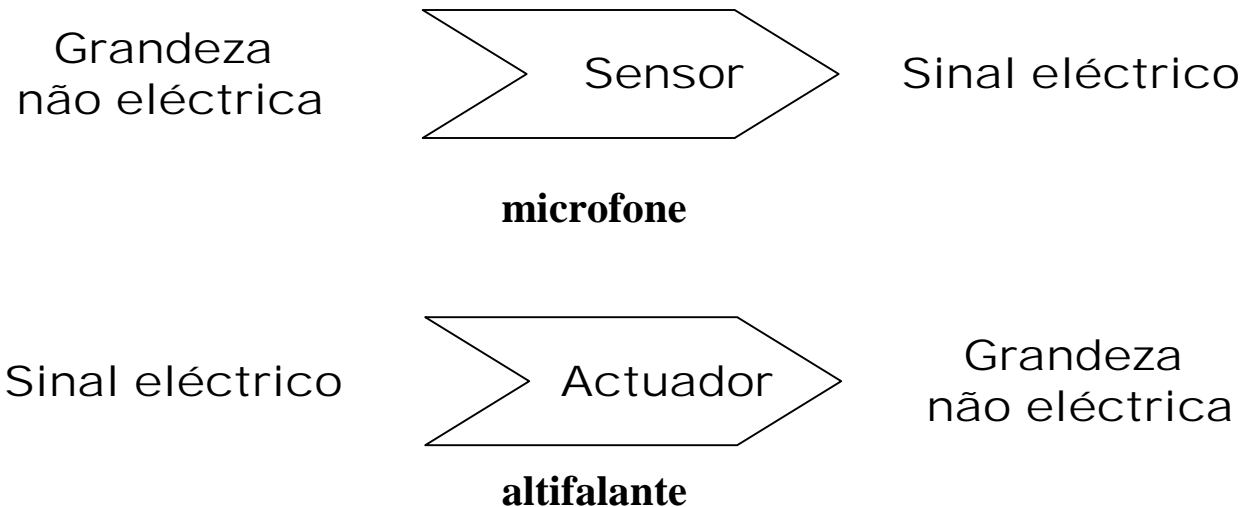


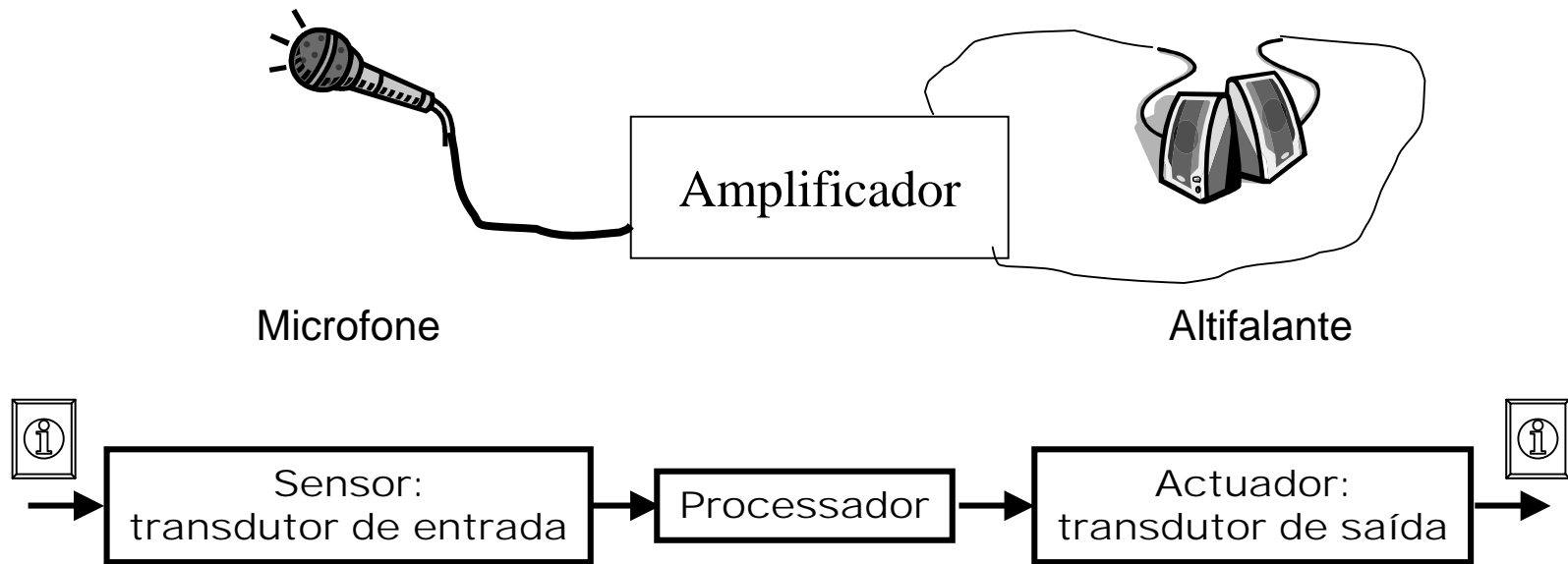
# Transdutores, sensores e actuadores

- **Transdutor:** dispositivo que converte uma forma de energia noutra

**Transdutor eléctrico** converte grandezas não eléctricas (pressão, temperatura, etc) em sinais eléctricos e vice-versa.



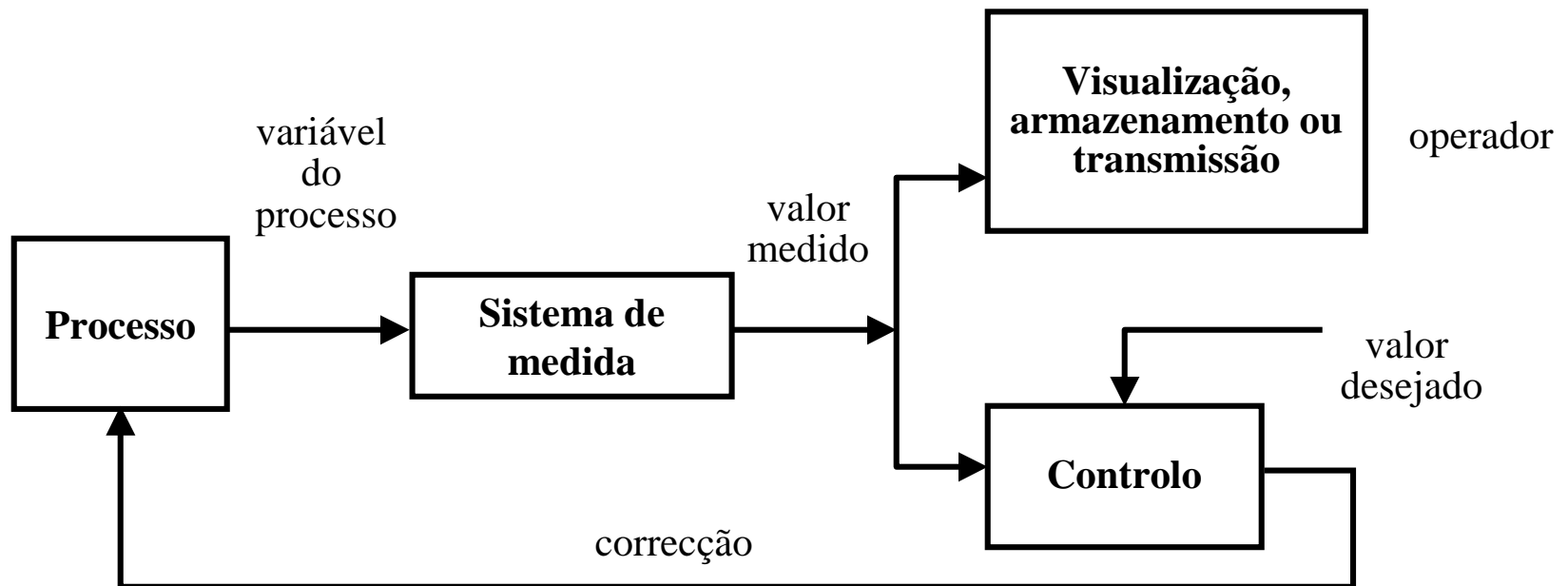
# Transdutores, sensores e actuadores



- Necessidade de processar (modificar ou acondicionar) o sinal eléctrico do sensor, utilizando Ampops, filtros, conversores A/D, etc..

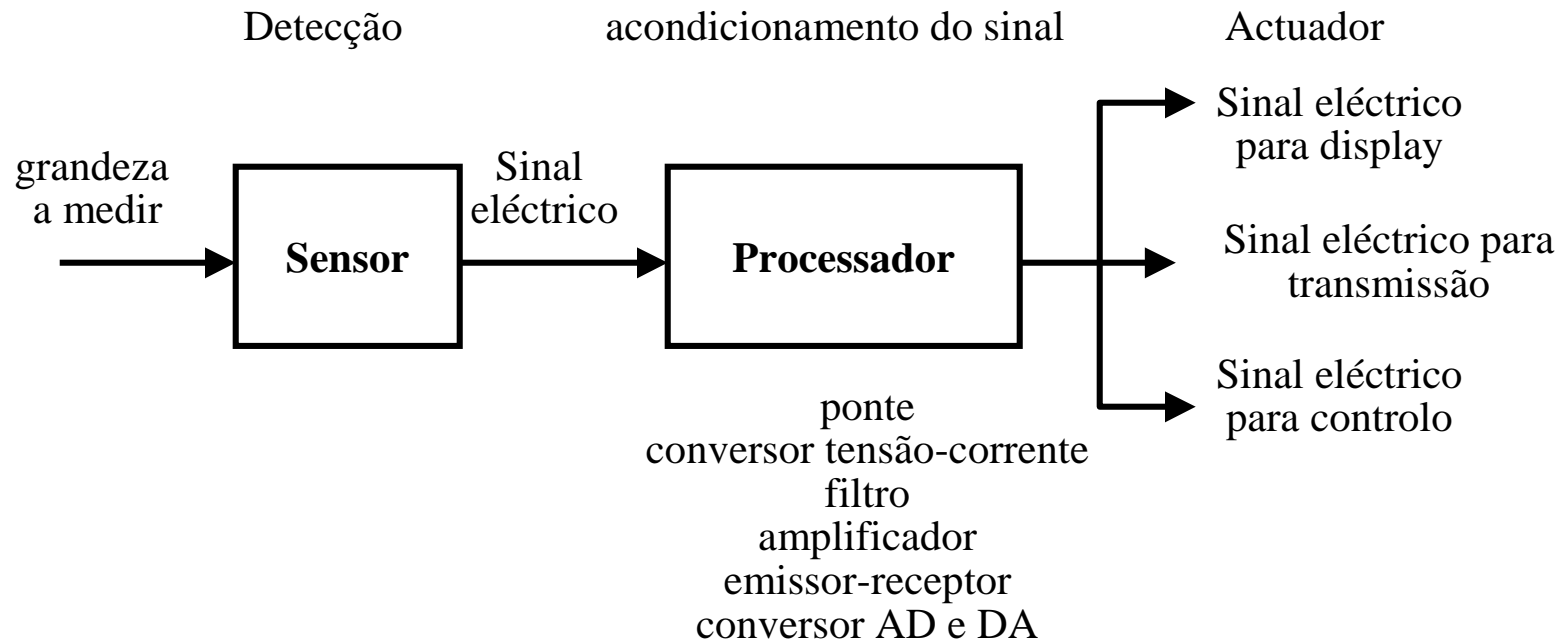
# Transdutores nos sistemas de instrumentação

- São utilizados transdutores em sistemas de instrumentação para medir grandezas ou controlar a operação de um processo.



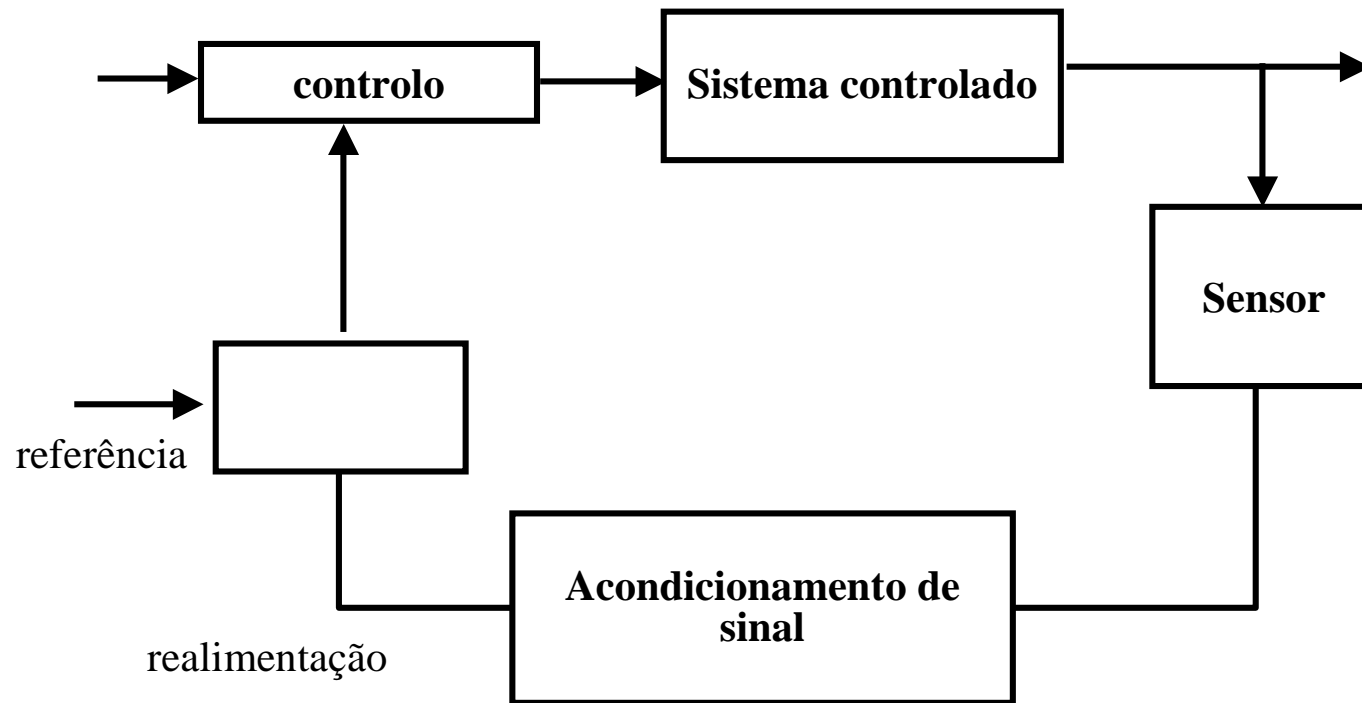
# Sensores nos sistemas de medida

- São utilizados sensores no sistema de medida.

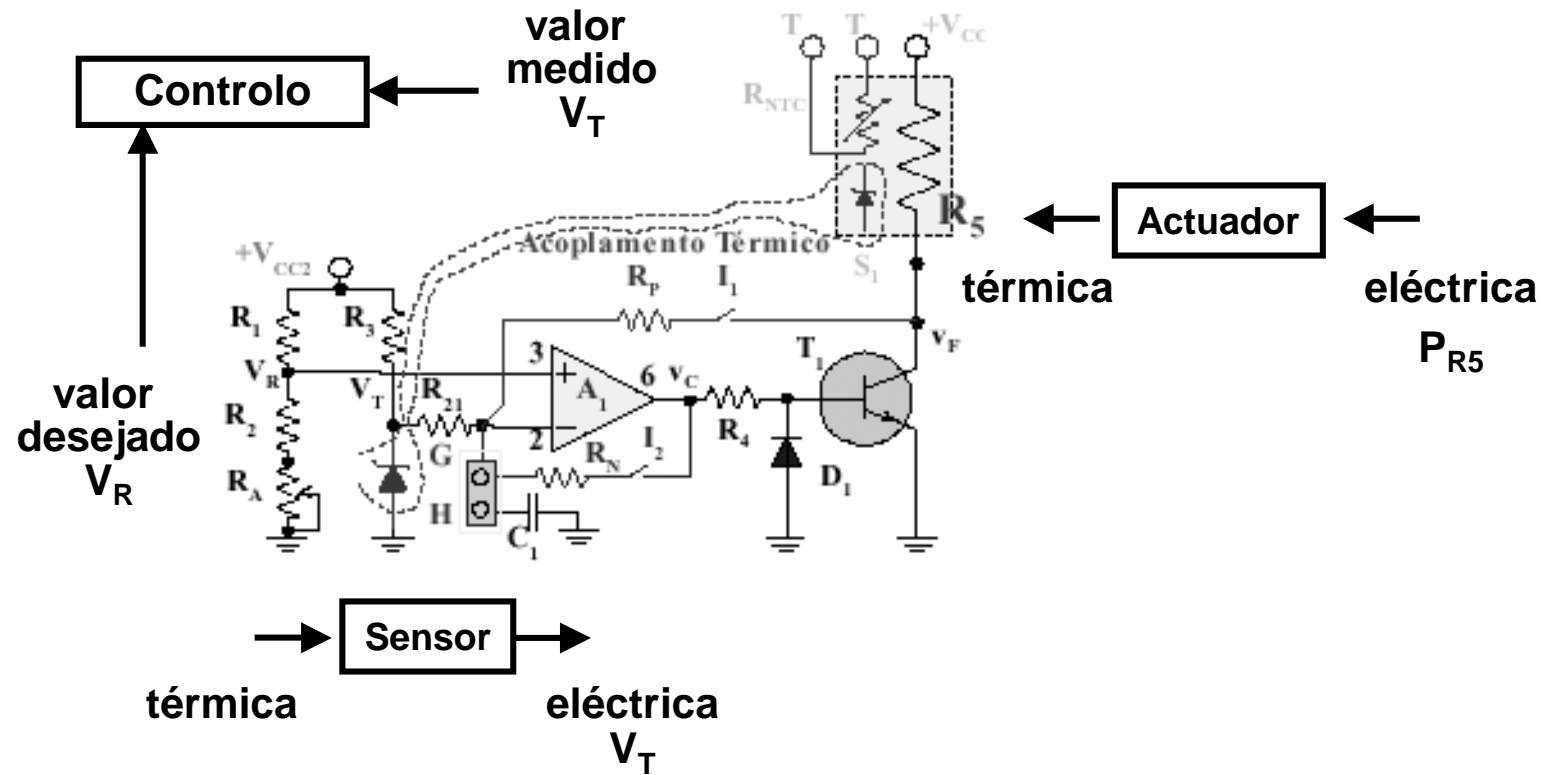


# Transdutores nos sistemas de instrumentação

- Sistema básico de controlo



# Exemplo: sensor e actuador eléctricos



# Classificação dos sensores

Várias formas de classificação:

- o campo de aplicação  
biomedicina, meteorologia, consumo, automação, etc.
- a função que realizam  
ou o que medem: pressão, aceleração, campo magnético, temperatura, capacidade térmica, etc.
- o princípio físico de funcionamento  
transdução resistiva, transdução capacitiva, transdução indutiva, transdução piezoelétrica, transdução piezoresistiva, transdução fotovoltaica, transdução termoelétrica, etc.
- forma de energia do sinal que convertem  
mecânica, magnética, radiante, térmica e elétrica (não há conversão da forma de energia do sinal)

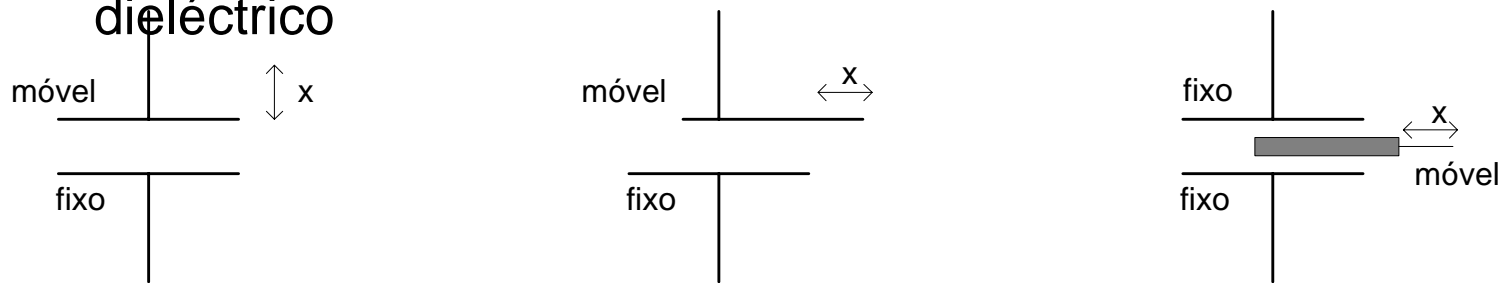
# Princípio físico de funcionamento

- Transdução resistiva
  - Resistência eléctrica varia com a temperatura (**RTD – Resistance Temperature Detector**)
- Transdução fotoresistiva
  - Condutividade eléctrica do material depende da intensidade luminosa que neles incide (**LDR – Light Dependent Resistor**)
- Transdução potenciométrica
  - Resistência eléctrica varia por variação de um contacto
- Transdução de galga extensométrica:
  - Resistência eléctrica varia por num fio condutor devido ao efeito de uma força (strain gauge).

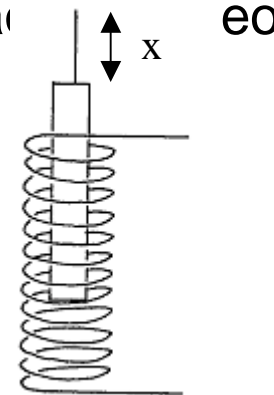
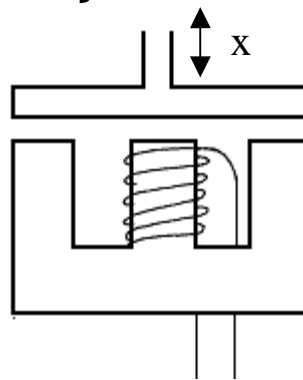


# Princípio físico de funcionamento

- Transdução capacitiva: variação da capacidade por alteração no posicionamento dos eléctrodos ou por alteração do dieléctrico

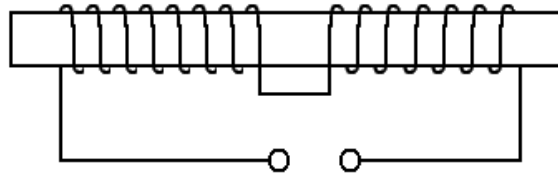


- Transdução indutiva: variação da auto-indução de uma bobina por variação externa do fluxo ou variação

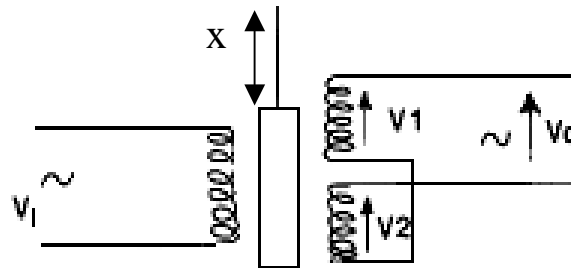


# Princípio físico de funcionamento

- Transdução electromagnética: por variação fluxo magnético por variação do núcleo

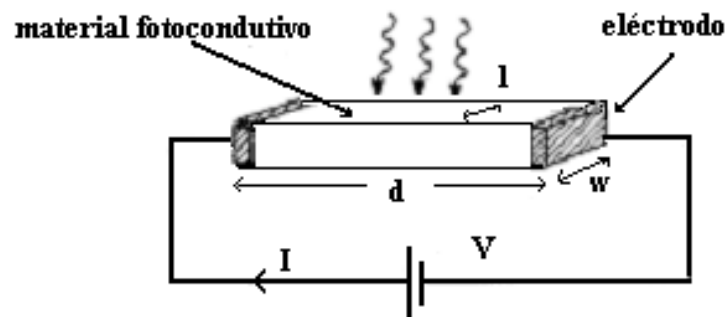


- Transdução da relutância magnética por variação do núcleo



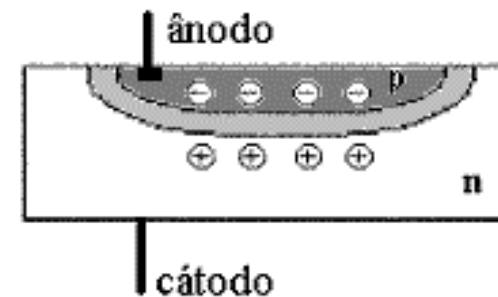
# Princípio físico de funcionamento

- Transdução piezoelétrica: variação da carga ou da tensão eléctrica quando sujeitos a uma força de compressão ou tensão
- Transdução fotocondutiva: variação da tensão por variação da incidência de luz

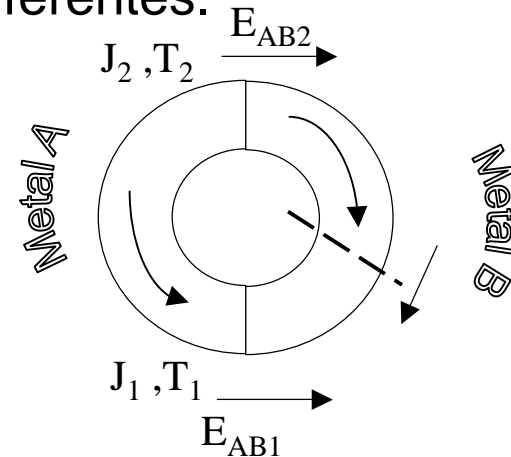
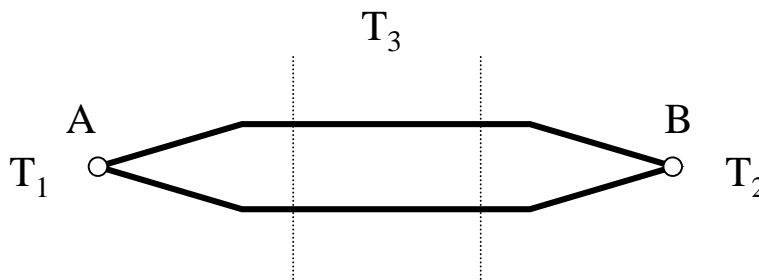


# Princípio físico de funcionamento

- Transdução fotovoltaica: variação da tensão na junção  $V_D$  na junção por variação da incidência de iluminação



- Transdução termoelétrica: força electromotriz num circuito fechado constituído por dois metais diferentes se os pontos de junção estiverem a temperaturas diferentes.



# Revisões

- Transdutor
  - Sensor
  - Actuador
- Utilização em sistemas de controlo e medida
- Necessidade de processamento do sinal (acondicionamento, conversão A/D, etc)
- Comunicação do sinal

# Classificação dos sensores

Várias formas de classificação:

- o campo de aplicação

biomedicina, meteorologia, consumo, automação, etc.

- a função que realizam

ou o que medem: pressão, aceleração, campo magnético, temperatura, capacidade térmica, etc.

- o princípio físico de funcionamento

transdução resistiva, transdução capacitiva, transdução indutiva, transdução piezoelétrica, transdução piezoresistiva, transdução fotovoltaica, transdução termoelétrica, etc.

- forma de energia do sinal que convertem

mecânica, magnética, radiante, térmica e elétrica (não há conversão da forma de energia do sinal)

# Campo de aplicação

- Biomedicina
  - biosensores (electroquímicos de DNA) para detecção de microrganismos patogénicos
  - Imagiologia: PET (positron Emission Tomography), PEM (positron Emission mammography),
- Meteorologia
  - Temperatura, velocidade do vento, humidade, pressão atmosférica, etc
- Consumo
  - Automóveis: velocidade, temperatura, colisões, airbag, etc
  - Domótica: iluminação, temperatura, fugas de fumo, etc
- Automação
  - Processos industriais: pressão, força temperatura

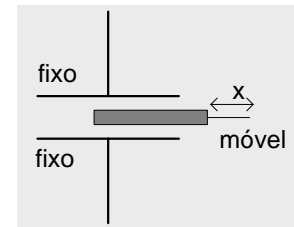
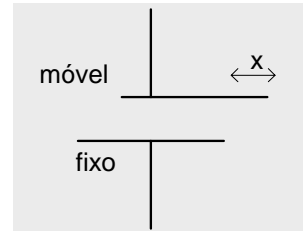
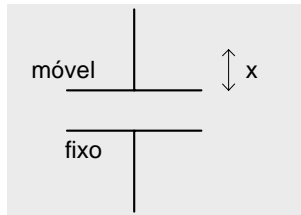
# Princípio físico de funcionamento

- Transdução resistiva
  - Resistência eléctrica varia com a temperatura (RTD – Resistance Temperature Detector)
- Transdução fotoresistiva
  - Condutividade eléctrica do material depende da intensidade luminosa que neles incide (LDR – Light Dependent Resistor)
- Transdução potenciométrica
  - Resistência eléctrica varia por variação de um contacto
- Transdução de galga extensométrica:
  - Resistência eléctrica varia por num fio condutor devido ao efeito de uma força (strain gauge).

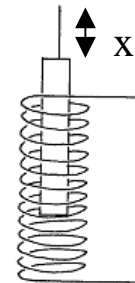
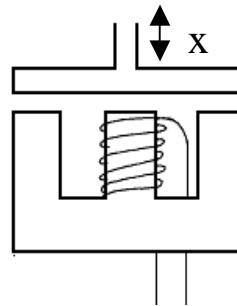


# Princípio físico de funcionamento

- Transdução capacitiva: variação da capacidade por alteração no posicionamento dos eléctrodos ou por alteração do dieléctrico

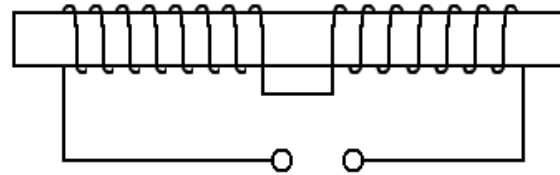


- Transdução indutiva: variação da auto-indução de uma bobina por variação externa do fluxo ou variação de núcleo

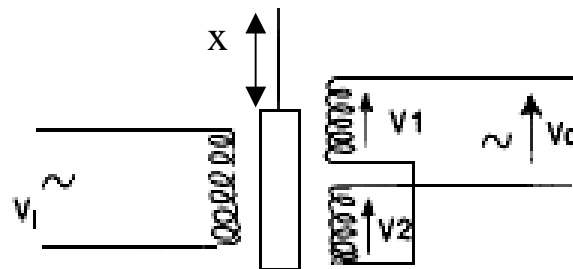


# Princípio físico de funcionamento

- Transdução electromagnética: por variação fluxo magnético por variação do núcleo

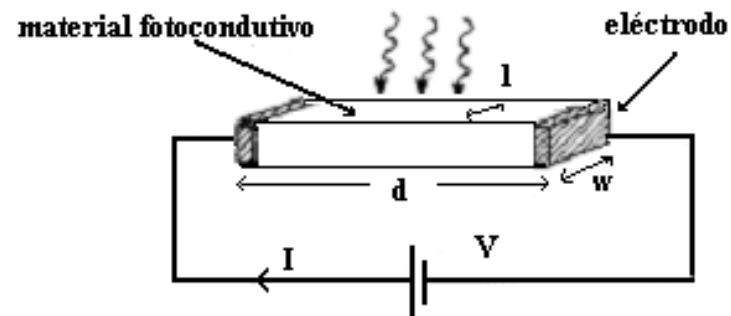


- Transdução da relutância magnética por variação do núcleo



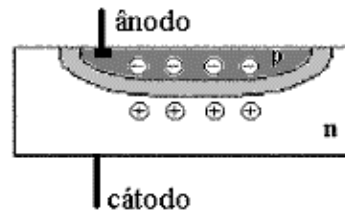
# Princípio físico de funcionamento

- Transdução piezoelétrica: variação da carga ou da tensão eléctrica por efeito de uma força de compressão ou tensão
- Transdução fotocondutiva: variação da tensão por variação da incidência de luz

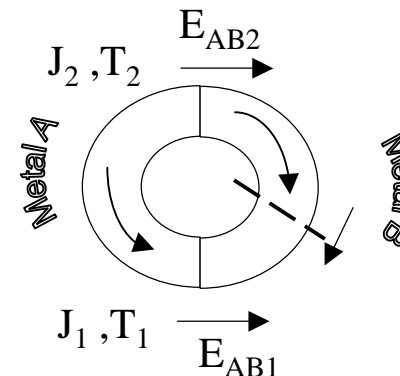
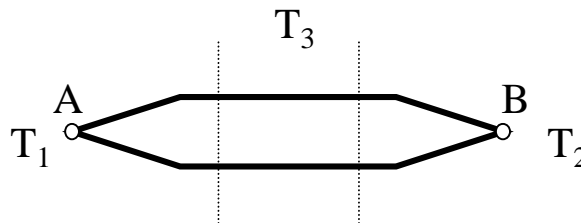


# Princípio físico de funcionamento

- Transdução fotovoltaica: variação da tensão na junção VD na junção por variação da incidência de iluminação.



- Transdução termoelétrica: força electromotriz num circuito fechado constituído por dois metais diferentes se os pontos de junção estiverem a temperaturas diferentes.



# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED			

# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante		

# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante	Visualização	

# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante	Visualização	Geração de fótons



# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante	Visualização	Geração de fótons
LCD			

# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante	Visualização	Geração de fótons
LCD	Radiante		

# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante	Visualização	Geração de fótons
LCD	Radiante	Visualização	

# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante	Visualização	Geração de fótons
LCD	Radiante	Visualização	Moléculas de cristal polarizadas

# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante	Visualização	Geração de fótons
LCD	Radiante	Visualização	Moléculas de cristal polarizadas
Impressora térmica			

# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante	Visualização	Geração de fótons
LCD	Radiante	Visualização	Moléculas de cristal polarizadas
Impressora térmica	Térmica		

# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante	Visualização	Geração de fótons
LCD	Radiante	Visualização	Moléculas de cristal polarizadas
Impressora térmica	Térmica	Armazenamento	

# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante	Visualização	Geração de fótons
LCD	Radiante	Visualização	Moléculas de cristal polarizadas
Impressora térmica	Térmica	Armazenamento	Cera derretida



# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante	Visualização	Geração de fótons
LCD	Radiante	Visualização	Moléculas de cristal polarizadas
Impressora térmica	Térmica	Armazenamento	Cera derretida
Cabeça magnética			

# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante	Visualização	Geração de fótons
LCD	Radiante	Visualização	Moléculas de cristal polarizadas
Impressora térmica	Térmica	Armazenamento	Cera derretida
Cabeça magnética	Magnética		

# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante	Visualização	Geração de fótons
LCD	Radiante	Visualização	Moléculas de cristal polarizadas
Impressora térmica	Térmica	Armazenamento	Cera derretida
Cabeça magnética	Magnética	Armazenamento	

# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante	Visualização	Geração de fótons
LCD	Radiante	Visualização	Moléculas de cristal polarizadas
Impressora térmica	Térmica	Armazenamento	Cera derretida
Cabeça magnética	Magnética	Armazenamento	Magnetização de filmes

# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante	Visualização	Geração de fótons
LCD	Radiante	Visualização	Moléculas de cristal polarizadas
Impressora térmica	Térmica	Armazenamento	Cera derretida
Cabeça magnética	Magnética	Armazenamento	Magnetização de filmes
Laser			

# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante	Visualização	Geração de fótons
LCD	Radiante	Visualização	Moléculas de cristal polarizadas
Impressora térmica	Térmica	Armazenamento	Cera derretida
Cabeça magnética	Magnética	Armazenamento	Magnetização de filmes
Laser	Radiante		

# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante	Visualização	Geração de fotões
LCD	Radiante	Visualização	Moléculas de cristal polarizadas
Impressora térmica	Térmica	Armazenamento	Cera derretida
Cabeça magnética	Magnética	Armazenamento	Magnetização de filmes
Laser	Radiante	Armazenamento	

# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante	Visualização	Geração de fótons
LCD	Radiante	Visualização	Moléculas de cristal polarizadas
Impressora térmica	Térmica	Armazenamento	Cera derretida
Cabeça magnética	Magnética	Armazenamento	Magnetização de filmes
Laser	Radiante	Armazenamento	Remoção de material



# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante	Visualização	Geração de fótons
LCD	Radiante	Visualização	Moléculas de cristal polarizadas
Impressora térmica	Térmica	Armazenamento	Cera derretida
Cabeça magnética	Magnética	Armazenamento	Magnetização de filmes
Laser	Radiante	Armazenamento	Remoção de material
Altifalante			

# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante	Visualização	Geração de fótons
LCD	Radiante	Visualização	Moléculas de cristal polarizadas
Impressora térmica	Térmica	Armazenamento	Cera derretida
Cabeça magnética	Magnética	Armazenamento	Magnetização de filmes
Laser	Radiante	Armazenamento	Remoção de material
Altifalante	Mecânica		

# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante	Visualização	Geração de fótons
LCD	Radiante	Visualização	Moléculas de cristal polarizadas
Impressora térmica	Térmica	Armazenamento	Cera derretida
Cabeça magnética	Magnética	Armazenamento	Magnetização de filmes
Laser	Radiante	Armazenamento	Remoção de material
Altifalante	Mecânica	Transmissão	

# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante	Visualização	Geração de fótons
LCD	Radiante	Visualização	Moléculas de cristal polarizadas
Impressora térmica	Térmica	Armazenamento	Cera derretida
Cabeça magnética	Magnética	Armazenamento	Magnetização de filmes
Laser	Radiante	Armazenamento	Remoção de material
Altifalante	Mecânica	Transmissão	Geração de som

# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante	Visualização	Geração de fótons
LCD	Radiante	Visualização	Moléculas de cristal polarizadas
Impressora térmica	Térmica	Armazenamento	Cera derretida
Cabeça magnética	Magnética	Armazenamento	Magnetização de filmes
Laser	Radiante	Armazenamento	Remoção de material
Altifalante	Mecânica	Transmissão	Geração de som
Antena			

# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante	Visualização	Geração de fótons
LCD	Radiante	Visualização	Moléculas de cristal polarizadas
Impressora térmica	Térmica	Armazenamento	Cera derretida
Cabeça magnética	Magnética	Armazenamento	Magnetização de filmes
Laser	Radiante	Armazenamento	Remoção de material
Altifalante	Mecânica	Transmissão	Geração de som
Antena	Radiante		

# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante	Visualização	Geração de fótons
LCD	Radiante	Visualização	Moléculas de cristal polarizadas
Impressora térmica	Térmica	Armazenamento	Cera derretida
Cabeça magnética	Magnética	Armazenamento	Magnetização de filmes
Laser	Radiante	Armazenamento	Remoção de material
Altifalante	Mecânica	Transmissão	Geração de som
Antena	Radiante	Transmissão	

# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante	Visualização	Geração de fótons
LCD	Radiante	Visualização	Moléculas de cristal polarizadas
Impressora térmica	Térmica	Armazenamento	Cera derretida
Cabeça magnética	Magnética	Armazenamento	Magnetização de filmes
Laser	Radiante	Armazenamento	Remoção de material
Altifalante	Mecânica	Transmissão	Geração de som
Antena	Radiante	Transmissão	Geração de ondas rádio



# Exemplos de actuadores e sua classificação

<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante	Visualização	Geração de fótons
LCD	Radiante	Visualização	Moléculas de cristal polarizadas
Impressora térmica	Térmica	Armazenamento	Cera derretida
Cabeça magnética	Magnética	Armazenamento	Magnetização de filmes
Laser	Radiante	Armazenamento	Remoção de material
Altifalante	Mecânica	Transmissão	Geração de som
Antena	Radiante	Transmissão	Geração de ondas rádio
Motor eléctrico			

# Exemplos de actuadores e sua classificação

Actuador	Forma de energia	Função	Princípio de funcionamento
LED	Radiante	Visualização	Geração de fótons
LCD	Radiante	Visualização	Moléculas de cristal polarizadas
Impressora térmica	Térmica	Armazenamento	Cera derretida
Cabeça magnética	Magnética	Armazenamento	Magnetização de filmes
Laser	Radiante	Armazenamento	Remoção de material
Altifalante	Mecânica	Transmissão	Geração de som
Antena	Radiante	Transmissão	Geração de ondas rádio
Motor eléctrico	Mecânica		

# Exemplos de actuadores e sua classificação

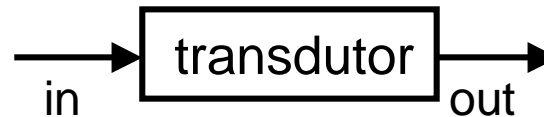
<b>Actuador</b>	<b>Forma de energia</b>	<b>Função</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
LED	Radiante	Visualização	Geração de fótons
LCD	Radiante	Visualização	Moléculas de cristal polarizadas
Impressora térmica	Térmica	Armazenamento	Cera derretida
Cabeça magnética	Magnética	Armazenamento	Magnetização de filmes
Laser	Radiante	Armazenamento	Remoção de material
Altifalante	Mecânica	Transmissão	Geração de som
Antena	Radiante	Transmissão	Geração de ondas rádio
Motor eléctrico	Mecânica	Transmissão	

# Exemplos de actuadores e sua classificação

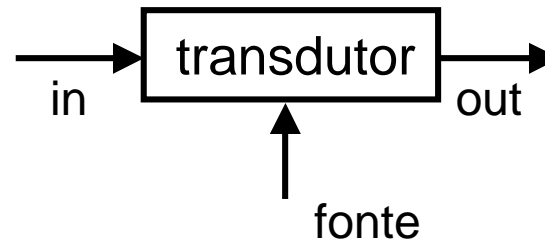
Actuador	Forma de energia	Função	Princípio de funcionamento
LED	Radiante	Visualização	Geração de fótons
LCD	Radiante	Visualização	Moléculas de cristal polarizadas
Impressora térmica	Térmica	Armazenamento	Cera derretida
Cabeça magnética	Magnética	Armazenamento	Magnetização de filmes
Laser	Radiante	Armazenamento	Remoção de material
Altifalante	Mecânica	Transmissão	Geração de som
Antena	Radiante	Transmissão	Geração de ondas rádio
Motor eléctrico	Mecânica	Transmissão	Geração de movimento

# Transdutores activos ou passivos

- Activo (*self-generating*) – não requer uma fonte exterior
  - célula fotovoltaica (solar)
  - termopares



- Passivos (*modulating*) – é necessária uma fonte exterior que é modulada pelo sinal a medir
  - resistência térmica
  - fotodíodo



# Caracterização dos Sensores

Características de desempenho dos sensores:

- **Características estáticas:**

relacionadas com sinais a medir sem variações no tempo, em determinadas condições de temperatura, humidade e pressão atmosférica ( geralmente ambientes interiores).

- **Características dinâmicas:**

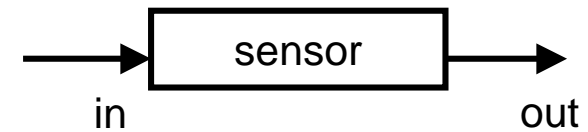
relacionadas com a resposta a sinais a medir que variam no tempo.

- **Características ambientais:**

relacionadas com o desempenho dos sensor durante ou depois da exposição a determinadas condições exteriores de temperatura, pressão, vibração, aceleração, etc.

# Caracterização dos Sensores

## Características estáticas



- gama de funcionamento

valores máximos e mínimos na entrada ( $in_{max}$ ,  $in_{min}$ )

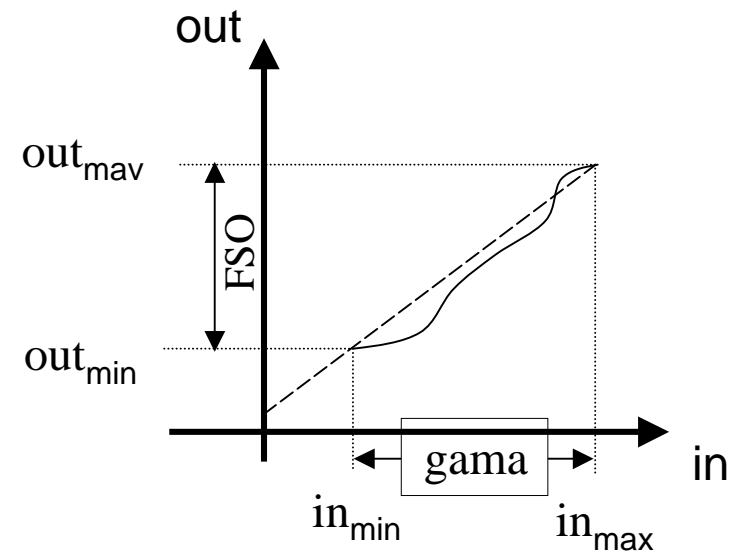
e na saída: ( $out_{max}$ ,  $out_{min}$ )

e máxima variação (*span*) na entrada

$$in_{max} - in_{min}$$

e na saída (*Full Scale Operation*):

$$FSO = out_{max} - out_{min}$$



# Caracterização dos Sensores

- erro e exactidão (*accuracy*)

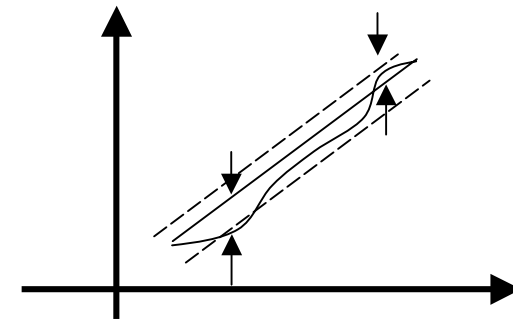
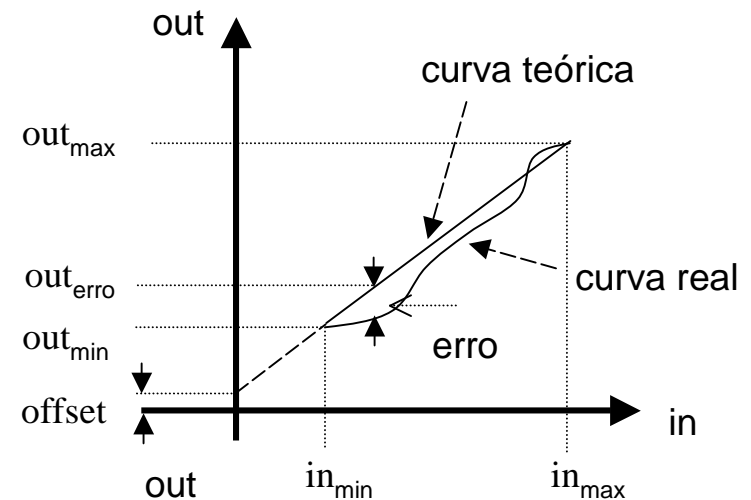
**erro:** diferença algébrica entre o valor teórico e o valor medido

$$\Delta = \frac{\Delta}{out_{erro}} = \frac{\Delta}{FSO}$$

**exactidão:**

$$\pm \% FSO$$

- erros determinados por calibração: histerese, repetibilidade, linearidade

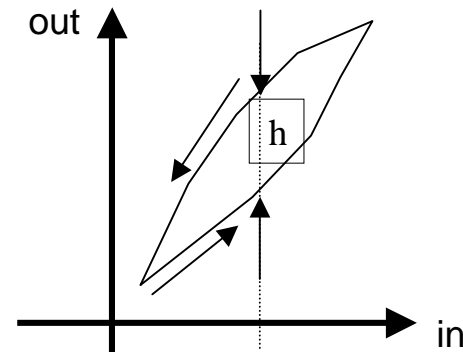




# Caracterização dos Sensores

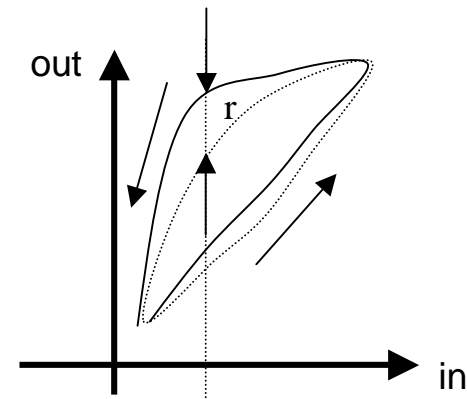
- **histerese**  
máxima diferença entre leituras na saída, para qualquer valor de sinal na entrada dentro da gama de entrada, quando este sinal varia nas direcções diferentes (aumentando e diminuindo)

$$\frac{h}{FSO} \%$$



- **repetibilidade**  
máxima diferença entre leituras na saída, para o mesmo valor de sinal na entrada dentro da gama de entrada, quando este sinal varia na mesma direcção

$$\frac{r}{FSO} \%$$



# Caracterização dos Sensores

- linearidade (para sensores com resposta linear)

máxima diferença entre a leitura obtida e o valor da linha recta

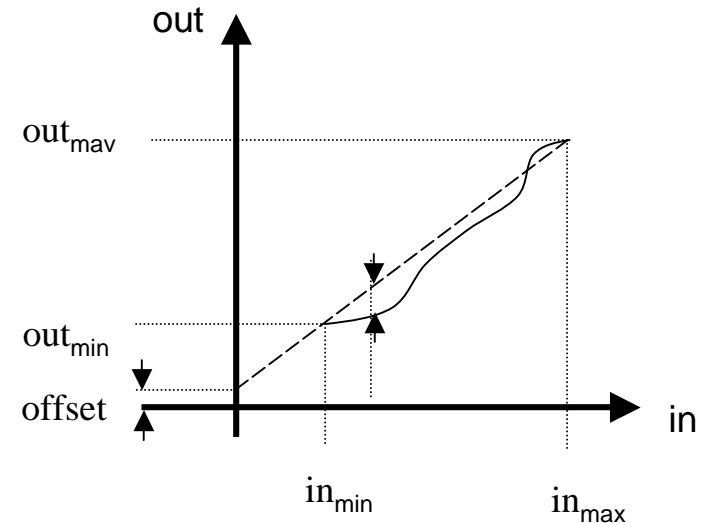
$$\frac{\max(out_{lin}(in) - out(in))}{FSO}$$

para o mesmo valor de sinal aplicado na entrada dentro da gama de entrada

$$out_{lin}(in) = K \times in + offset$$

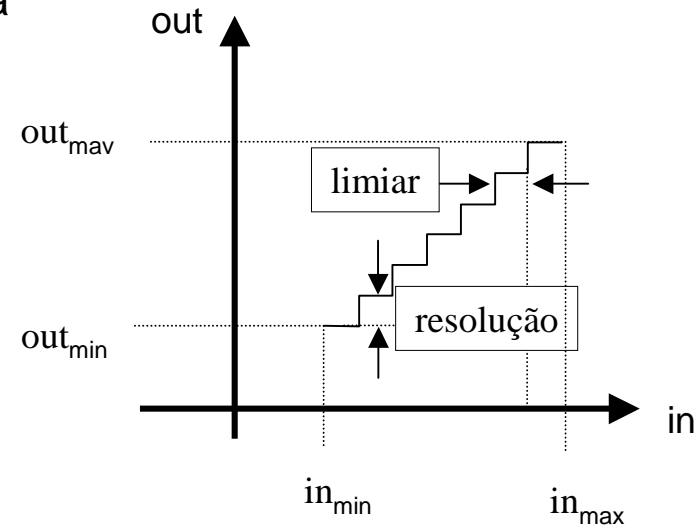
$$K = \frac{out_{max} - out_{min}}{in_{max} - in_{min}}$$

K - sensibilidade



# Caracterização dos Sensores

- resolução  
amplitude dos degraus de saída quando o sinal a medir varia continuamente na gama de entrada



- limiar (threshold)  
mínima variação do sinal a medir que provoca diferença no valor de saída

# Caracterização dos Sensores

**Características dinâmicas** (com variações no tempo do sinal a medir)

- resposta na frequência

variação da amplitude e da fase do sinal de saída para uma gama de frequências de sinais sinusoidais na entrada

- resposta transitória

resposta na saída quando há uma variação na entrada em forma de degrau num sistema não amortecido

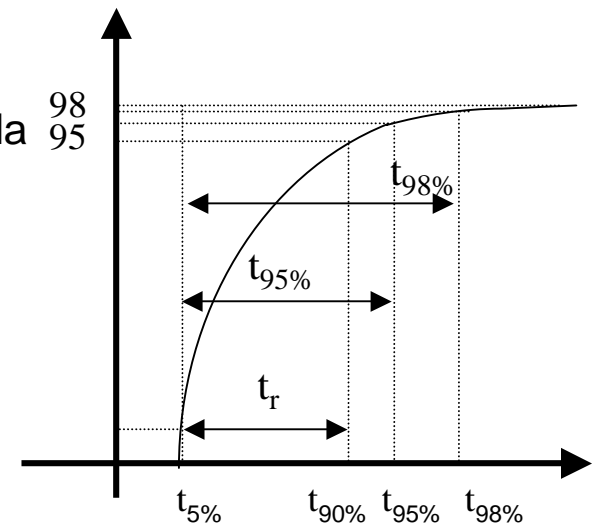
**sistema de 1ª ordem**

$t_r$  tempo de subida

$t_{95\%}$  tempo de resposta (estabelecimento) a 95%

$t_{98\%}$  tempo de resposta a 98%

$\tau$  = tempo de resposta a 63,2%



# Caracterização dos Sensores

## sistema de 2ª ordem

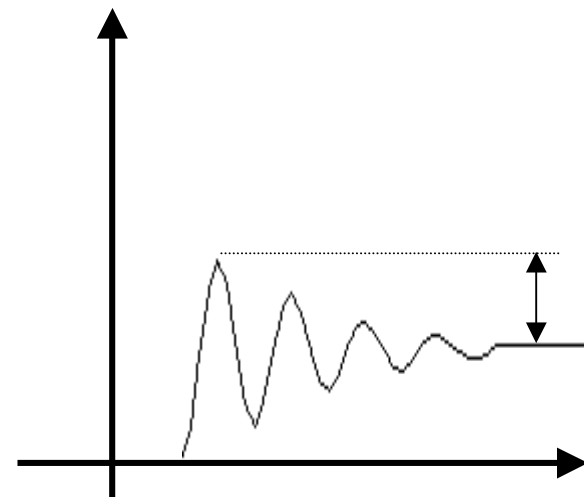
factor de amortecimento e  
frequência de ressonância

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2 \xi \omega_0 \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = a$$

$\omega_0$  - frequência de ressonância

$\xi$  - factor de amortecimento

$a$  - altura do degrau



$\xi > 1$  sobre amortecido

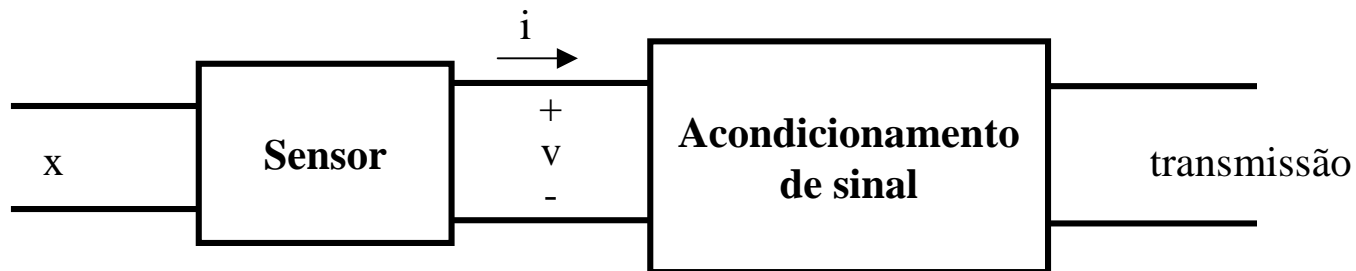
sobreelevação

# Caracterização dos Sensores

## **Características ambientais**

- gama de temperaturas para as quais o sensor opera
- erro de temperatura: máxima diferença entre leituras obtidas, para o mesmo valor de sinal na entrada dentro da gama de entrada, quando a temperatura varia entre os valores extremos da gama de temperaturas
- erros de aceleração, de vibração, de pressão, de montagem, etc.

