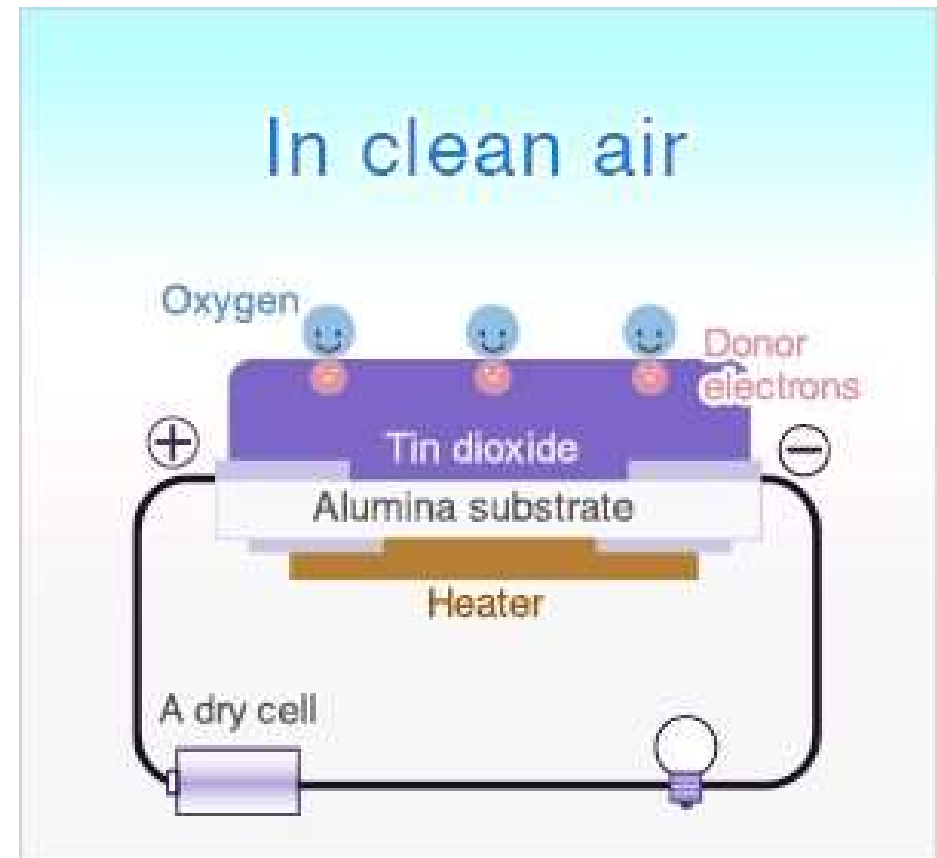
(b)

**Figure 2.30** Resistive humidity sensor based on a bulk polymer and its resistance–humidity characteristic (from Ohmic Instruments).

# Sensores de gás resistivos - Princípio

Os sensores resistivos de gás semicondutor dependem da mudança da condutividade da superfície, ou do volume, de alguns semicondutores de óxido metálico, dependendo da concentração de oxigênio na atmosfera ambiente.