# Electrónica da interface



Circuitos de conversão de parâmetros (R,C, L) em tensão

Amplificadores, integradores, seguidores (adaptação de impedância)

Filtros (ruído)

Fonte de alimentação (sensores passivos)

Compensação/linearização

Conversor tensão-corrente, conversor AD, conversão frequência-tensão,  
conversão tensão-frequência,

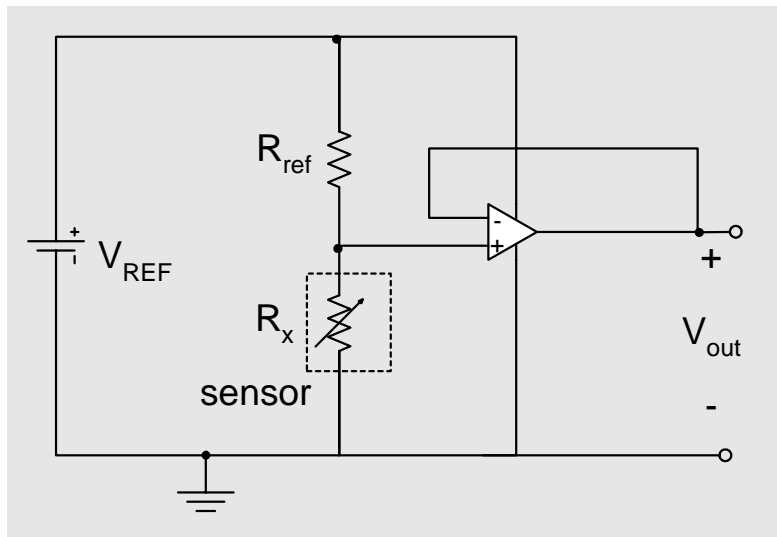
# Circuitos de acondicionamento de sinal

- Muitos sensores alteram um parâmetro eléctrico (resistência, capacidade, indutância, etc.) quando há alteração do sinal de entrada
- A variação do parâmetro eléctrico não pode ser mediada directamente, sendo necessários circuitos: passagem de corrente no sensor determinando a queda de tensão.



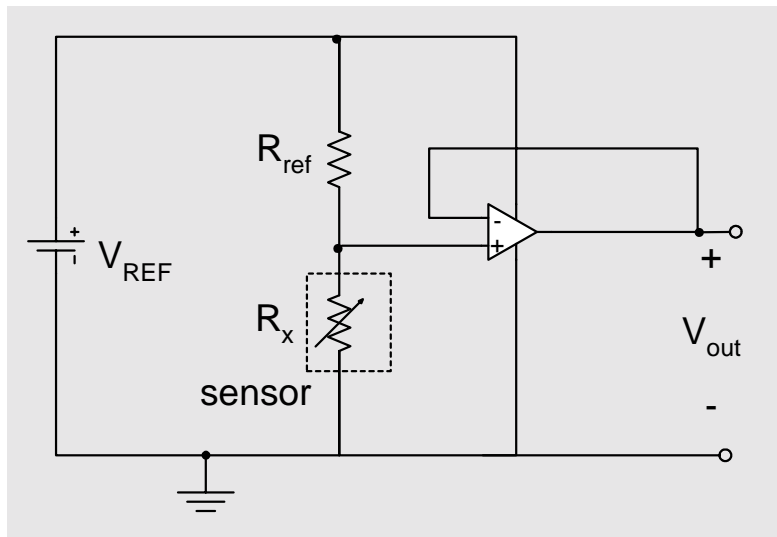
# Circuitos de acondicionamento de sinal

- Transdução resistiva: divisor de tensão



# Circuitos de acondicionamento de sinal

- Transdução resistiva: divisor de tensão



$$V_{out} = V_{ref} \frac{R_x}{R_x + R_{ref}}$$

$$V_{out} = A \times R_x$$

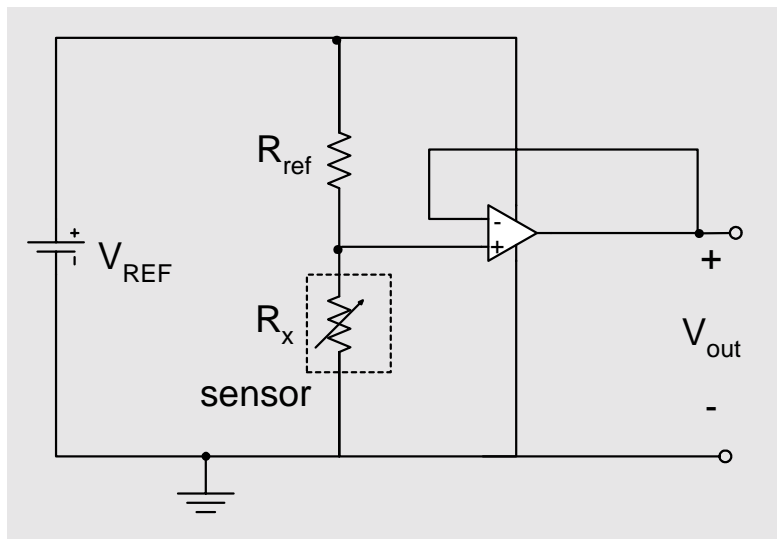
ganho:

$$A = \frac{V_{out}}{R_x} = \frac{V_{ref}}{R_x + R_{ref}} \approx \frac{V_{ref}}{R_{ref}}$$

Para  $R_x \ll R_{ref}$   $A \cong$  constante

linearidade

# Circuitos de acondicionamento de sinal



$$S = \frac{dV_{out}}{dR_x}$$

$$V_{out} = V_{ref} \frac{R_x}{R_x + R_{ref}}$$

$$S = V_{ref} \frac{R_x + R_{ref} - R_x}{[R_x + R_{ref}]^2} = V_{ref} \frac{R_{ref}}{[R_x + R_{ref}]^2}$$

o valor da sensibilidade é máximo para

$$R_x \ll R_{ref}$$

# Circuitos de acondicionamento de sinal

Num sensor linear  $R_x = R_0(1+x)$  o ganho é dado por

$$A = \frac{V_{out}}{R_x} = \frac{V_{ref}}{R_0(1+x) + R_{ref}}$$

$$A = \frac{V_{ref}}{R_0} \frac{1}{1+x+k}$$

$$k = \frac{R_{ref}}{R_0}$$

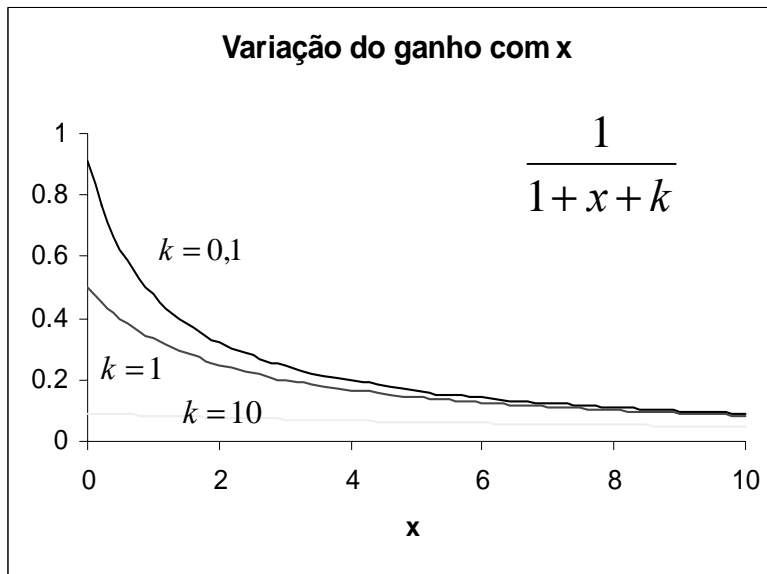
e a sensibilidade por

$$S = V_{ref} \frac{R_{ref}}{[R_x + R_{ref}]^2} = V_{ref} \frac{R_{ref}}{[R_0(1+x) + R_{ref}]^2}$$

$$S = \frac{V_{ref}}{R_0} \frac{k}{[1+k+x]^2}$$

# Circuitos de acondicionamento de sinal

Num sensor linear



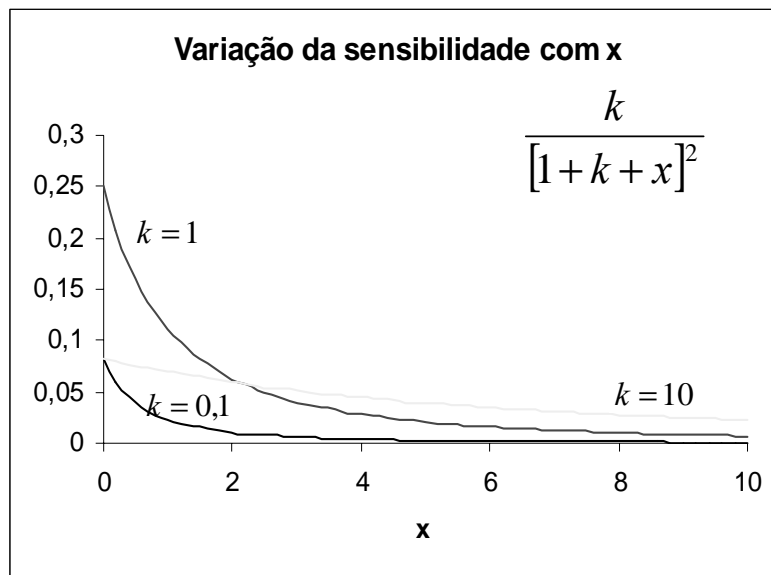
$$A = \frac{V_{ref}}{R_0} \frac{1}{1+x+k}$$

$$k = \frac{R_{ref}}{R_0} = 10$$

Maior linearidade para  $k = 10$ .

# Circuitos de acondicionamento de sinal

Num sensor linear



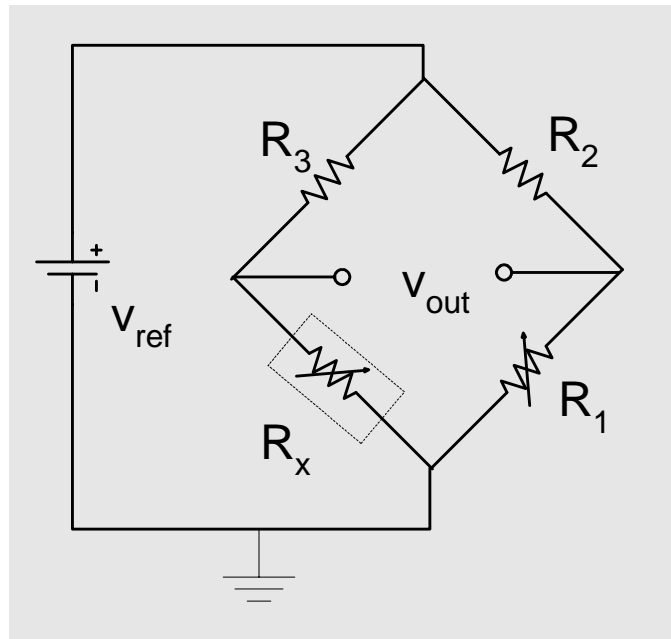
$$S = \frac{V_{ref}}{R_0} \frac{k}{[1+k+x]^2}$$

Pouca sensibilidade com  $k = 10$ .

# Circuitos de acondicionamento de sinal

- Divisor potenciométrico:
  - Vantagem:
    - Circuito simples
  - Desvantagem:
    - Para ser linear, não é muito sensível a pequenas variações de  $x$
    - A tensão de saída fica dependente da variação da temperatura do sensor
- Alternativa: usar ponte de Wheatstone em modo balanceado ou não balanceado

# Circuitos de acondicionamento de sinal



Ponte de Wheatstone (dois divisores de tensão): se  $R_1$  for um sensor (*dummy*) idêntico a  $R_x$ , compensam-se variações com a temperatura



# Circuitos de acondicionamento de sinal

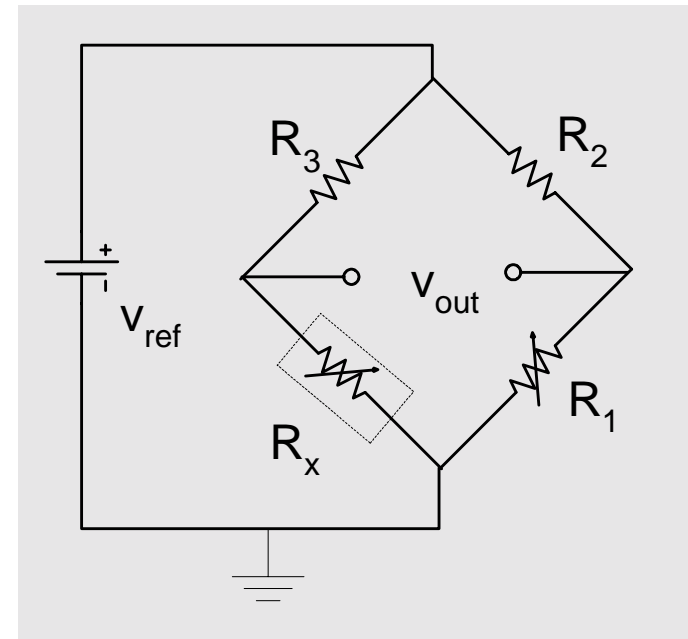
Ponte de Wheatstone (dois divisores de tensão):  
com um elemento de referência ( $R_1$ ) idêntico ao sensor ( $R_x$ )

Em modo balanceado (*null*),  
ajusta-se  $R_1$  (manual ou automaticamente)  
de modo a ter

$$V_{out} = 0 \Rightarrow R_x = R_3 \frac{R_1}{R_2}$$

O valor de  $R_x$  é

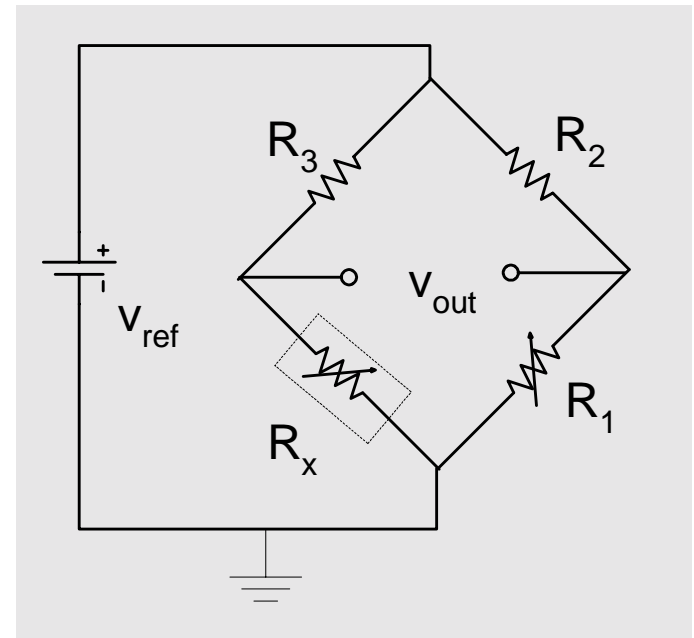
$$R_x = R_1 \frac{R_3}{R_2} \quad \text{sendo o ganho} \quad \frac{R_3}{R_2}$$



# Circuitos de acondicionamento de sinal

Em modo não balanceado (*deflection*), detecta-se a tensão  $V_{out}$

$$V_{out} = V_{ref} \left( \frac{R_x}{R_x + R_3} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)$$



# Circuitos de acondicionamento de sinal

A sensibilidade

$$S = \frac{d}{dR_x} \left[ V_{ref} \left( \frac{R_x}{R_x + R_3} - \frac{R_1}{R_1 + kR_1} \right) \right] = \frac{V_{ref}}{R_0} \frac{k}{(1+x+k)^2}$$
$$k = \frac{R_x}{R_3} = \frac{R_1}{R_2}$$

é igual à do divisor de tensão, mas:

- Em modo não balanceado, pode aumentar-se a sensibilidade com um andar de ganho.
- Em modo balanceado, a medida não depende de  $V_{ref}$ .

# Circuitos de acondicionamento de sinal

Modo não balanceado usado quando  $|x| \ll 1$   
fazendo

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_0$$

$$V_{out} = \frac{V_{ref}}{2} \left( \frac{x}{2+x} \right)$$

$$V_{out} \approx \frac{V_{ref}}{4} x$$

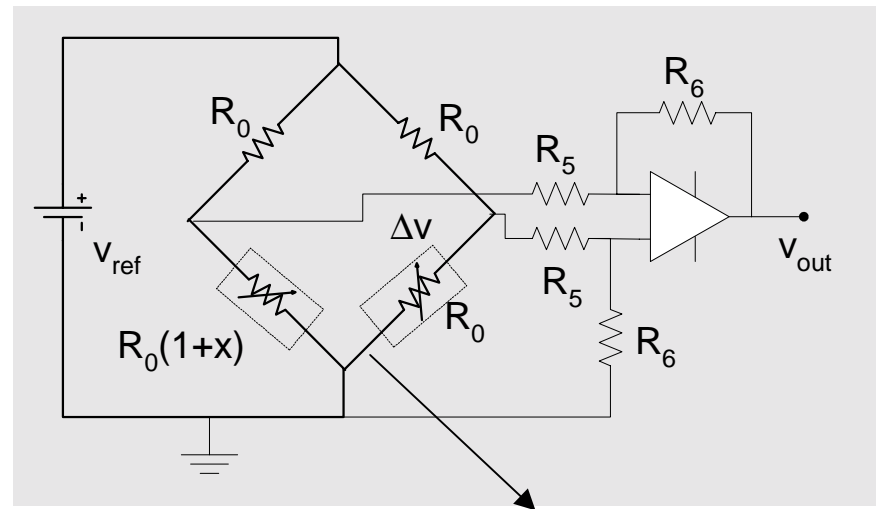
Aproximadamente linear

# Circuitos de acondicionamento de sinal

$$R = R_0 \Rightarrow V_{out} = 0$$

$$R = R_0(1+x) \Rightarrow V'_{out} = \frac{V_{ref}}{4} x$$

$$\Delta V = V'_{out} - V_{out} = \frac{V_{ref}}{4} x$$



$$V_{out} = -\frac{R_5}{R_6} \Delta V \approx -\frac{R_5}{R_6} \frac{V_{ref}}{4} x$$

# Revisões

- Classificação dos transdutores: campo de aplicação, função que realizam, princípio de funcionamento e forma da energia que convertem
- Exemplos de transdutores
- Sensores activos e passivos
- Características dos sensores:
  - estáticas: gama de funcionamento (*span e FSO*), erro e exactidão, histerese, repetibilidade, linearidade, resolução e limiar (*threshold*)
  - dinâmicas: resposta em frequência e resposta transitória
  - ambientais: gama de temperaturas, erros de temperatura, vibração, pressão, aceleração, etc
- Medição de R, L e C: divisor potenciométrico e ponte de Wheatstone (modo balanceado e não balanceado)

# Exemplo

Com base na folha de catálogo do acelerómetro ADXL103, indique a sensibilidade, a gama dinâmica, a exactidão e os erros de linearidade, histerese, repetibilidade, a resolução e o limiar (características estáticas).

O sinal de saída é uma tensão proporcional à aceleração.

Sensibilidade ( $dV_{out}/da$ ): 1000 mV/g (típico)

Span:  $\pm 1,7g$

FSO: 0,3 a 4,5 V ( $V_s = 5 V$ )

Exactidão e erros:

linearidade  $\pm 0,5 \%FSO$

repetibilidade e histerese sem referência

erro de temperatura  $\pm 3\%$  Resolução: dependente do ruído ( $110 mg/HZ^{1/2}$ )

# Exemplo

Limiar e resolução dependentes do ruído (características de ruído branco)

$$110 \frac{\mu g}{\sqrt{Hz}}$$

Para uma largura de banda de 100 Hz  $C_x = C_y = 0,05 \mu F$   $BW = 100 Hz$

$$\text{limiar} = \frac{110}{10} = 11 \mu g$$

$$\text{resolução} = 11 \mu g \times 1000 \frac{mV}{g} = 11 \mu V$$



# Exemplo

Determine o erro de linearidade e a exactidão de um sensor de temperatura com transdução resistiva caracterizado por

$$R = 100(1 + 3,808 \Delta T + -5,0802 \Delta T^2)$$

quando percorrido por uma corrente constante sabendo que a gama dinâmica de entrada (*span*) é de 0 e 850°C.

$$\Delta V = \Delta R \times I$$

$$R_{linear} = 100(1 + 3,908 \times 10^{-3} \Delta T) \quad R = 100(1 + 3,908 \times 10^{-3} \Delta T - 5,0802 \times 10^{-7} \Delta T^2)$$

Erro absoluto

erro relativo

$$\Delta R = -4,32 \times 10^{-2} \Omega$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{-4,32 \times 10^{-2}}{100}$$

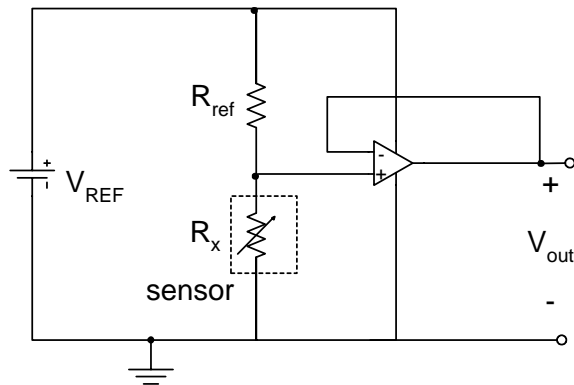
# Exemplo

Exactidão

$$\frac{\Delta R_{\max}}{R_{850^{\circ}\text{C}} - R_{0^{\circ}\text{C}}} = \frac{-100 \times 5,0802 \times 10^{-7} \times 850^2}{332 - 100} = \frac{-4,32 \times 10^{-2}}{232} = -0,02\%$$

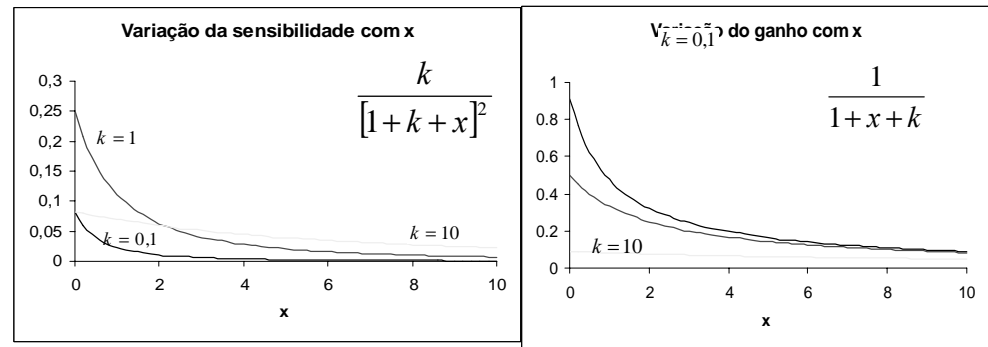
# Revisões

$$V_{out} = V_{ref} \frac{R_x}{R_x + R_{ref}}$$

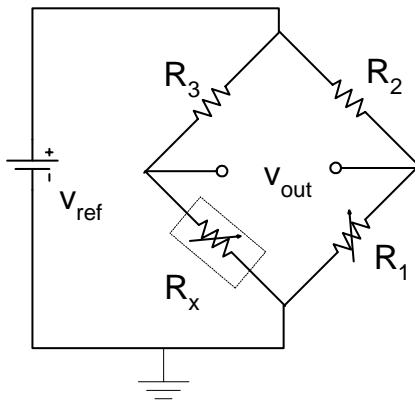


$$R_x = R_0(1+x)$$

$$S = \frac{V_{ref}}{R_0} \frac{k}{[1+k+x]^2} \quad A = \frac{V_{ref}}{R_0} \frac{1}{1+x+k}$$



# Revisões



Modo balanceado

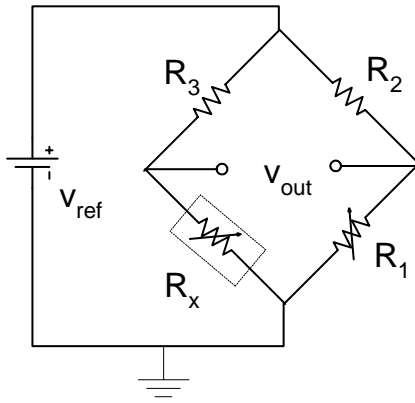
$$V_{out} = 0 \Rightarrow R_x = R_3 \frac{R_1}{R_2}$$

Modo não balanceado

$$|x| \ll 1$$

$$V_{out} = V_{ref} \left( \frac{R_x}{R_x + R_3} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \quad V_{out} = 0 \Rightarrow R_x = R_3 \frac{R_1}{R_2}$$

# Revisões



$$R_x = R_0(1+x)$$

$$S = \frac{d}{dR_x} \left[ V_{ref} \left( \frac{R_x}{R_x + R_3} - \frac{R_1}{R_1 + kR_1} \right) \right] = \frac{V_{ref}}{R_0} \frac{k}{(1+x+k)^2}$$

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

$$S_{\max} \quad \text{para } k=1 \quad R_1 = R_2 = R_3 = R_0$$

$$V_{out} = \frac{V_{ref}}{2} \left( \frac{x}{2+x} \right)$$

$$V_{out} \approx \frac{V_{ref}}{4} x$$

# Exemplo

- Num sistema de medida constituído por um sensor, um amplificador e um circuito de armazenamento ligados em série, as sensibilidades são, respectivamente,  $0,3 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ ,  $2,5\text{V}/\text{mV}$ ,  $4,0 \text{ mm}/\text{V}$ . Determine a sensibilidade do sistema de medida.

Sensibilidade:

$$k = 0,3 \text{ mV}/^{\circ}\text{C} \times 2,5 \text{ V}/\text{mV} \times 4,0 \text{ mm}/\text{V} = 3,0 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$$

# Exemplo

- Num sistema de medida os erros do sensor, do circuito de acondicionamento de sinal e do circuito de armazenamento são respectivamente  $\pm 2\%$ ,  $\pm 3\%$  e  $\pm 4\%$ . Determine o maior erro possível e o erro mais provável.

Maior erro:

$$\pm (2 + 3 + 4)\% = \pm 9\%$$

Erro mais provável:

$$\pm \sqrt{2^2 + 3^2 + 4^2} \% = \pm \sqrt{29} \% = \pm \sqrt{5,4} \%$$

# Exemplo

- Num sistema de medida com um sensor de transdução resistiva, utiliza-se uma ponte de Wheatstone, alimentada por uma tensão de 5 V. Admitindo que a resistência do sensor é dada por

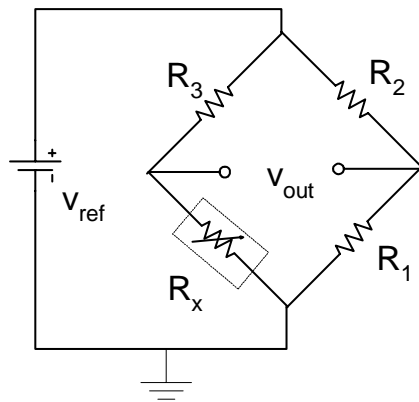
$$R_x = 120 (1 + 0,01) \Omega$$

desenhe a ponte e determine a sensibilidade da ponte,



# Exemplo

Modo de funcionamento da ponte: não balanceado  $|x| \ll 1$ .



$$R_1 = R_2 = R_3 = R_0 = 120\Omega$$

$$V_{out} = \frac{V_{ref}}{2} \left( \frac{x}{2+x} \right) \approx \frac{V_{ref}}{4} x = \frac{5}{4} \times 0,01 = 1,25 \times 10^{-2} = 12,5 \text{ mV}$$

# Exemplo

Sensibilidade:

$$S = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta R_x} = \frac{12,5mV}{1,2\Omega} = 10,42mV/\Omega$$

$$S = \frac{V_{ref}}{R_0} \frac{k}{(1+x+k)^2} = \frac{5}{120} \frac{1}{(1+0,01+1)^2} = 10,31mV/\Omega$$

# Exemplo

Uma uma resistência dependente da temperatura (RTD) com uma resistência de  $500 \Omega$  a  $0^\circ \text{C}$ , uma gama dinâmica de entrada de  $0\text{-}50^\circ \text{C}$  e uma sensibilidade de  $4 \Omega/^\circ \text{C}$ , é utilizada em duas pontes de Wheatstone, em modo não balanceado em que:

1)  $R_1 = R_2 = R_3 = 500\Omega \quad V_{ref} = 10V$

2)  $R_1 = 500\Omega ; R_2 = R_3 = 5000\Omega \quad V_{ref} = 26,1V$

Desenhe as curvas de calibração nos dois casos para temperatura de  $0^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ \text{C}$  e  $50^\circ \text{C}$ . São lineares? Qual a mais linear?

# Exemplo

$$V_{out} = V_{ref} \left( \frac{R_x}{R_x + R_3} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)$$

$$0^\circ \quad V_{out} = 0$$

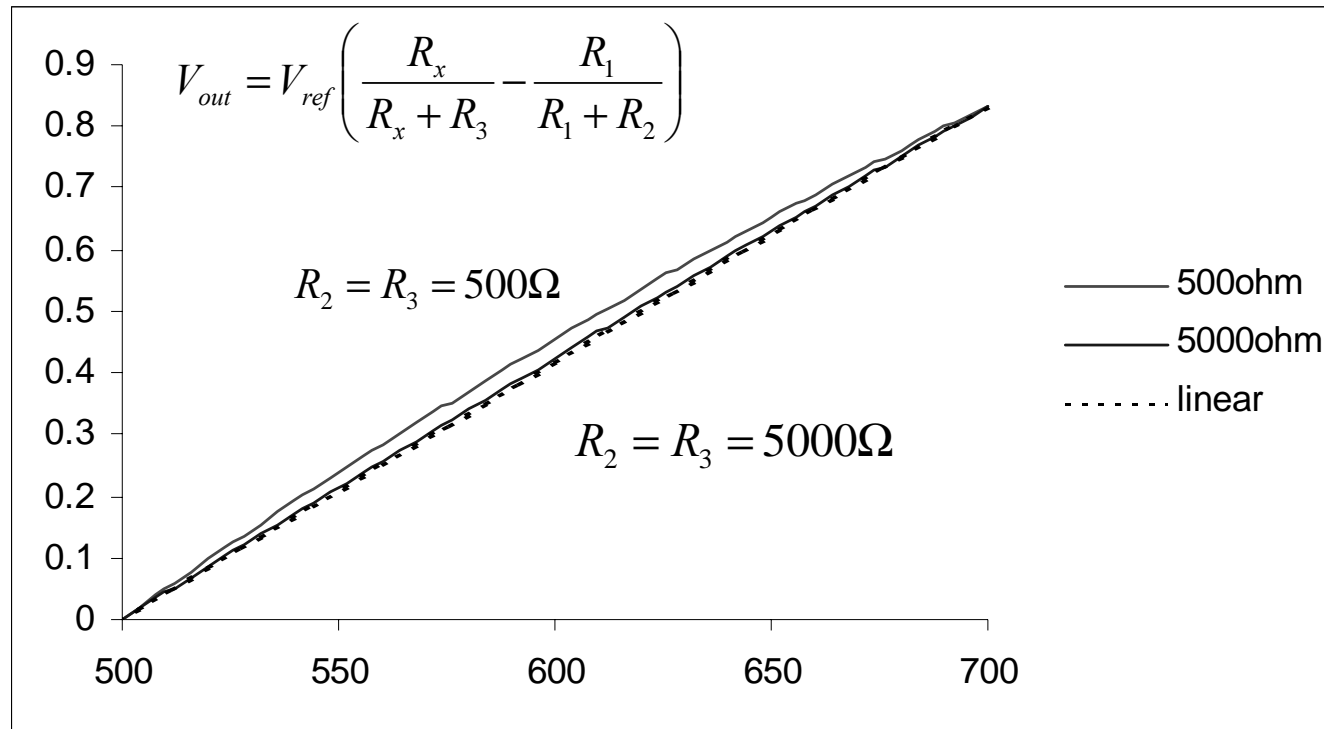
$$25^\circ \quad R_x = 500 + 4 \times 25$$

$$50^\circ \quad R_x = 500 + 4 \times 50$$

$$V_{out} = V_{ref} \left( \frac{R_x}{R_x + 5000} - \frac{500}{500 + 5000} \right)$$

$$V_{out} = V_{ref} \left( \frac{R_x}{R_x + 500} - \frac{500}{500 + 500} \right)$$

# Exemplo

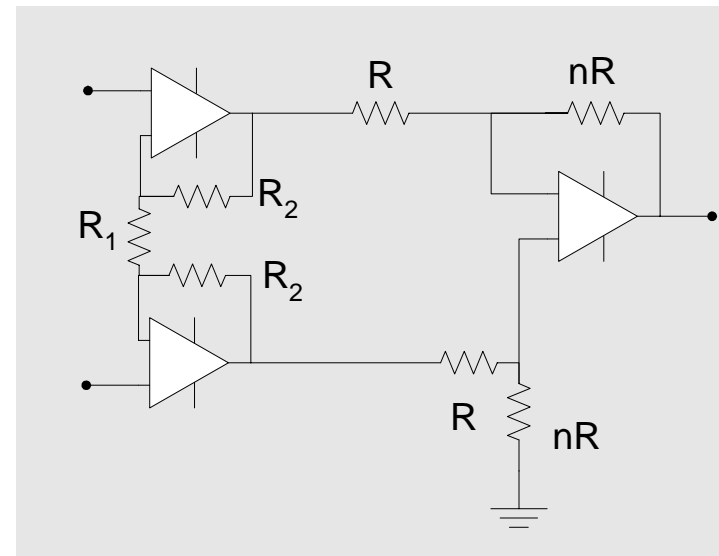


# Circuitos de acondicionamento de sinal

Necessidade de:

- impedância de entrada elevada
- CMRR elevado
- desvios (*offsets*) pequenos

Amplificador de instrumentação:



# Revisões

- Análise de uma folha de catálogo para obter as características estáticas de um sensor. Análise das características dinâmicas e ambientais.
- Exemplos relacionados com sensibilidade e linearidade de sensores e circuitos/sistemas com sensores.
- Exemplos de circuitos de acondicionamento de sinal: divisor potenciométrico, ponte de Wheatstone, amplificador de instrumentação.

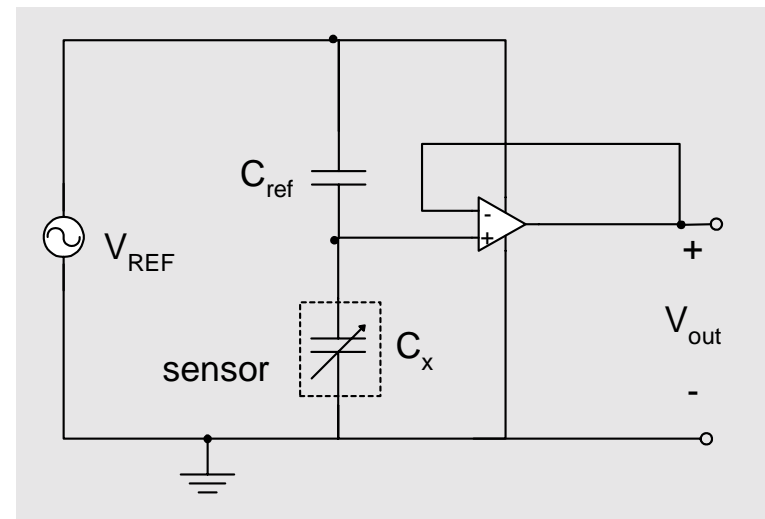
# Circuitos de acondicionamento de sinal

## Transdutores capacitivos:

- Variação da posição relativa dos eléctrodos: (microsensores mecânicos)
- variação da constante dielétrica: (sensores de temperatura e químicos)

$$C = \varepsilon \frac{A}{d}$$

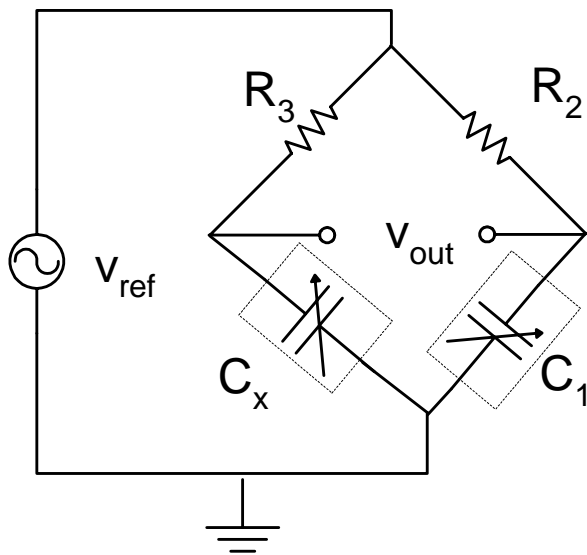
$$V_{out} = V_{ref} \frac{C_{ref}}{C_x + C_{ref}}$$



sistema não linear ou com sensibilidade baixa



# Circuitos de acondicionamento de sinal



$$\frac{1}{j\omega C_x \left( R_3 + \frac{1}{j\omega C_x} \right)} = \frac{1}{j\omega C_1 \left( R_2 + \frac{1}{j\omega C_1} \right)}$$

$$\frac{1}{j\omega R_3 C_x + 1} = \frac{1}{j\omega R_2 C_1 + 1} \quad j\omega R_3 C_x = j\omega R_2 C_1$$

$$C_x = C_1 \frac{R_3}{R_2}$$

Para valores de C (pf) muito pequenos há problemas com capacidades parasitas (integração dos circuitos e sensor)

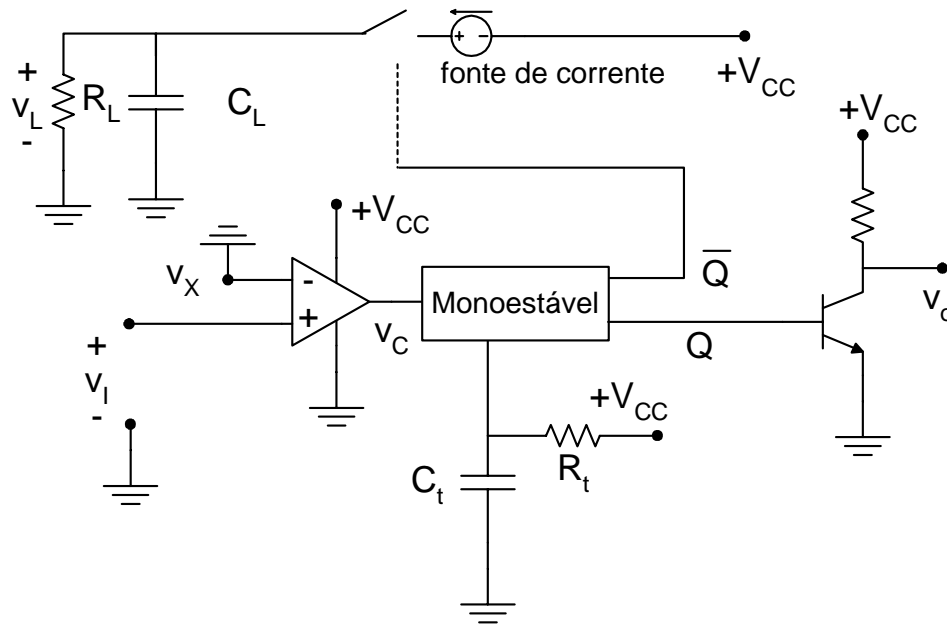
# Conversão frequência-tensão

- Ex: Na determinação da velocidade de rotação de eixos de máquinas elétricas ou mecânicas.

O sinal com uma dada frequência é proveniente de sensores ópticos ou electromagnéticos que geram impulsos correspondentes à rotação da máquina.

A tensão contínua obtida pode ser a variável de controlo num sistema que controle a velocidade de rotação de uma máquina.

# Conversão frequência-tensão

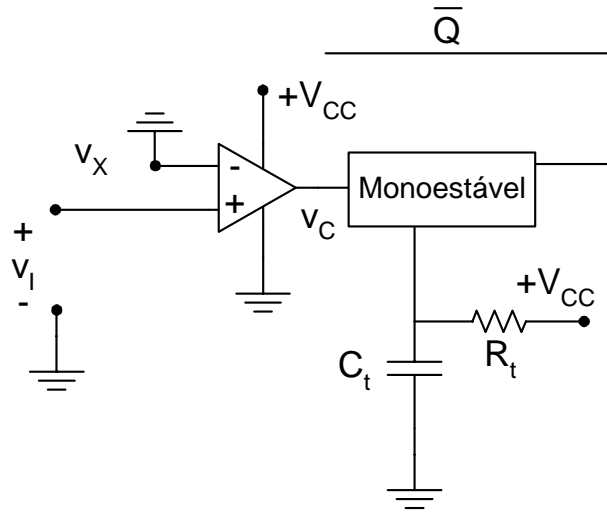


$$v_i \leq v_x = 0 \Rightarrow v_c = 0$$

$$v_i > v_x = 0 \Rightarrow v_c = 1$$

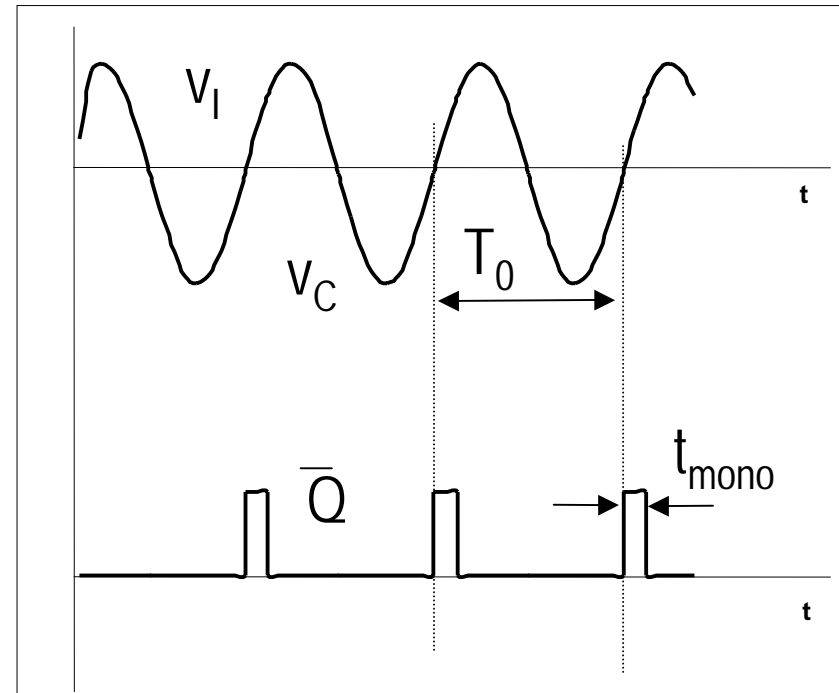
$$v_i = V_I \text{sen}(2\pi f_0 t)$$

# Conversão frequência-tensão

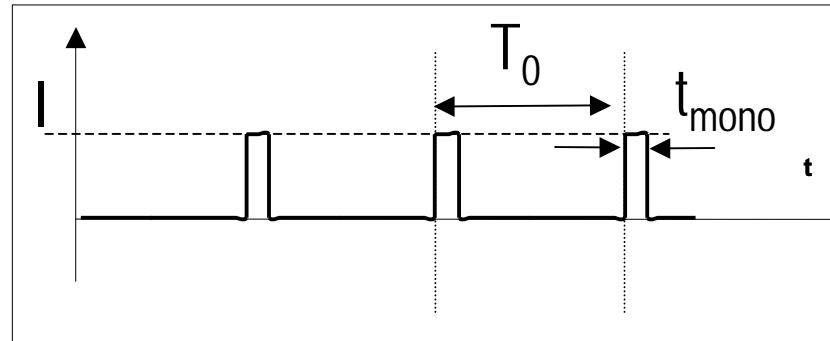
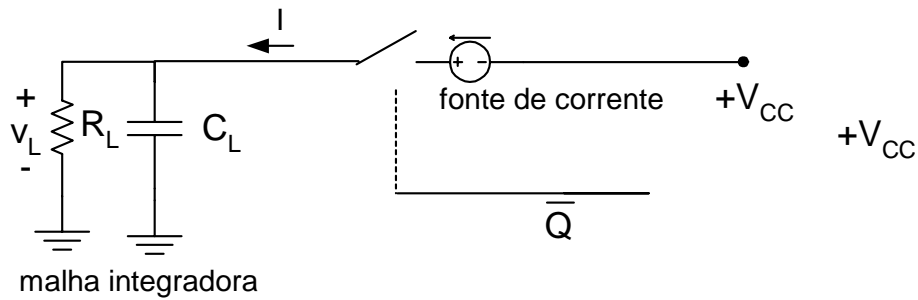


$$v_x = 0$$

$$v_I = V_I \text{sen}(2\pi f_0 t)$$



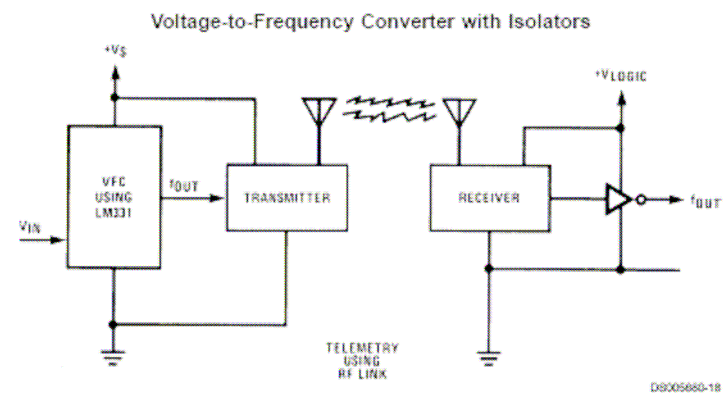
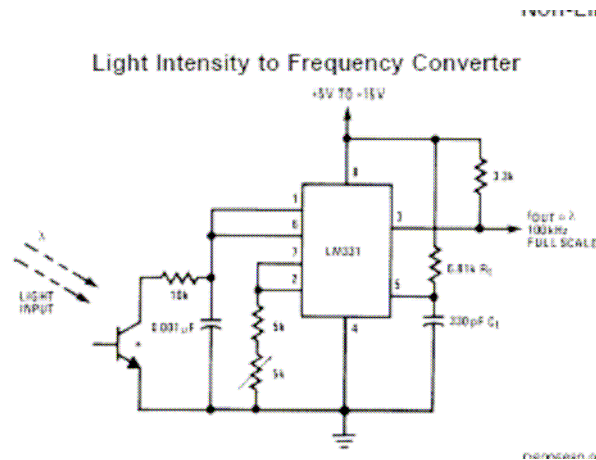
# Conversão frequência-tensão



$$V_L = I \frac{t_{mono}}{T_0} R_L = I R_L t_{mono} \frac{1}{T_0} = k f_o$$

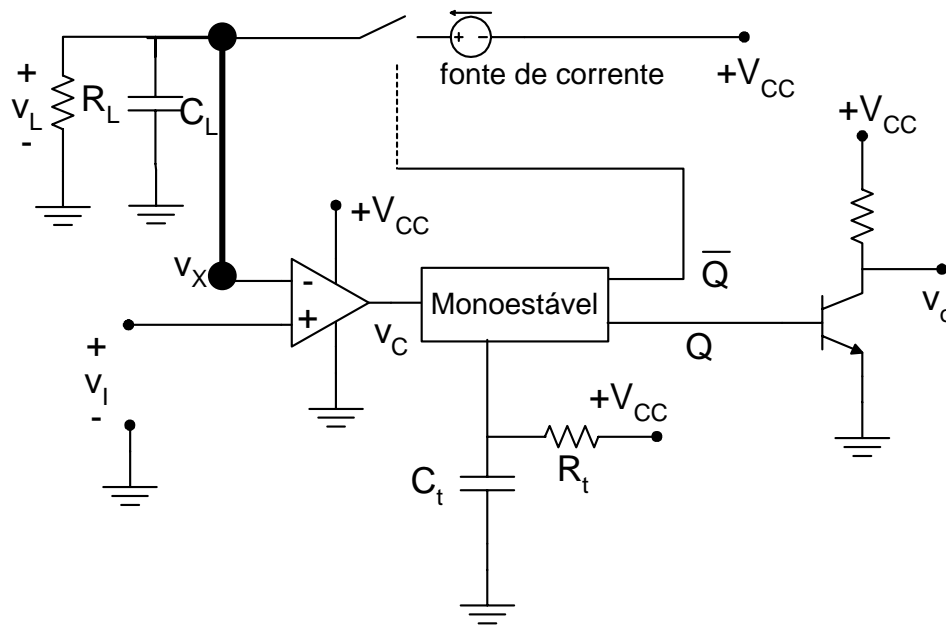
# Conversão tensão-frequência

- Ex: conversão de um sinal de um sensor em frequência



- Ex: Transmissão de um sinal de um sensor à distância

# Conversão tensão frequência



$V_I$  tensão contínua a converter

Circuito realimentado

$$V_I = V_x$$

$$V_x = V_L$$

Regime transitório

$$V_I > V_x$$

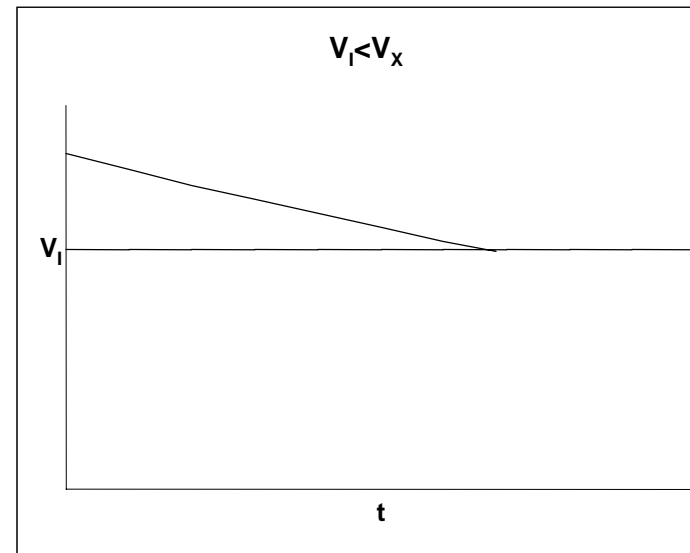
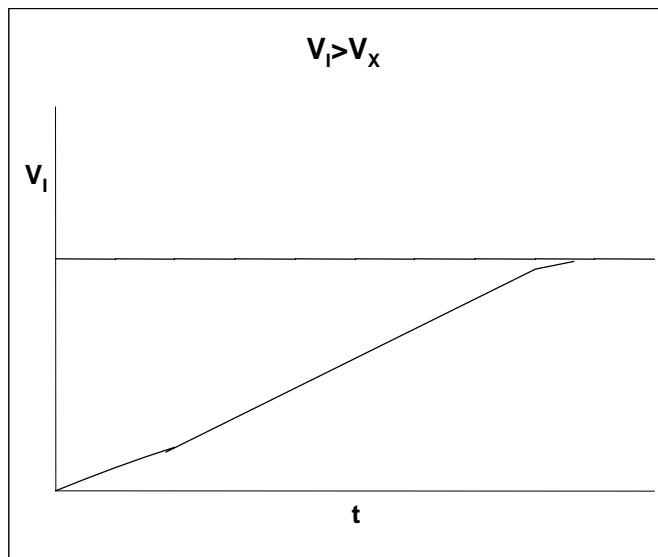
$C_L$  carrega

$$V_I < V_x$$

$C_L$  descarrega

até se ter  $V_I \approx V_x$

# Conversão tensão frequência

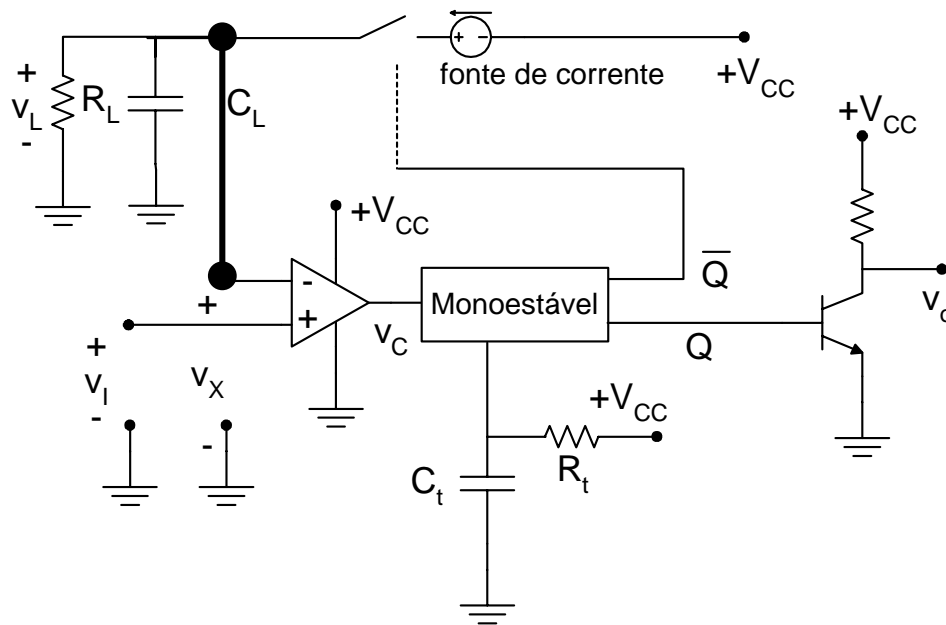


Em regime transitório

- $C_L$  carrega com um ou mais impulsos do monoestável até  $V_X = V_I$
- $C_L$  descarrega-se até  $V_X = V_I$

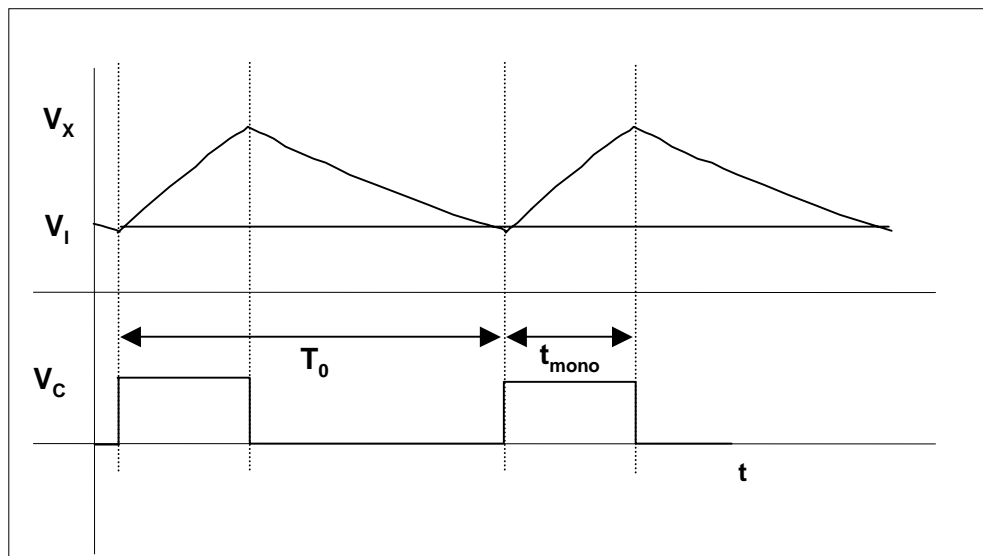


# Conversão tensão frequência



Em regime estacionário, após  $V_L$  ter atingido o valor de  $V_I$ , se  $C_L$  se descarrega, o monoestável dispara e  $C_L$  volta a carregar.

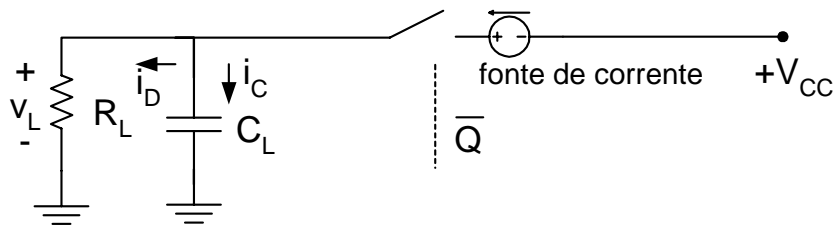
# Conversão tensão frequência



Em regime estacionário, após  $V_L$  ter atingido o valor de  $V_I$ , se  $C_L$  se descarrega, o monoestável dispara e  $C_L$  volta a carregar.

# Conversão tensão frequência

LM331



Corrente de carga

$$i_C = I \frac{t_{mono}}{T_0}$$

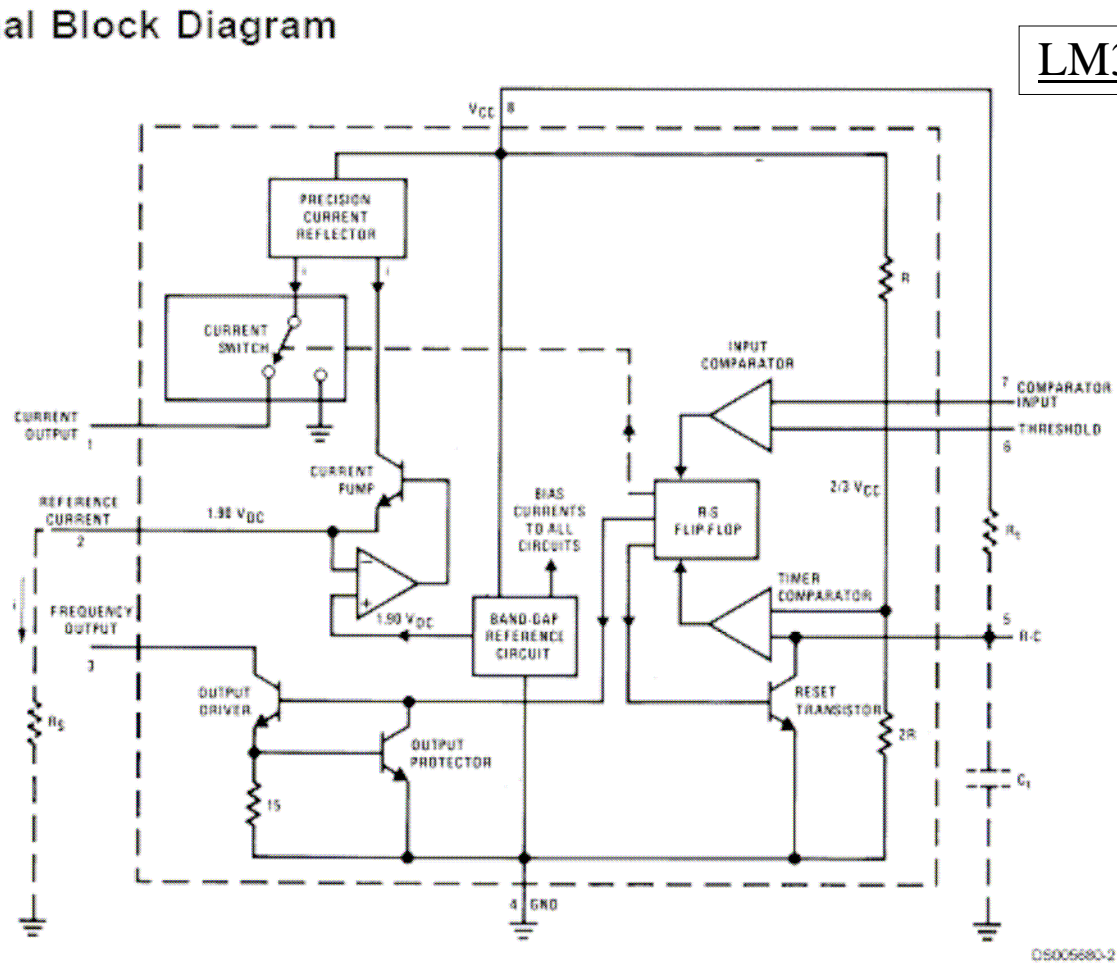
Corrente de descarga

$$i_D = \frac{V_x}{R_L} \approx \frac{V_I}{R_L}$$

$$i_D = i_C \Rightarrow f_o = \frac{V_I}{R_L I t_{mono}} \quad f_o = k \times V_I$$

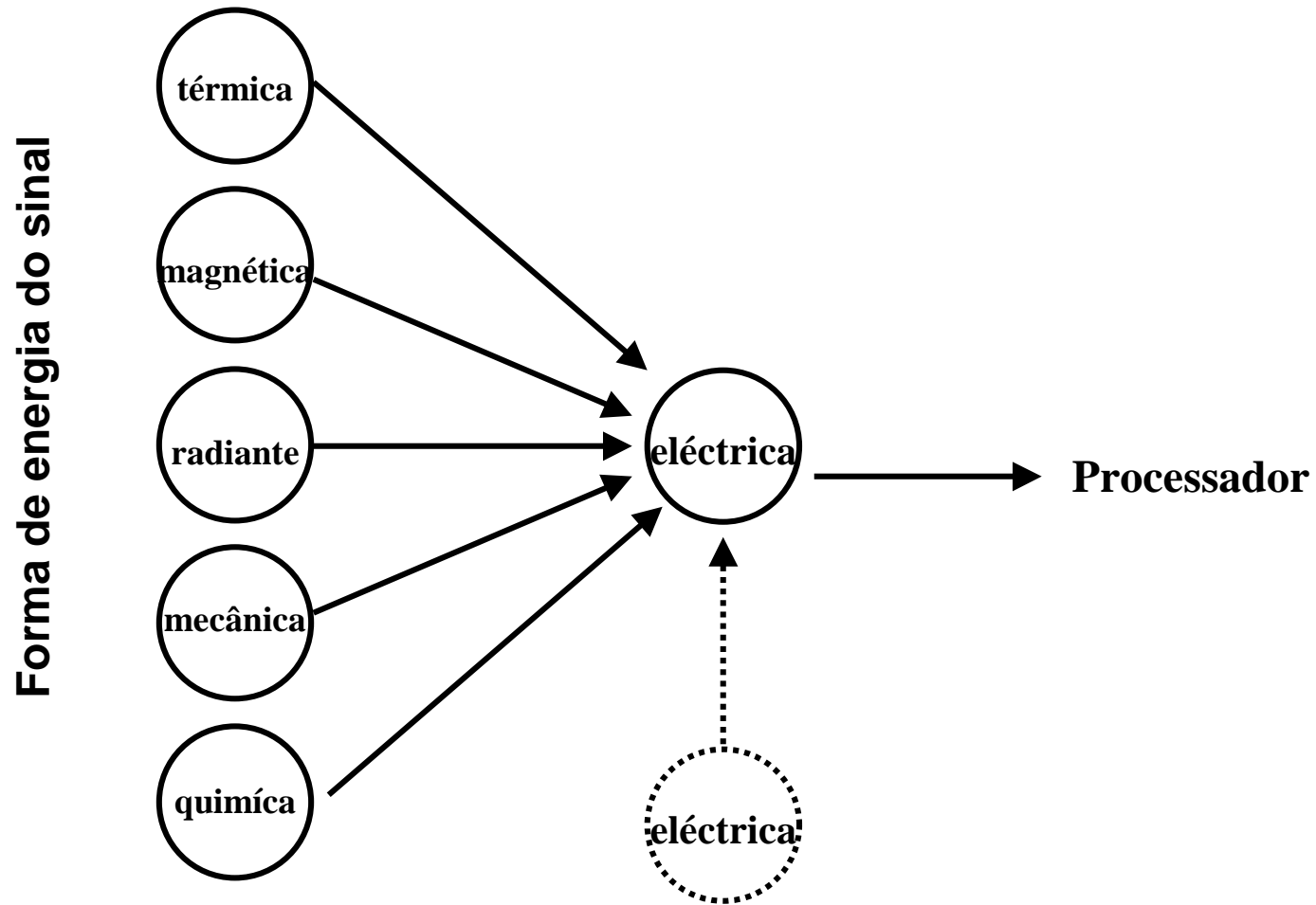
# Conversão tensão frequência

Functional Block Diagram



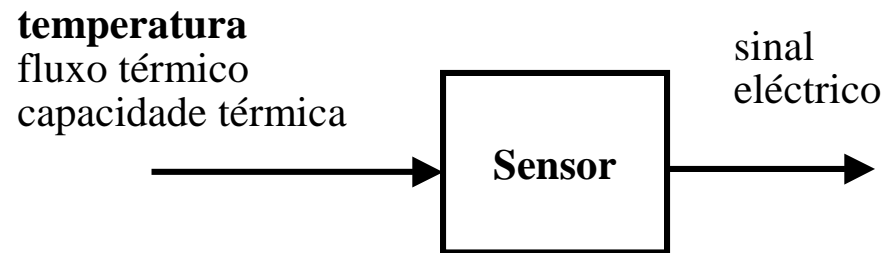
LM331

# Classificação dos sensores



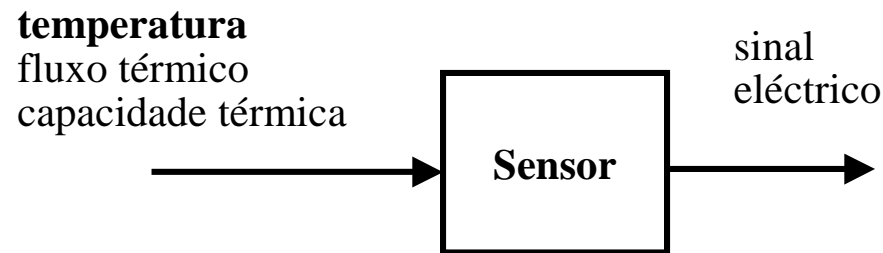
# Sensores térmicos

- Medem grandezas relacionadas com o aquecimento de um corpo



# Sensores térmicos

- Medem grandezas relacionadas com o aquecimento de um corpo



$$Q = m c T$$

**Q** – energia térmica ou calor (J ou caloria)

**m** – massa (kg)

**c** – calor específico (J/kg °C)

**T** – temperatura absoluta (°K)

$$\frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx}$$

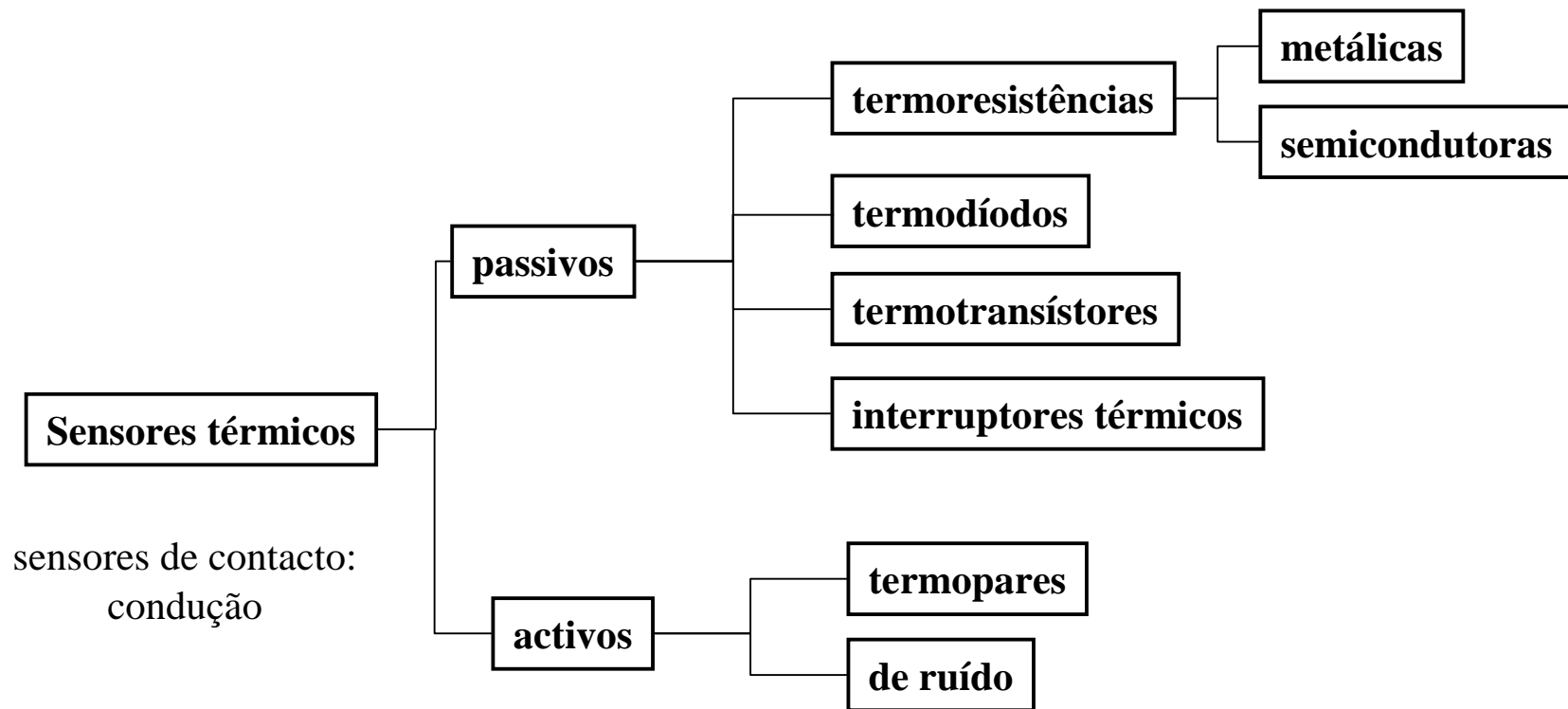
**dQ/dt** – fluxo térmico

**k** – condutibilidade térmica do material

**A** – área da secção transversal

**dT/dx** – gradiente térmico

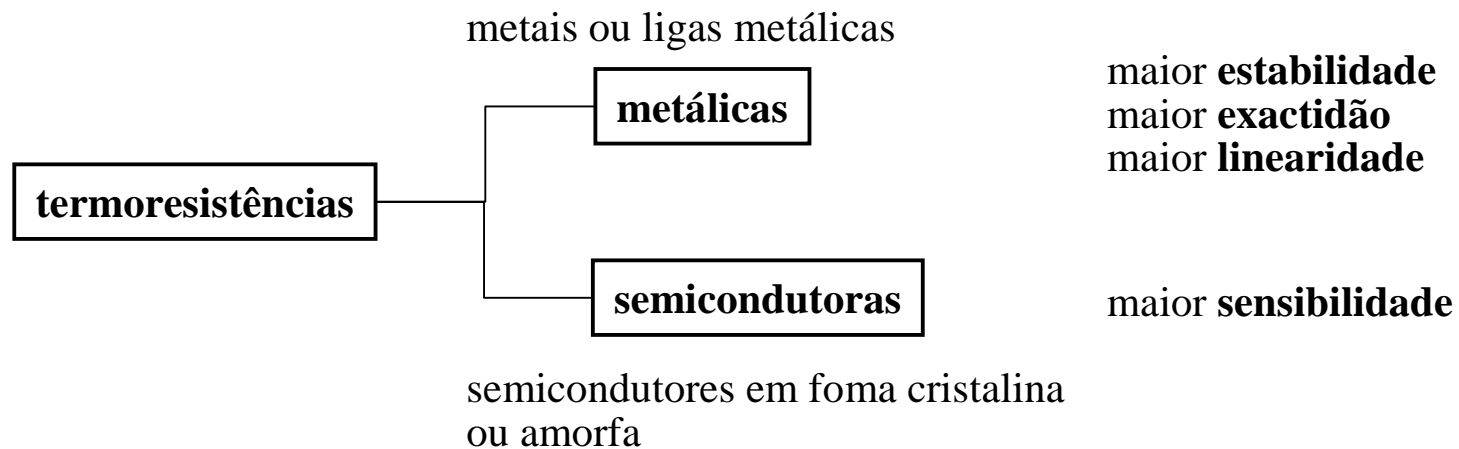
# Tipos de sensores térmicos





# Termoresistências

- Resistividade eléctrica dos materiais varia com a temperatura
- Termoresistências ou termistências: resistências sensíveis à temperatura



# Termoresistências metálicas

- Muitas vezes designadas por **RTD – Resistance Temperature Detector**
- Resistência de um fio (ou filme metálico):

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

$$\frac{1}{\rho} = \sigma = nq\mu$$

**R** – resistência eléctrica

**$\rho$**  – resistividade

**l** – comprimento

**A** – área da secção transversal

**$\mu$**  – mobilidade

**n** – concentração de electrões

**q** – carga do electrão

- A condutividade dos electrões depende da temperatura

# Termoresistências metálicas

$$\rho = \rho_0 \left[ 1 + \alpha (T - T_0) + \beta (T - T_0)^2 + \dots \right]$$

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \Delta T + \beta \Delta T^2 + \dots)$$

$$\alpha = \left. \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \right|_{T_0} \quad \beta = \left. \frac{1}{2\rho} \frac{\partial^2 \rho}{\partial T^2} \right|_{T_0}$$

**coeficientes de temperatura de  
1ª e 2ª ordem**

$$R = R_0 (1 + \alpha_T \Delta T + \beta_T \Delta T^2 + \dots)$$

$$\alpha_T = \left. \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \right|_{T_0}$$

**coeficiente de temperatura**

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha_T \times \Delta T$$

# Termoresistências metálicas

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \Delta T + \beta \Delta T^2 + \dots)$$

$$R = R_0 (1 + \alpha_T \Delta T + \beta_T \Delta T^2 + \dots)$$

$\alpha$  e  $\beta$  sensibilidades semi-relativas  
coeficientes de temperatura da  
resistividade em relação à temperatura  
 $\alpha$  de 1ª e 2ª ordem

$\alpha_T$  sensibilidade semi-relativa  
ou coeficiente de temperatura  
da resistência

$\alpha$ elevado	→	boa sensibilidade
$\beta$ reduzido	→	boa linearidade

# Termoresistências metálicas

- Sensibilidades

$$S_a = \left. \frac{dR}{dT} \right|_{T_0}$$

**Sensibilidade absoluta: taxa da variação de R com T**

$$S_{sr} = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\Delta T} = \left. \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \right|_{T_0}$$

**Sensibilidade semi-relativa: taxa da variação percentual de R com T**

$$S_r = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta T}{T}} = \left. \frac{T}{R} \frac{dR}{dT} \right|_{T_0}$$

**Sensibilidade relativa: taxa de variação percentual de R com a variação percentual de T**

# Exemplo

- Duas resistências de 100  $\Omega$  e 10 M $\Omega$  aumentam de 10 $\Omega$  quando a temperatura sobe de 40 $^{\circ}\text{C}$  para 50  $^{\circ}\text{C}$ . Qual a mais sensível?

$$S_a = \frac{\Delta R}{\Delta T} = 1\Omega/^{\circ}\text{C}$$

$$S_{sr} = \frac{\Delta R}{R} \quad S_{sr100} = \frac{10}{100} = 0,01^{\circ}\text{C}^{-1} \quad S_{sr1M} = \frac{10}{10^6} = 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

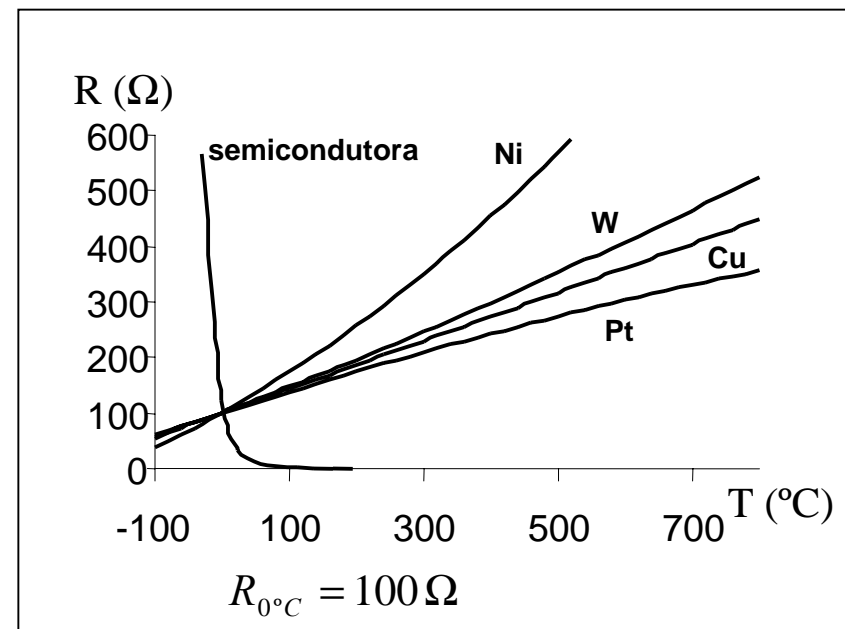
$$S_r = \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad S_{r100} = 40 \times 0,01 = 0,4^{\circ}\text{C}^{-1} \quad S_{r1M} = 40 \times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

# Termoresistências metálicas

Metal	$\alpha$ ( $\Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}$ )	$\beta$ ( $\Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}^2$ )
Platina	0,0039	$-8,75 \times 10^{-7}$
Cobre	0,0043	$6,25 \times 10^{-8}$
Tungstênio	0,0046	$8,80 \times 10^{-7}$
Níquel	0,0068	$5,12 \times 10^{-6}$

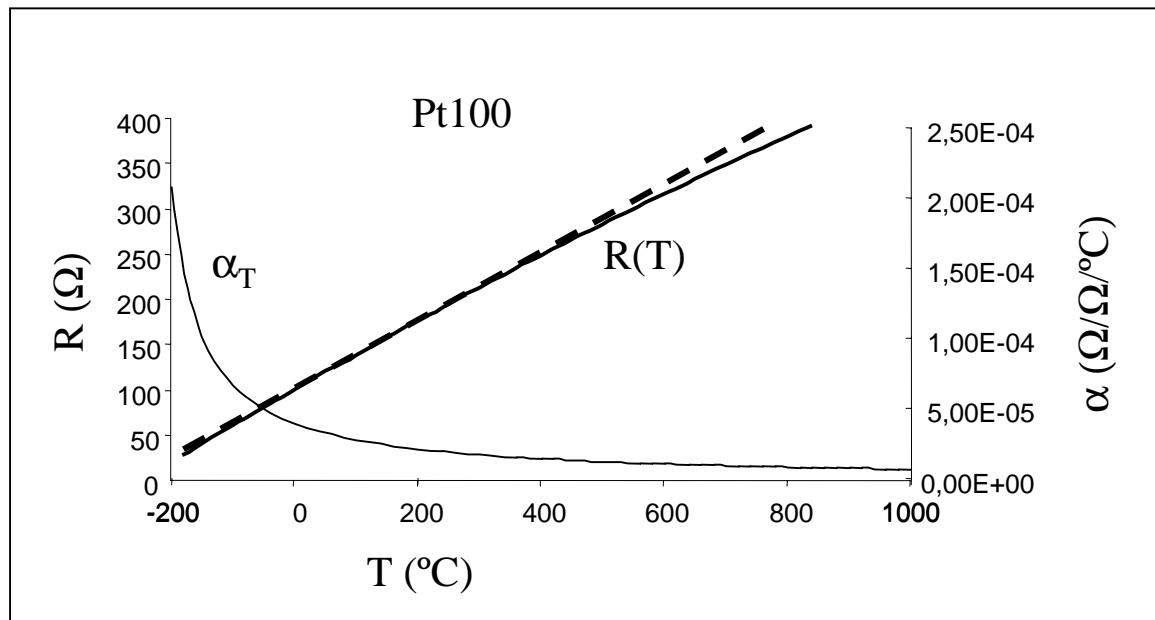
Fabricantes especificam valores de R com tabelas

R(T) da platina é das mais lineares



# Termoresistências metálicas

- Termoresistências de platina:
  - A platina pode ser produzido com **grau de pureza elevado** (resistividade definida com precisão), **estável e inerte**.
  - Serve de padrão de referência para temperaturas 13,8 °K 1-903,89 °K
  - 100  $\Omega$  (Pt100), 500  $\Omega$  e 1000  $\Omega$



erro < 3% -270 - 800°C

erro < 0,5% 0 - 100°C



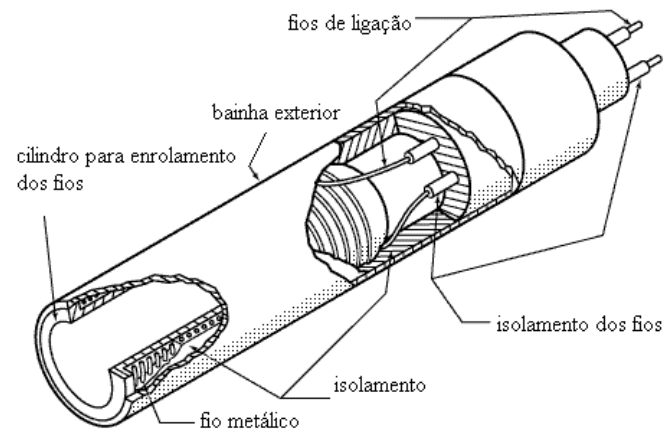
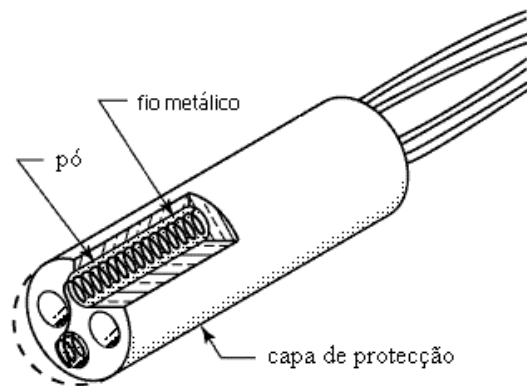
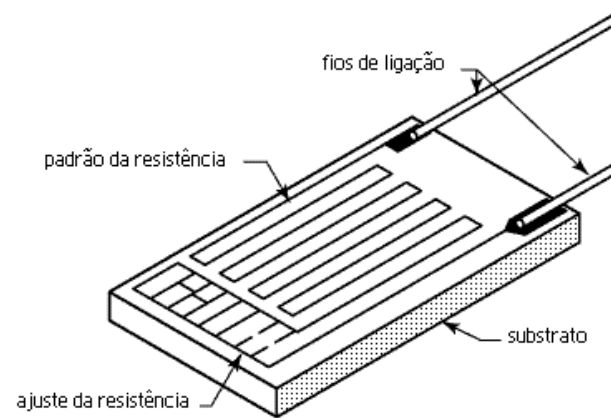
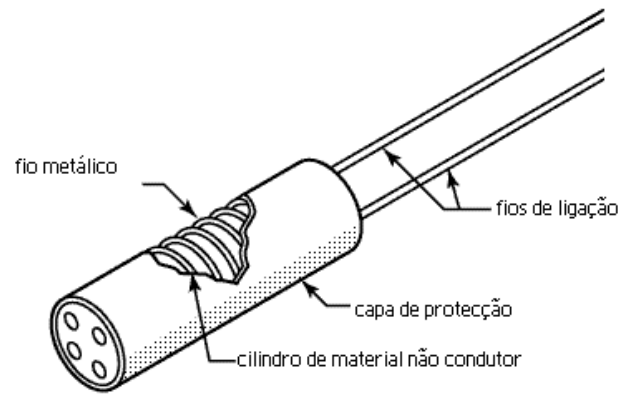
# Termoresistências de platina

Determine o erro de linearidade uma Pt100 em que  $\alpha = 3,808 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  e  $\beta = -5,0802 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$ , quando percorrida por uma corrente constante e quando a temperatura varia entre 0 e 850°C.

$$\frac{\Delta R_{\max}}{R_{850^\circ\text{C}} - R_{0^\circ\text{C}}} = -0,02\%$$

(já resolvido)

# Termoresistências metálicas



<http://www.rdfcorp.com>

# Termoresistências metálicas

- Exemplos (Rdf Corporation) em platina:
  - Industriais
  - Com cápsulas
  - De superfície
- Exemplos (RTD Company) (platina, cobre e níquel):
  - Genérico
  - De superfície
  - Enrolamento
  - Filme
  - Enrolamento em cerâmica
  - Enrolamento oco

# Termoresistências semicondutoras



- Resistividade dos semicondutores (Si) intrínsecos

$$\frac{1}{\rho} = \sigma = n_i q (\mu_n + \mu_p)$$

$n_i$  – concentração de portadores intrínsecos

$E_g$  – altura da banda proibida

$k$  – constante de Boltzman

$\sigma$  - condutividade

$\mu$  - mobilidade

# Termoresistências semicondutoras

- Semicondutores intrínsecos (sem impurezas)

$$\frac{1}{\rho} = \sigma = n_i q (\mu_n + \mu_p)$$

$$\mu \propto T^{-\frac{3}{2}} T^{-\frac{5}{2}}$$

$$n_i(T) \propto T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

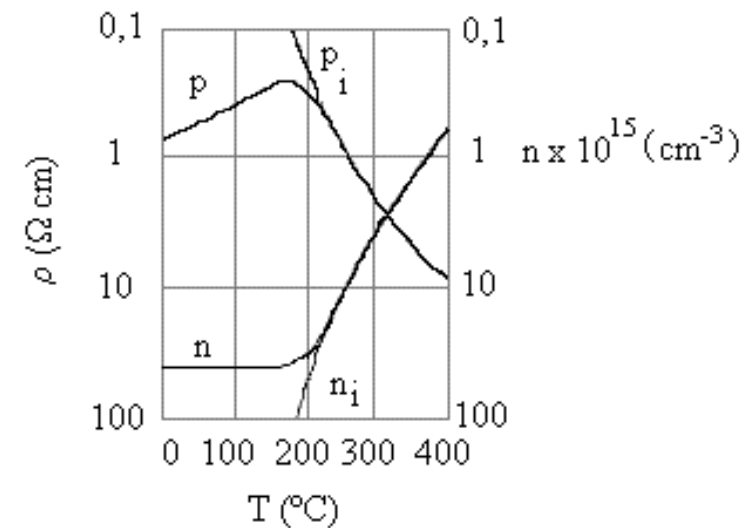
$$\rho \propto e^{\frac{E_g(0)}{2kT}}$$

a resistividade diminui com a temperatura

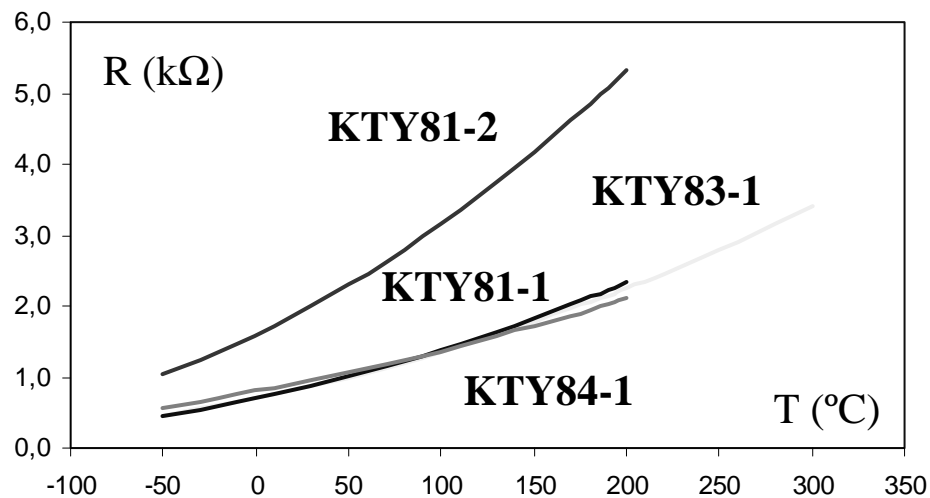
$$T \uparrow \quad \rho \downarrow$$

# Termoresistências semicondutoras

- Não se consegue obter com silício um nível de impurezas de modo a ser considerado intrínseco: na gama de temperaturas de interesse as impurezas influenciam  $\rho$ .
- semicondutores dopados:
  - baixas temperaturas:  
predominância das impurezas
  - altas temperaturas:  
preponderância dos portadores intrínsecos



# Termoresistências semicondutoras



Silício

Fabricantes especificam  $R$  com tabelas

Sensor	Valor nominal ( $\Omega$ )	Gama de temperaturas (°C)	$\alpha$ ( $\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$ )	$\beta$ ( $\Omega/\Omega/^\circ\text{C}^2$ )
KTY81-1	990-1050	- 55 a 150	7,87E-03	1,87E-05
KTY81-2	1980-2100	- 55 a 150	7,87E-03	1,87E-05
KTY83-1	990-1050	- 55 a 150	7,64E-03	1,73E-05
KTY84-1	970-1050	0 a 300	6,12E-03	1,03E-05

# Termoresistências semicondutoras

KTY com características semelhantes às RTD, mas mais sensíveis e menos lineares

Metal	$\alpha$ ( $\Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}$ )	$\beta$ ( $\Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}^2$ )
Platina	$3,9 \times 10^{-3}$	$-8,75 \times 10^{-7}$
Cobre	$4,3 \times 10^{-3}$	$6,25 \times 10^{-8}$
Tungstênio	$4,6 \times 10^{-3}$	$8,80 \times 10^{-7}$
Níquel	$6,8 \times 10^{-3}$	$5,12 \times 10^{-6}$

KTY81-1

Sensor	Valor nominal ( $\Omega$ )	Gama de temperaturas ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\alpha$ ( $\Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}$ )	$\beta$ ( $\Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}^2$ )
KTY81-1	990-1050	- 55 a 150	7,87E-03	1,87E-05
KTY81-2	1980-2100	- 55 a 150	7,87E-03	1,87E-05
KTY83-1	990-1050	- 55 a 150	7,64E-03	1,73E-05
KTY84-1	970-1050	0 a 300	6,12E-03	1,03E-05



# Termoresistências semicondutoras

Determine o erro de linearidade uma KTY81 na faixa de temperaturas de 0° a 100°.

$$R = 1000 [1 + \alpha \Delta T + \beta \Delta T^2 + \dots]$$

$$\text{erro}(100^\circ) = \beta \times 75^2 = 1,87 \times 10^{-5} \times 75^2 = 140,5 \, \Omega$$

$$\text{erro}(0^\circ) = -\beta \times 25^2 = -1,87 \times 10^{-5} \times 25^2 = -46,9 \, \Omega$$

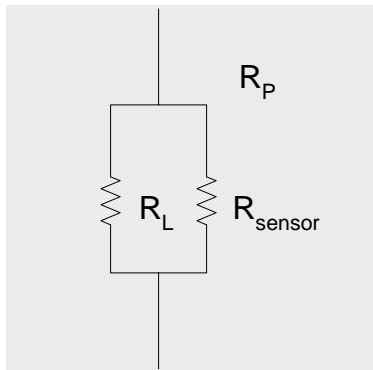
$$\Delta R = 140,5 \, \Omega$$

$$R(100^\circ) \approx 1000 [1 + 7,87 \times 10^{-3} 75] = 1590,2 \, \Omega$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{140,5}{1590,2} = 8,8\%$$

# Termoresistências semicondutoras

- Menos lineares que termoresistências metálicas
- Linearização dos sensores KTY (numa determinada gama de temperaturas)



Temperatura	$T_A$	$T_B$	$T_C$
$R_{\text{sensor}}$	$R_A$	$R_B$	$R_C$

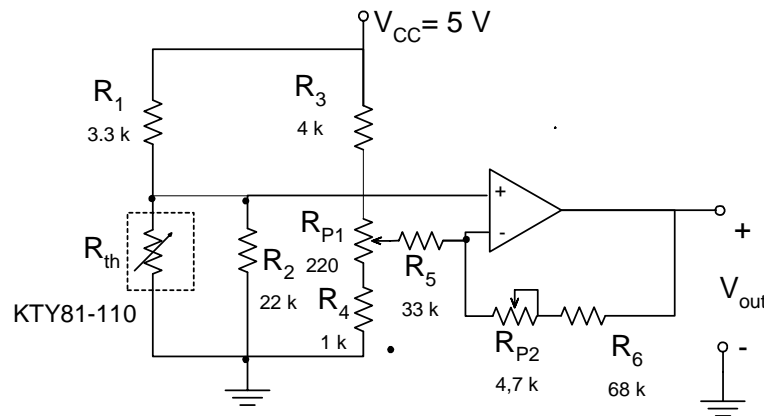
$$R_{PA} - R_{PB} = R_{PB} - R_{PC} \Rightarrow R_L$$

$$\frac{R_{\text{sensor}(T_A)} R_L}{R_{\text{sensor}(T_A)} + R_L} - \frac{R_{\text{sensor}(T_B)} R_L}{R_{\text{sensor}(T_B)} + R_L} = \frac{R_{\text{sensor}(T_B)} R_L}{R_{\text{sensor}(T_B)} + R_L} - \frac{R_{\text{sensor}(T_C)} R_L}{R_{\text{sensor}(T_C)} + R_L}$$

# Termoresistências semicondutoras

## •Ex

Termómetro electrónico para T de 0° a 100°C, gerando uma tensão entre 1 e 3 V.  
 Rp1 gera 1 V na saída para T = 0° C. Rp2 define o ganho para se ter 3V a 100°C. O erro de linearidade é de ±1°C na gama de 0ª a 100°C.