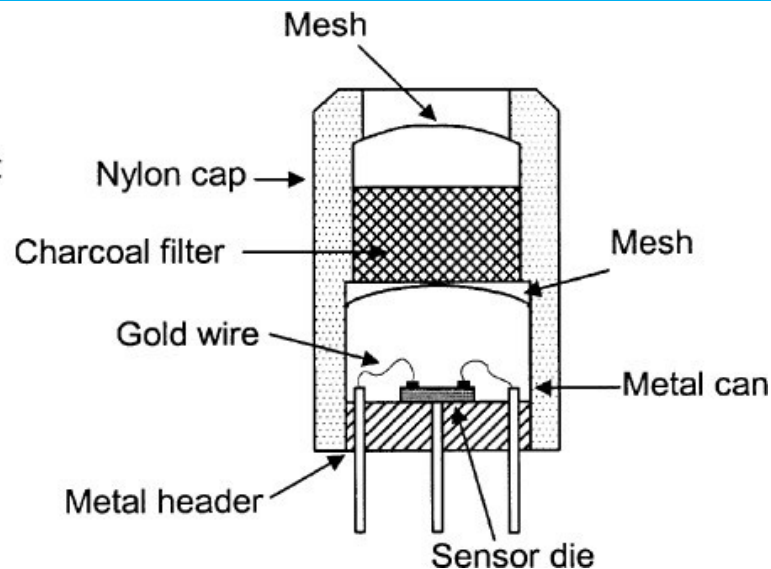
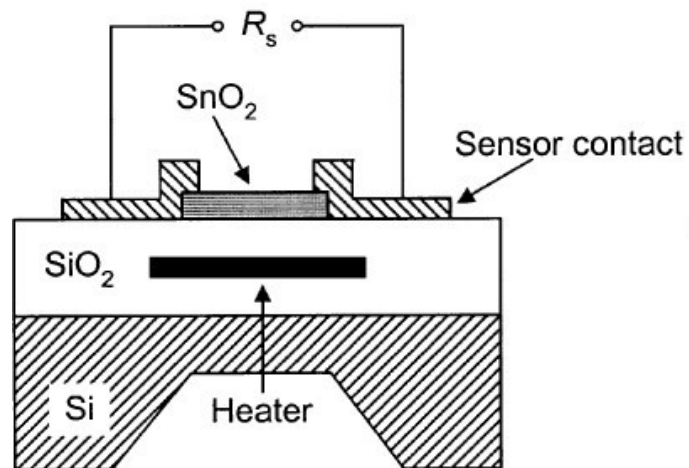
Outros gases reagem com o oxigênio e podem ser detectados indiretamente.



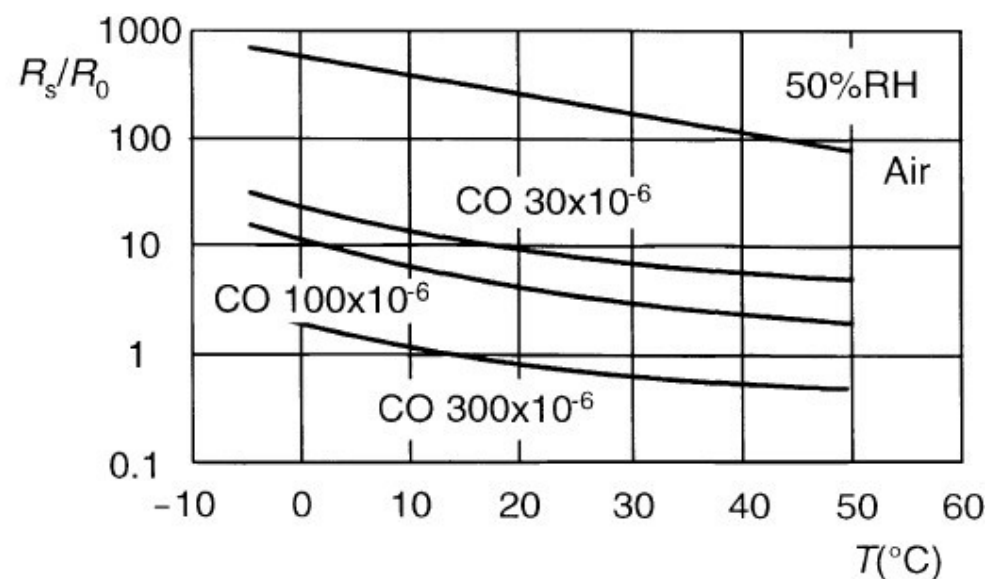
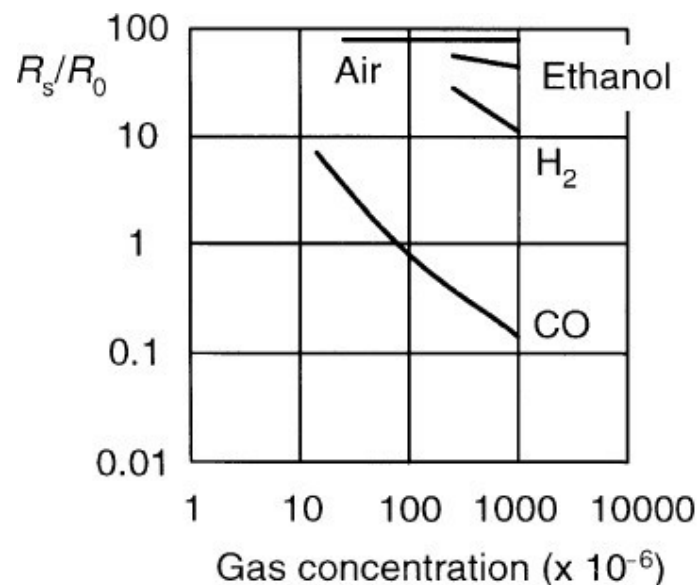
<http://www.figarosensor.com/technicalinfo/principle/mos-type.html>