$$R_{th(100^\circ)} = 1696 \Omega$$

$$R_{th(25^\circ)} = 1000 \Omega$$

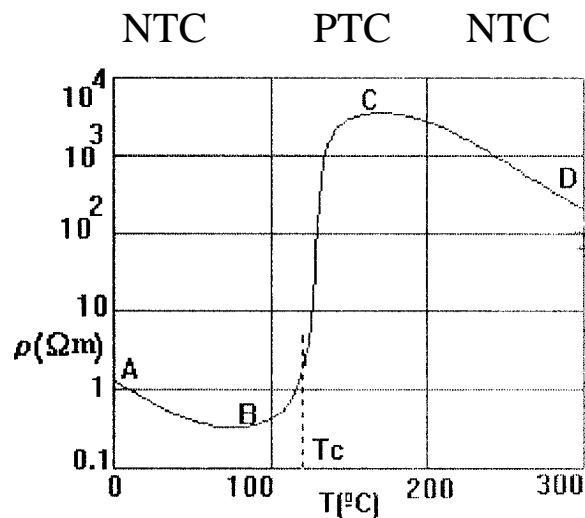
$$R_{th(0^\circ)} = 815 \Omega$$

$$V_+ = \frac{R_L // R_2}{R_L // R_2 + R_1}$$

$$V_+(0^\circ) = \frac{R_{th} // R_2}{R_{th} // R_2 + R_1} =$$

# Termoresistências cerâmicas semicondutoras

- Misturas de óxidos metálicos (ferro, níquel, cobre, magnésio, cobalto, titânio, lítio e urânio) cozidas a altas temperaturas



$T_C$  temperatura de Curie

NTC Negative Temperature Coefficient  
 PTC Positive Temperature Coefficient

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{B}{T}} \quad B > 0 \quad NTC$$

$$R = A e^{\frac{B}{T}} \quad B < 0 \quad PTC$$

# Termoresistências cerâmicas semicondutoras

- Sensor NTC fazendo  $T_C$  muito elevada

$$R = A e^{\frac{B}{T}} \quad T \rightarrow \infty \quad R = A$$

A depende de  $\rho$ , l e S

B depende das propriedades da cerâmica

$$R(T) = R(T_0) e^{B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad T_0 = 25^\circ C = 298,15^\circ K$$

expressão aproximada (A e B dependem da temperatura):

erro típico de 0,3% para variação de 0° a 50°C

Usam-se também expressões empíricas

$$\frac{1}{T} = a + b \ln(R) \quad R \rightarrow \frac{1}{T} = a + b \ln(R) + c \ln^3(R) \quad e \quad erro \pm 0,01^\circ C$$

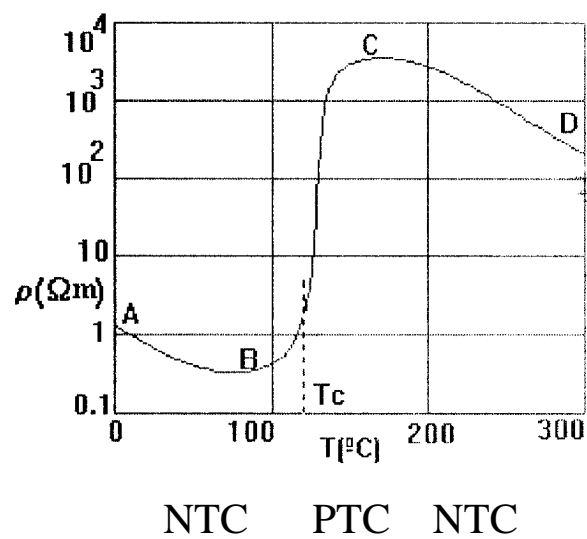
# Termoresistências cerâmicas semicondutoras

- Termistências NTC e PTC

$$R = Ae^{\frac{B}{T}}$$

NTC:  $T \uparrow$      $R \downarrow$

PTC:  $T \uparrow$      $R \uparrow$



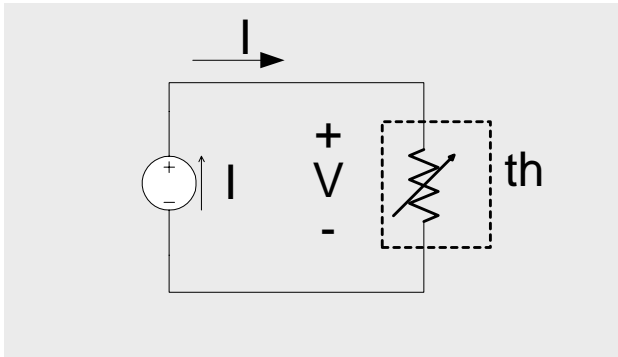
NTC - materiais escolhidos de modo a terem  $T_C$  elevada:  $R$  diminui quando  $T$  aumenta

PTC - com  $T_C$  baixa:  $R$  aumenta com  $T$  numa determinada faixa de temperaturas

<http://www.atpsensor.com>

# Termistências NTC

- Auto-aquecimento regenerativo (excitação em corrente)



$$P_{gl} = R I^2 \Rightarrow T \uparrow$$

$$T \uparrow \Rightarrow R \downarrow$$

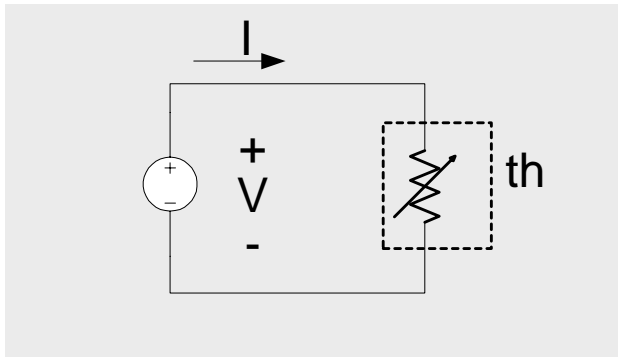
$$\Delta T = T - T_a = R_{th} P_g$$

Temperatura final de th:

$$P_{gl} = R I^2 = \frac{T_{final} - T_a}{R_{th}} \Rightarrow A e^{\frac{B}{T_{final}}} I^2 = \frac{T_{final} - T_a}{R_{th}}$$

# Termistências NTC

- Auto-aquecimento regenerativo (excitação em tensão)



$$P_{gV} = \frac{V^2}{R} \Rightarrow T \uparrow \quad R \downarrow \quad P_g \uparrow \quad T \uparrow$$

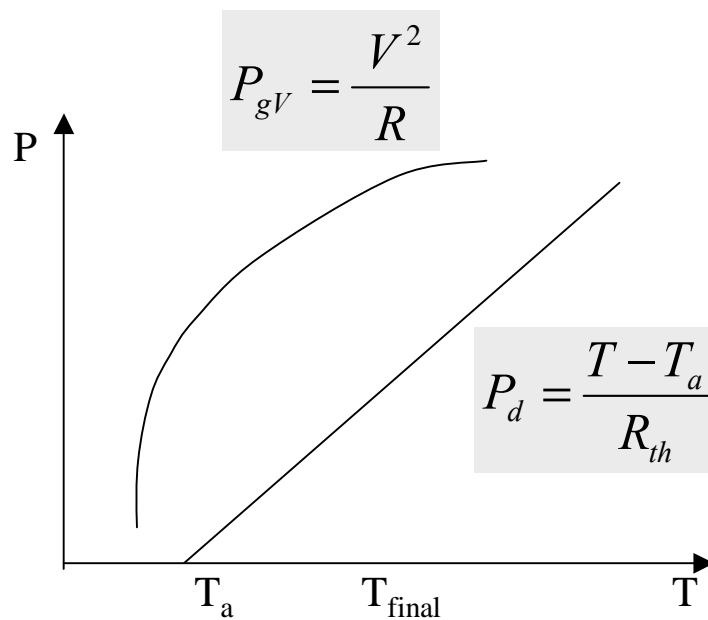
Pode haver destruição da resistência



# Termistências NTC

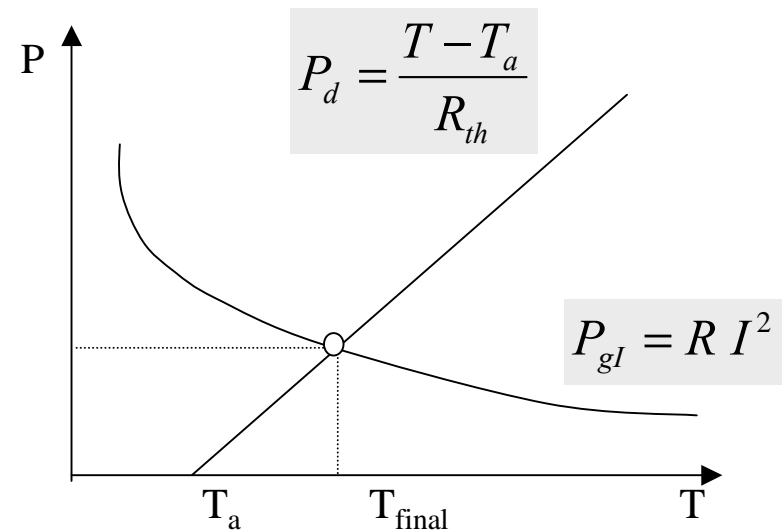
- Auto-aquecimento regenerativo

excitação em tensão



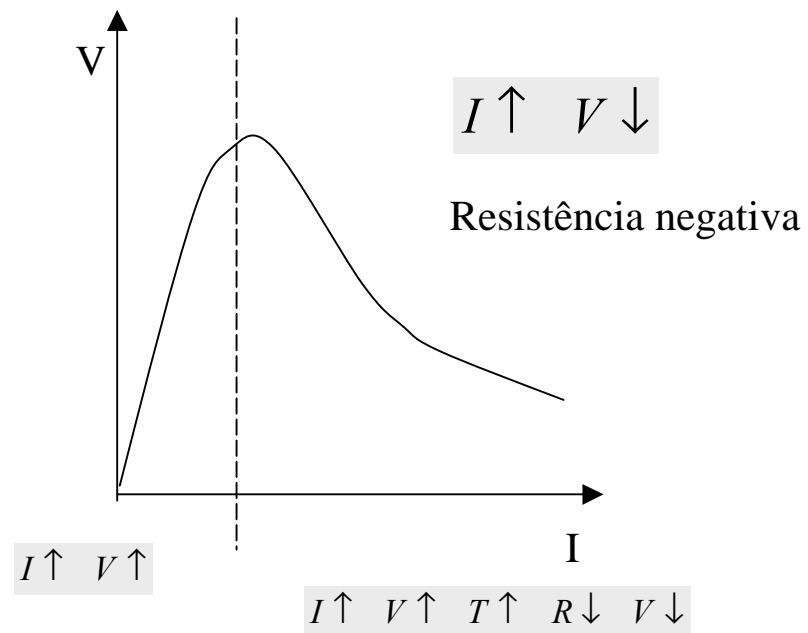
pode haver destruição da resistência

excitação em corrente



# Termistências NTC

- Auto-aquecimento regenerativo



# Termistências NTC

## •Exemplo

Uma termistência NTC com  $R(25^{\circ}\text{C}) = 10 \text{ k}\Omega$  e  $B = 3800 \text{ }^{\circ}\text{K}$  é utilizada com dois regimes de excitação: corrente  $I$  de  $0,1 \text{ mA}$  e de  $10 \text{ mA}$ . A resistência térmica da termistência é de  $100 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$  e a temperatura do ar é de  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Calcule:

- as temperaturas atingidas pelas resistências
- o efeito de auto-aquecimento

$$A = \frac{R}{e^{\frac{B}{T}}} = \frac{10k}{e^{\frac{3800}{298.13}}} = 0,002916$$

$$P = \frac{\Delta T}{100}$$

$$I = 0,1 \text{ mA} \Rightarrow 10 \text{ k} \times 0,1 \times 10^{-6} = 1 \text{ mW}$$

$$\Delta T = P \times 100 = 0,1^{\circ}$$

$$I = 10 \text{ mA} \Rightarrow 10 \text{ k} \times 100 \times 10^{-6} = 1 \text{ W}$$

$$\Delta T = P \times 100 = 100^{\circ}$$

# Termistências NTC

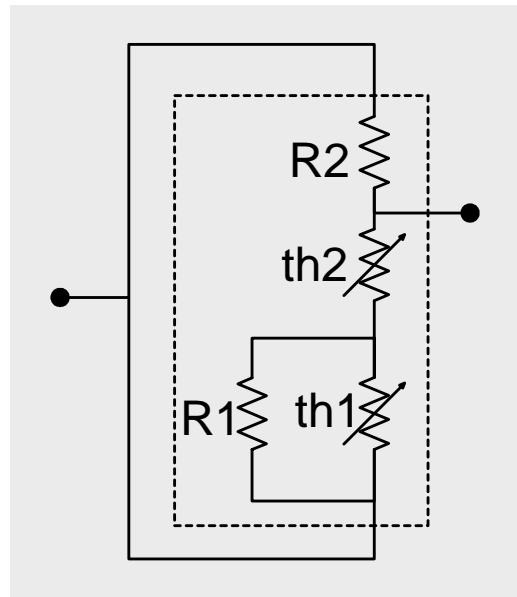
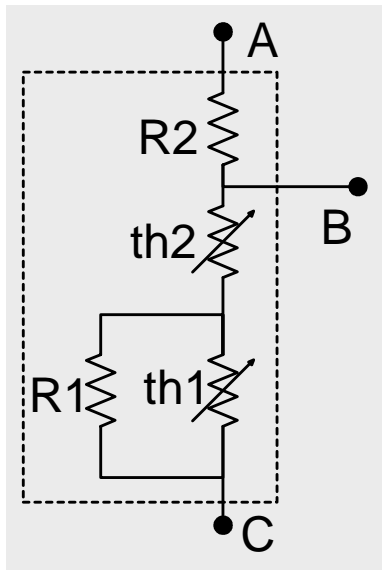
$$2,916 \times 10^{-3} \times e^{\frac{3800}{T}} \times 100 \times 10^{-6} = \frac{T - 298,15}{100}$$

$$T = 32.35^{\circ}C$$

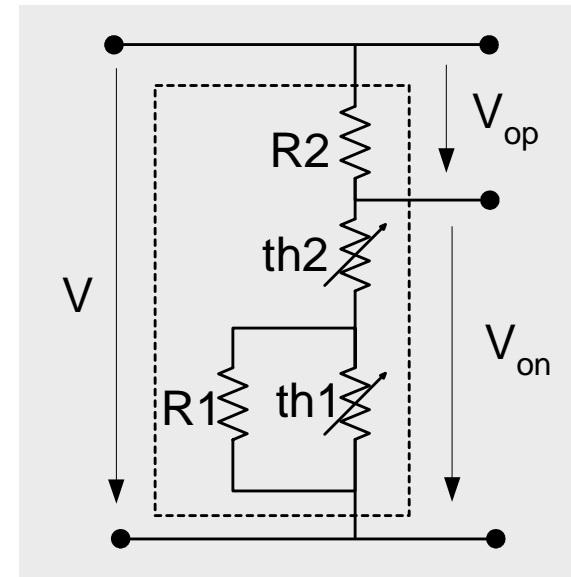
auto-aquecimento regenerativo: é gerado mais calor que o inicial

# Termistências NTC

- LTN –Linear Thermistor Network



$$R(T) = A_r T + B_r$$



$$\frac{V_{op}}{V} = A_v T + B_v$$

# Sensores lineares com termistências NTC

- LTN –Linear Thermistor Network (Fenwal Electronics)

LTN	Gama (°C)	$A_v$ (mV/°C)	$B_v$ (V/V)	$A_r$ ( $\Omega/^\circ\text{C}$ )	$B_r$ (k $\Omega$ )	Erro de linearidade 0,1°C
LTN ML1	-5 a 45	5,7562	0,195814	-40,178	5,6132	-0,58 a 0,61
LTN ML2	-30 a 50	6,8517	0,346778	-152,295	14,56684	-2,48 a 1,09
LTN ML3	0 a 100	5,3988	0,137113	-21,433	3,42566	-2,31 a 2,34

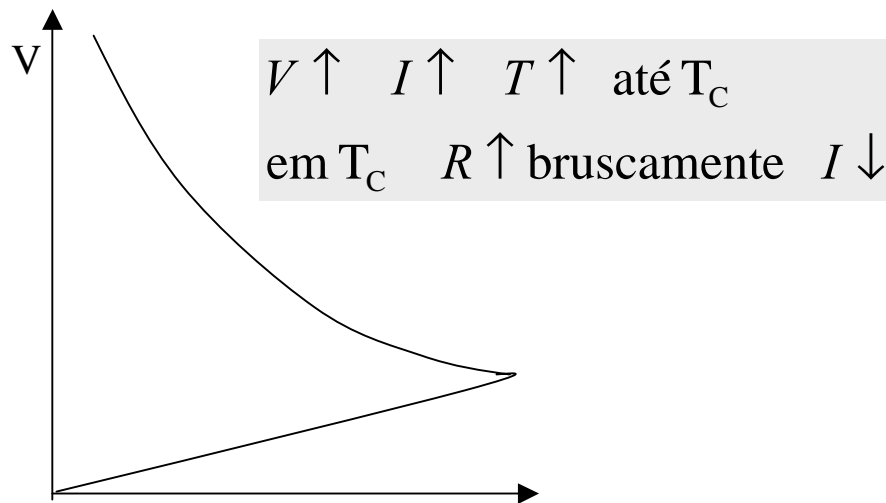
Tolerâncias de fabrico baixas, precisas e lineares

Preços relativamente económicos (mais sensíveis que as RTD de platina)

# Vantagens e desvantagens das NTC

- Mais sensíveis que qualquer outro sensor de temperatura
- Valores variáveis de  $1\Omega$  a  $100\text{ M}\Omega$
- Valores exactos e pouca dispersão de características de sensor para sensor
- Aproveita-se o auto-aquecimento em certas aplicações
- Formas variadas, adaptadas à diferentes aplicações

# Termistências PTC



- Pouco precisas e pouco estáveis face às NTC, não se utilizando para medir temperaturas
- A resistência varia bruscamente aproveitando-se a sua utilização com interruptor térmico

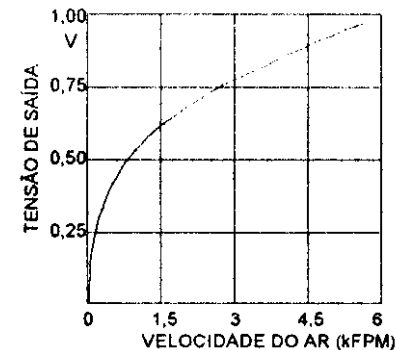
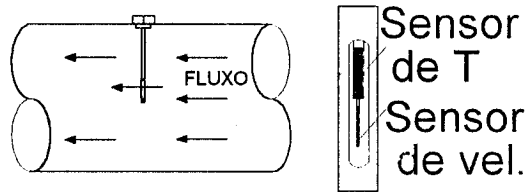


# Aplicações das termistências metálicas

- Medição de temperaturas: grande exactidão com RTD de platina.
- Medição de caudais de gases (ex: controlo da quantidade de ar para a combustão nos motores de explosão com injeção electrónica)

# Aplicações das termistências metálicas

- Sierra Instruments com 2 termistências



$$T_C = T_a + \Delta T \quad (\Delta T = 60^\circ)$$

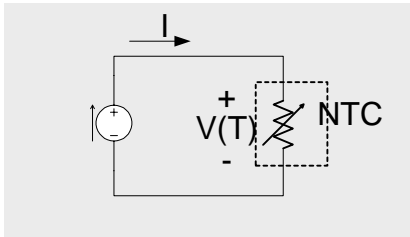
$$fpmt(\text{foot per minute}) = 0,3048m / s$$

- sensor de temperatura do ar  $T_a$
- sensor de temperatura do gás de modo a manter a temperatura  $T_c$

A diferença entre tensões aplicadas ao sensor de temperatura do gás, com e sem fluxo de gás, mantendo a temperatura  $T_2$ , é função da velocidade do gás

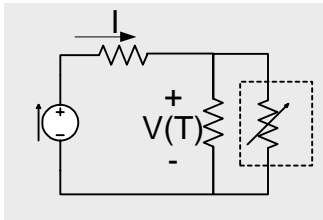
# Aplicações das termistências NTC

- Medição de temperaturas com termistências NTC



$$V(T) = I A e^{\frac{B}{T}}$$

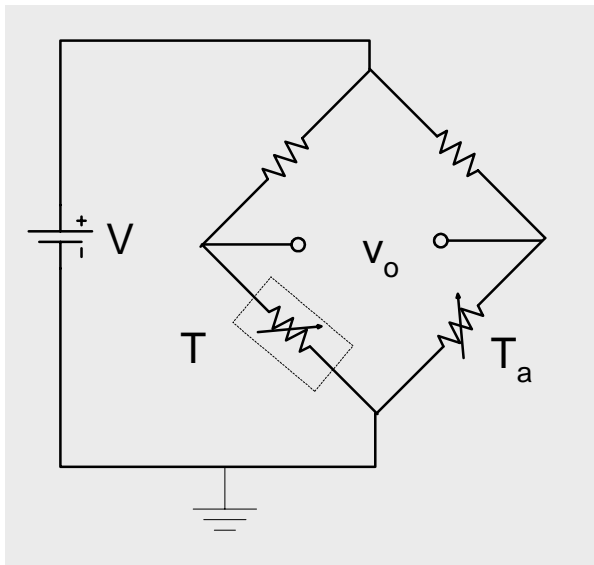
$I$  pequena para não haver auto-aquecimento



$$V(T) \text{ linear}$$

# Aplicações das termistências NTC

- Medição de temperaturas com termistências NTC

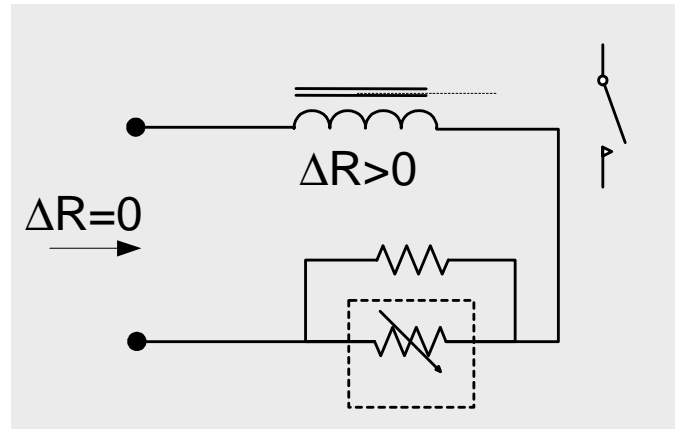


$V_o$

diferença de temperatura entre  
as duas termistências

# Aplicações das termistências NTC

Compensação da variação com a temperatura da resistência de um relé



Manter a corrente constante no circuito, independente da temperatura

# Aplicações das termistências NTC

A resistência do solenóide (fio de cobre) de um relé é de  $5000 \Omega$  a  $25^\circ\text{C}$ . O relé necessita de uma corrente de  $1 \text{ mA}$  para a armadura fechar o contacto. Dimensione o valor de uma NTC, caracterizada por  $B = 4000 \text{ K}$  de modo a que a corrente de fecho do contacto fique constante quando a temperatura varia entre  $0$  e  $60^\circ \text{C}$ . O coeficiente de temperatura do cobre é de  $0,0043 \Omega/\Omega/^\circ\text{C}$ . Considere  $V = 7.5 \text{ V}$ .

$$R_{\text{relé}}(0^\circ) = 5000(1 - 0,0043 \times 25) = 4538 \Omega$$

$$R_{\text{relé}}(60^\circ) = 5000(1 + 0,0043 \times 35) = 5752 \Omega$$

$$1\text{m} = \frac{7.5}{R_{\text{relé}} + R_{\text{th}}}$$

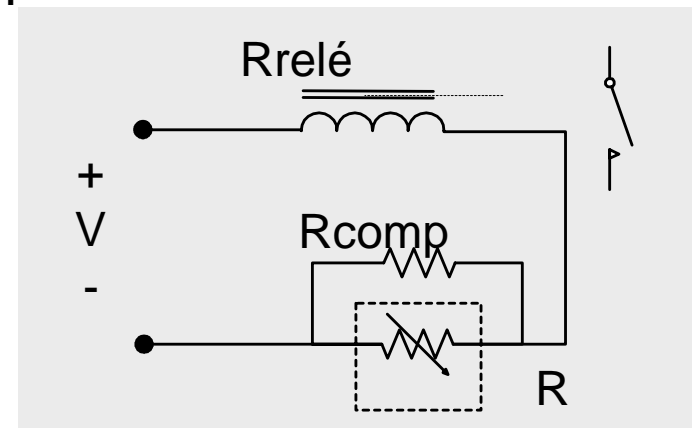
$$R_{\text{th}}(25^\circ) = 2,5 \text{ k}\Omega$$

$$R_{\text{th}}(0^\circ) = 2962 \Omega$$

$$R_{\text{th}}(60^\circ) = 1748 \Omega$$

$$R = Ae^{\frac{B}{T}}$$

$$A = \frac{2500}{\frac{4000}{e^{298.15}}} = 0.003727$$



# Aplicações das termistências NTC

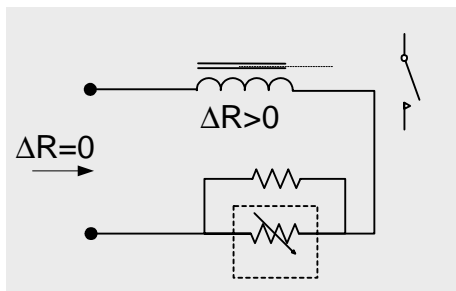
$$R(0^\circ) = 8535 \Omega$$

$$R(60^\circ) = 610 \Omega$$

$$R_{comp} // 610 =$$

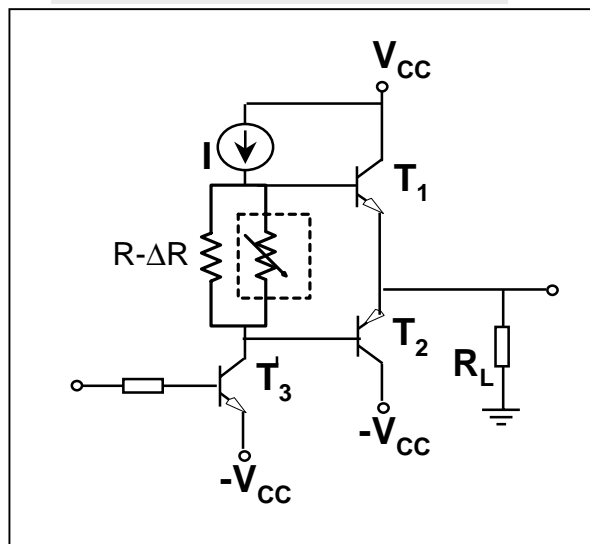
# Aplicações das termistências semicondutoras

Compensação da variação da resistência com a temperatura com uma NTC



Circuito com relé

Manter a corrente constante no circuito, independente da temperatura



Classe AB limiar de condução na ausência de sinal

$$2V_{BE} = RI$$

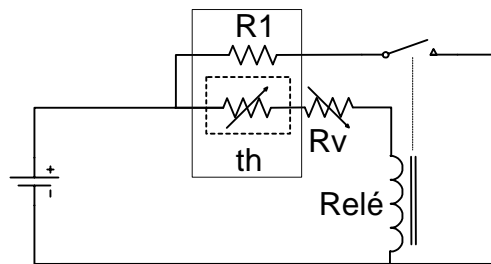
$$\Delta V_{BE} / \Delta T < 0$$

$$V_{BE} \downarrow \Rightarrow R \downarrow$$



# Aplicações das termistências semicondutoras

- Controlo de temperatura com uma NTC

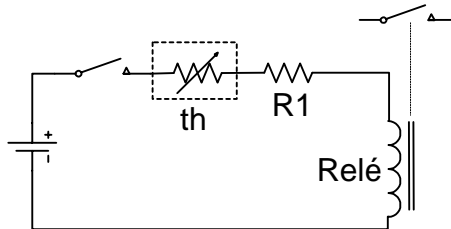


Corpo aquecido por R1, sendo a temperatura controlada por RV

th e R1 acopladas térmicamente

th sem auto-aquecimento

- Circuito de atraso com uma NTC (auto-aquecimento)



$$E_i = E_a + E_d$$

$$P_i dt = C_c dT + \frac{T - T_a}{R_t} dt$$

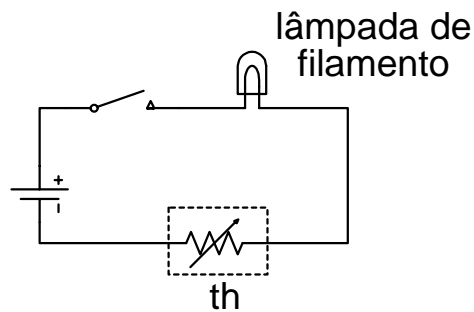
$$T = T_a + \Delta T_{\max} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_t}} \right)$$

$$\Delta T_{\max} = T_{\text{final}} - T_a = P_i R_t$$

$$\tau_t = C_c R_t$$

# Aplicações das termistências semicondutoras

- Atenuador de corrente de pico com NTC (auto-aquecimento)



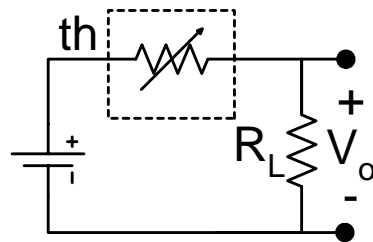
Lâmpada de  $100 \Omega$

$$T = 25^{\circ}C \quad R = 50\Omega$$

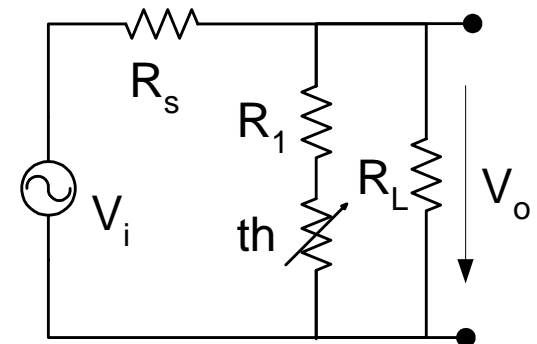
$$T = 2700^{\circ}C \quad R = 500\Omega$$

- Estabilizador de tensão com NTC (auto-aquecimento)

série

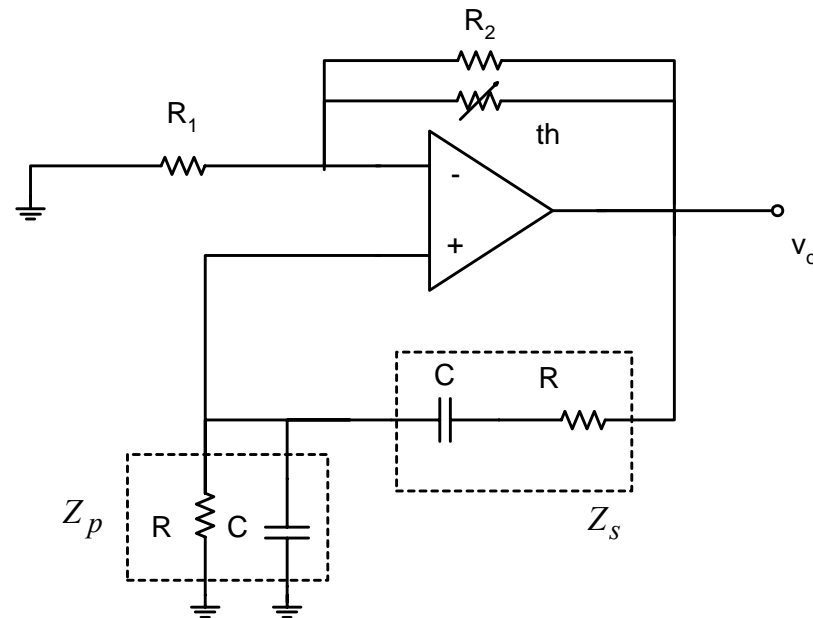
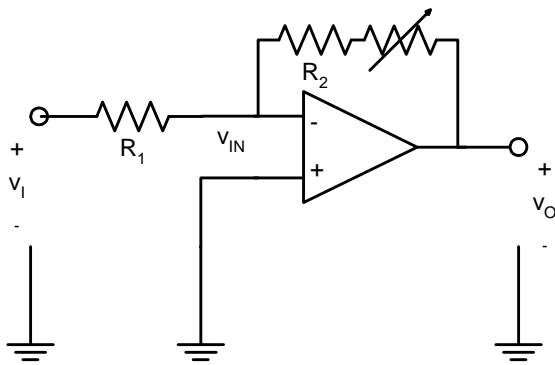


paralelo



# Aplicações das termistências semicondutoras

- Regulador automático de amplitude com NTC (auto-aquecimento)

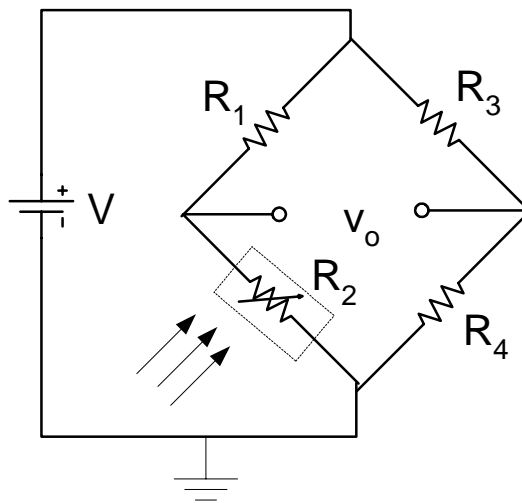


$$T(s) = A(s)\beta(s) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{Z_p}{Z_s + Z_p}$$

$$R_2/R_1 = 2 \quad \omega_0 = \frac{1}{CR}$$

# Aplicações das termistências semicondutoras

- Medidor de potência de radiação com NTC (auto-aquecimento)



Radiação de alta frequência

$$R_2 > R_1 = R_3 = R_4 = R \quad V_0 \neq 0$$

$$V \uparrow \quad R_2 \downarrow \quad V = V_1 \text{ para ter } V_0 = 0$$

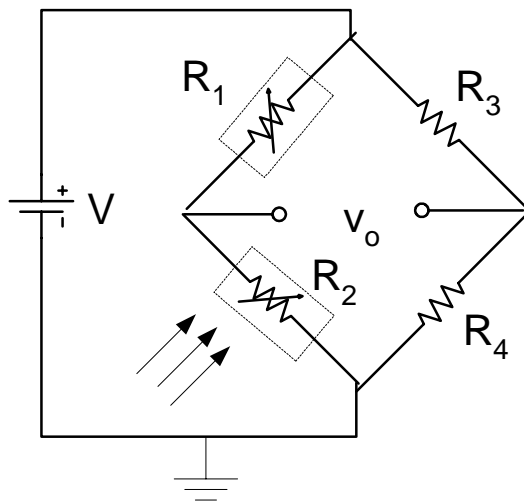
$$\text{radiação incidente na NTC} \quad R_2 \downarrow \quad V_0 \neq 0$$

$$V \downarrow \quad V = V_2 \text{ para ter } V_0 = 0$$

$$P_{\text{rad}} = \frac{(V_1 - V_2)^2}{R}$$

# Aplicações das termistências semicondutoras

- Medidor de velocidades de gases com NTC (auto-aquecimento)



Corrente de ar ou de gás

$$R_1 = R_2 \quad R_3 = R_4 \quad V \text{ constante}$$

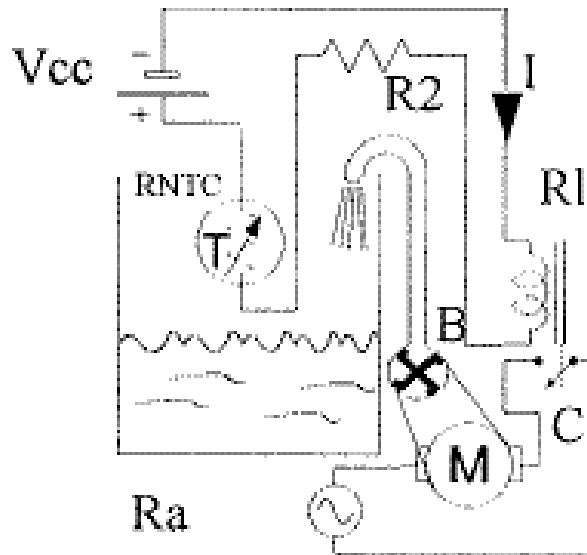
$$\text{Temp}(R_1) = \text{Temp}(R_2) \quad \text{e} \quad V_0 = 0$$

$$\text{corrente de ar em } R_2 \quad R_2 \downarrow \quad V_0 \neq 0$$

Valor de  $V_0$  é uma medida da velocidade do gás independente da temperatura ambiente

# Aplicações das termistências semicondutoras

- Controlador do nível de líquidos com NTC (auto-aquecimento)



desliga

Quando o líquido atinge a NTC

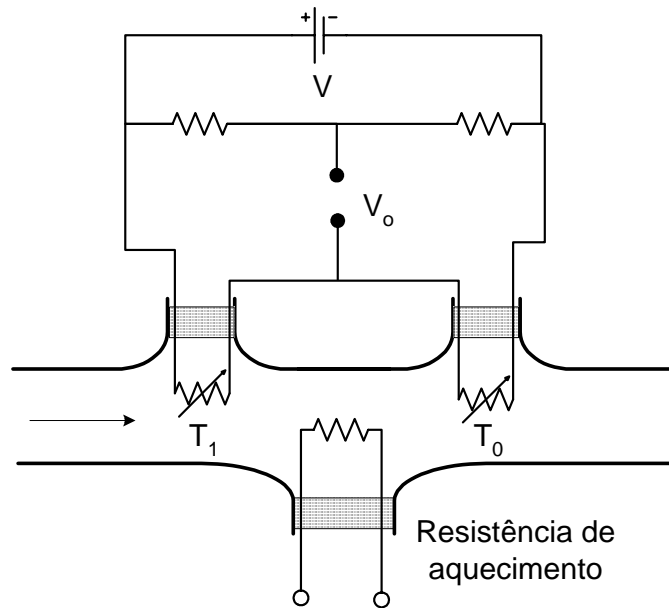
$$T_{NTC} \downarrow \quad R_{NTC} \uparrow \quad I \downarrow$$

relé abre e a bomba de água desliga

NTC a temperatura elevada

# Aplicações das termistências semicondutoras

- Medidor de fluxo de fluidos com NTC



Fluido parado  $T_1 = T_0$

Fluido a deslocar-se na direcção indicada na figura  $T_1 < T_0$

$\Delta V_0$  proporcional à velocidade do fluido, com indicação do sentido

NTCs com auto-aquecimento pode evitar resistência de aquecimento

# Revisões

- Circuito de conversão tensão-frequência e frequência-tensão.
- Sensores térmicos passivos (de contacto, por condução): termistências ou termoresistências:
- Sensibilidades absoluta, relativa e semi-relativa (ou coeficiente térmico)

$$R = R_0 (1 + \alpha \Delta T + \beta \Delta T^2 + \dots) \quad \alpha = \frac{1}{\rho} \left. \frac{\partial \rho}{\partial T} \right|_{T_0} \quad \frac{\Delta R}{R} = \alpha_T \times \Delta T$$

- Termistências
  - Metálicas: mais lineares, mais exactas e mais estáveis (do tipo PTC).
  - Semicondutoras (forma cristalina ou amorfa): mais sensíveis

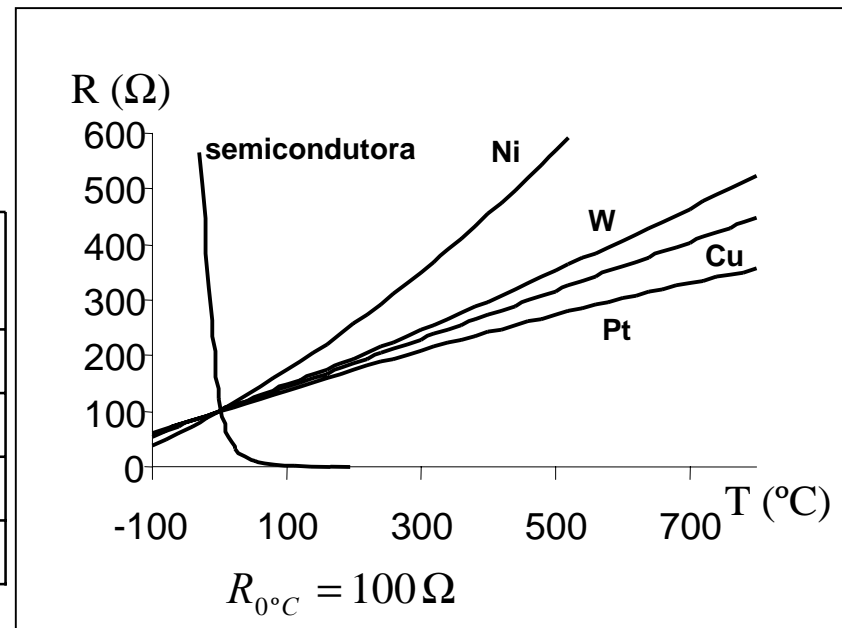


# Revisões

- Termistências metálicas

$$\frac{1}{\rho} = \sigma = nq\mu$$

Metal	$\alpha$ ( $\Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}$ )	$\beta$ ( $\Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}^2$ )
Platina	0,0039	$-8,75 \times 10^{-7}$
Cobre	0,0043	$6,25 \times 10^{-8}$
Tungstênio	0,0046	$8,80 \times 10^{-7}$
Níquel	0,0068	$5,12 \times 10^{-6}$



- Platina serve de padrão de referência para temperaturas 13,8  $^{\circ}\text{K}$  1-903,89  $^{\circ}\text{K}$
- 100  $\Omega$  (Pt100), 500  $\Omega$  e 1000  $\Omega$

# Revisões

## Termistências semicondutoras (forma cristalina)

Semicondutor intrínseco  
(sem impurezas dopantes)

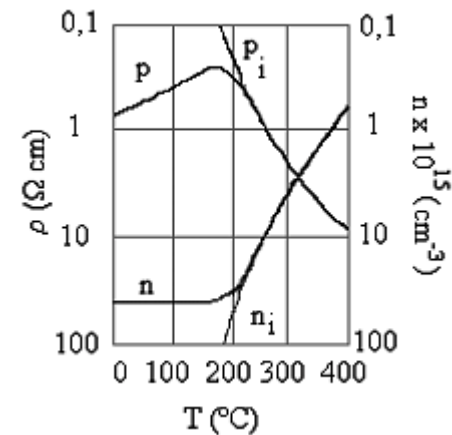
$$\frac{1}{\rho} = \sigma = n_i q (\mu_n + \mu_p)$$

$$n_i(T) \propto T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad \mu \propto T^{-\frac{3}{2}}$$

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{B}{T}}$$

dopado

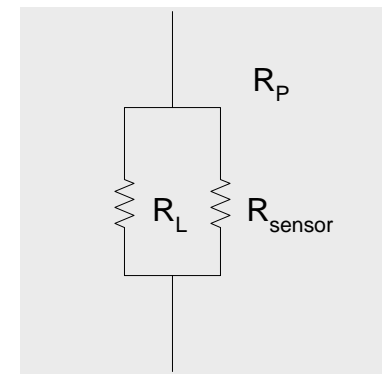
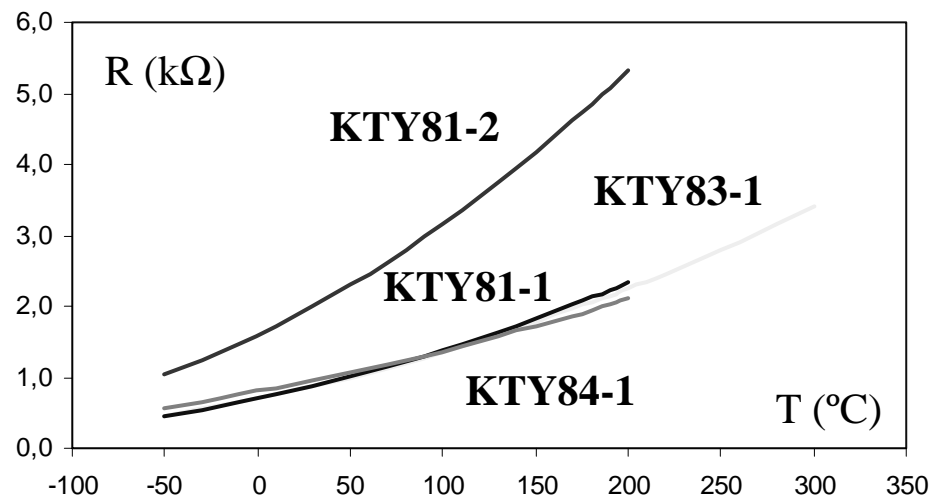
$$\sigma = q (n_n \mu_n + n_p \mu_p)$$



a baixas temperaturas semelhante à dos metais  
altas temperaturas semelhante aos intrinsecos

# Revisões

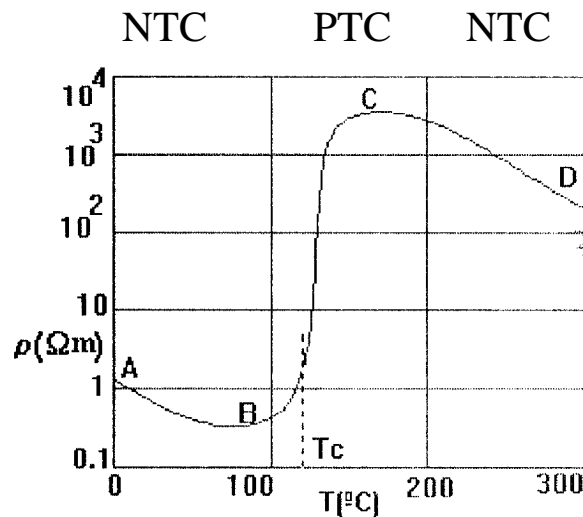
Termistências de silício dopado (KTY da Philips)



Linearização numa determinada gama de temperaturas

# Termoresistências cerâmicas semicondutoras

- Misturas de óxidos metálicos cozidos a altas temperaturas:
  - de metais de alta resistividade no estado puro: Fe, Cu, Ni, Mn (valência 3)
  - de metais de valências diferentes: Ti (valência 4) semicondutor tipo n  
Li (valência 2) semicondutor tipo p



$T_c$  temperatura de Curie

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{B}{T}} \quad R = A e^{\frac{B}{T}} \quad \begin{array}{l} B > 0 \quad NTC \\ B < 0 \quad PTC \end{array}$$

NTC Negative Temperature Coefficient  
PTC Positive Temperature Coefficient

# Termoresistências cerâmicas semicondutoras

- Sensor NTC fazendo  $T_C$  muito elevada

$$R = A e^{\frac{B}{T}} \quad T \rightarrow \infty \quad R = A$$

A depende de  $\rho$ ,  $l$  e  $S$

B depende das propriedades da cerâmica

$$R(T) = R(T_0) e^{B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad T_0 = 25^\circ C = 298,15^\circ K$$

expressão aproximada (A e B dependem da temperatura):

erro típico de 0,3% para variação de 0° a 50°C

Usam-se também expressões empíricas

$$\frac{1}{T} = a + b \ln(R) \quad \rightarrow \quad \frac{1}{T} = a + b \ln(R) + c \ln^3(R) \quad \text{erro } \pm 0,01^\circ C$$

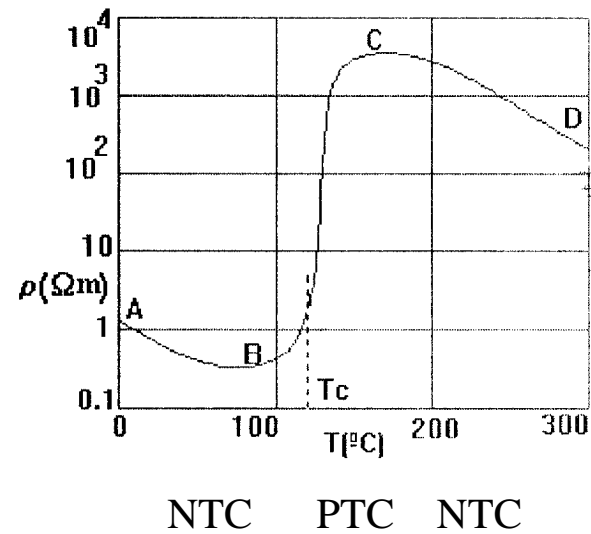
# Termoresistências cerâmicas semicondutoras

- Termistências NTC e PTC

$$R = Ae^{\frac{B}{T}}$$

NTC:  $T \uparrow$      $R \downarrow$

PTC:  $T \uparrow$      $R \uparrow$



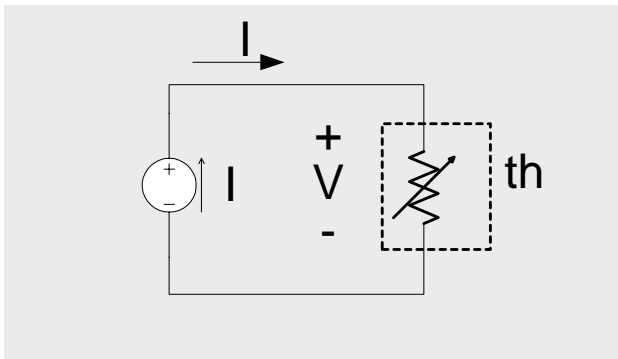
NTC - materiais escolhidos de modo a terem  $T_C$  elevada:  $R$  diminui quando  $T$  aumenta

PTC - com  $T_C$  baixa:  $R$  aumenta com  $T$  numa determinada faixa de temperaturas

<http://www.atpsensor.com> (NTC)

# Termistências NTC

- Auto-aquecimento regenerativo (excitação em corrente)



$$P_{gl} = R I^2 \Rightarrow T \uparrow$$

$$T \uparrow \Rightarrow R \downarrow$$

$$\Delta T = T - T_a = R_{th} P_g$$

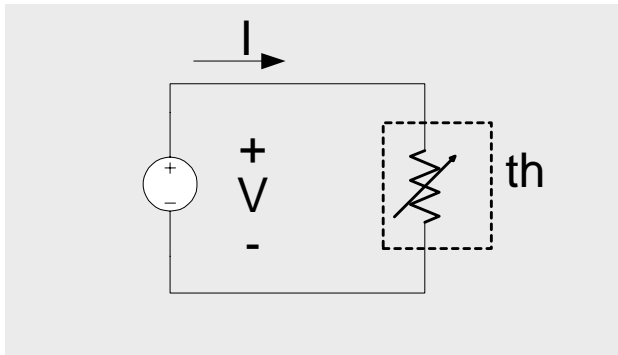
$$R I^2 = \frac{T_{final} - T_a}{R_{th}}$$

Temperatura final de th:

$$Ae^{\frac{B}{T_{final}}} I^2 = \frac{T_{final} - T_a}{R_{th}}$$

# Termistências NTC

- Auto-aquecimento regenerativo (excitação em tensão)



$$P_{gV} = \frac{V^2}{R} \Rightarrow T \uparrow \quad R \downarrow \quad P_g \uparrow \quad T \uparrow$$

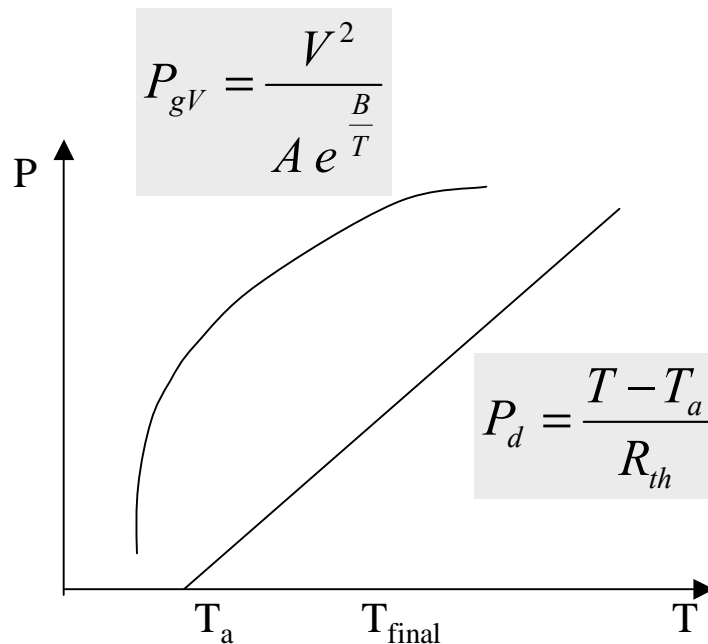
Pode haver destruição da resistência



# Termistências NTC

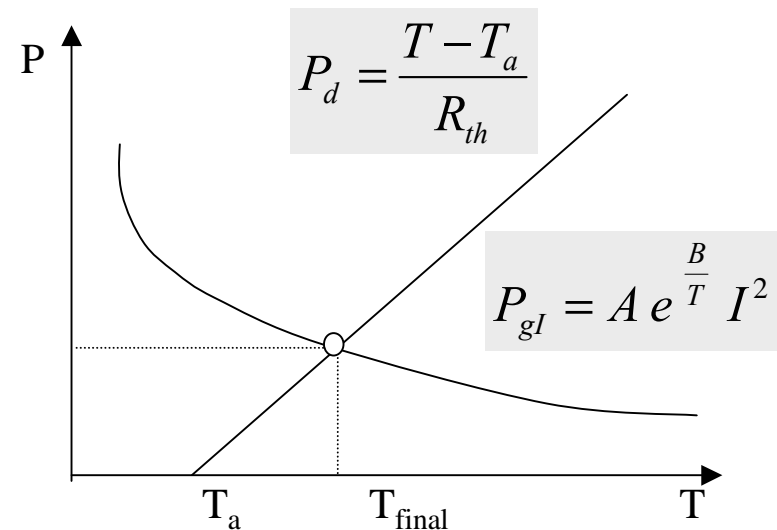
- Auto-aquecimento regenerativo

excitação em tensão



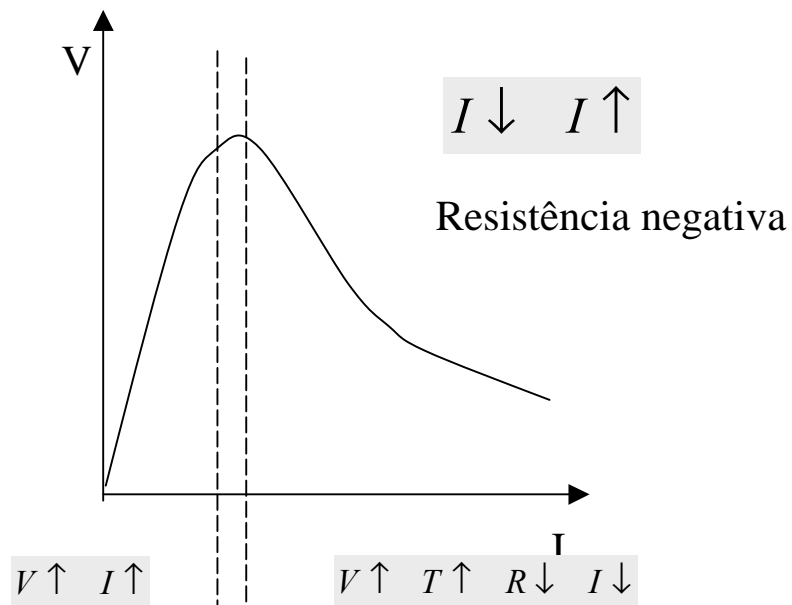
pode haver destruição da resistência

excitação em corrente



# Termistências NTC

- Auto-aquecimento regenerativo (excitação em tensão)



Não há auto-aquecimento  
sensor de temperatura

há autoaquecimento  
resistência incremental negativa

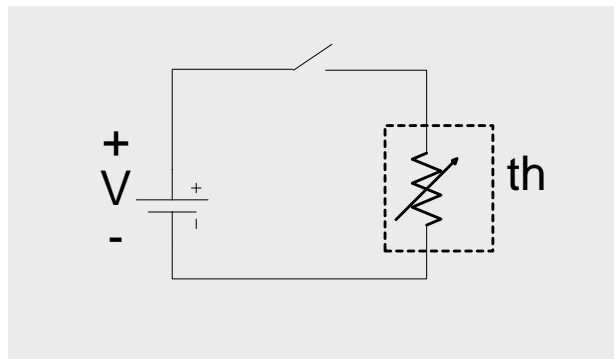
# Termistências NTC

- Auto-aquecimento regenerativo (excitação em tensão)

A duração no tempo do regime de auto-aquecimento depende da constante de tempo térmica:

$$\tau = R_{th} C_c$$

podendo ser usada para introduzir atrasos no estabelecimento de correntes em circuitos.



# Termistências NTC

- Exemplo

Uma termistência NTC com  $R(25^{\circ}\text{C}) = 10 \text{ k}\Omega$  e  $B = 3800 \text{ }^{\circ}\text{K}$  é utilizada com dois regimes de excitação: corrente  $I$  de  $0,1 \text{ mA}$  e de  $10 \text{ mA}$ . A resistência térmica da termistência é de  $100 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$  e a temperatura do ar é de  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Calcule as temperaturas atingidas pelas resistências e comente o efeito de auto-aquecimento regenerativo.

$$A = \frac{R}{e^{\frac{B}{T}}} = \frac{10k}{e^{\frac{3800}{298.13}}} = 0,002916$$

$$P = \frac{\Delta T}{100}$$

$$I = 0,1 \text{ mA} \Rightarrow 10 \text{ k} \times 0,1 \times 10^{-6} = 1 \text{ mW}$$

$$\Delta T = P \times 100 = 0,1^{\circ}$$

$$I = 10 \text{ mA} \Rightarrow 10 \text{ k} \times 100 \times 10^{-6} = 1 \text{ W}$$

$$\Delta T = P \times 100 = 100^{\circ}$$

# Termistências NTC

$$2,916 \times 10^{-3} \times e^{\frac{3800}{T}} \times 100 \times 10^{-6} = \frac{T - 298,15}{100}$$

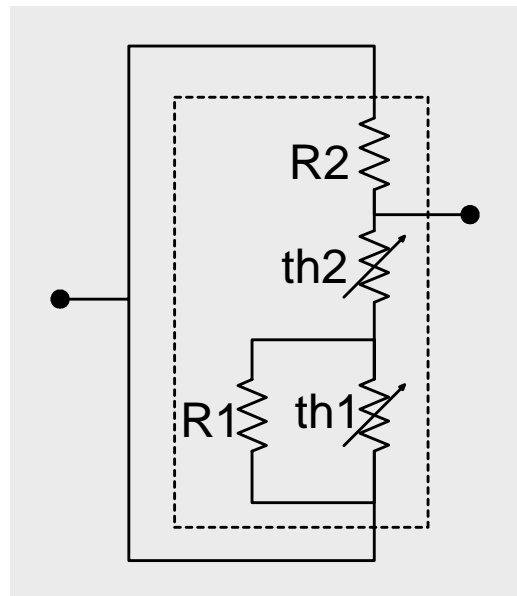
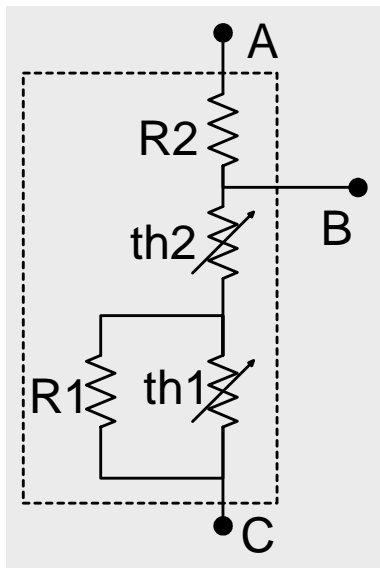
$$T = 32.35^{\circ}C$$

auto-aquecimento regenerativo: é gerado mais calor que o inicial

# Termistências NTC

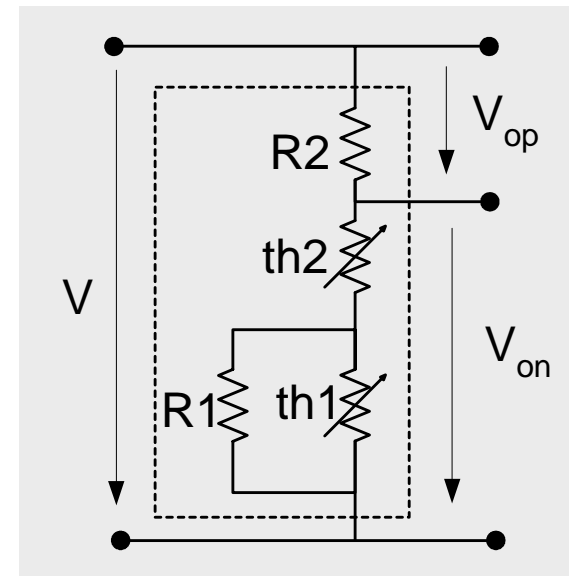
- LTN – Linear Thermistor Network

$$R(T) = A e^{\frac{B}{T}} \rightarrow A_r T + B_r$$



resistência

$$R = A_r T + B_r$$



divisor de tensão

$$\frac{V_{op}}{V} = A_v T + B_v$$

# Sensores lineares com termistências NTC

- LTN –Linear Thermistor Network (Fenwal Electronics)

LTN	Gama (°C)	$A_V$ mV/°C	$B_V$ (V/V)	$A_r$ (Ω/°C)	$B_r$ (kΩ)	Erro de linearidade ( °C)
LTN ML1	-5 a 45	5,7562	0,195814	-40,178	5,6132	-0,58 a 0,61
LTN ML2	-30 a 50	6,8517	0,346778	-152,295	14,56684	-2,48 a 1,09
LTN ML3	0 a 100	5,3988	0,137113	-21,433	3,42566	-2,31 a 2,34

Tolerâncias de fabrico baixas, precisas e lineares

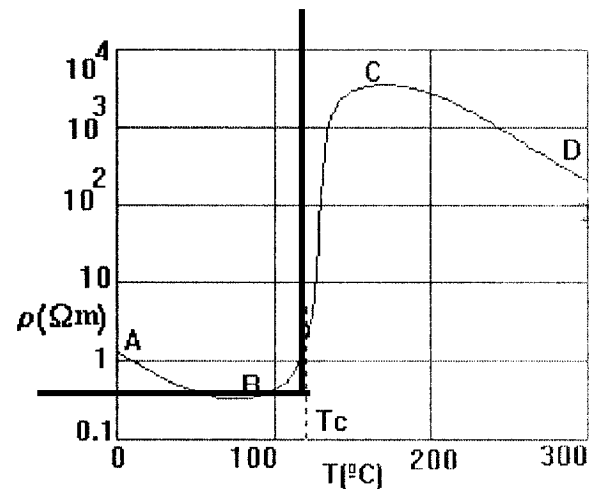
Preços relativamente económicos (mais sensíveis que as RTD de platina)

# Vantagens e desvantagens das NTC

- Mais sensíveis que qualquer outro sensor de temperatura
  - Valores muito variáveis: de  $1\Omega$  a  $100\text{ M}\Omega$
  - Valores exactos e pouca dispersão de características de sensor para sensor
  - Aproveita-se o auto-aquecimento em certas aplicações
  - Formas variadas, adaptadas à diferentes aplicações
- 
- Muito pouco lineares, mas podem ser linearizadas (LTN)

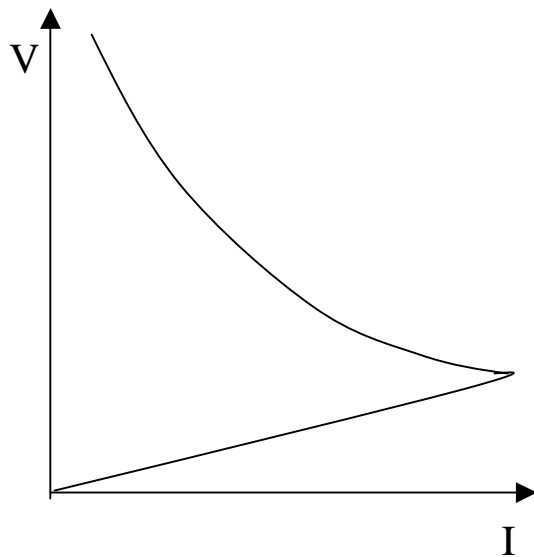


# Termistências PTC



- Cerâmicas semicondutoras com temperatura de Curie baixa
- A resistência varia bruscamente aproveitando-se a sua utilização com interruptor térmico.
- Pouco precisas e pouco estáveis face às NTC, não se utilizando para medir temperaturas

# Termistências PTC



$V \uparrow$   $I \uparrow$   $T \uparrow$  até  $T_c$   
em  $T_c$   $R \uparrow$  bruscamente  $I \downarrow$

- A resistência varia bruscamente aproveitando-se a sua utilização com interruptor térmico

# Aplicações das termistências metálicas

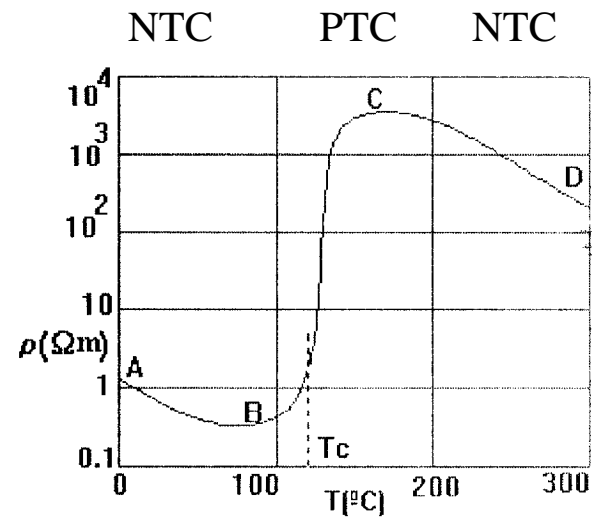
- Medição de temperaturas: grande exactidão com RTD de platina.
- Medição de caudais de gases (ex: controlo da quantidade de ar para a combustão nos motores de explosão com injeção electrónica)

# Revisões

Cerâmicas semicondutoras:

óxidos metálicos cozidos a altas temperaturas

$$R = A e^{\frac{B}{T}} \quad \begin{array}{l} B > 0 \quad NTC \\ B < 0 \quad PTC \end{array}$$

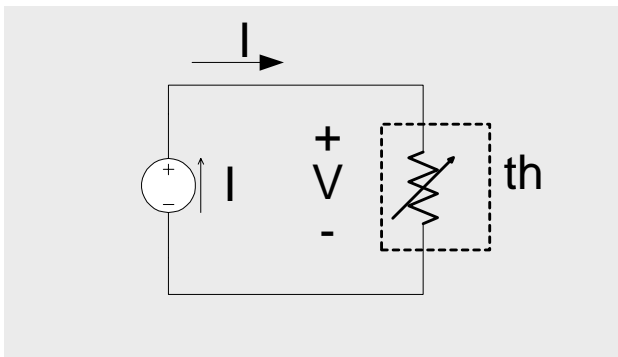


$T_C$  temperatura de Curie

# Revisões

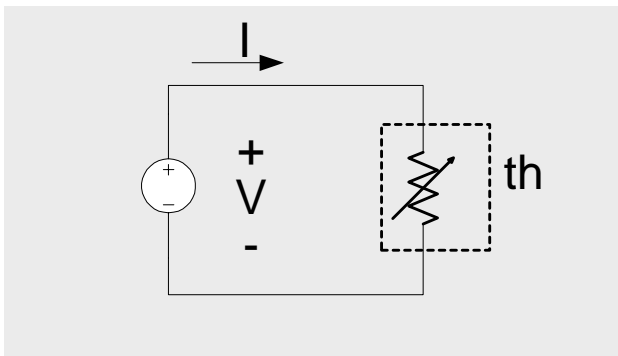
Auto-aquecimento regenerativo das NTC

$$\tau = R_{th} C_c$$



$$T \uparrow \Rightarrow R \downarrow \Rightarrow P = RI^2 \downarrow$$

$$Ae^{\frac{B}{T_{final}}} I^2 = \frac{T_{final} - T_a}{R_{th}}$$



$$T \uparrow \Rightarrow R \downarrow \Rightarrow P = \frac{V^2}{R} \uparrow$$

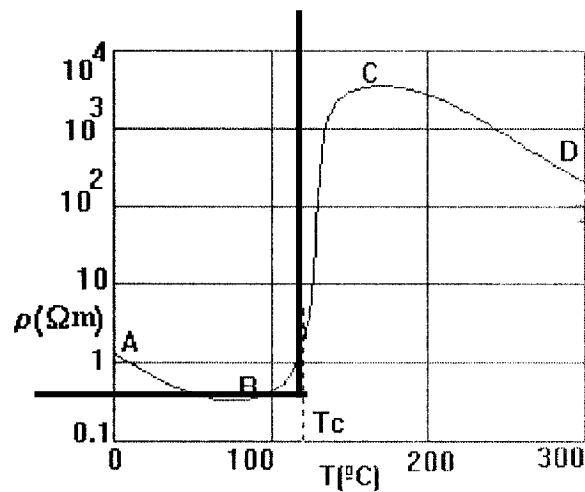
Pode haver destruição da resistência

# Revisões

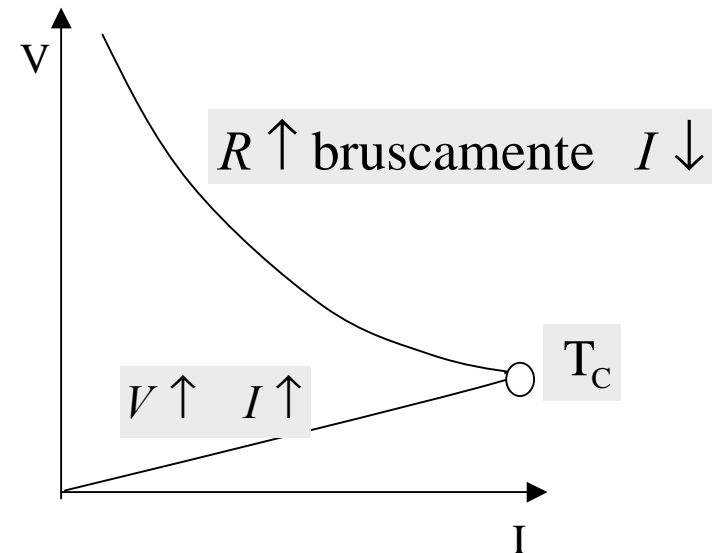
- Vantagens: mais sensíveis que qualquer outro sensor de temperatura, valores muito variáveis: de  $1\Omega$  a  $100\text{ M}\Omega$ , valores exactos e pouca dispersão, aproveitamento do auto-aquecimento e formas variadas.
- Desvantagens: muito pouco lineares.
- Podem ser linearizadas (LTN) por associação com resistências e/ou outras termoresistências.

$$R(T) = A e^{\frac{B}{T}} \rightarrow A_r T + B_r$$

# Revisões



Curie



- PTC: temperatura de Curie baixa
- A resistência varia bruscamente aproveitando-se a sua utilização com interruptor térmico.

# Aplicações das termistências

## Medição de temperaturas

Metálicas: grande exactidão com RTD de platina.

Semicondutoras:

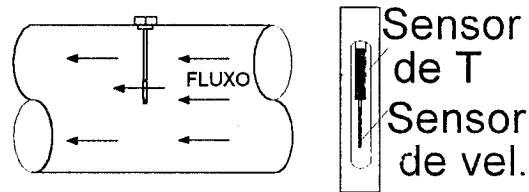
Silício: soluções económicas

Cerâmicas NTC: I pequena para não haver auto-aquecimento



# Aplicações das termistências metálicas

Sierra Instruments com 2 termistências



$$T_C = T_a + \Delta T \quad (\Delta T = 60^\circ)$$

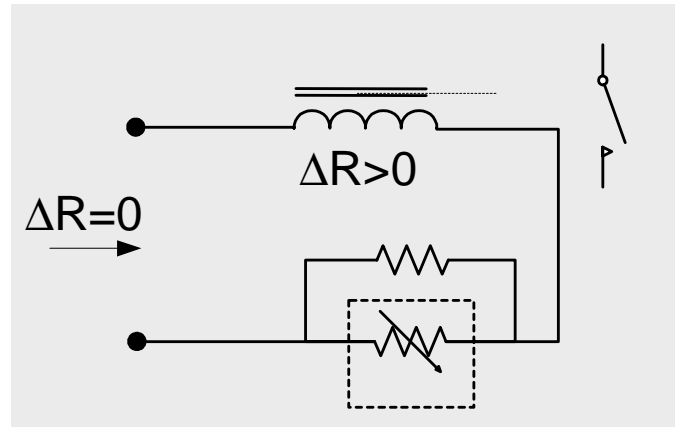
$$fpmt(\text{foot per minute}) = 0,3048m / s$$

sensor de temperatura do ar e sensor de velocidade  
(sensor de temperatura do gás)  
controlador de temperatura do gás de modo a manter a  $T_c$

A diferença entre tensões aplicadas ao controlador de temperatura do gás, com e sem fluxo de gás, mantendo a temperatura  $T_c$ , é função da velocidade do gás

# Aplicações das termistências NTC

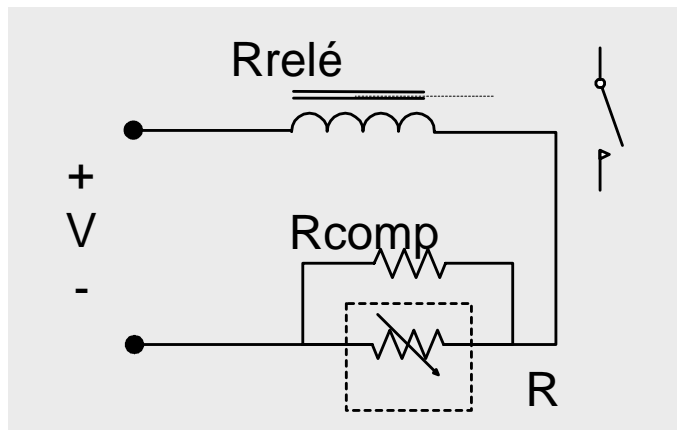
Compensação da variação com a temperatura da resistência de um relé



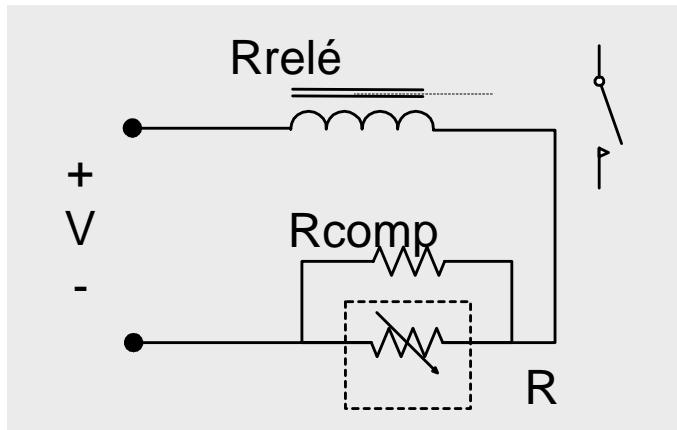
Manter a corrente constante no circuito, independente da temperatura

# Aplicações das termistências NTC

A resistência do solenóide (fio de cobre) de um relé é de  $5000 \Omega$  a  $25^\circ\text{C}$ . O relé necessita de uma corrente de  $1 \text{ mA}$  para a armadura fechar o contacto. Dimensione o valor de uma NTC, caracterizada por  $B = 4000 \text{ K}$  de modo a que a corrente de fecho do contacto fique constante quando a temperatura varia entre  $0$  e  $60^\circ \text{C}$ . O coeficiente de temperatura do cobre do enrolamento do relé é de  $0,00356 \Omega/\Omega/^\circ\text{C}$ . Considere  $V = 7,5 \text{ V}$ .



# Aplicações das termistências NTC



$$R_{relé}(0^\circ) = 5000(1 - 0,00356 \times 25) = 4555 \Omega$$

$$R_{relé}(60^\circ) = 5000(1 + 0,00356 \times 35) = 5623 \Omega$$

$$\Delta R_{relé} = 1068 \Omega$$

$$\Delta(R_{comp} // R_{th}) = -1068 \Omega$$

$$\frac{V}{R_{comp} // R_{th} + R_{relé}} = \frac{7,5}{R_{comp} // R_{th} + 5000} = 1 \text{ mA}$$

$$R_{eq} = R_{comp} // R_{th} = 2500 \Omega$$

$$R = A e^{\frac{4000}{298.15}}$$

# Aplicações das termistências NTC

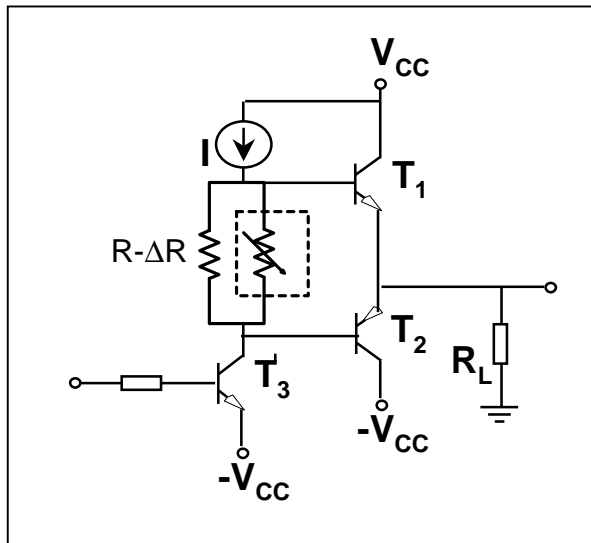
$$25^{\circ}C \quad R_{eq} = R_{comp} // R_{th} = 2500 \Omega$$

$$\frac{R_{comp} \times A e^{\frac{4000}{298.15}}}{R_{comp} + A e^{\frac{4000}{298.15}}} = 2500$$

$$\frac{R_{comp} \times A e^{\frac{4000}{273.15}}}{R_{comp} + A e^{\frac{4000}{273.15}}} - \frac{R_{comp} \times A e^{\frac{4000}{333.15}}}{R_{comp} + A e^{\frac{4000}{333.15}}} = -1068$$

# Aplicações das termistências NTC

Compensação da variação da resistência com a temperatura com uma NTC



Classe AB limiar de condução na ausência de sinal

$$2V_{BE} = RI$$

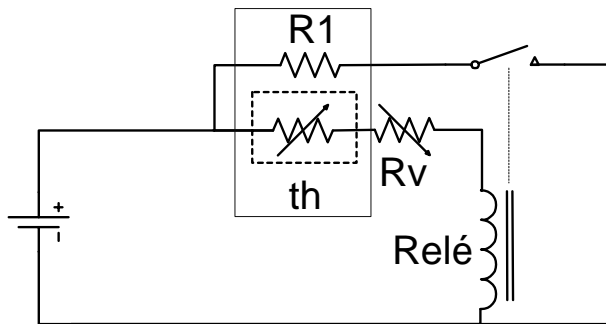
$$\alpha_V = \Delta V_{BE} / \Delta T < 0$$

$$I(R - \Delta R) = 2V_{BE} + \alpha_V \Delta T$$

$$T \uparrow \quad V_{BE} \downarrow \quad R \downarrow \quad I \approx cte$$

# Aplicações das termistências NTC

- Controlador de temperatura com uma NTC



contacto fechado em repouso  
contacto abre quando a corrente  
atinge um determinado valor

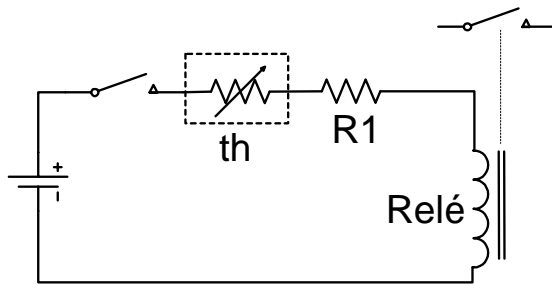
Corpo aquecido por R1

Temperatura controlada por RV

Rth e R1 acopladas térmicamente  
Rth sem auto-aquecimento

# Aplicações das termistências NTC

- Circuito de atraso com uma NTC (auto-aquecimento)



$$E_t = E_a + E_d$$

$$P_t dt = C_c dT + \frac{T - T_a}{R_\theta} dt$$

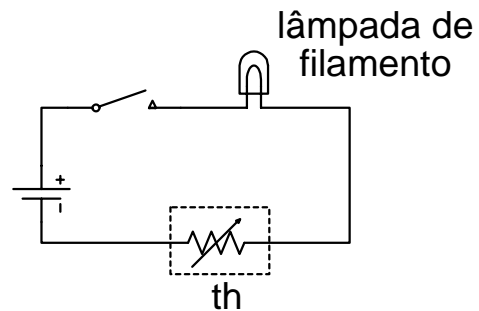
$$\Delta T_{\max} = T_{\text{final}} - T_a$$

$$T = T_a + \Delta T_{\max} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_t}} \right) \quad \tau_t = C_c R_t$$



# Aplicações das termistências NTC

- Atenuador de corrente de pico com NTC (auto-aquecimento)



Lâmpada de  $100\ \Omega$

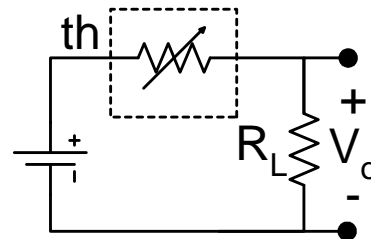
$$T = 25^\circ C \quad R = 50\ \Omega$$

$$T = 2700^\circ C \quad R = 500\ \Omega$$

# Aplicações das termistências NTC

- Estabilizador de tensão com NTC (auto-aquecimento)

série



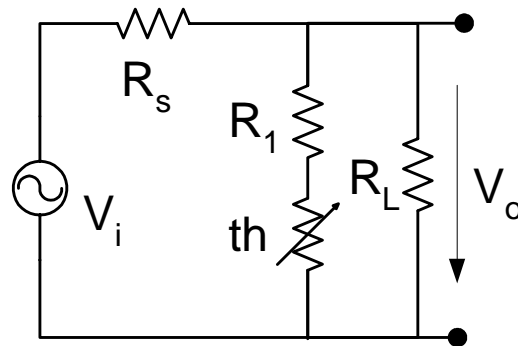
$$V_o = V \frac{R_L}{R_L + R_{th}}$$

$$R_L \uparrow \quad V_o \uparrow \quad I \downarrow \quad T \downarrow \quad R_{th} \uparrow \quad V_o \approx Cte$$

# Aplicações das termistências NTC

- Estabilizador de tensão com NTC (auto-aquecimento)

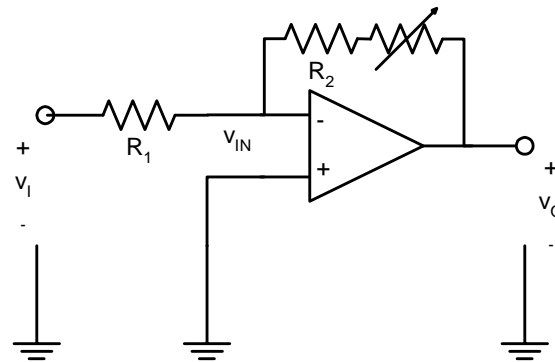
paralelo



$$R_L \uparrow \quad V_o \uparrow \quad T \uparrow \quad R_{th} \downarrow \quad V_o \approx Cte$$

# Aplicações das termistências NTC

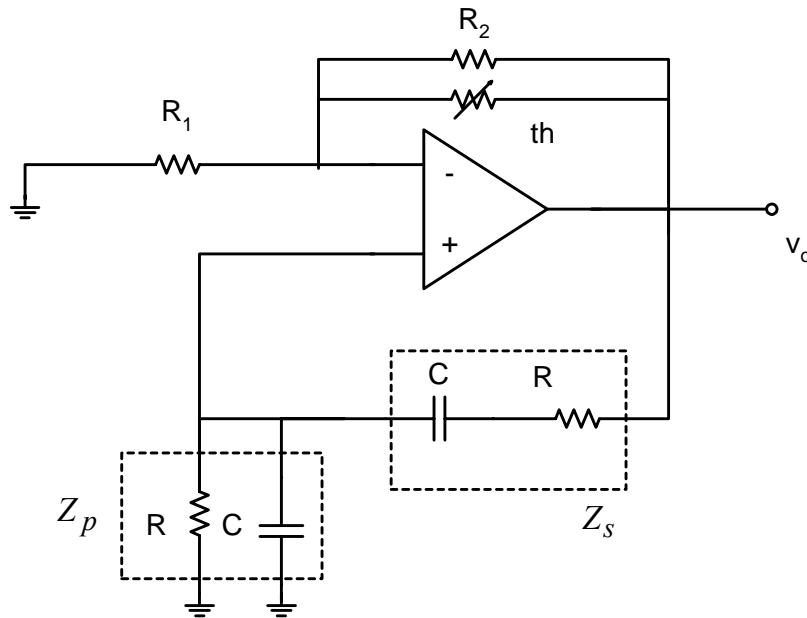
- Regulador automático de amplitude com NTC (auto-aquecimento)



$$V_i \uparrow \quad V_o \uparrow \quad T \uparrow \quad R_{th} \downarrow \quad G_V \downarrow \quad V_o \approx Cte$$

# Aplicações das termistências NTC

- Regulador automático de amplitude com NTC (auto-aquecimento)

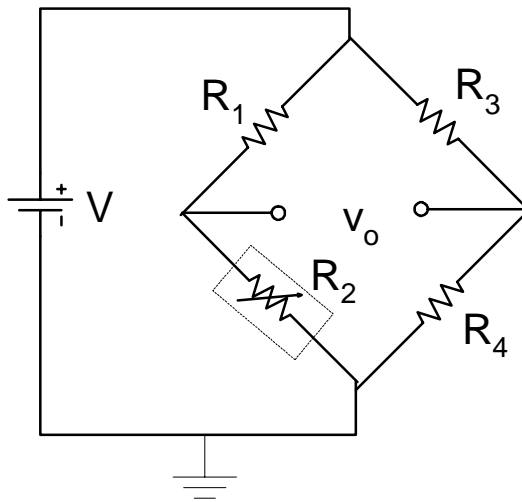


$$T(s) = A(s)\beta(s) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{Z_p}{Z_s + Z_p}$$

$$R_2/R_1 = 2 \quad \omega_0 = \frac{1}{CR}$$

# Aplicações das termistências NTC

- Medidor de potência de radiação com NTC (auto-aquecimento)



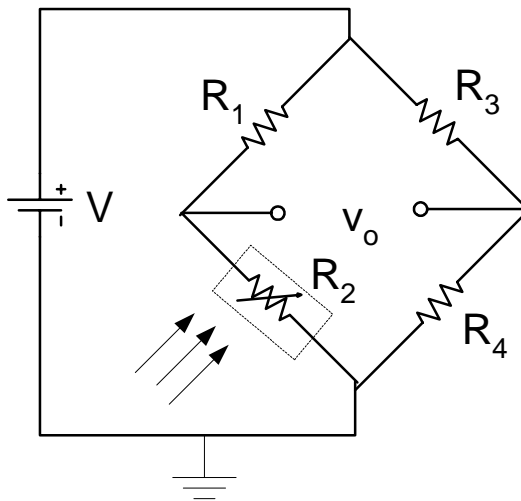
$$R_2 > R_1 = R_3 = R_4 = R \quad V_0 \neq 0$$

$$V \uparrow \quad R_2 \downarrow \quad V = V_1 \text{ para ter } V_0 = 0$$

$$R_2 = R_1 = R_3 = R_4 = R \quad V_0 = 0$$

# Aplicações das termistências NTC

- Medidor de potência de radiação com NTC (auto-aquecimento)



Radiação de alta frequência

$$R_2 > R_1 = R_3 = R_4 = R \quad V_0 \neq 0$$

$$V \uparrow \quad R_2 \downarrow \quad V = V_1 \text{ para ter } V_0 = 0$$

$$R_2 = R_1 = R_3 = R_4 = R \quad V_0 = 0$$

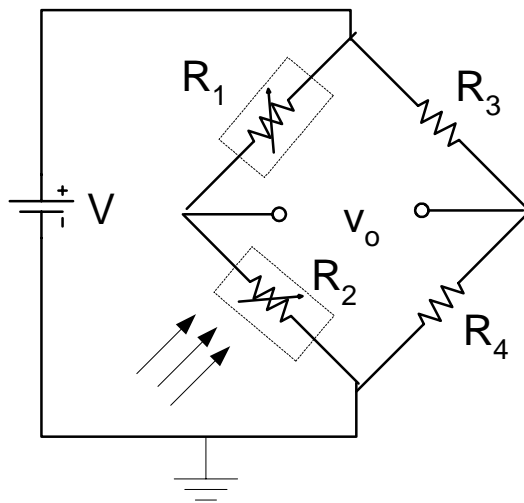
$$\text{radiação incidente na NTC} \quad R_2 \downarrow \quad V_0 \neq 0$$

$$V \downarrow \quad V = V_2 \text{ para ter } V_0 = 0$$

$$P_{\text{rad}} = \frac{(V_1 - V_2)^2}{R}$$

# Aplicações das termistências NTC

- Medidor de velocidades de gases com NTC (auto-aquecimento)



Corrente de ar ou de gás

$$R_1 = R_2 \quad R_3 = R_4$$

$$\text{Temp}(R_1) = \text{Temp}(R_2) \quad \text{e} \quad V_0 = 0$$

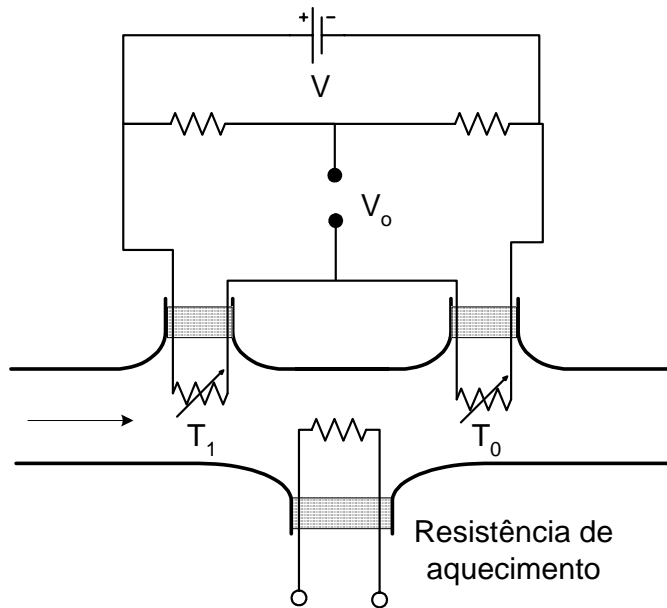
$$\text{corrente de ar em } R_2 \quad R_2 \downarrow \quad V_0 \neq 0$$

Valor de  $V_0$  é função da velocidade do gás  
independente da temperatura ambiente



# Aplicações das termistências NTC

- Medidor de fluxo de fluidos com NTC



Fluido parado  $T_1=T_0$

Fluido a deslocar-se na direcção indicada na figura  $T_1 < T_0$

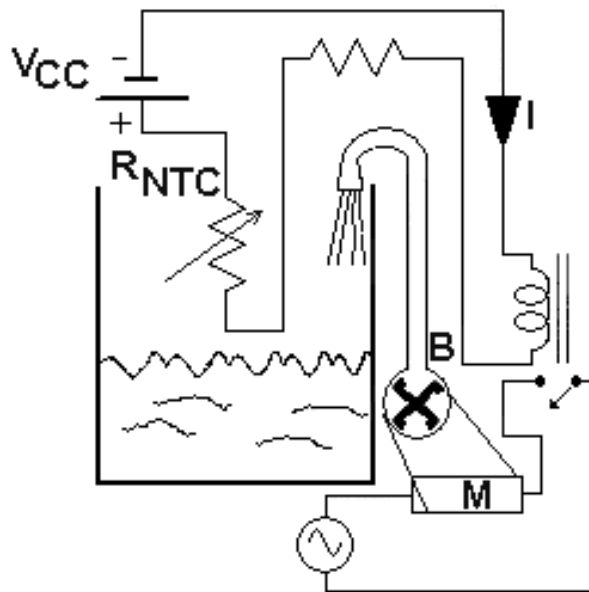
$\Delta V_o$  proporcional à velocidade do fluido, com indicação do sentido

NTCs com auto-aquecimento pode evitar resistência de aquecimento

# Aplicações das termistências NTC

- Controlador do nível de líquidos com NTC (auto-aquecimento)

A encher o depósito, o circuito da bomba está ligado



Quando o líquido atinge a NTC

$$T_{NTC} \downarrow \quad R_{NTC} \uparrow \quad I \downarrow$$

O contacto dorelé abre e a bomba de água desliga

NTC a temperatura elevada

# Exemplo

## Controlador do nível de líquidos com NTC

$R_{\text{relé}} = 50 \Omega$ ;  $I > 40 \text{ mA}$  relé fecha o contacto C,  $I < 20 \text{ mA}$  relé abre o contacto

$V_{\text{cc}} = 12 \text{ V}$ ;

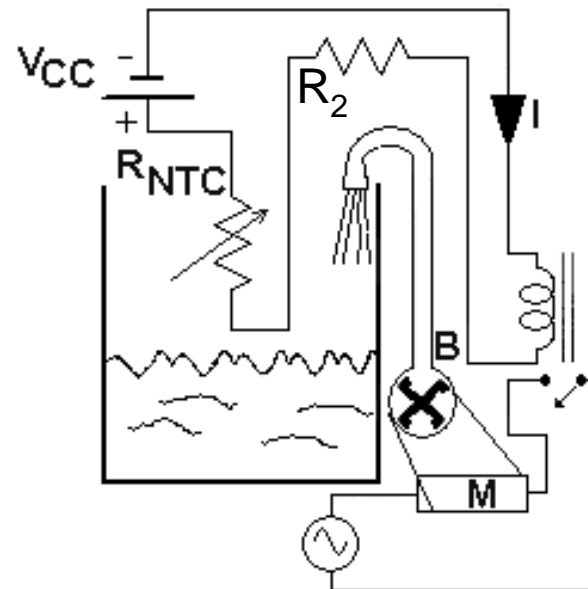
$R_2 = 0 \Omega$ ;

$R_{\text{ntc}}$ :  $R_{\theta} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$ ,  $R_{\theta} \text{ (na água)} = 2 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$

$B = 4000 \text{ K}$ ;

$T_{\text{água}} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

$T_{\text{ar}} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$



# Exemplo

a) Calcule os valores limite que deve ter a resistência NTC para ligar e desligar o relé.

$$R_{NTC} \geq 550 \, \Omega \quad \text{na água para desligar o relé}$$

$$R_{NTC} \leq 250 \, \Omega \quad \text{no ar para ligar o relé}$$

# Exemplo

- a) Calcule os valores limite que deve ter a resistência NTC para ligar e desligar o relé.
- b) Calcule temperatura que a NTC atinge quando a torneira está a encher o depósito de água.

$$P_d = 0,4 \text{ W} \quad T_{R_{NTC}} = T_a + 0,4 \times 40 = 25 + 16 = 41^\circ \text{ C}$$

# Exemplo

- Calcule os valores limite que deve ter a resistência NTC para ligar e desligar o relé.
- Calcule temperatura que a NTC atinge quando a torneira está a encher o depósito de água.
- Qual o valor das constantes características da resistência NTC e o seu valor à temperatura ambiente de 25 °C.

$$A = \frac{250}{\frac{4000}{e^{273.15+41}}} = 0.0007382$$

$$R_{NTC(25^{\circ}C)} = 0.0007382 \times e^{\frac{4000}{298,15}} = 495,1 \Omega$$

# Exemplo

- Calcule os valores limite que deve ter a resistência NTC para ligar e desligar o relé.
- Calcule temperatura que a NTC atinge quando a torneira está a encher o depósito de água.
- Qual o valor das constantes características da resistência NTC e o seu valor à temperatura ambiente de 25 °C.
- Calcule o valor da resistência NTC dentro da água e verifique se o relé desliga nesta situação.

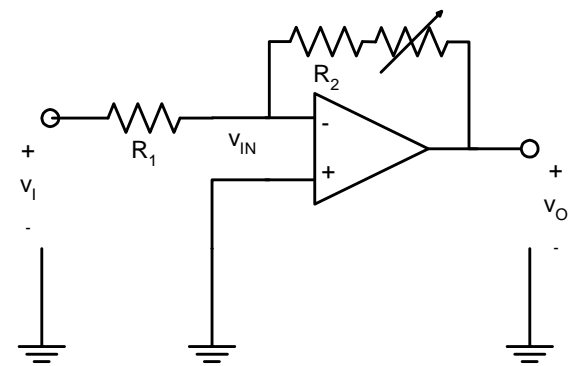
$$\frac{T-15}{2} = 7,487 \times 10^{-4} e^{\frac{4000}{273,15+T}} \left( \frac{12}{50 + 7,487 \times 10^{-4} e^{\frac{4000}{273,15+T}}} \right)^2 \Rightarrow T \approx 15^\circ C$$

$$R_{ntc}(15^\circ) \approx 797 \Omega$$

# Exemplo

Controlador automático de gabho (AGC) com NTC

NTC:  $R_{\theta} = 150 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $B = 4000 \text{ K}$ ;  $C_{\text{cal}} = 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$   
 $T_a = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$





# Exemplo

- a) Explique o funcionamento do circuito e diga quais as funções desempenhadas pelos quatro componentes.

# Exemplo

- a) Explique o funcionamento do circuito e diga quais as funções desempenhadas pelos quatro componentes.
- b) Dimensione  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_{ntc}$  de modo a que  $V_{om} = 10\text{ V}$  para  $V_{im} = 10\text{ V}$  quando a temperatura da NTC é de  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . Considere  $R_2/R_{NTC} = 0,1$ .

$$R_{ntc}(100^\circ) \approx 165,4\ \Omega \quad R_1 \approx 182\ \Omega \quad R_2 \approx 16,6\ \Omega$$

# Exemplo

- Explique o funcionamento do circuito e diga quais as funções desempenhadas pelos quatro componentes.
- Dimensione  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_{ntc}$  de modo a que  $V_{om} = 10\text{ V}$  para  $V_{im} = 10\text{ V}$  quando a temperatura da NTC é de  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . Considere  $R_2/R_{NTC} = 0,1$ .
- Calcule o ganho de tensão e  $V_{im}$  para  $V_{om} = 10\text{ V}$  quando  $T = 26\text{ }^\circ\text{C}$ .

$$R_{ntc}(26^\circ) \approx 2345\ \Omega \quad G_V(26^\circ) = \frac{V_{om}}{V_{im}} = 32,6 \quad V_{im} = \frac{V_{om}}{32,6} = 3,98\text{ V}$$

# Exemplo

- a) Explique o funcionamento do circuito e diga quais as funções desempenhadas pelos quatro componentes.
- b) Dimensione  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_{ntc}$  de modo a que  $V_{om} = 10\text{ V}$  para  $V_{im} = 10\text{ V}$  quando a temperatura da NTC é de  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . Considere  $R_2/R_{NTC} = 0,1$ .
- c) Calcule o ganho de tensão e  $V_{im}$  para  $V_{om} = 10\text{ V}$  quando  $T = 26\text{ }^\circ\text{C}$ .
- d) Calcule a potência dissipada na termistância quando a sua temperatura atinge  $100\text{ }^\circ\text{C}$  por auto aquecimento.

$$P_d(100^\circ) = R_{NTC} \frac{V_0^2}{(R_{NTC} + R_2)^2} = 0,5\text{ W}$$

# Exemplo

- Explique o funcionamento do circuito e diga quais as funções desempenhadas pelos quatro componentes.
- Dimensione  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_{ntc}$  de modo a que  $V_{om} = 10\text{ V}$  para  $V_{im} = 10\text{ V}$  quando a temperatura da NTC é de  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . Considere  $R_2/R_{NTC} = 0,1$ .
- Calcule o ganho de tensão e  $V_{im}$  para  $V_{om} = 10\text{ V}$  quando  $T = 26\text{ }^\circ\text{C}$ .
- Calcule a potência dissipada na termistância quando a sua temperatura atinge  $100\text{ }^\circ\text{C}$  por auto aquecimento.
- Admita que a potência dissipada a  $100\text{ }^\circ\text{C}$  subiu  $10\%$ , determine a temperatura final da NTC e a lei de variação da temperatura no tempo.