# Sensores de gás resistivos - Exemplos

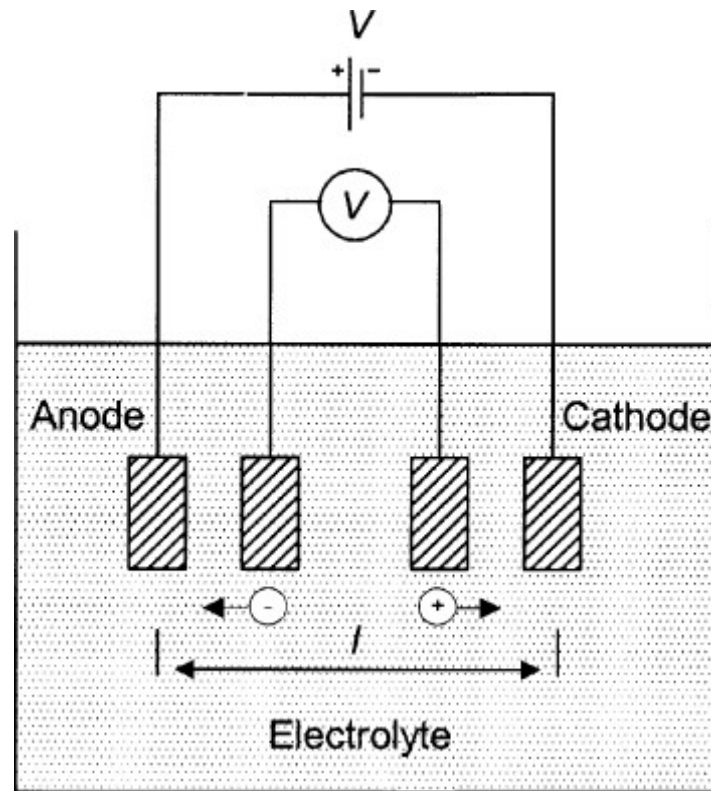


TGS2442

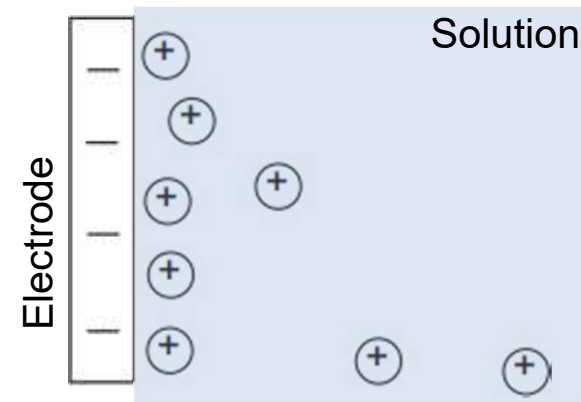




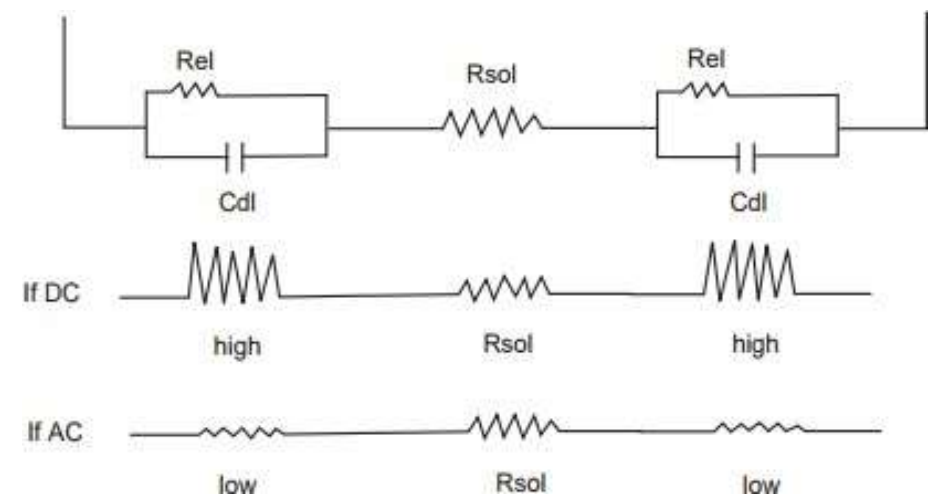
# Sensores de condutividade (Liquid Conductivity Sensors)