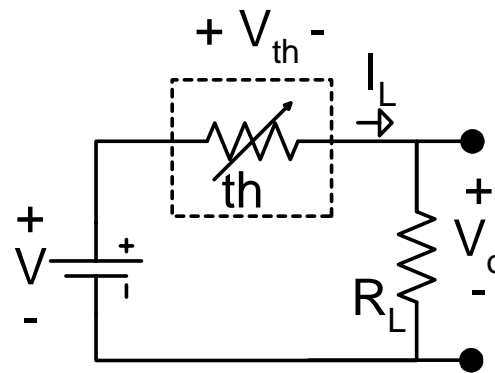
$$\Delta P_d(100^\circ) = 0,1 \times 0,5\text{ W} \quad \Delta T = 0,05 \times 150 = 7,5\text{ }^\circ\text{C}$$

$$\tau = 0,1 \times 150 = 15\text{ s}$$

$$T = 107,5 - 7,5 e^{-\frac{t}{15}}$$

# Aplicações das termistências

Limitador de corrente na carga com PTC

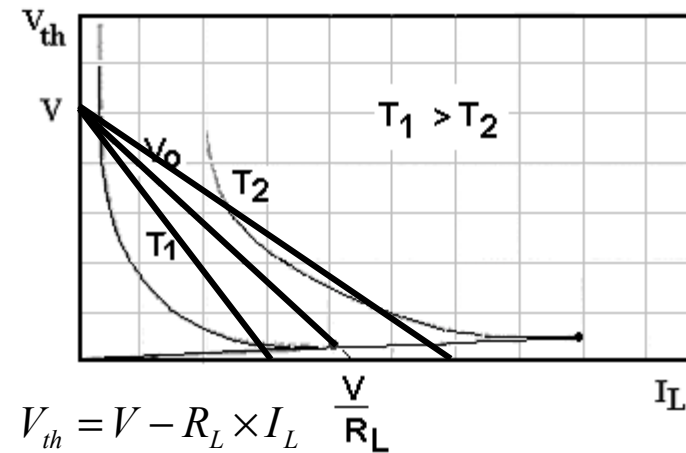
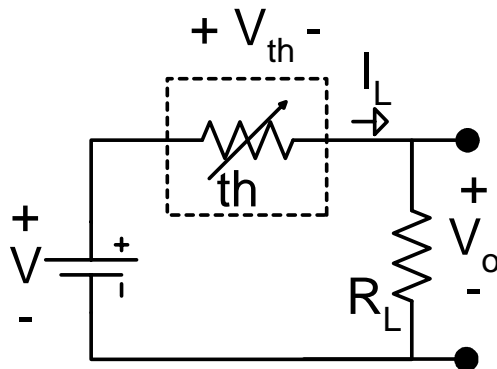


$$R_L \downarrow \quad I \uparrow \quad P_{R_{PTC}} \uparrow \quad T \uparrow \quad R_{PTC} \uparrow \quad I \downarrow$$

$$I_{Lmax}^2 R_{PTC} = \frac{T_{Curie} - T_a}{R_\theta} \quad I_{Lmax} = \sqrt{\frac{T_{Curie} - T_a}{R_{PTC} R_{th}}}$$

# Aplicações das termistências

Limitador de corrente na carga com PTC

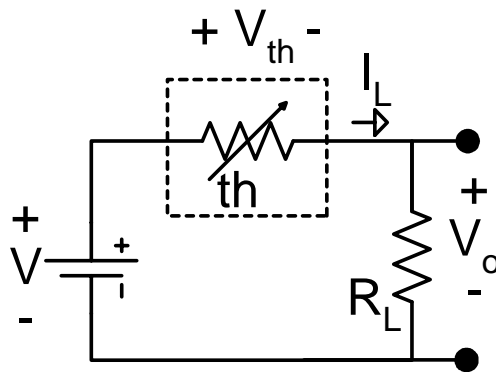


Para  $T_2$  não atinge a temperatura de Curie

$R_L$  mínimo para  $T_1$

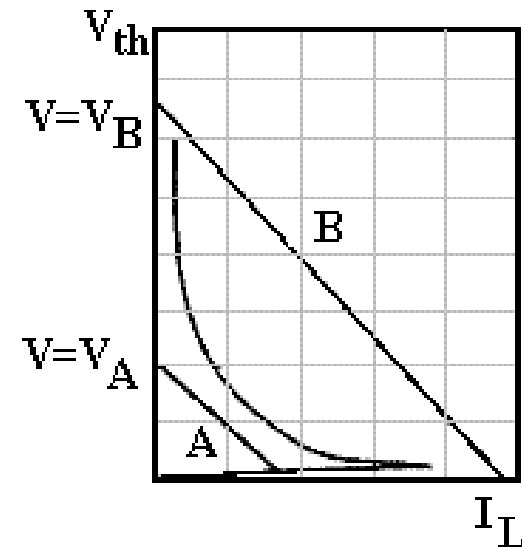
# Aplicações das termistências

- Protecção de sobretensões na entrada



$$\frac{V_{th}^2}{R_{PTC}} = \frac{T_{Curie} - T_a}{R_t}$$

$$V_{th\max} = \sqrt{R_{PTC} \frac{T_{Curie} - T_a}{R_t}}$$

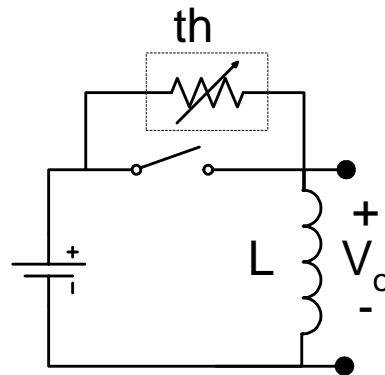


Para  $V_A$  não atinge a temperatura de Curie



# Aplicações das termistências

- Supressão de arcos eléctricos com PTC

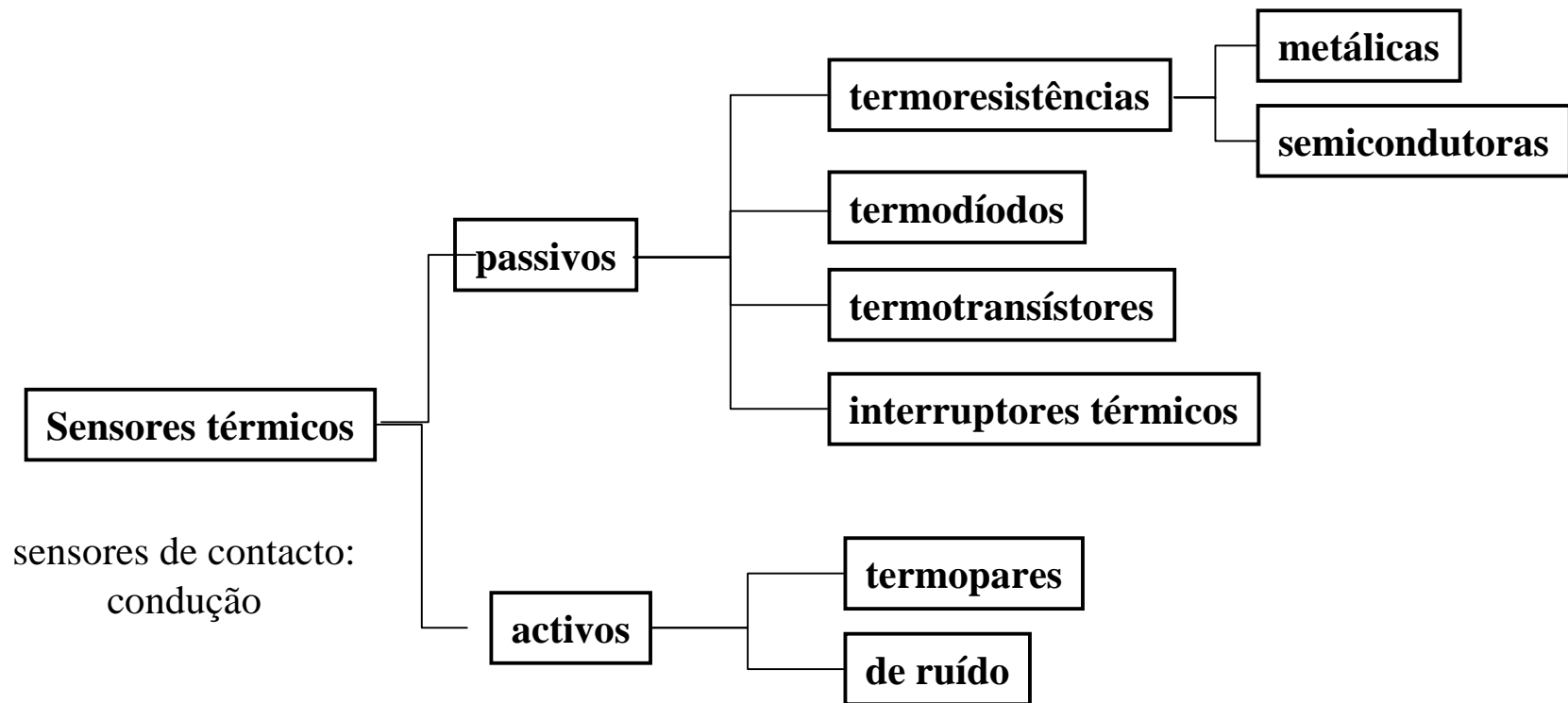


Quando o interruptor abre a corrente passa pela termistência e há auto-aquecimento. Ao fim de algum tempo a termistência tem um valor elevado

$$P_{R_{PTC}} \uparrow \quad T \uparrow \quad R_{PTC} \uparrow$$

$R_{PTC}$  muito elevado (circuito aberto)

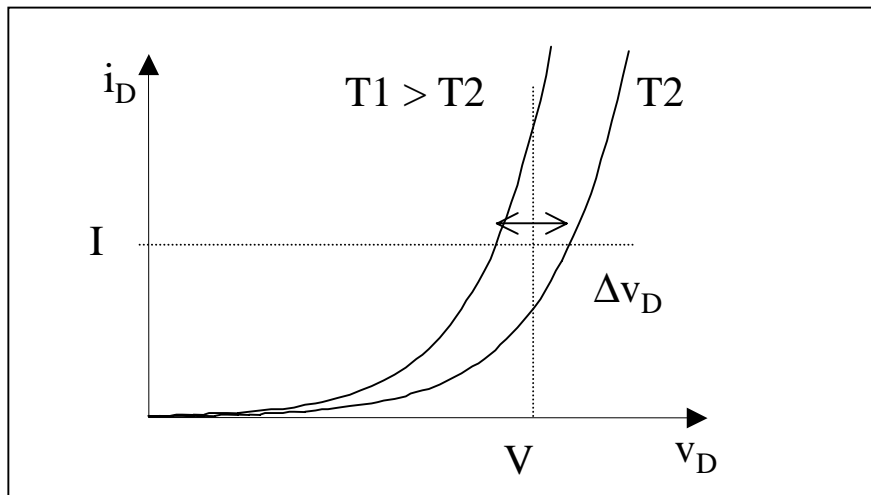
# Tipos de sensores térmicos



# Termodíodos e termotransístores

- Estes sensores utilizam a variação da característica  $i(v)$  de uma junção de semiconductor com a temperatura.

$$i_D = I_s \left( e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1 \right) \quad I_s = c A T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad V_T = \frac{kT}{q}$$



$I_s$  corrente inversa de saturação

$c$  – constante que depende da tecnologia

$A$  – área transversal da junção

$V_T$  -tensão térmica

# Termodíodos e termotransístores

- Pode utilizar-se excitação em tensão medindo a corrente ou excitação em corrente medindo a tensão.

T

$$v_D = V_T \ln\left(\frac{i_D}{I_s} + 1\right) \approx V_T \ln\left(\frac{i_D}{I_s}\right)$$

$$\begin{array}{ll} T_1 = 50\text{ }^\circ\text{C} & T_2 = 30\text{ }^\circ\text{C} \\ \Delta T = 20\text{ }^\circ\text{C} & \Delta v_D = 40\text{ mV} \end{array} \quad \frac{dv_D}{dT} = -2\text{mV}/^\circ\text{C} \quad (\text{Si})$$

- Modo mais usado por haver mais controlo sobre a tensão pois a variação é logarítmica

# Revisões

- Termodíodos

$$i_D = I_s \left( e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1 \right) \quad I_s = c A T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad V_T = \frac{kT}{q}$$

- Excitação em corrente

$$v_D = V_T \ln \left( \frac{i_D}{I_s} + 1 \right) \quad v_D \approx V_T \ln \left( \frac{i_D}{I_s} \right)$$

$$\frac{dv_D}{dT} = -2mV / ^\circ C \quad (Si) \quad \Delta T = 20^\circ C \Rightarrow \Delta V = 40mV$$

# Termodíodos

- A característica  $v_D(T)$  não é linear

$$v_D \approx V_T \ln\left(\frac{i_D}{I_s}\right) \qquad \frac{dv_D}{dT} = V_T \frac{d \ln\left(\frac{i_D}{I_s}\right)}{dT} + \boxed{\ln\left(\frac{i_D}{I_s}\right) \frac{dV_T}{dT}}$$

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

$$\boxed{\ln\left(\frac{i_D}{I_s}\right) \frac{dV_T}{dT}} = \ln\left(\frac{i_D}{I_s}\right) \frac{d(kT/q)}{dT} = \ln\left(\frac{i_D}{I_s}\right) \frac{k}{q} = \frac{V_T}{T} \ln\left(\frac{i_D}{I_s}\right) = \boxed{\frac{v_D}{T}}$$

# Termodíodos

$$\frac{dv_D}{dT} = \boxed{V_T \frac{d \ln\left(\frac{i_D}{I_s}\right)}{dT}} + \ln\left(\frac{i_D}{I_s}\right) \frac{dV_T}{dT}$$

Excitação em corrente (constante)

$$\boxed{V_T \frac{d \ln\left(\frac{i_D}{I_s}\right)}{dT}} = V_T \frac{I_s}{i_D} \frac{d \frac{i_D}{I_s}}{dT} = -V_T \frac{I_s}{i_D} \frac{i_D}{I_s^2} \frac{dI_s}{dT} = \boxed{-\frac{V_T}{I_s} \frac{dI_s}{dT}}$$

# Termodíodos

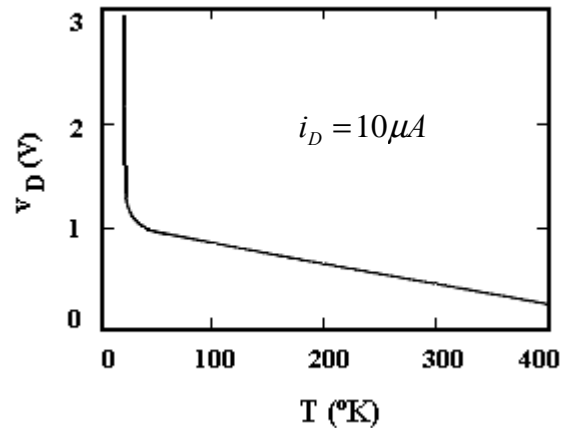
$$-\frac{V_T}{I_s} \frac{\partial I_s}{\partial T} = \frac{d\left(c A T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{2kT}}\right)}{dT} = -\frac{V_T}{I_s} cA \left( \frac{3}{2} T^{\left(\frac{1}{2}\right)} e^{-\frac{E_g}{2kT}} + \frac{E_g}{2kT^2} T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \right)$$

$$-\frac{V_T}{I_s} \frac{dI_s}{dT} = \boxed{\frac{3k}{2q} - \frac{E_g}{2qT}} \quad \frac{dv_D}{dT} = \boxed{\frac{3k}{2q} - \frac{E_g}{2qT}} + \boxed{\frac{v_D}{T}} = \frac{1}{T} \left( v_D - \frac{E_g}{2q} \right) - \frac{3k}{2q}$$

$v_D(T)$  não é linear



# Termodíodos



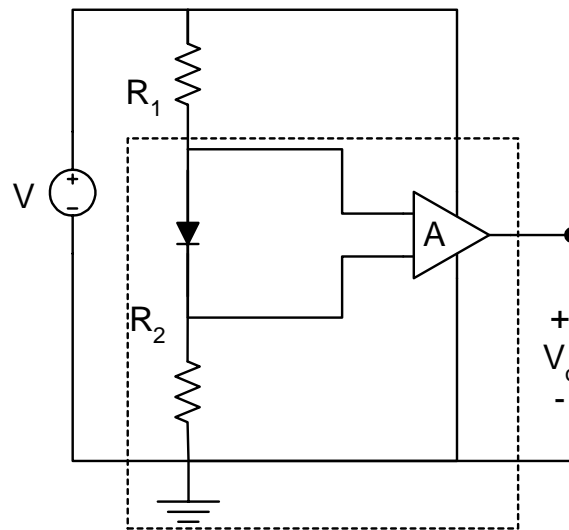
Díodo de silício

$$\frac{dv_D}{dT} = -2mV / ^\circ C \quad (Si)$$

- Funcionamento na zona directa (excitação em corrente)
- Zona aproximadamente linear a partir de 50°K
- Acima de 300°C problemas na junção
- Sensores baratos para utilização em aplicações que não sejam críticas em termos de linearidade e exactidão.

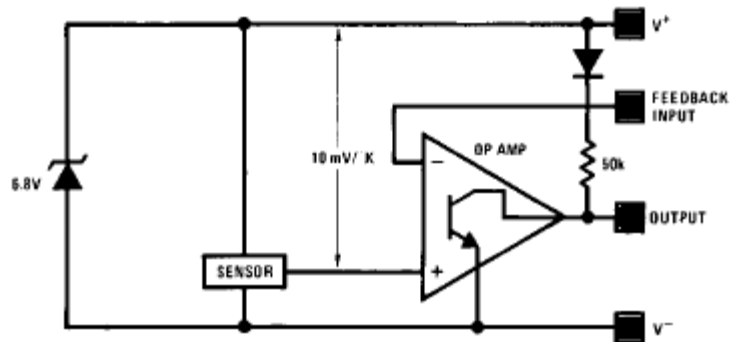
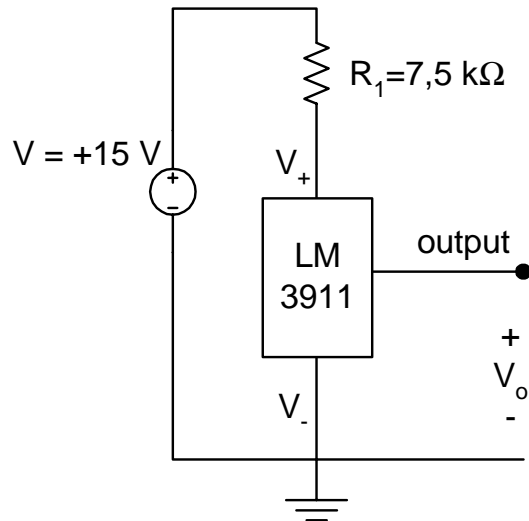
# Termodíodos

Facilidade de integração com outros componentes electrónicos



# Termodíodos

LM3911 (baixo custo)  $10\text{mV}/^\circ\text{K}$



Sensor de temperatura, tensão de referência e opamp

Utiliza a diferença de VBE em transístores com polarizados com correntes diferentes.

# Termodíodos: diferença de tensões

Duas junções diferentes à mesma temperatura

$$v_{D1} - v_{D2} = V_T \ln \left( \frac{\frac{i_{D1}}{I_{s1}} + 1}{\frac{i_{D2}}{I_{s2}} + 1} \right) \approx V_T \ln \left( \frac{i_{D1} I_{s2}}{I_{s1} i_{D2}} \right)$$

o mesmo material

$$v_{D1} - v_{D2} \approx T \frac{k}{q} \ln \left( \frac{i_{D1} A_2}{i_{D2} A_1} \right)$$

Diferença de tensões proporcional à temperatura

# Termodíodos: diferença de tensões

+  
 $V_{D1}$   
 -

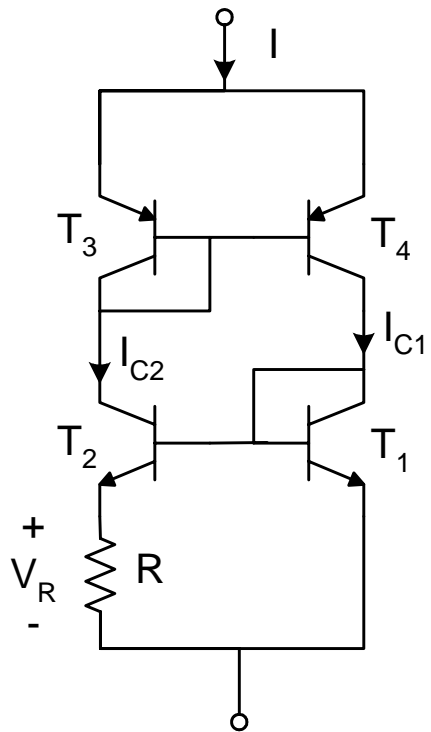
$D_2$  pode ser realizado  
 com  $m$  díodos  $D_1$  em paralelo

$$m = \frac{A_2}{A_1}$$

$$v_{D1} - v_{D2} \approx T \frac{k}{q} \ln \left( \frac{i_{D1}}{i_{D2}} \frac{A_2}{A_1} \right) \quad i_{D1} = i_{D2} \quad \Rightarrow \quad v_{D1} - v_{D2} \approx T \frac{k}{q} \ln m$$

$$\frac{d(v_{D1} - v_{D2})}{dT} \approx \frac{k}{q} \ln(m) \quad \text{característica linear}$$

# Termotransístor: diferenças de $V_{BE}$



$$A_3 = A_4 \quad A_2 = m A_1 = 8 \times A_1$$

$$A_3 = A_4 \quad I_{C3} = I_{C4} \quad I_{C1} \approx I_{C4} \quad I_{C2} \approx I_{C3}$$

$$I_{C1} = I_{C2} = I_{C3} = I_{C4}$$

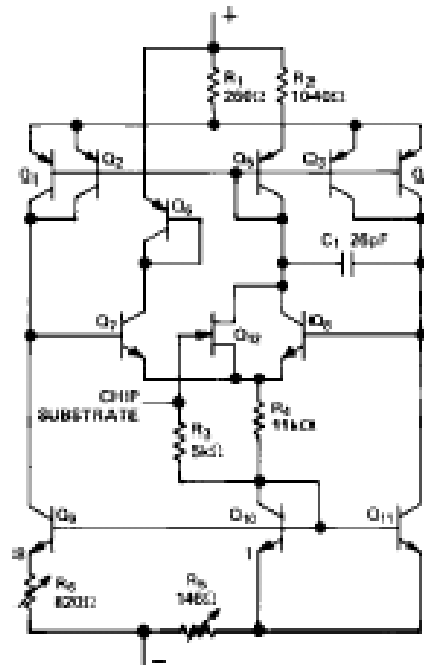
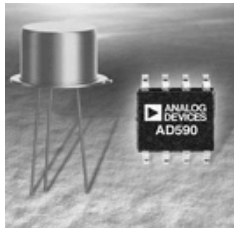
$$v_R = v_{BE1} - v_{BE2} \approx T \frac{k}{q} \ln \left( \frac{m A_1}{A_1} \right) = T \frac{k}{q} \ln 8$$

$$I_T = 2 \times I_R = 2 \times \frac{v_{BE1} - v_{BE2}}{R} = 10^{-6} T$$

R ajustada para  $358 \Omega$  de modo a:  $I = 10^{-6} T$

AD590: baseia-se neste circuito

# AD590



AD590

$$1\mu A/^{\circ} K$$

AD590 - corrente proporcional à temperatura absoluta: PTAT - Proportional To Absolute Temperature)

# AD590: conversão de Kelvin para Fahrenheit

AD590

Dimensione o circuito para conversão de temperaturas entre  $0^\circ$  (32 mV) e  $100^\circ$  V (212 mV)

$$0^\circ C = 273,15^\circ K = 32^\circ F$$

$$100^\circ CF = 373,15^\circ K = 212^\circ F$$

$$v_o = -1 \times T \times \frac{R_2}{R_1} - V_{ref} \quad \left\{ \begin{array}{l} 32 = -273,15 \frac{R_2}{R_1} - V_{ref} \\ 212 = -373,15 \frac{R_2}{R_1} - V_{ref} \end{array} \right.$$

$1 \mu A / ^\circ K$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{R_2}{R_1} = 1,8 \\ V_{ref} = -0,45967 \text{ V} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} R_1 = 100 \text{ k}\Omega \\ R_2 = 180 \text{ k}\Omega \end{array}$$



# Termotransístor: diferenças de $V_{BE}$

- LM335

$$v_{C1} = v_{C10} \Rightarrow i_{C1} = i_{C10} = \frac{I}{2}$$

$$v_0 = (v_{BE1} - v_{BE10}) \frac{R_1 + 2n R_1}{R_1} = (v_{BE1} - v_{BE10})(2n + 1)$$

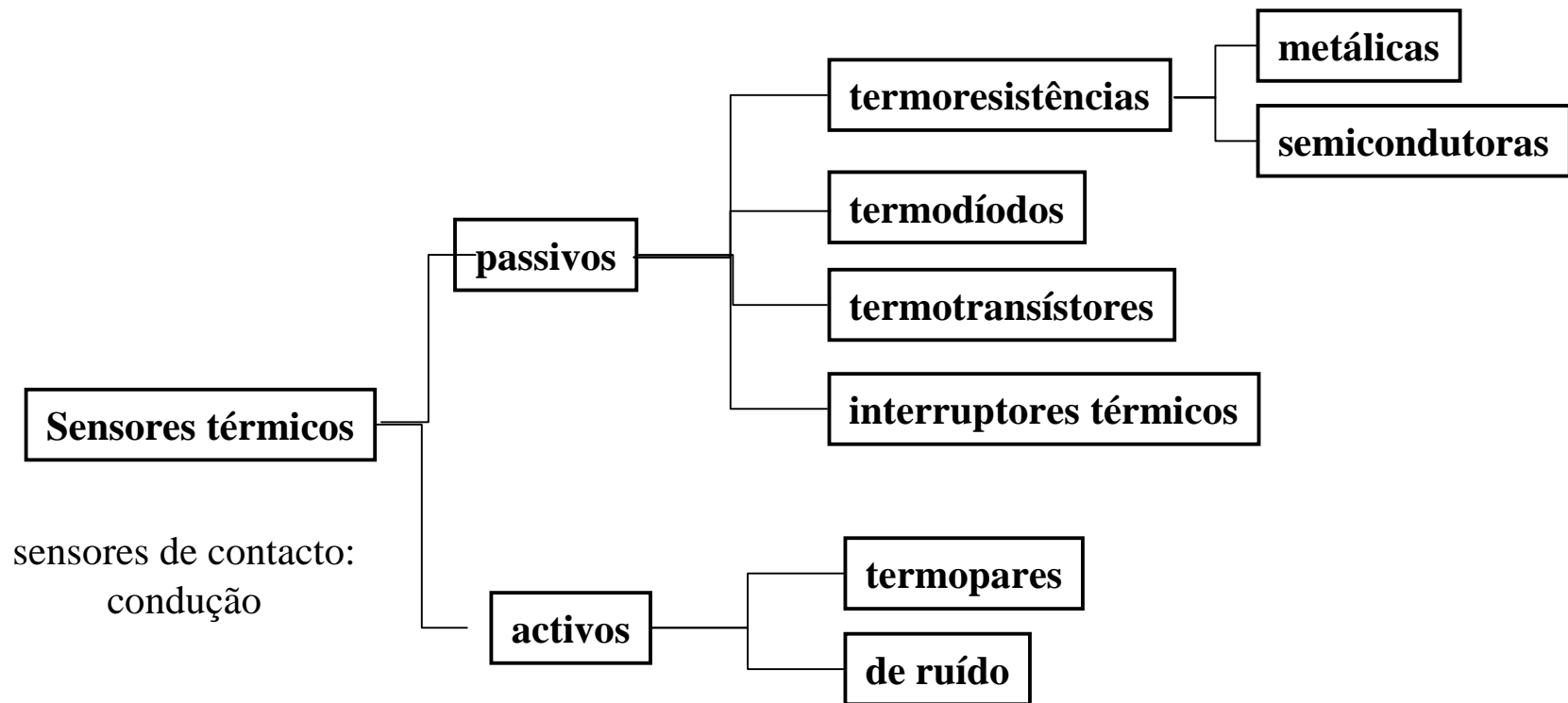
$$v_0 = T \frac{k}{q} \ln(m)(2n + 1)$$

Dimensione o circuito para conversão  
de temperaturas de °C em °K

$$\text{Se } n = 24,7 \text{ e } m = 10 \Rightarrow v_0 = 2,73 + 0,01 T_{Celsius}$$

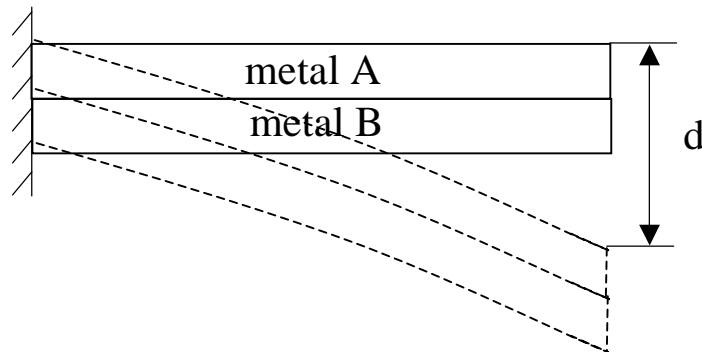


# Tipos de sensores térmicos

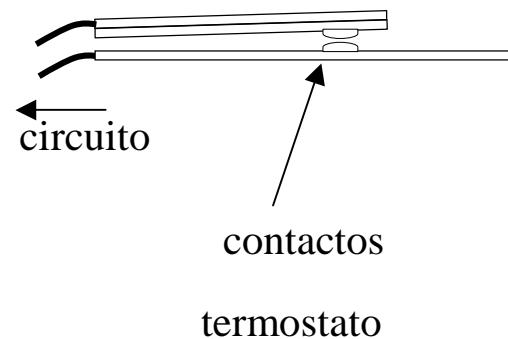


# Interruptores térmicos

- Usados mais como dispositivos de controlo do que para medir temperatura.
- Sensor térmico com uma função discreta que modula a temperatura.
- Bimetálico: junção de duas tiras de metais com coeficientes de temperatura diferentes:

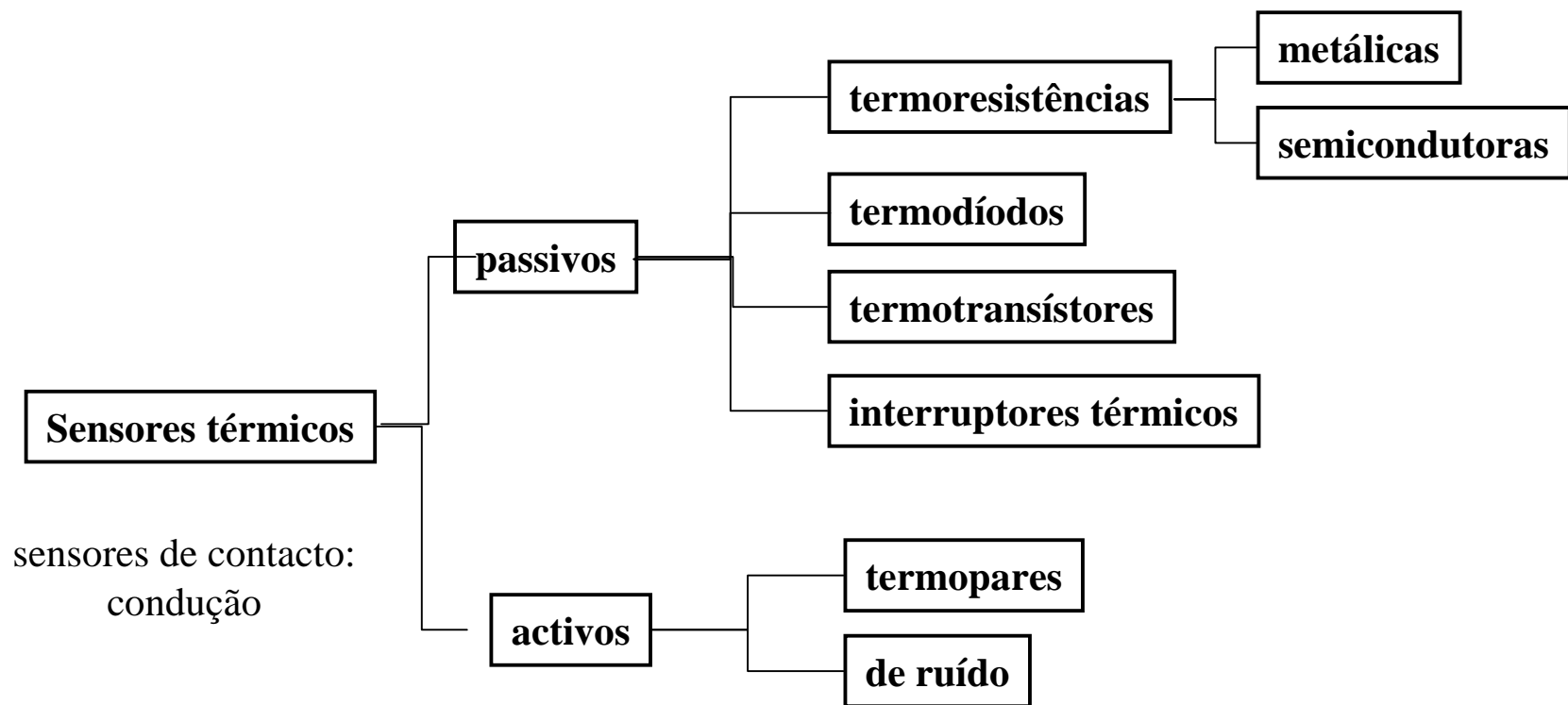


coeficiente de dilatação do metal A maior



- Termistências como interruptores térmicos nos microsensores (temperatura de Curie): resistência passa de valor baixo a valor muito alto

# Tipos de sensores térmicos



# Termopares ou pares termoelétricos

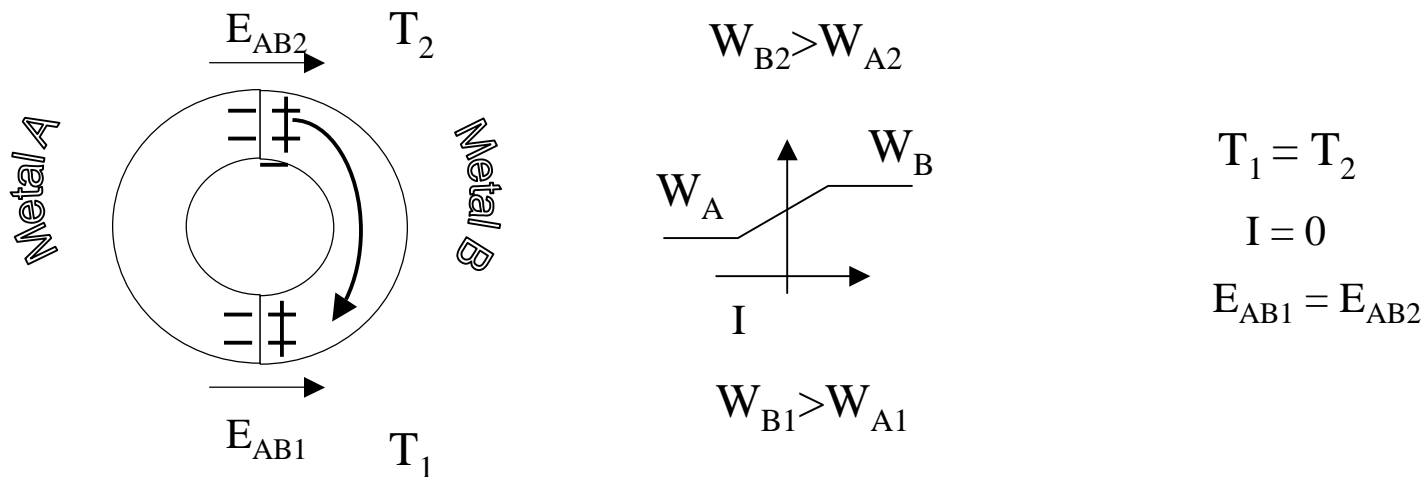
- Baseiam-se no efeito de Seebeck
- Efeito de Seebeck é um efeito termoelétrico
- Efeitos termoelétricos: fenómenos físicos que relacionam a temperatura com as propriedades eléctricas dos materiais
- Outros efeitos termoelétricos: efeito de Peltier e efeito de Thomson
- Efeito de Peltier e efeito de Thomson: conversão de energia eléctrica em energia térmica e bombas de calor (transporte de energia térmica à custa de energia eléctrica)

# Termopares ou pares termoelétricos

- São dos sensores mais usados para medir temperatura.
- São sensores activos: não necessitam de fonte exterior.
- Permitem medir desde temperaturas baixas até quase à temperatura de fusão dos metais (-200 a 1600°C).
- São exactos, sensíveis e fiáveis.
- A força electromotriz permite medir diferenças de temperatura

# Efeito de Seebeck (termopar)

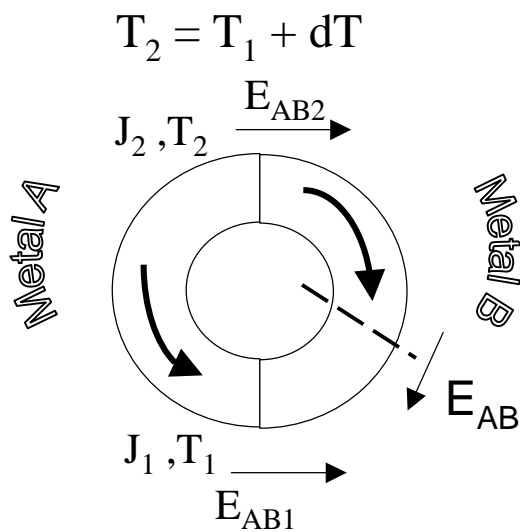
Metal A e metal B: os electrões deslocam-se do condutor com maior energia para o de menor energia:  $E_{AB1}$  e  $E_{AB2}$



Com as duas junções à mesma temperatura a corrente é nula



# Efeito de Seebeck (termopar)



Se  $T_1 \neq T_2$  então  $E_{AB1} \neq E_{AB2}$

$$E_{AB} = E_{AB2} - E_{AB1} < 0$$

corrente no sentido contrário aos ponteiros do relógio

$$E_{AB} = E_{AB2} - E_{AB1} > 0$$

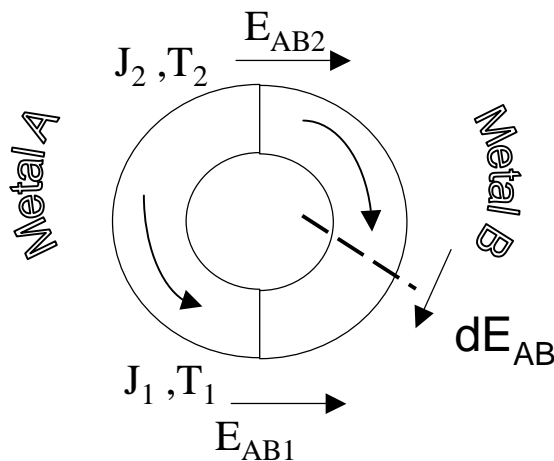
corrente no sentido dos ponteiros do relógio

$$dE_{AB} = E_{AB2} - E_{AB1} = \alpha_{AB} dT$$

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B$$

$\alpha_{AB}$  coeficiente de Seebeck

# Efeito de Seebeck (termopar)



$$dE_{AB} = E_{AB2} - E_{AB1} = \alpha_{AB} dT$$

A f.e.m depende:

- a natureza dos materiais A e B ( $\alpha_{AB}$  coeficiente de Seebeck)
- da temperatura

# Efeito de Peltier

- A corrente eléctrica numa junção de dois condutores provoca absorção ou libertação de calor na junção, aumentando ou diminuindo a temperatura da junção.
- A quantidade de calor absorvida ou libertada é proporcional à carga que atravessa a junção.

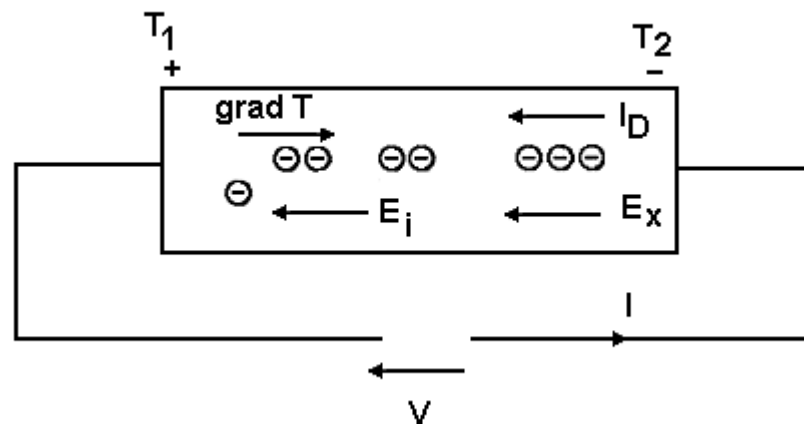
$$dQ_{\Pi_{AB}} = \Pi_{AB} dq \quad \Pi_{AB} \text{ coeficiente de Peltier}$$

$$dq = i dt \quad dQ_{\Pi_{AB}} = \Pi_{AB} i dt \quad P_{\Pi_{AB}} = \frac{dQ_{\Pi_{AB}}}{dt} = \Pi_{AB} i$$

- Efeito de Peltier muito acentuado em alguns semicondutores

# Efeito de Thomson

- A corrente eléctrica num condutor homogéneo em que exista um gradiente de temperatura provoca absorção ou libertação de calor.
- Se o movimento dos electrões for na direcção do gradiente de temperatura, estes perdem energia (calor), ganhando energia no sentido inverso



Libertação de calor

# Efeito de Thomson

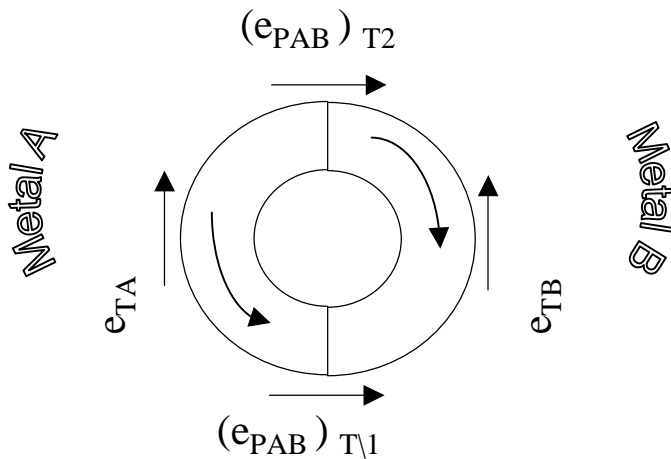
- A quantidade de calor libertada por unidade de tempo e de volume

$$\frac{dQ_T}{dt} = \frac{dP_T}{dV} = -\beta \text{ grad } T J_x \quad J_x = \frac{di}{dS} \quad dV = dS dx$$

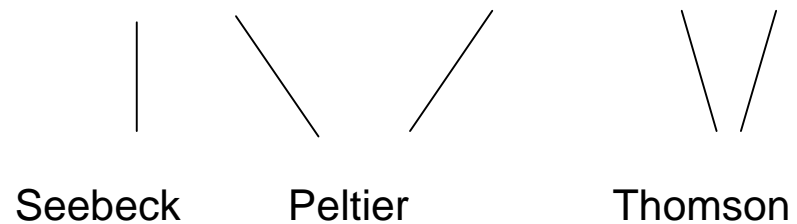
$\beta$  coeficiente de Thomson

# Termopares

- No circuito fechado com as junções a temperaturas diferentes:



$$E_{AB} = E_{PAB}|_{T_2} - E_{PAB}|_{T_1} + E_{TA} - E_{TB}$$

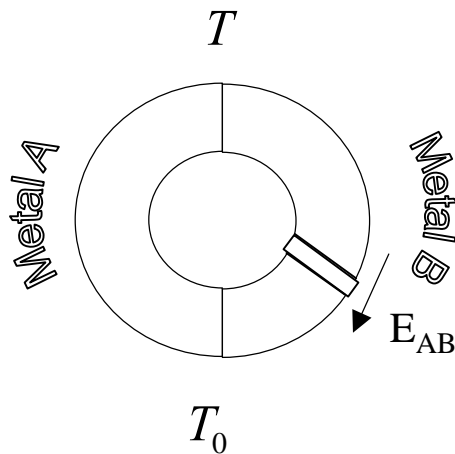


$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B = \frac{dE_{AB}}{dT} = \frac{d\Pi_{AB}}{dT} + \beta_A - \beta_B$$

- Com o circuito aberto existe apenas efeito de Seebeck, podendo medir-se a força electromotriz que depende da temperatura T.

# Termopares

- Termopar: funcionamento em circuito aberto (só efeito de Seebeck). Não há aquecimento por efeitos e Peltier e Thomson.
- A lei de variação da força electromotriz com temperatura T:



$$E_{AB} = a_{AB} (T - T_0) + \frac{1}{2} b_{AB} (T^2 - T_0^2)$$

Por razões de ordem prática a temperatura de referência utilizada é  $T_0 = 0^\circ C$  (gelo) e não  $T_0 = 0^\circ K$

# Termopares

- Linearidade e sensibilidade:

$$dE_{AB} = E_{AB2} - E_{AB1} = \alpha_{AB} dT \quad \alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B$$

$$E_{AB} = a_{AB} (T - T_0) + \frac{1}{2} b_{AB} (T^2 - T_0^2) \quad a_{AB} = a_A - a_B$$
$$b_{AB} = b_A - b_B$$

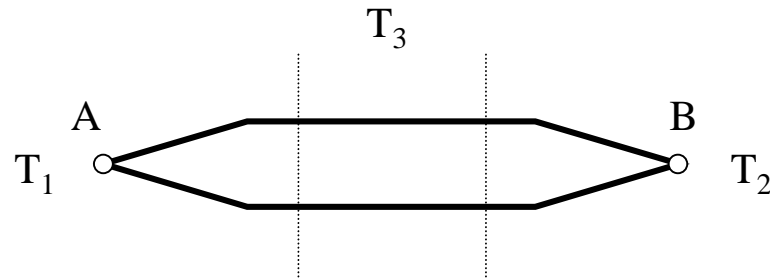
$$\frac{dE_{AB}}{dT} = a_{AB} + b_{AB} T$$

- Aumenta-se a sensibilidade maximizando  $a_{AB}$   $a_A > 0$  e  $a_B < 0$
- Aumenta-se a linearidade minimizando  $b_{AB}$



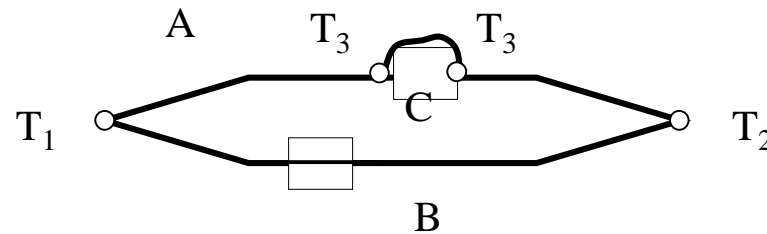
# Leis dos termopares

- A f.e.m de Seebeck só depende da temperatura das junções ( $T_1$  e  $T_2$ ) dos dois condutores, não sendo afectada por temperaturas nos condutores ( $T_3$ )



# Leis dos condutores intermédios

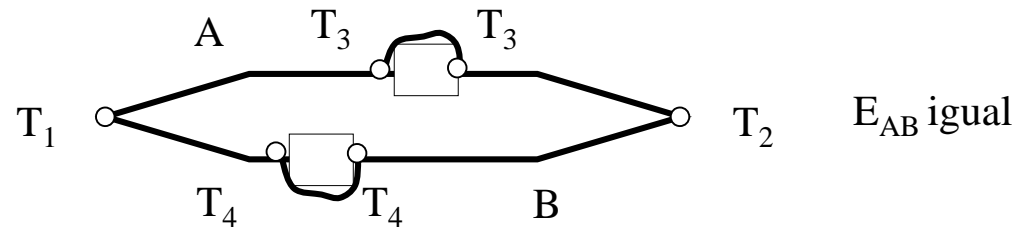
- A f.e.m. de Seebeck de dois condutores, A e B, não é alterada pela introdução de um condutor C que esteja à mesma temperatura



$$E_{BA}(T_1) + E_{AC}(T_3) + E_{CA}(T_3) + E_{AB}(T_2) = E_{AB}(T_2) - E_{AB}(T_1)$$

# Leis dos condutores intermédios

- A introdução de condutores adicionais (cabos, conectores, etc), não altera da f.e.m de Seebeck, se cada condutor estiver todo à mesma temperatura:



- A introdução de um voltímetro com os dois extremos à mesma temperatura não provoca alteração .