Polarization effects (double layer capacitor)



Equivalent circuit

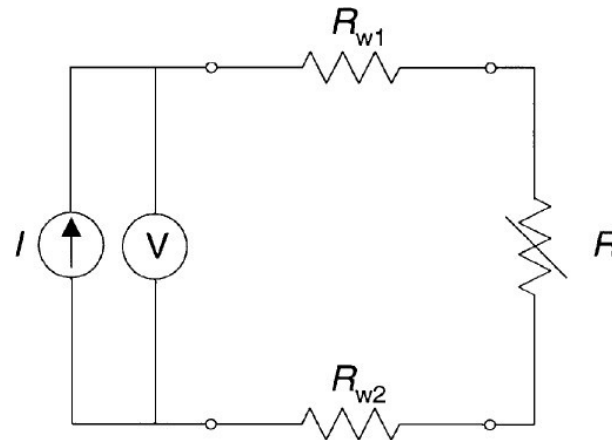


# Condicionamento de sinal para sensores resistivos

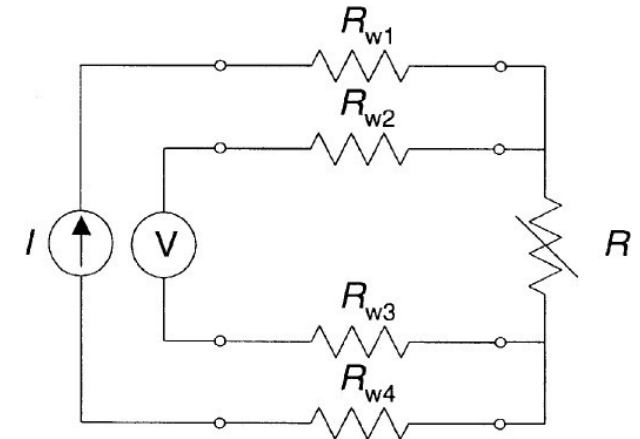
---

# Circuitos Básicos

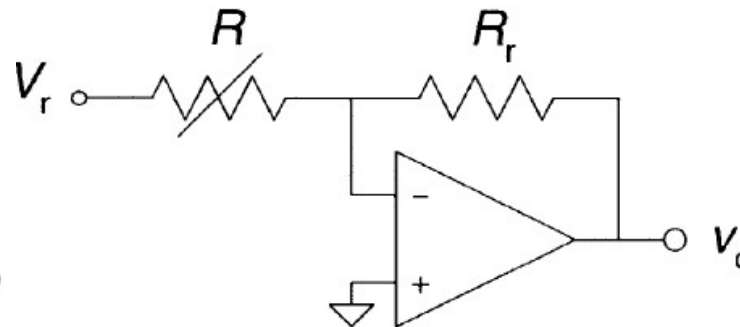
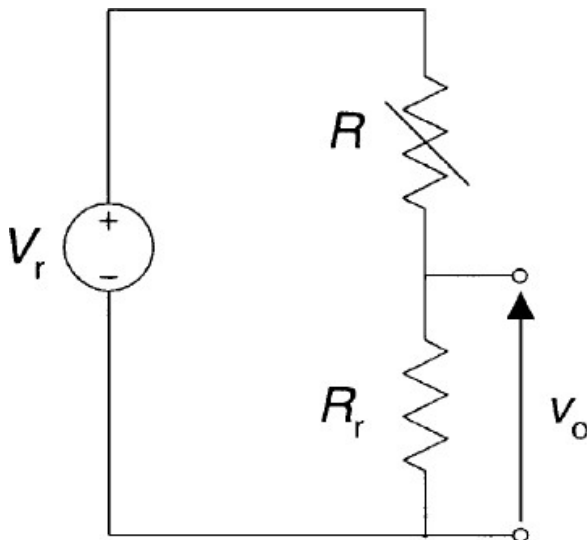
## Método 2-fios ou 4 fios.



Compensa as resistências dos fios



## Divisor de Voltagem



## Diferença entre 2 fios e 4 fios?

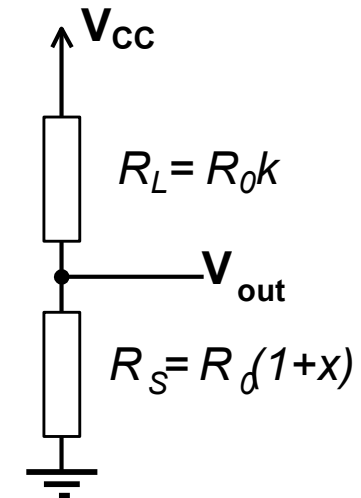
Olá, Em resumo, um instrumento de 2 fios (4-20mA) é alimentado pelo circuito de corrente. Um instrumento de 4 fios é alimentado por uma fonte externa.

# Divisor de Voltagem

## ■ Pressupostos

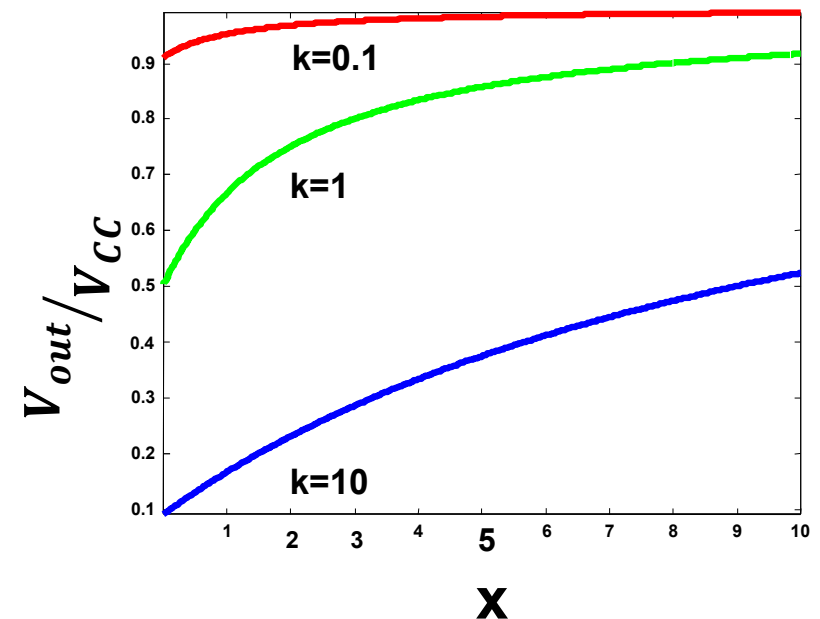
- Interessado em medir a mudança fracionária na resistência  $x$  do sensor:  $R_S = R_0(1+x)$
- $R_0$  é a resistência do sensor na ausência de um estímulo
- A carga do resistor é expressa:  $R_L = R_0 k$  por conveniência

$$\begin{aligned} V_{out} &= V_{CC} \frac{R_S}{R_S + R_L} = \\ &= V_{CC} \frac{R_0(1+x)}{R_0(1+x) + R_0 k} = V_{CC} \frac{1+x}{1+x+k} \end{aligned}$$



## Perguntas

- E se invertermos  $R_S$  e  $R_L$ ?
- Como podemos recuperar  $R_S$  a partir de  $V_{out}$ ?