# Leis dos condutores intermédios

- Lei dos condutores intermédios: podem determinar-se a f.e.m e os coeficientes de um termopar com base em em tabelas de termopares de vários metais com um metal de referência.

Metal	a ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ )	b ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ )
Antimónio	+35,6	+0.145
Ferro	+16,7	-0,29

Referência: chumbo

Par Antimónio -Ferro

$$a_{SbFe} = a_{SbPb} - a_{FePb}$$

$$b_{SbFe} = b_{SbPb} - b_{FePb}$$

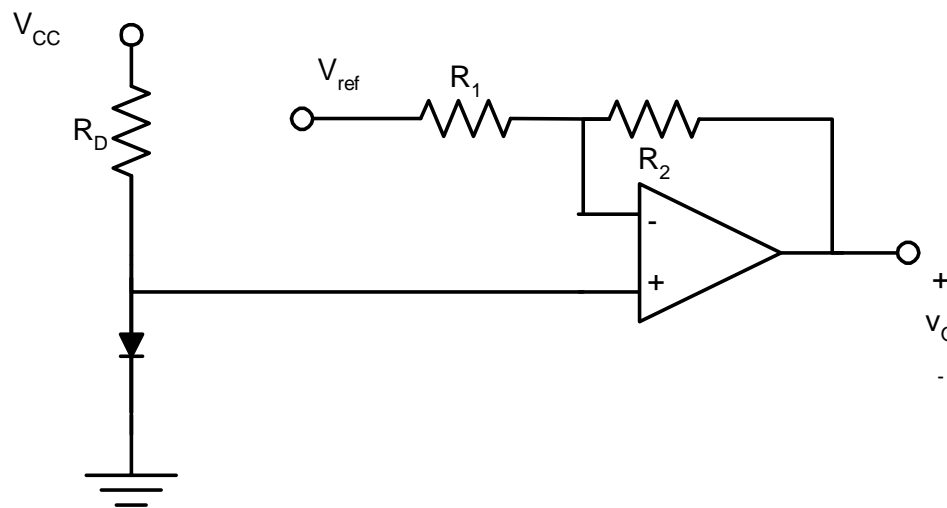
$$E_{SbFe} = E_{SbPb} - E_{FePb}$$

# Revisões

- Termodíodos e termotransístores: utilização da tensão na junção e a diferença de tensão entre duas junções com dimensões diferentes.
- Exemplos de circuitos comerciais: conversão de temperatura em tensão e em corrente.
- Interruptores térmicos

# Exemplo

Dimensione o termómetro da figura que utiliza um termodíodo, de modo a medir temperaturas entre  $0^{\circ}$  e  $100^{\circ}\text{C}$ , com tensões na saída entre 0 e 10 V.



termodíodo

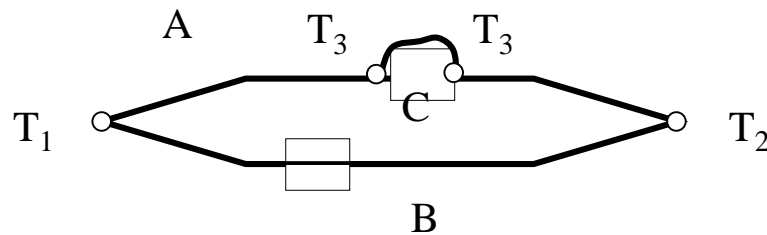
# Revisões

- Efeitos termoelétricos: Seebeck, Peltier e Thomson
- Termopar
- Sensibilidade e linearidade de termopares
- Leis dos termopares

# Revisões

- Leis dos consutores intermédios

A f.e.m. de Seebeck de dois condutores, A e B, não é alterada pela introdução de um condutor C que esteja à mesma temperatura.



$$E_{BA}(T_1) + E_{AC}(T_3) + E_{CA}(T_3) + E_{AB}(T_2) = E_{AB}(T_2) - E_{AB}(T_1)$$

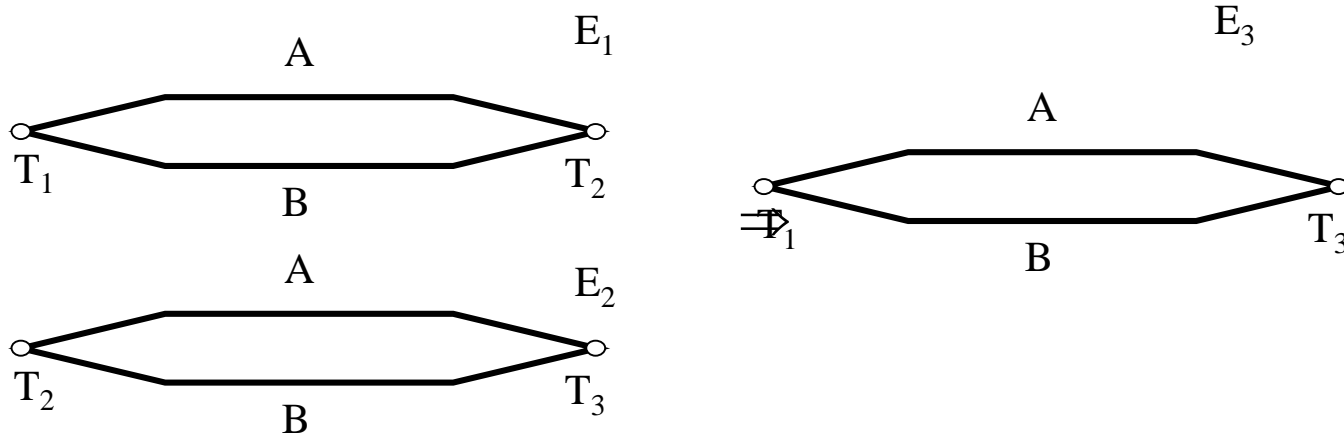
$$a_{SbFe} = a_{SbPb} - a_{FePb} \quad b_{SbFe} = b_{SbPb} - b_{FePb} \quad E_{SbFe} = E_{SbPb} - E_{FePb}$$



# Leis das temperaturas intermédias

- Se num termopar a f.e.m de Seebeck, com as junções às temperaturas  $T_1$  e  $T_2$  for  $E_1$  e com as junções às temperaturas  $T_2$  e  $T_3$  for  $E_2$  então às temperaturas  $T_1$  e  $T_3$  será

$$E_3 = E_2 + E_1$$



Pode utilizar-se qualquer temperatura como referência

# Leis das temperaturas intermédias

- Qual a f.e.m de um termopar Constantan-Ferro, se uma junção estiver a 1100°C e a outra a 40°C?

Tabela com valores de f.e.m do Constantan-Ferro

T (°C)	E <sub>AB</sub> (mV)
1100°C	11,846
40°C	0,232

**T<sub>0</sub> = 0°C**

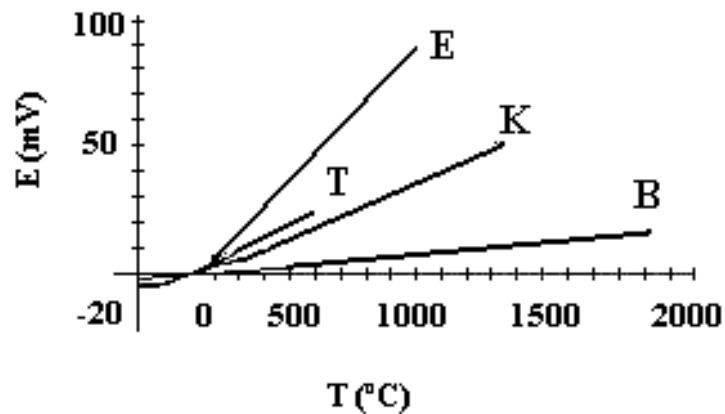
$$T_1 = 1100^\circ\text{C} \quad T_2 = 0^\circ\text{C} \quad E_{AB} = 11,842 \text{ mV}$$

$$T_3 = 40^\circ\text{C} \quad T_2 = 0^\circ\text{C} \quad E_{AB} = 0,232 \text{ mV}$$

$$T_1 = 1100^\circ\text{C} \quad T_3 = 40^\circ\text{C} \quad E_{AB} = 11,848 - 0,232 = 11,304 \text{ mV}$$

# Tipos de termopares comerciais

- Termopares normalizados

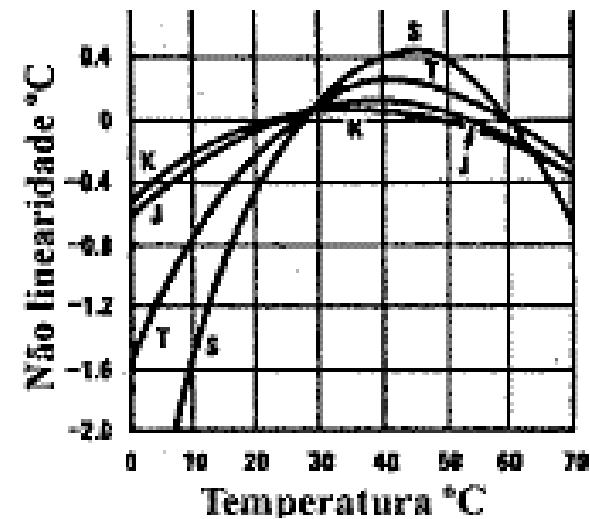


**E** Cromel - Constantan

**T** Cobre - Constantan

**K** Cromel - Alumel

**B** Platina (6%) / Ródio - Platina (30%) / Ródio



# Tipos de termopares comerciais

Existe normalização sendo usados determinados metais e ligas metálicas

Escolha depende: linearidade, sensibilidade, gama de temperaturas que suportam, resistência a agentes químicos

Tipo	Metal A	Metal B	Cor dos fios
E- ANSI	Cromel (90% Níquel, 10% Crómio)	Constantan (57% Cobre, 43% Níquel)	Púrpura-vermelho
J- ANSI	Ferro	Constantan	Branco -vermelho
K- ANSI	Cromel	Alumel (94% Níquel, 3% magnésio, 2% alumínio, 1% Silício)	Amarelo -vermelho

# Tipos de termopares comerciais




Existe normalização sendo usados determinados metais e ligas metálicas

Tipo	Metal A	Metal B	Cor dos fios
T- ANSI	Cobre	Constantan	Azul - vermelho
C- ANSI	Tungsténio (5%) /Rénio	Tungsténio (26%) /Rénio	-
R- ANSI	Platina (13%)/Ródio	Platina	Preto -vermelho
S- ANSI	Platina(10%)//Ródio	Platina	Preto - vermelho
B- ANSI	Platina(6%)/Ródio	Platina(30%)//Ró dio	Preto - vermelho
I	Irídio (60%)/Ródio	Irídio	-

# Tipos de termopares comerciais

Tipo	Temperatura (°C)	$a_{AB}$ (mV/°C)	Comentário
E- ANSI	0 a 982	60,9	Maior sensibilidade
J- ANSI	-184 A 760	51,7	Atmosferas redutoras com pouco oxigénio: ferro oxida a altas temperaturas (acima de 550°C)
K- ANSI	-184 a 1260	40,6	Uso genérico
T- ANSI	-184 a 400	40,6	Atmosferas mediamente redutoras
C- ANSI	2300	20	Atmosferas mediamente redutoras
R- ANSI	0 a 1600	6	Atmosferas inertes ou vácuo: pouco resistente à oxidação.
S- ANSI	0 a 1550	6	Resistente à corrosão e oxidação
B- ANSI	40 a 1800	6	Resistente à corrosão e oxidação
I	2200	6	

# Termopares

- Podem ser comprados ou fabricados especificamente para uma dada aplicação com fio bifilar de metais diferentes separados por um isolador. Os fios podem ser soldados ou apertados por um dispositivo mecânico.
- A junção de medida pode estar (diferentes tempos de resposta):
  - ligada à bainha de encapsulamento (à massa) 
  - desligada da bainha de encapsulamento (isolada) 
  - fora da bainha do encapsulamento (exposta) 
- Vários invólucros e várias dimensões:
  - exemplos ([www.lee-dickens.biz](http://www.lee-dickens.biz))

# Exemplo

- Determine a f.e.m de Seebeck num termopar de tipo T para uma temperatura de 100° C, estando a junção fria a 20°C

Tipo	Metal A	Metal B
T- ANSI	Cobre	Constantan

Metal	a (μV/°C)	b (μV/°C)
Cobre-Chumbo	2.71	0,0079
Constantan-Chumbo	-38,1	-0,0888

$$E_{AB} = a_{AB} (T - T_0) + \frac{1}{2} b_{AB} (T^2 - T_0^2)$$

$$E_{AB} = 40,81 (100 - 20) + \frac{1}{2} 0,0957 (100^2 - 20^2) = 3,72mV$$



# Termopares

Termopar aberto para medir temperatura **T**

Pela lei dos condutores intermédios,  
a tensão medida no voltímetro:

$$v = E_{AB}|_T - E_{AB}|_{T_1}$$

pois

$$v = E_{CA}|_{T_1} + E_{AB}|_T + E_{BC}|_{T_1}$$

$$E_{CA}|_{T_1} + E_{BC}|_{T_1} = E_{BA}|_{T_1} = -E_{AB}|_{T_1}$$

$$v = E_{AB}|_T - E_{AB}|_{T_1}$$

Mantém as junções AC e BC  
à mesma temperatura



**São medidas diferenças de temperatura**

# Termopares

Pode adicionar-se à tensão desenvolvida no termopar uma tensão de compensação para se medir T

$$v = E_{AB}|_T - E_{AB}|_{T_1} \quad E_{AB} = a_{AB} (T - T_0) + \frac{1}{2} b_{AB} (T^2 - T_0^2)$$

$$v + v_{comp} = E_{AB}|_T - E_{AB}|_{T_1} + v_{comp}$$

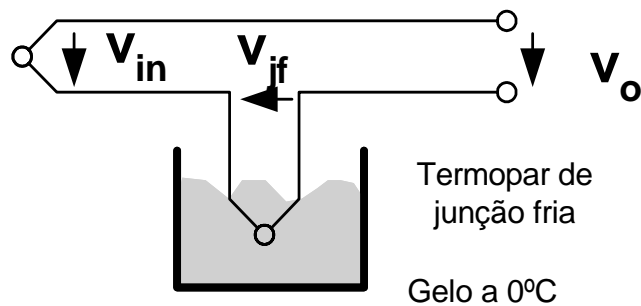
$$\text{Se } v_{comp} = E_{AB}|_{T_1} \quad v + v_{comp} = E_{AB}|_T$$

$$E_{AB} \approx a_{AB} (T - T_0) \quad \text{determinando } E_{AB} \text{ sabe-se } T$$

# Termopares

Compensação da junção fria fazendo  $T_1 = T_0 = 0^\circ\text{C}$

Termopar de  
medida



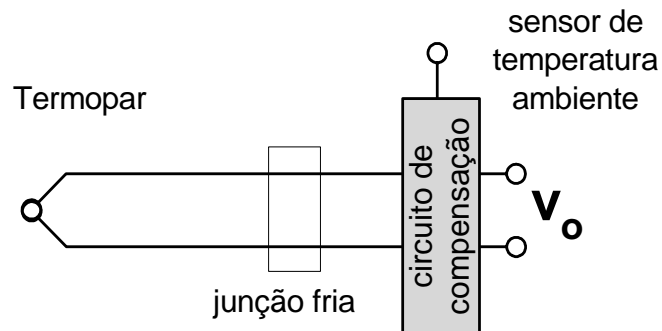
$$v_0 = v_{in} - v_{jf} = E_{AB}|_T - E_{AB}|_{0^\circ\text{C}}$$

$$E_{AB}|_T - E_{AB}|_{0^\circ\text{C}} = a_{AB} (T - T_0) + \frac{1}{2} b_{AB} (T^2 - T_0^2) - a_{AB} (0 - T_0) - \frac{1}{2} b_{AB} (0 - T_0^2)$$

$$v_0 = a_{AB} T$$

# Termopares

Se a temperatura da junção fria for a temperatura ambiente,  $E_{jf}$  variará de forma aproximadamente linear com  $T_{amb}$ . A compensação será realizada com uma tensão que varie também linearmente com a temperatura, utilizando um sensor de temperatura.

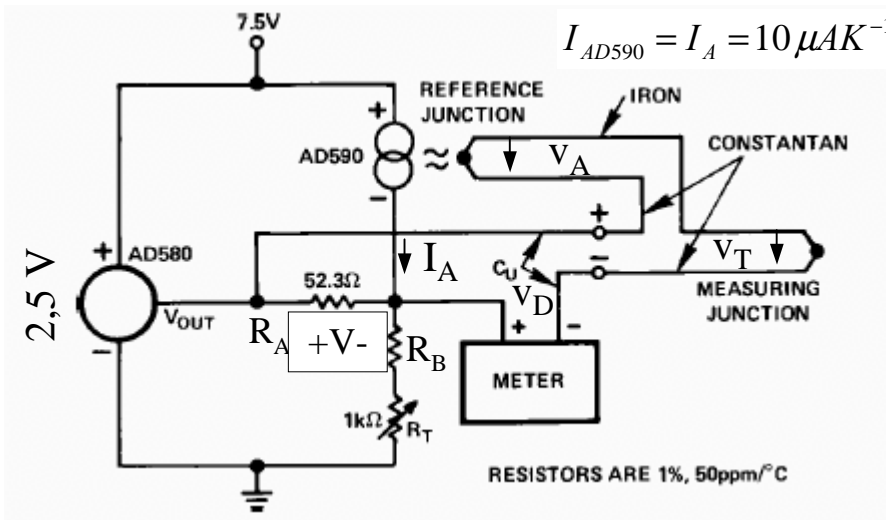


$$E_{jun. fria} \Big|_{T_{amb}} = a(T_{amb} - T_0)$$

$$v_{comp} \Big| = a(T_{amb} - T_0)$$

# Termopares

Compensação da temperatura da junção fria de um termopar com o AD590



$$R = R_B + R_T$$

$$v_D = V_T - V_A + V$$

$$v_D = V_T - V_A + \left( 2,5 - 2,5 \frac{R}{R + R_A} - I_A \frac{R R_A}{R + R_A} \right)$$

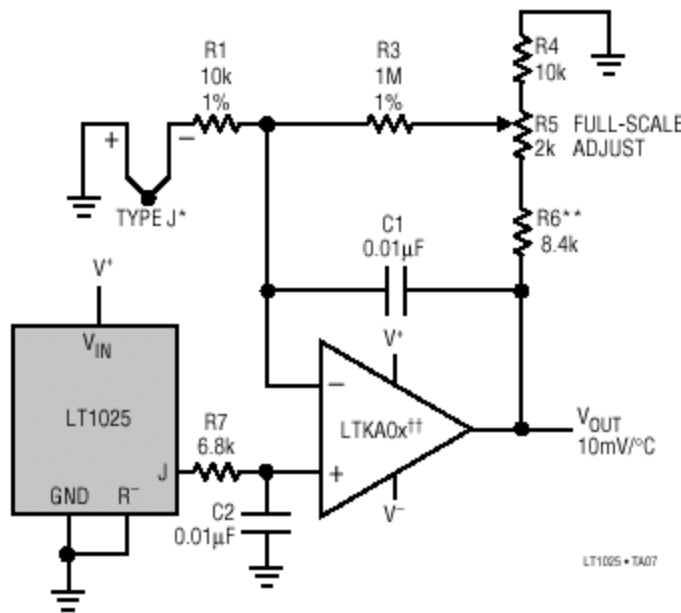
$$v_D = V_T - V_A - \frac{R_A I + 2,5}{1 + \frac{R_A}{R}} + 2,5 \approx V_T$$

Termopar ferro constantan com a compensação da junção fria realizada com o circuito AD590 que utiliza um termotransístor: erro inferior a 0,5% para variação T entre 15 e 35 °C. Existe um termopar parasita (ferro cobre)

# Termopares

LT1025: Compensação da temperatura da junção fria de um termopar E, J, K, R, S e T

Grounded Thermocouple Amplifier with Positive Output



\* FOR BEST ACCURACY, THERMOCOUPLE RESISTANCE SHOULD BE LESS THAN 50Ω  
 \*\* SELECTED FOR 0°C TO 200°C RANGE  
 †† OR EQUIVALENT. SEE "AMPLIFIER CONSIDERATIONS"

$$V_{J_{LT1025}} = \alpha T + \beta(T - 25)^2$$

LT1025:  
 variação não linear para compensar a não linearidade do termopar

LT1025 à temperatura da junção fria

LTKA0x - amplificador bipolar:

$$V_{os} < 35 \mu V$$

$$V_{os}/T < 1,5 \mu V \text{ } ^\circ C^{-1}$$

$$I_B < 1 \text{ nA}$$

# Termopares

- Característica  $E_{AB}(T)$  de um termopar aproximadamente linear em pequenas faixas de temperatura

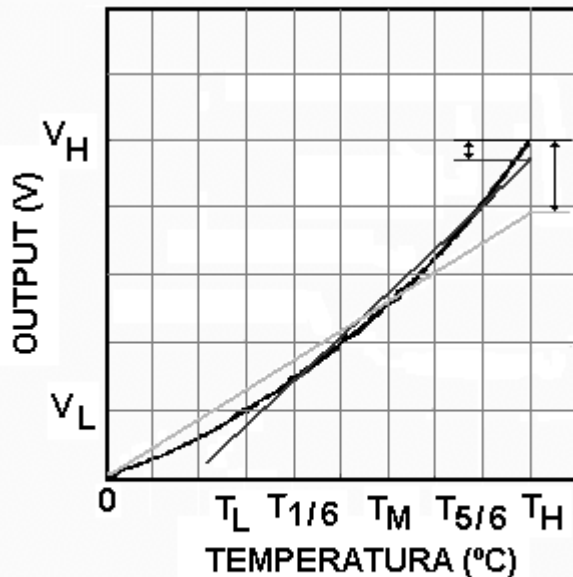
$$E_{AB}(T - T_0) \approx a(T - T_0)$$

- Linearização da característica de um termopar

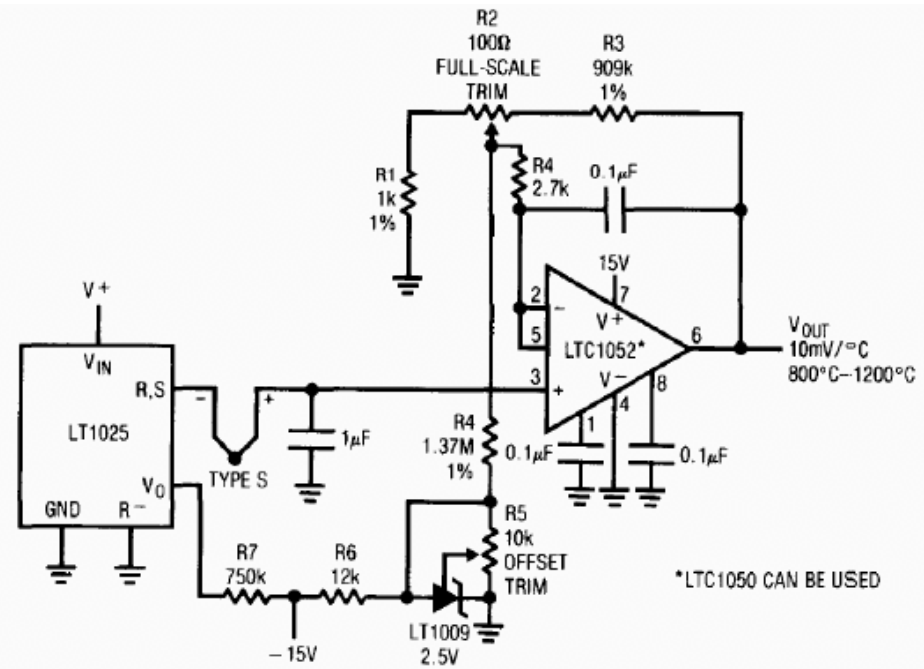
$$E_{AB}(T - T_0) = a(T - T_0) + b(T - T_0)^2 + c(T - T_0)^3 + \dots$$

# Termopares

Linearização: amplificação com adição de *offset*



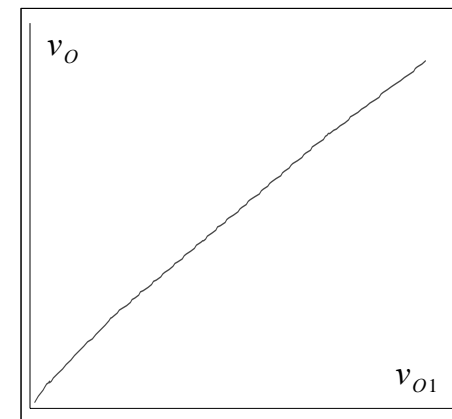
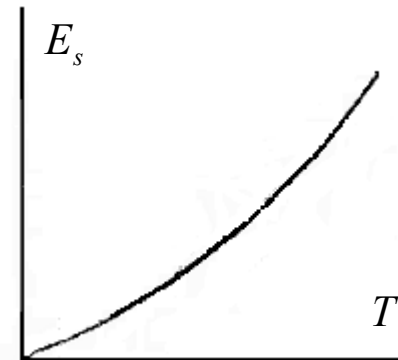
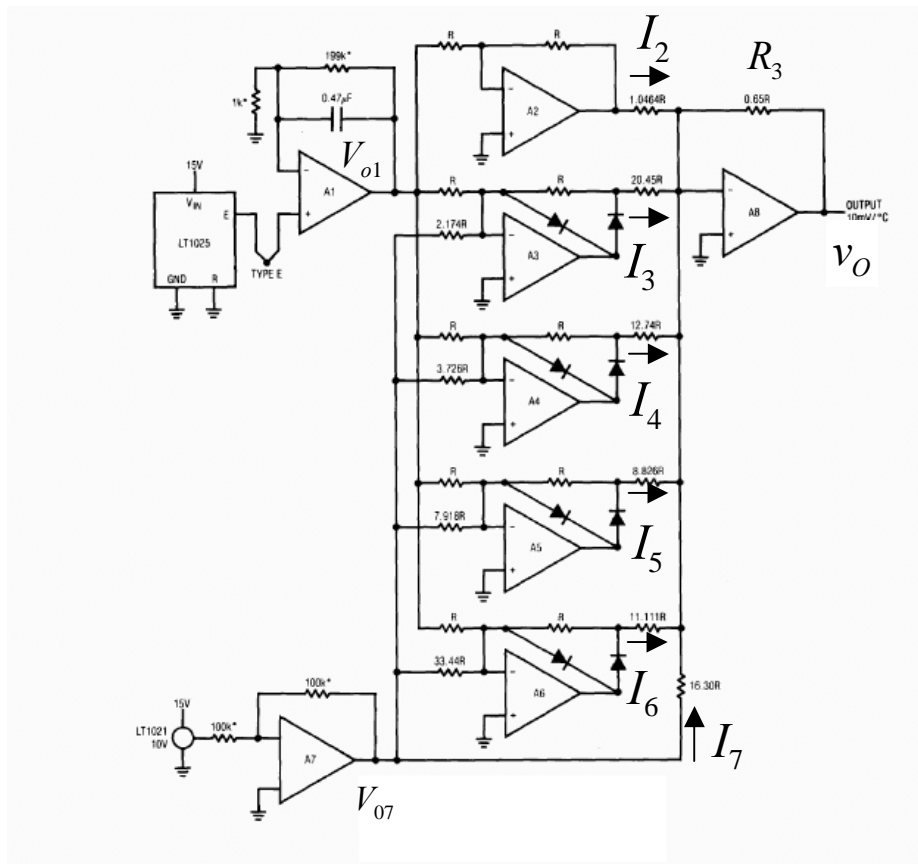
com compensação de offset  
sem compensação de offset





# Termopares

Linearização: amplificação com ganhos diferentes para vários troços



# Revisões

- Leis dos termopares: condutores intermédios e temperaturas intermédias
- Termopares normalizados: B, C, E, J, K, R, S, T (linearidade, sensibilidade, gama de temperaturas que suportam, resistência a agentes químicos, cores dos fios terminais, etc)
- Medição de temperatura com termopar aberto (medição de diferenças de temperaturas)



$$v = E_{AB}|_T - E_{AB}|_{T_1}$$

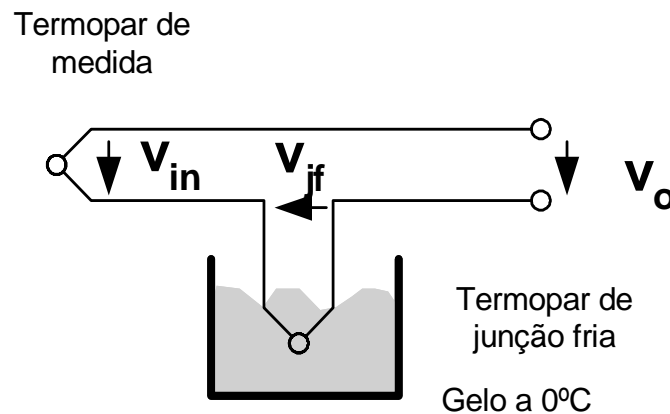
Junções AC e BC à mesma temperatura

$$v = E_{CA}|_{T_1} + E_{AB}|_T + E_{BC}|_{T_1}$$

$$v = E_{AB}|_T - E_{AC}|_{T_1} - E_{CB}|_{T_1}$$

# Revisões

- Medição da temperatura conhecendo uma das temperaturas: temperatura da junção fria com gelo fundente:  $T_1 = 0^\circ\text{C}$

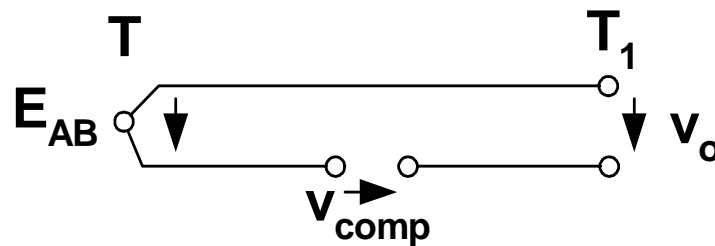


$$T = \frac{v_0}{a_{AB}}$$

$$v_0 = E_{AB}|_T - E_{AB}|_{0^\circ\text{C}} \approx a_{AB} (T - 0) = a_{AB} T$$

# Revisões

- Medição da temperatura compensando a temperatura da junção fria: junta-se uma tensão de compensação



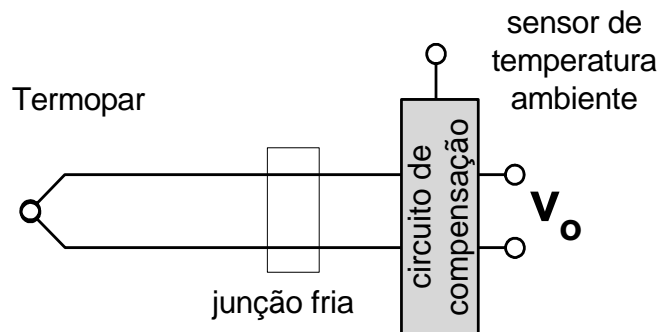
$$T = \frac{v_0}{a_{AB}}$$

$$v_0 = E_{AB}|_T - E_{AB}|_{T_1} + v_{comp}$$

$$E_{AB}|_{T_1} = v_{comp} \quad v_0 = E_{AB}|_T \approx a_{AB}T$$

# Revisões

- Compensação da temperatura da junção fria utilizando um controlador de temperatura



$$E_{jun. fria} \Big|_{T_{amb}} = a(T_{amb} - T_0)$$

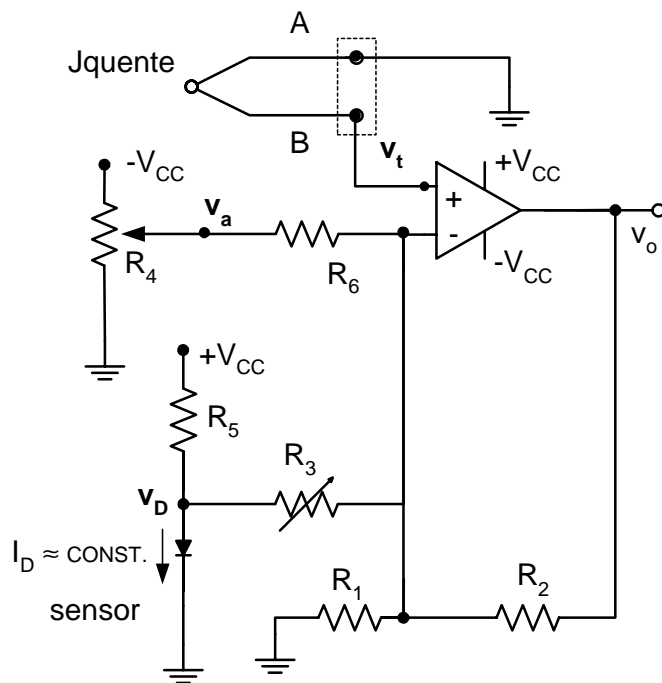
$$v_{comp} \Big| = a(T_{amb} - T_0)$$

# Revisões

- Circuitos para compensação da temperatura da junção fria de um termopar E, J, K, R, S e T (ex LT1025 que contém um sensor de temperatura)
- Característica  $E_{AB}(T)$  de um termopar aproximadamente linear em pequenas faixas de temperatura
- Linearização com circuitos analógicos ou métodos digitais.
- LT1025 permite linearização das características dos termopares E, J, K, R, S e T

# Exemplo

O circuito da figura utiliza um termopar ferro constantan e um díodo (1N1448) com sensor auxiliar para compensar a temperatura da junção fria à temperatura ambiente.



Dimensione o circuito de modo a ter na saída uma tensão de 5,48 V para uma temperatura de 100 °C

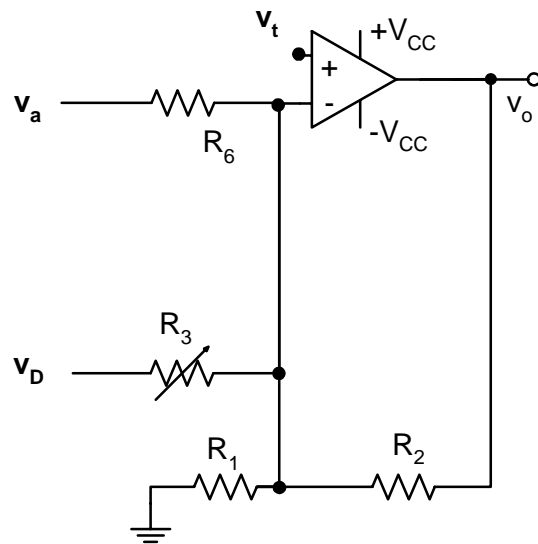
1N1448

$$\frac{\Delta V}{\Delta T} = -2mV \text{ } ^\circ C^{-1}$$

$$25^\circ C \quad V = 0,72 V$$

$$I = 5mA$$

# Termopares



$$v_t = 0 \quad v_a = 0 \quad v_o = -v_D \frac{R_2}{R_3}$$

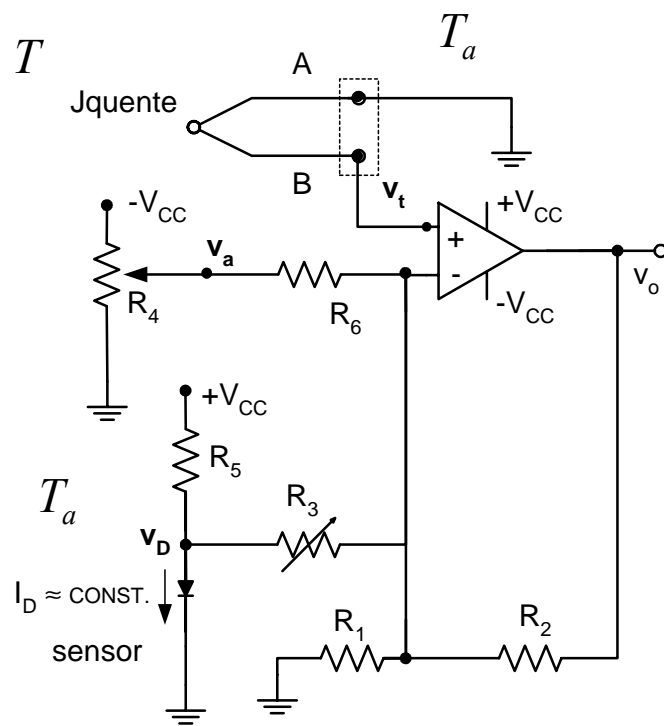
$$v_t = 0 \quad v_D = 0 \quad v_o = -v_a \frac{R_2}{R_6} =$$

$$v_a = 0 \quad v_D = 0 \quad v_o = v_t \left( 1 + \frac{R_2}{R_1 // R_2 // R_3} \right)$$

$$v_o = (E_{AB}(T) - E_{AB}(T_a)) \left( 1 + \frac{R_2}{R_1 // R_2 // R_3} \right) - v_D \frac{R_2}{R_3} - v_A$$



# Termopares



$$V_{CC} = 10V$$

$$R_5 = \frac{10 - 0,72}{5m} = 19,56k \approx 20k\Omega$$

$$a_{FeCn} = 16,7 + 38,1 = 54,8 \mu V / ^\circ C$$

$$E_{FeCn}(100^\circ) = 54,8 \times 100 = 5,48 mV$$

$$5,48 = 5,48m \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad \frac{R_2}{R_1} = 1000$$

$$R_6 \gg R_1 \quad R_2 = 100k\Omega$$

$$R_3 \gg R_1 \quad R_1 = 100\Omega$$

# Termopares

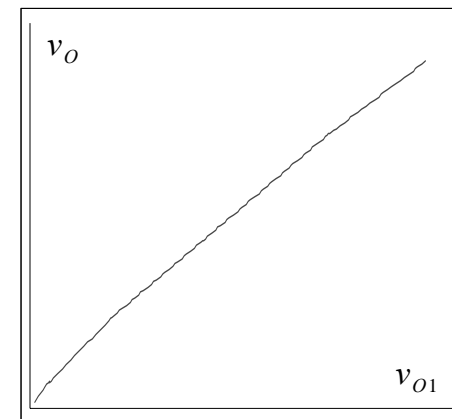
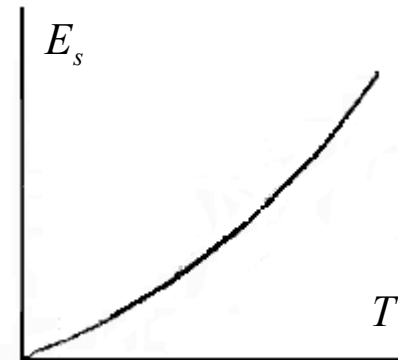
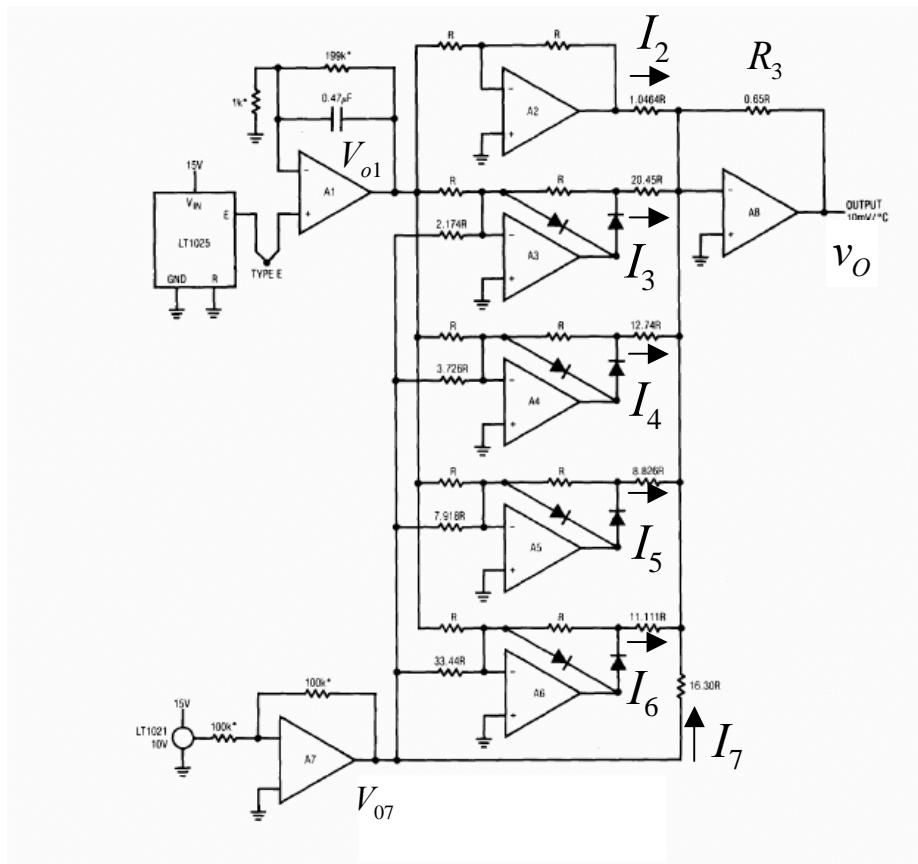
$$-E_{AB}(T_a) \left( 1 + \frac{R_2}{R_1 // R_2 // R_3} \right) - v_D \frac{R_2}{R_3} - v_A \frac{R_2}{R_6} = 0 \quad v_D = 0,72 - 2 \times 10^{-2} (T_a - 25)$$

$$5,48 \mu \times T_a \left( 1 + \frac{R_2}{R_1 // R_6 // R_3} \right) = 2 \times 10^{-2} T_a$$

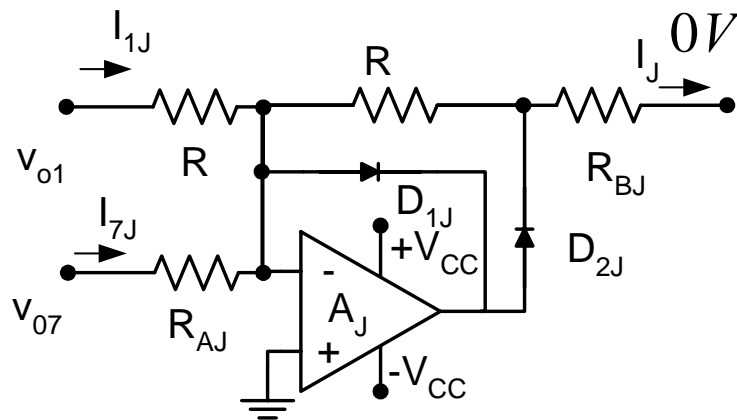
$$-(0,72 + 2 \times 10^{-2} \times 25) \frac{R_6}{R_3} = v_A$$

# Termopares

Linearização: amplificação com ganhos diferentes para vários troços



# Termopares



$D_{1J}$  on ou  $D_{2J}$  on

$$I_{1J} = \frac{v_{o1}}{R} \quad I_{7J} = \frac{v_{o7}}{R_{AJ}}$$

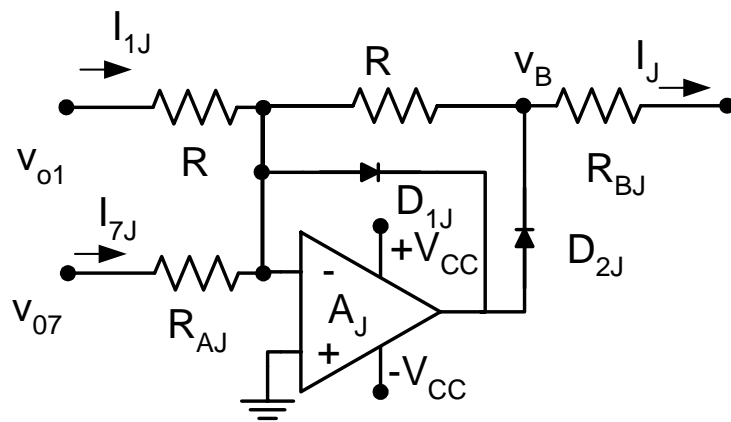
$I_{1J} + I_{7J} > 0$        $D_{1J}$  on e  $D_{2J}$  off

$$I_J = 0$$

$$\frac{v_{o1}}{R} + \frac{v_{o7}}{R_{AJ}} > 0 \Rightarrow v_{o1} > -v_{o7} \frac{R}{R_{AJ}}$$

Nesta situação a corrente  $I_J$  anula-se

# Termopares



$$D_{1J} \text{ on ou } D_{2J} \text{ on } \frac{v_{o7}}{R_{AJ}}$$

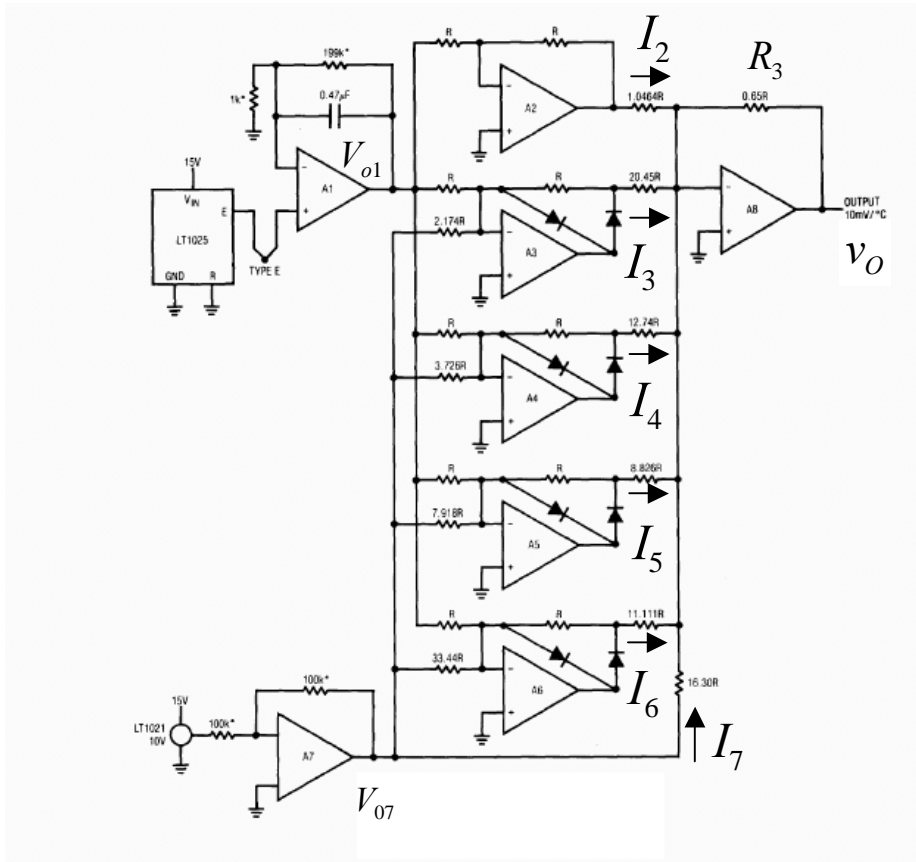
$$I_{1J} = \frac{v_{o1}}{R} \quad I_{7J} = \frac{v_{o7}}{R_{AJ}}$$

$$I_{1J} + I_{7J} < 0 \quad D_{1J} \text{ off } D_{2J} \text{ on}$$

$$I_J = \frac{v_B}{R_{BJ}} = -\frac{1}{R_{BJ}} R \left( \frac{v_{o7}}{R_{AJ}} + \frac{v_{o1}}{R} \right)$$

$$I_J = -\frac{v_{o1}}{R_{BJ}} - v_{o7} \frac{R}{R_{AJ}} \frac{1}{R_{BJ}}$$

# Termopares



$$I_3 = R_3 \left( -\frac{v_{o1}}{R_{B3}} - v_{o7} \frac{R}{R_{A3}} \frac{1}{R_{B3}} \right)$$

...

$$I_6 = R_3 \left( -\frac{v_{o1}}{R_{B6}} - v_{o7} \frac{R}{R_{A6}} \frac{1}{R_{B6}} \right)$$

$$I_7 = R_3 \left( \frac{v_{o7}}{R_{A7}} \right)$$

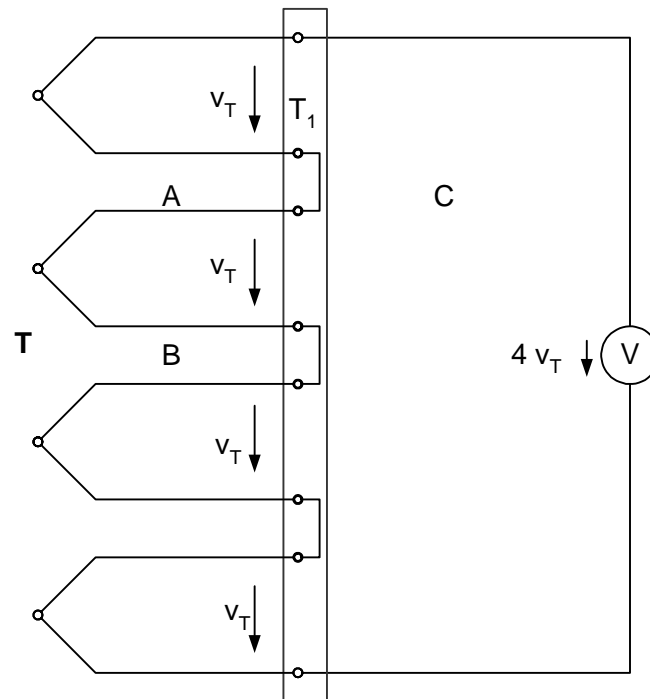
$$v_o = R_3 (I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 + I_7)$$

Os termos em  $v_{o7}$  anulam-se

À medida que  $v_{o1}$  aumenta as correntes  $I_3, I_4, I_5$  e  $I_6$  vão-se anulando, de modo a diminuir o ganho

# Termopares

- Para obter uma tensão maior podem usar-se vários termopares em série: termopilha

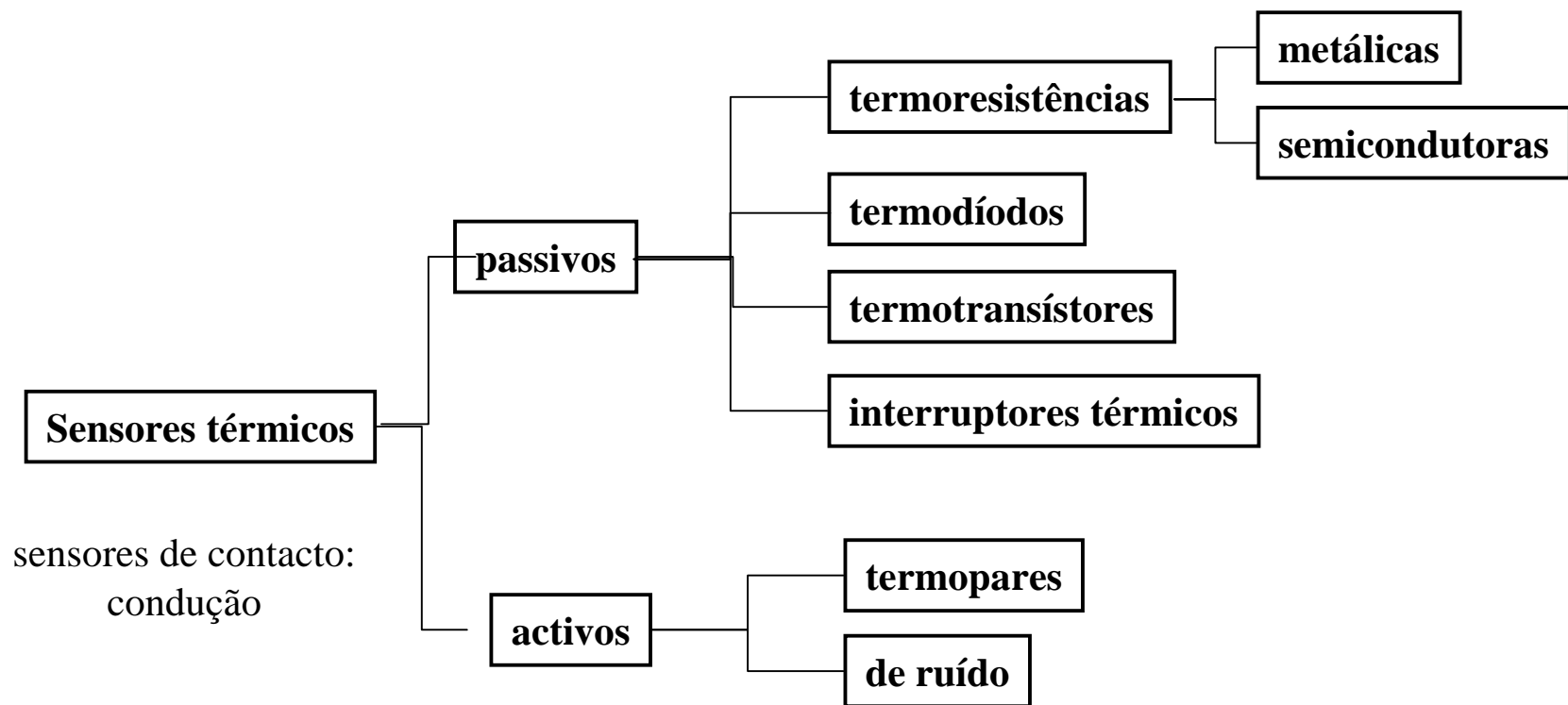


# Termopares

- Erros na medida de temperatura:
  - Não linearidades do termopar (podem ser corrigidas)
  - Má compensação da junção fria (podem utilizar-se circuitos que introduzam menos erros)
  - Amplificação:  $V_{OS}$ ,  $I_B$ , tolerâncias das resistências
  - Termopares parasitas (ex: cobre-solda  $3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ )
  - Gradientes de temperatura (fontes de calor e ventiladores). Deve-se calibrar depois de estabilizado o funcionamento.
  - Mau posicionamento do termopar (assegurar bom contacto térmico)



# Tipos de sensores térmicos



# Sensores térmicos de ruído

- Sensores activos: não necessitam de fonte exterior.
- Utilização do ruído térmico numa resistência

$$v_n = \sqrt{4kR\Delta f T} \qquad i_n = \sqrt{4kG\Delta f T}$$

numa resistência de 10 k $\Omega$  290°K e uma largura de banda de 10kHz  
o ruído térmico é de 1,3  $\mu$ V: utilização muito limitada

- Díodos e transístores também têm ruído térmico, mas a existência de outros tipos de ruído (flutuação aleatória do movimento de portadores e geração e recombinação de portadores na base) torna a dependência com a temperatura mais complicada.