# Ponte Wheatstone

- **Um circuito que consiste em 2 divisores**

- Um divisor de tensão de referência (esq)
- Um sensor de divisão de tensão

- **Modos de operação da ponte de Wheatstone**

- Modo nulo

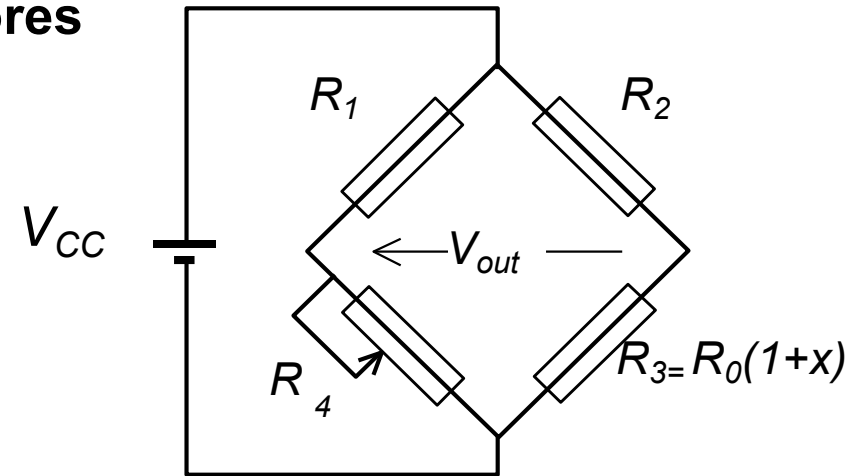
- ✓  $R_4$  ajustado até que a condição de equilíbrio seja atendida:

$$V_{out} = 0 \Leftrightarrow R_3 = R_4 \frac{R_2}{R_1}$$

**Vantagem: a medição é independente das flutuações em  $V_{CC}$**

- Modo de deflexão

- ✓ A tensão desbalanceada  $V_{out}$  é usada como saída do circuito



$$V_{OUT} = V_{CC} \left( \frac{R_3}{R_2 + R_3} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right)$$

**Vantagem: velocidade**

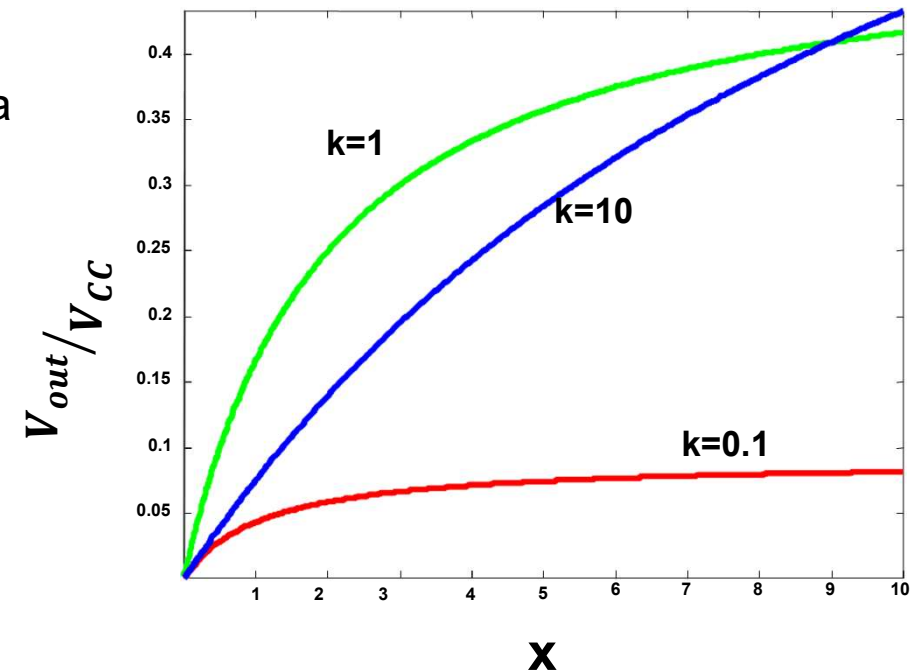
# Ponte Wheatstone

## Pressupostos

Deseja medir as alterações de resistência fracionária do sensor  $R_S = R_0(1+x)$

- A ponte está operando perto da condição de equilíbrio:

$$k = \frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_0}$$



A tensão de saída torna-se

$$\begin{aligned} V_{out} &= V_{cc} \left( \frac{R_0(1+x)}{R_0k + R_0(1+x)} - \frac{R_4}{R_4k + R_4} \right) = \\ &= V_{cc} \left( \frac{(1+x)}{k + (1+x)} - \frac{1}{k+1} \right) = V_{cc} \frac{kx}{(1+k)(1+k+x)} \end{aligned}$$