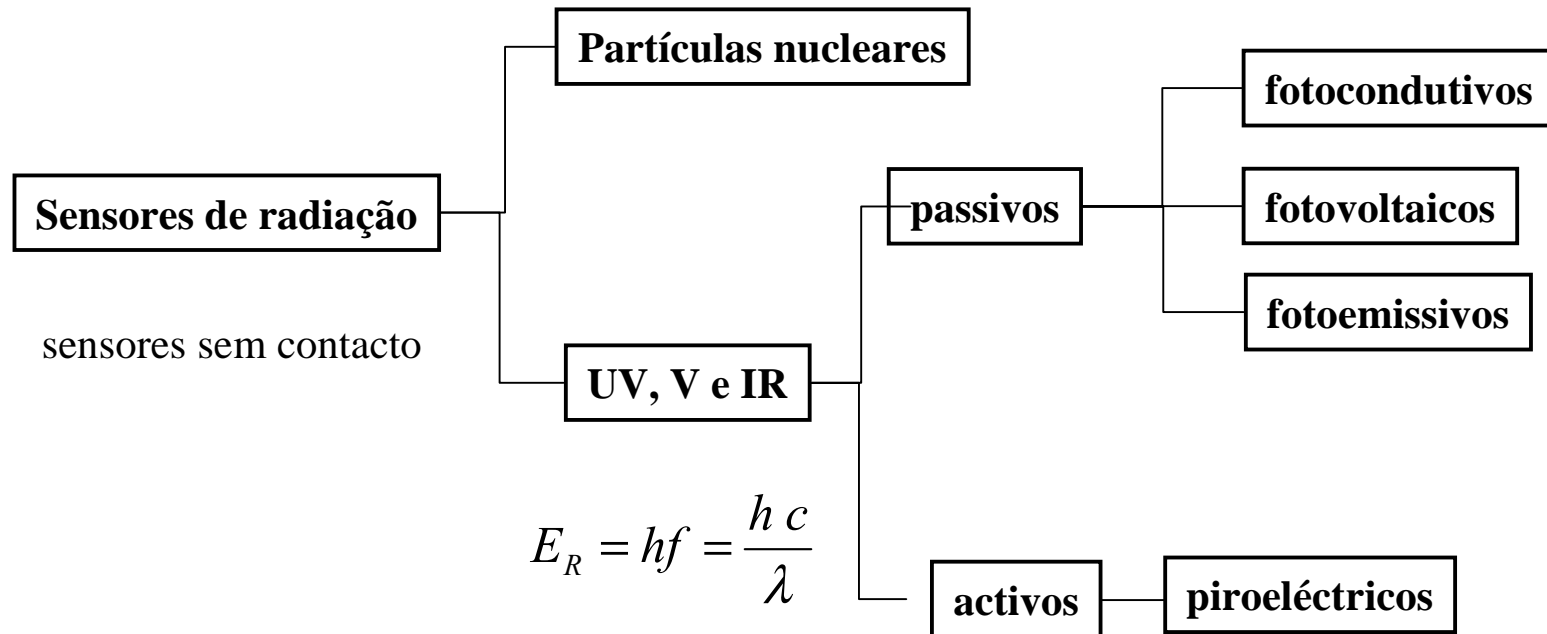
# Sensores de radiação

- A forma de energia do sinal que convertem é radiação.
- A energia incidente pode ter a forma de:
  - partículas nucleares (ex:partículas alfa e beta)
  - ondas electromagnéticas

• Raios gama	$< 10^{-11} \text{ m}$
• Raios X	$10^{-11} \text{ m} - 2 \cdot 10^{-8} \text{ m}$
• Ultravioletas	$2 \cdot 10^{-8} \text{ m} - 4 \cdot 10^{-7} \text{ m}$
• Visíveis	$4 \cdot 10^{-7} \text{ m} - 7 \cdot 10^{-7} \text{ m}$
• Infravermelhos	$7 \cdot 10^{-7} \text{ m} - 10^{-4} \text{ m}$
• Microondas	$10^{-4} \text{ m} - 10^{-2} \text{ m}$
• Rádio	$> 10^{-2} \text{ m}$

} UV, V, IR

# Sensores de radiação



$$E_R = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

$E_R$  – energia da radiação  
 $h$  – constante de Planck (Js)  
 $\lambda$  – comprimento de onda  
 $c$  – velocidade de propagação da luz

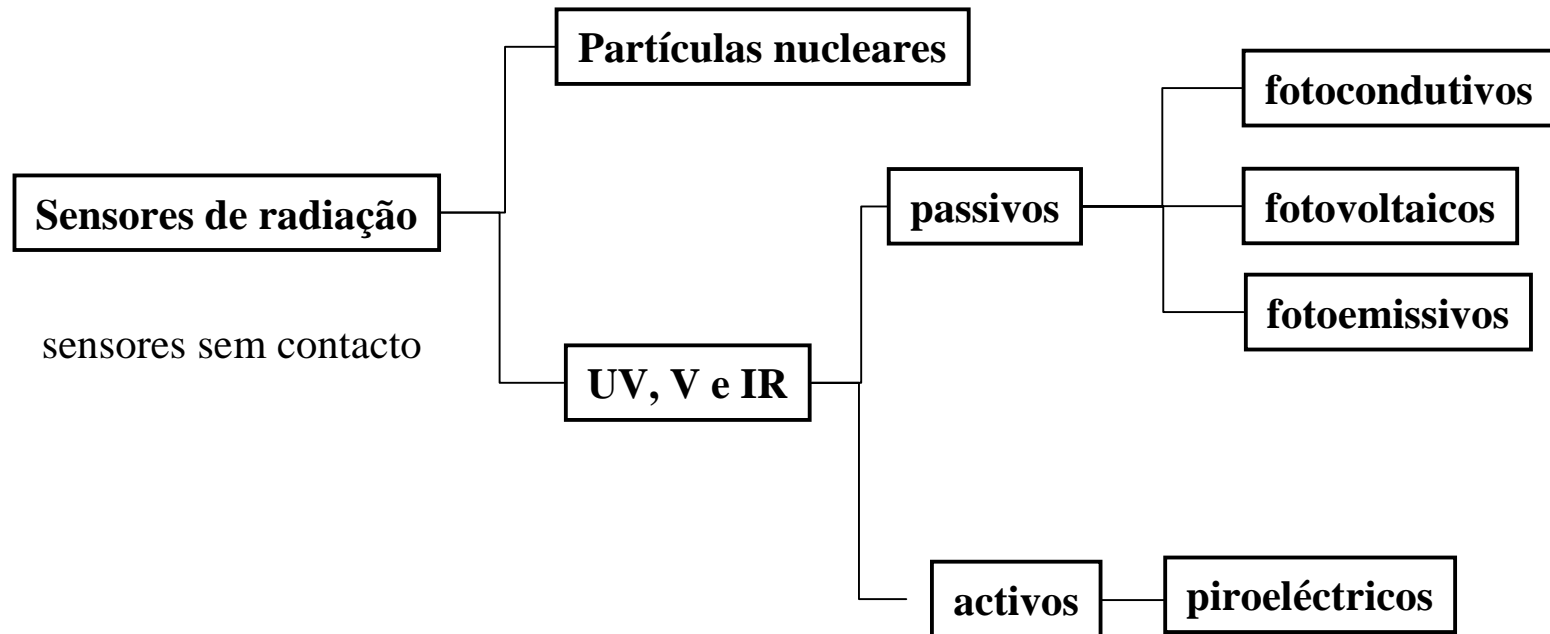
# Sensores de radiação

- Sensores UV-V-IR (ópticos-quânticos): convertem a energia que neles incide (fotões) em electrões de condução (efeito fotoeléctrico).

$$hf = h \frac{c}{\lambda} > E_g$$

- Utilização:
  - Medição da intensidade de fontes luminosas (fotometria)
  - Detecção da variação da intensidade de luz (câmaras de emissão de televisão)
  - Detecção de alteração da intensidade do feixe luminoso (contagem e objectos, abertura de portas, alarmes, interruptores ópticos, comunicações ópticas)

# Sensores de radiação

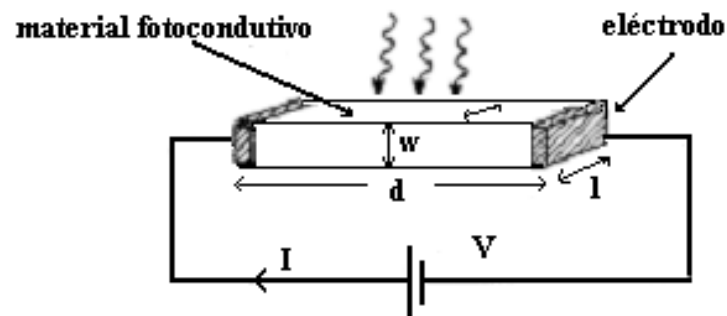


# Sensores de radiação

- Sensores fotocondutivos ou fotoresistências:
  - A condutividade eléctrica do material depende da intensidade luminosa que neles incide (LDR – Light Dependent Resistor)
  - Com iluminação, existe absorção de energia, os electrões libertam-se e o material torna-se condutor
  - Em escuridão absoluta a resistência é muito elevada ( $M\Omega$ ), pois não há electrões livres.
  - Barra de material semiconductor entre dois eléctrodos
  - Materiais: Sulfureto de Cádmio, Silício, Germânio

# Sensores de radiação

- Barra de material semiconductor entre dois eléctrodos



$$n_{\text{fotões}} = \frac{P_o}{h\nu} = \frac{P_o}{hc/\lambda}$$

$L$  – iluminação (Lux) é o número de fotões por unidade de tempo e área

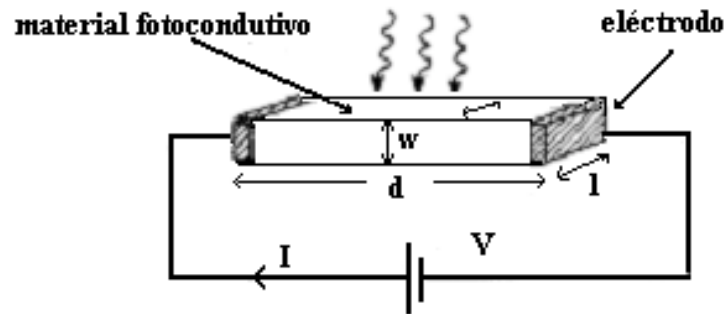
$$n_e = \eta \cdot L \cdot ld$$

$ld$  – área

$\eta$  rendimento quântico



# Sensores de radiação



$$n_e = \eta \cdot L \cdot l d$$

$\frac{v \tau}{d}$  Percentagem de electrões que contribui para I

$\mu$ - mobilidade

$\tau$  -tempo de trânsito

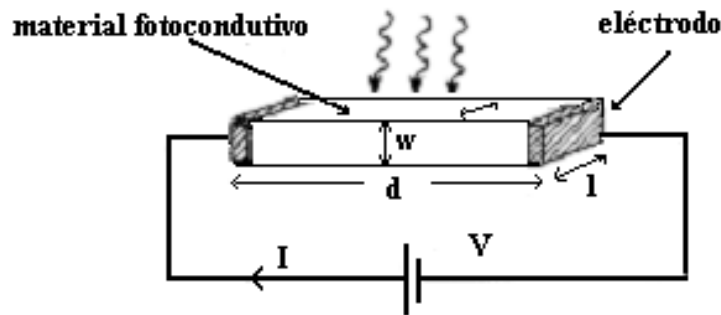
$v$  - velocidade de deriva

$$I = q n_e \cdot \frac{v \tau}{d}$$

$$v = \mu E = \frac{\mu V}{d}$$

$$I = q \eta L l \frac{\mu V}{d} \tau$$

# Sensores de radiação



$$I = q\eta Ll \frac{\mu V}{d} \tau$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{d}{q\eta Ll\mu\tau}$$

$$\tau = \tau_0(\lambda) L^{-\beta}$$

$$R_{LDR} = A L^{-\alpha} \quad A = \frac{1}{q\eta \frac{l}{d} \mu \tau_0}$$

$\lambda$  – comprimento de onda da radiação  
 $\alpha$  depende do material [ 0,7 ; 0,9 ]

maior sensibilidade para A pequeno

$$I = \frac{V}{A L^{-\alpha}} = \frac{V}{A} L^{\alpha} \quad A \downarrow \quad \eta \uparrow, \tau_0 \uparrow, \frac{l}{d} \uparrow$$

# Sensores de radiação

$$A \downarrow \quad \eta \uparrow, \tau_0 \uparrow (\text{material}), \frac{l}{d} \uparrow$$

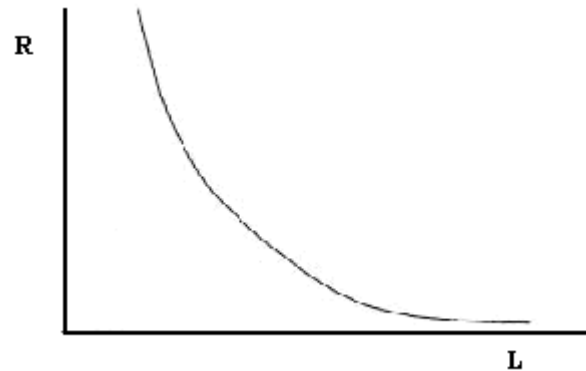
$$\frac{l}{d} \uparrow \quad \text{forma de tira comprida}$$

$$\tau_0 \uparrow, \eta \uparrow \quad \text{sulfureto de cádmio}$$



# Sensores de radiação

A resistência não é infinita à temperatura ambiente: há libertação de alguns electrões



$$R_{LDR} = A L^{-\alpha}$$

Resposta espectral do CaS

# Sensores de radiação

- Resposta no tempo
  - A diminuição da resistência por aumento da iluminação é um processo mais rápido que o seu inverso.
  - A geração de electrões muito mais rápida (10 a 100 vezes) que a recombinação electrão-lacuna (captura dos electrões pelos núcleos positivos).
- Resposta na frequência

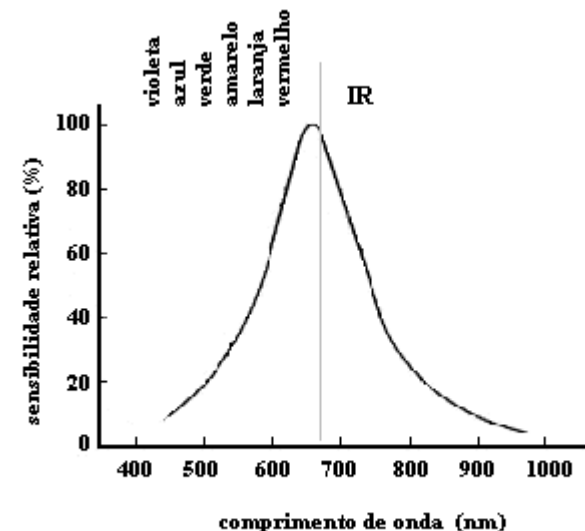
Sulfureto de Cádmio:

sensibilidade máxima para 680 nm

efeito fotoeléctrico deixa de se manifestar nos IR

Visíveis                     $4 \cdot 10^{-7} \text{ m} - 7 \cdot 10^{-7} \text{ m}$

Infravermelhos         $7 \cdot 10^{-7} \text{ m} - 10^{-4} \text{ m}$

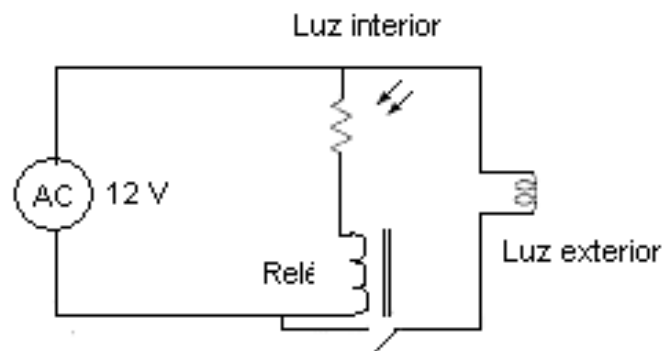


# Sensores de radiação

- Exemplo

## Controlador de iluminação com uma LDR.

Considere o circuito da figura que representa um sistema de controlo de iluminação de uma sala em função da luz ambiente.



O relé é actuado por corrente alternada de 50 mA e desactivado com uma corrente inferior a 20 mA. A resistência da bobina do relé é de 50  $\Omega$ .

A fotoresistência segue a lei  $R = A.L^{-\alpha}$ ,  $\alpha=0,8$ , e tem o valor de 1  $K\Omega$  para uma luminância,  $L$ , de 100 lux.

- Determine a lei de variação da fotoresistência.
- Determine os níveis de iluminação exterior, mínima e máxima, para activar o relé.
- Calcule o valor da fotoresistência para a iluminação de 1 vela (cerca de 1 lux).

# Sensores de radiação

- Controlador de iluminação com LDR

$$R_{LDR} = A L^{-\alpha} \quad A = \frac{1k}{100^{-0,8}} = 3981.07 \Omega/\text{Lux} \quad R_{LDR} = 3981.1 L^{-0,8}$$

$$\frac{12}{R_{LDR} + 50} > 50m \quad R_{LDR} < 240 - 50 = 190\Omega \quad L^{-0,8} = 190/3981.07 = 44,8 \text{ Lux}$$

$$L = 44,8 \text{ Lux}$$

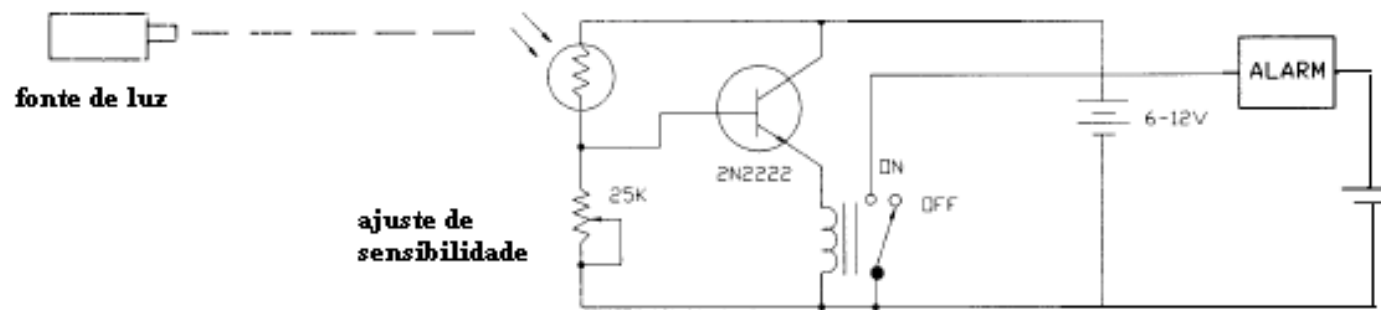
$$\frac{12}{R_{LDR} + 50} < 20m \quad R_{LDR} > 600 - 50 = 550\Omega \quad \text{Luz interior}$$

$$L = 11,87 \text{ Lux}$$

$$R_{LDR}(\text{1 vela}) = A = 3,98 \text{ k}\Omega$$

# Sensores de radiação

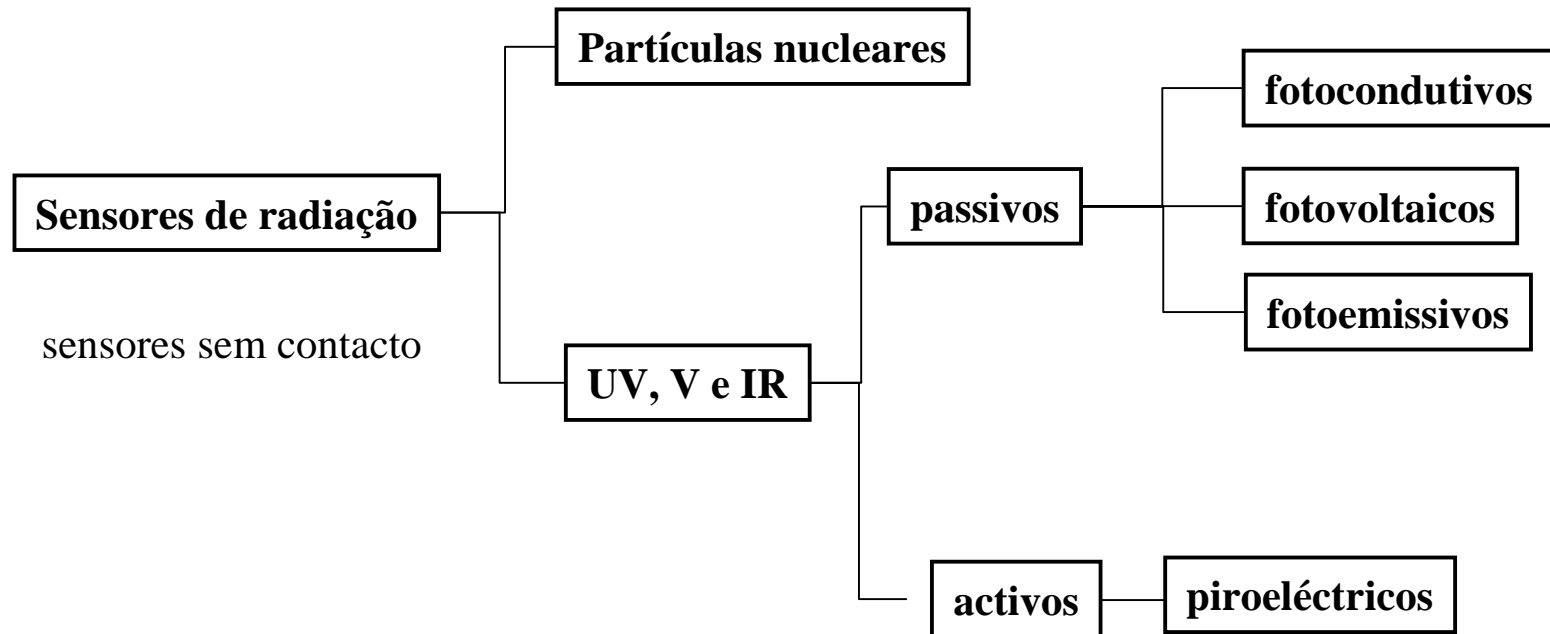
- ☀ Exemplo



O alarme detecta a existência de luz

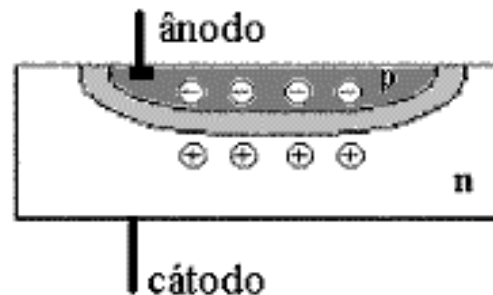


# Sensores de radiação



# Sensores de radiação

- Fotodíodos:
  - Efeito fotovoltaico: a incidência de iluminação gera portadores (pares electrão-lacuna) que se movem-se devido a variação de dopagem (p-n). Existe assim uma tensão na junção  $V_D$  na junção.

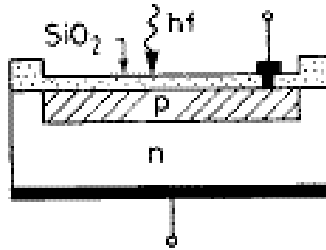


fotodíodo p-n

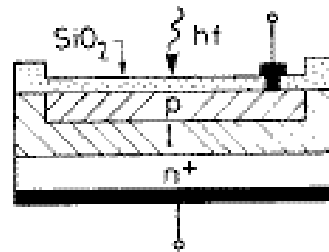
- Mais sensíveis, mais lineares, mais estáveis, mais rápidos e mais pequenos que as fotoresistências.

# Sensores de radiação

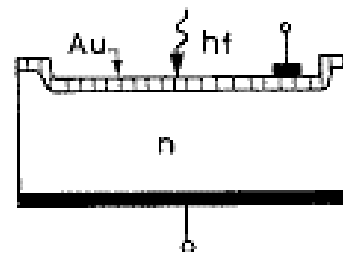
- Tipos de fotodíodos: pn, pin, schottky e avalanche



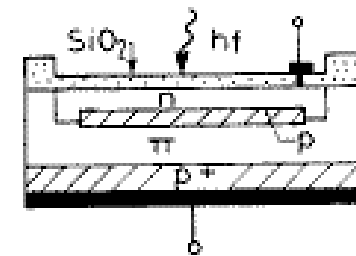
p-n  
190 – 1100 nm



p-i-n  
320 – 1100 nm



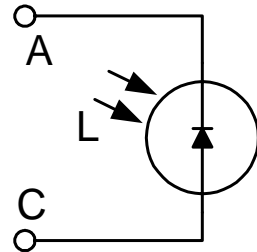
schottky  
190 – 680 nm



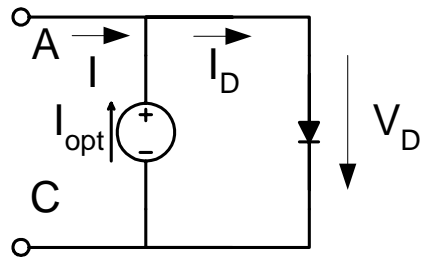
avalanche  
400 – 800 nm

# Sensores de radiação

- Símbolo



- Modelo para sinais fortes



$$I = I_S \left( e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1 \right) - I_{opt}$$

$$I_{opt} = \eta \frac{P_o}{hf} q$$

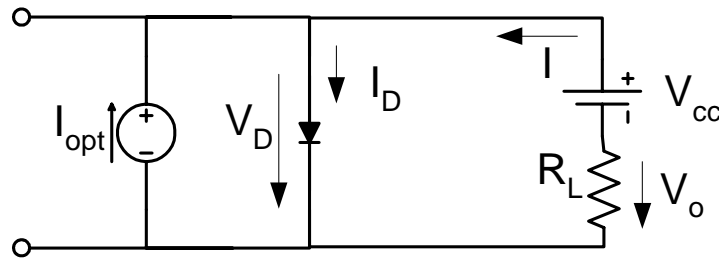
Corrente gerada pelos fótons

Junção semicondutora

$$I_D = I_S \left( e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1 \right)$$

# Sensores de radiação

- Fotodíodo utilizado com polarização externa directa:

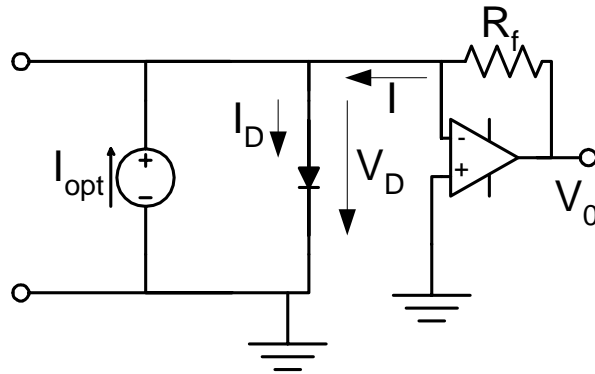


$$I = I_D - I_{opt} = \frac{V_{CC} - V_D}{R_L}$$

$$I = I_S \left( e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right) - I_{opt} = \frac{V_{CC} - V_D}{R_L}$$

# Sensores de radiação

- Fotodíodo utilizado sem polarização externa como sensor de luz:
  - Em curto-circuito



$$V_D = 0$$

$$V_0 = R_f I$$

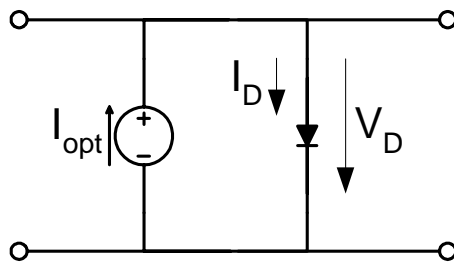
$$I = -I_{opt}$$

$$I_{opt} \propto L$$

Tensão proporcional à luminância

# Sensores de radiação

- Fotodíodo utilizado sem polarização externa como sensor de luz:
  - Em aberto  $R_L = \infty$



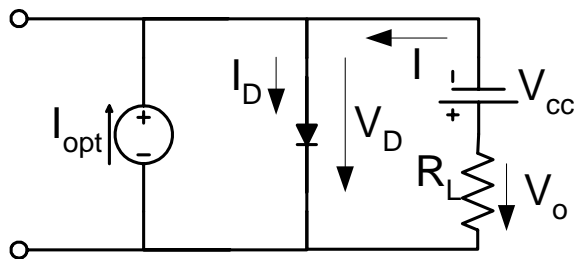
$$V_D = V_T \ln \left( 1 + \frac{I_{opt}}{I_S} \right)$$

$$I_{opt} \propto L$$

Tensão proporcional à luminância

# Sensores de radiação

- Fotodíodo utilizado com polarização externa inversa como sensor de luz:



$$I_D = -I_S \approx 0 \quad I = -I_{opt}$$

$$V_o = R_L I_{opt}$$

$$C_J(V_D) = \frac{C_J(0)}{\sqrt{1 - \frac{V_D}{\Psi_0}}}$$

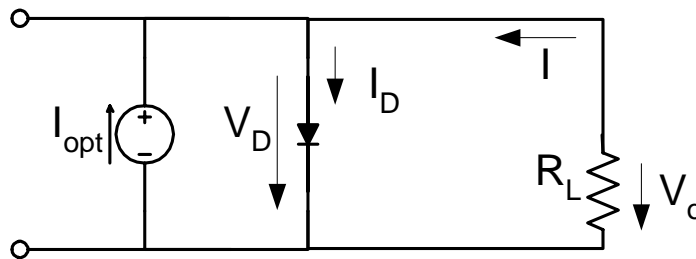
$\Psi_0$  altura da barreira de potencial

- Vantagem: a capacidade da junção é muito pequena, sendo o circuito mais rápido



# Sensores de radiação

- Fotodíodo utilizado com polarização externa nula, célula fotovoltaica: geração de energia sem qualquer fonte aplicada



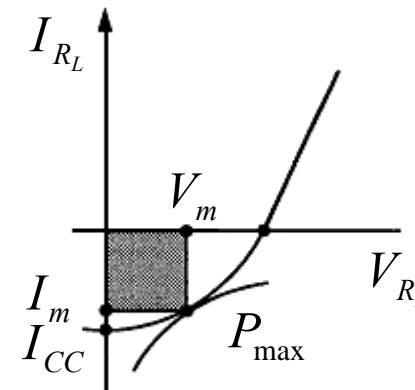
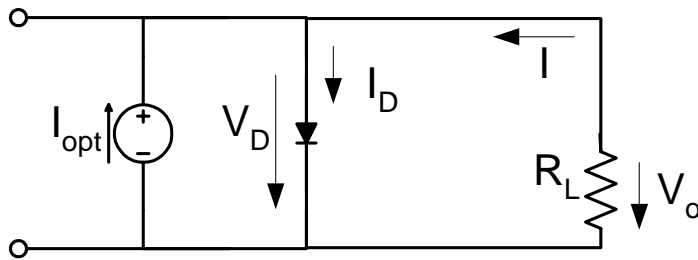
$$R_L = 0 \quad R_L = \infty \Rightarrow P_{R_L} = 0$$

$$R_L = \infty \Rightarrow V_0 = V_T \ln \left( 1 + \frac{I_{opt}}{I_S} \right) \quad \text{máxima tensão em vazio}$$

$$R_L = 0 \Rightarrow I_0 = I_{CC} = -I_{opt} \quad \text{máxima corrente em cc}$$

# Sensores de radiação

- Fotodíodo como célula fotovoltaica: existe uma resistência de carga  $R_m$  que maximiza a transferência de potência



$$V_{R_L} = V_D \quad I_{R_L} = I_S \left( e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right) - I_{opt}$$

$$R_m = \frac{V_m}{I_m}$$

# Sensores de radiação

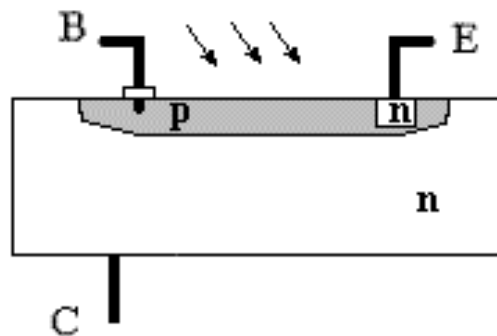
Células fotovoltaicas:

- Fotodíodos de grande dimensão que aproveitam a energia solar.
- Os painéis solares são associações em série e paralelo de células fotovoltaicas, realizadas com semicondutores cristalinos ou amorfos, que permitem obter as correntes e tensões necessárias para carregar as baterias.

# Sensores de radiação

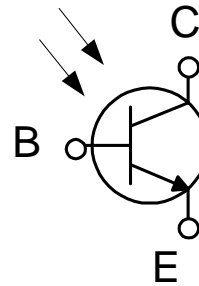
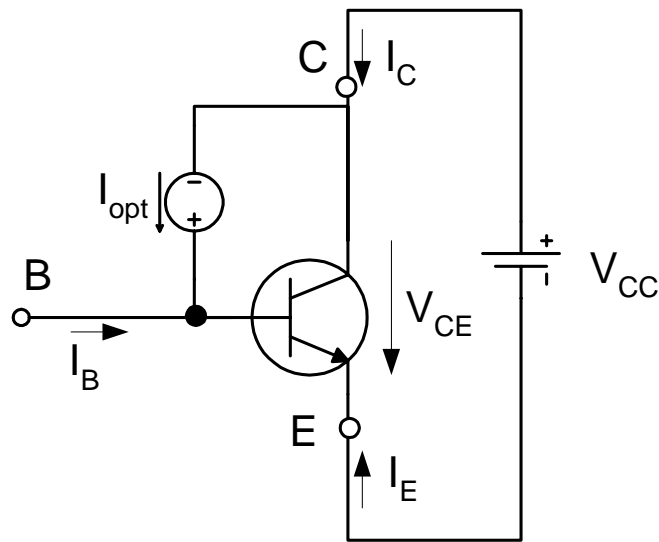
## Fototransístor

- Transístor de junção bipolar em que a junção base emissor é submetida a efeito fotovoltaico. Junção BE muito pequena e junção base colector polarizada inversamente.
- Os fotões atravessam a base e atingem a junção do colector.



# Sensores de radiação

- Fototransísttor com ou sem polarização da base ( $I_B$ ) e com polarização inversa da junção CB

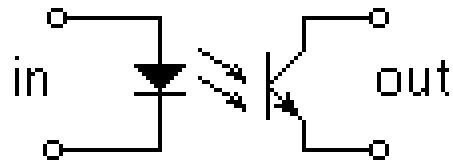


$$I_C = \beta_F (I_B + I_{opt})$$

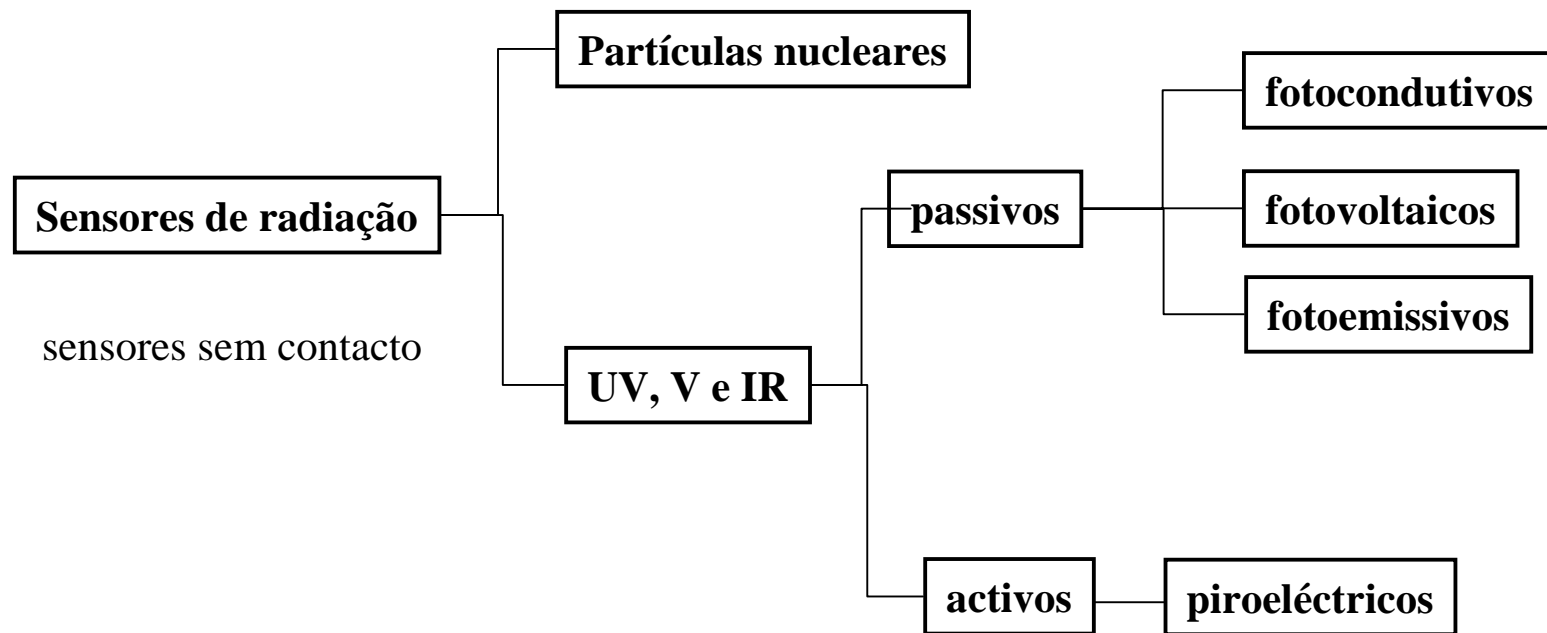
Eficiência do transísttor  $\beta_F$  vezes maior que a do díodo, mas tem tempos de resposta piores (capacidade de Miller)

# Sensores de radiação

- Fotodíodos e fototransístores utilizam-se em acopladores ópticos: sistemas que permitem a transmissão de sinais eléctricos, através de luz.
- Num acoplador óptico, realizado com um LED e um fototransístor no mesmo encapsulamento, consegue-se isolamento galvânico entre duas partes de um circuito.



# Sensores de radiação



- ✱ Sensores fotoemissivos: os fotões conseguem arrancar electrões que se forem gerados no vácuo podem ser captados por um campo eléctrico para medir a intensidade da radiação incidente.

# Sensores de radiação

- ✱ Detectores piroeléctricos (PIR) são sensores que convertem radiação IR em sinais eléctricos.
- ✱ Tem uma polarização eléctrica espontânea (movimentos de cargas eléctricas positivas e negativas em posições opostas) que é alterada pela temperatura devida à incidência de radiação IR.
- ✱ Utilizam materiais ferromagnéticos.
- ✱ Utilizam-se em detecção de intrusões, controlo de luz, medição de temperatura, interruptores de portas, etc.



# Sensores de radiação

- ✱ Pirómetros de radiação são sensores de radiação
  - ✱ Medem a temperatura de objectos em função da energia de radiação recebida desses objectos que provoca o aquecimento do sensor.
  - ✱ Um objecto aquecido radia energia electromagnética: a temperaturas altas a emissão atinge a radiação visível.
  - ✱ Os sensores são em geral associações em série de termopares (termopilhas) em que a junção quente é coberta por um material, que absorve bem a energia de radiação térmica.
- ✱ Bolómetros são sensores de radiação que medem a energia da radiação por alterações da resistência eléctrica

# Sensores de radiação

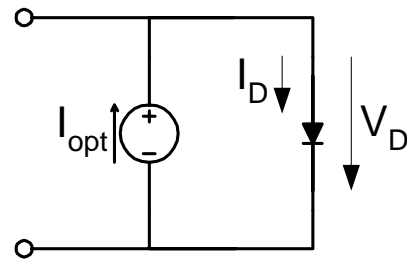
- Exemplo

Um fotodíodo do tipo p-n, cuja corrente inversa de saturação de 1pA, tem quando iluminado uma corrente de curto-circuito de 25mA, à temperatura de 17 °C.

1. Qual a tensão aos terminais do fotodíodo em circuito aberto nas mesmas condições de iluminação?

# Sensores de radiação

- Um fotodíodo do tipo p-n, cuja corrente inversa de saturação de 1pA, tem quando iluminado uma corrente de curto-circuito de 25mA, à temperatura de 17 °C.
  1. Qual a tensão aos terminais do fotodíodo em circuito aberto nas mesmas condições de iluminação?



$$V_T = 26 \cdot 10^{-3} V \quad (298^\circ K)$$

$$I_{opt} = 25 \text{ mA}$$

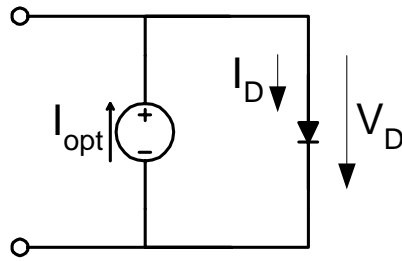
$$V_D = \frac{26 \cdot 10^{-3} \times 290}{298} \ln \left( 1 + \frac{25 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-12}} \right) \approx 0,606 V$$

# Sensores de radiação

2. Qual a máxima potência que o díodo pode fornecer a uma carga?

# Sensores de radiação

2. Qual a máxima potência que o díodo pode fornecer a uma carga?



$$P = V_D \times I_{R_L} = V_D \left[ I_s \left( e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right) - I_{opt} \right]$$

$$\frac{dP}{dV_D} = \left( I_s \left( e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right) - I_{opt} \right) + V_D \left( \frac{I_s}{V_T} e^{\frac{V_D}{V_T}} \right) = 0$$

$$e^{\frac{V_D}{V_T}} + \frac{V_D}{V_T} e^{\frac{V_D}{V_T}} = \frac{I_{opt}}{I_s} + 1$$

$$e^{\frac{V_D}{V_T}} \left( 1 + \frac{V_D}{V_T} \right) = \frac{I_{opt}}{I_s} + 1$$

$$e^{\frac{V_D}{V_T}} = \frac{\frac{I_{opt}}{I_s} + 1}{1 + \frac{V_D}{V_T}}$$

$$V_D = V_T \ln \frac{\frac{I_{opt}}{I_s} + 1}{1 + \frac{V_D}{V_T}}$$

# Sensores de radiação

$$V_D = V_T \ln \frac{\frac{I_{opt}}{I_s} + 1}{1 + \frac{V_D}{V_T}} \quad V_T = \frac{26 \cdot 10^{-3} \times 290}{298} = 25,3 \text{ mV}$$

$$V_D = 25,3 \cdot 10^{-3} \ln \frac{25 \cdot 10^9 + 1}{1 + \frac{V_D}{26 \cdot 10^{-3}}} \quad V_D = 0,52 \text{ V}$$

$$I = I_S \left( e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right) \quad I = 0,844 \text{ mA}$$
$$I_{R_L} = I_{opt} - I_D = 25 - 0,844 \approx 24,12 \text{ mA}$$
$$P = V_D \times I_{R_L}$$

# Sensores de radiação

3. Qual o valor da resistência de carga que origina a máxima transferência de potência?

$$I_{R_L} = I_{opt} - I_D = 25 - 0,844 \approx 24,12 \text{ mA}$$

$$R_L = \frac{V_D}{I_{R_L}} = \frac{0,52}{24,1m} \approx 21,6 \Omega$$

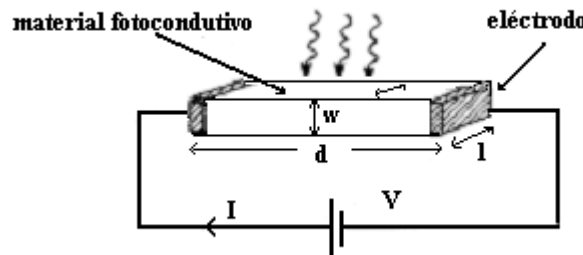
# Revisões

- Os sensores de radiação: partículas nucleares e UV-V-IR (ópticos-quânticos).
- UV-V-IR (ópticos-quânticos): fotocondutivos, fotovoltaicos, fotoemissivos e piroeléctricos.
- Aplicações: medição da intensidade de fontes luminosas, detecção da variação da intensidade de luz, detecção de alteração da intensidade do feixe luminoso.
- Detectores piroeléctricos (PIR - Pyroelectric Infra Red) ): têm uma polarização eléctrica espontânea que é alterada pela temperatura devida à incidência de radiação IR.



# Revisões

- LDR (fotocondutivo): convertem a energia que neles incide (fotões) em electrões de condução (efeito fotoeléctrico).
- Na escuridão absoluta a resistêcia é muito elevada ( $M\Omega$ ), pois não há electrões livres. Com iluminação, os electrões libertam-se e o material torna-se condutor.
- 



$$R_{LDR} = A L^{-\alpha}$$

$$\frac{l}{d} \uparrow$$

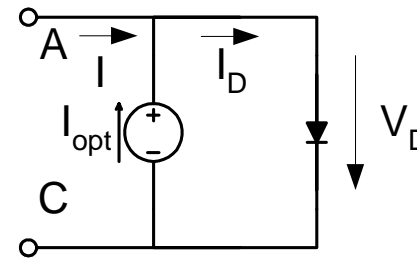
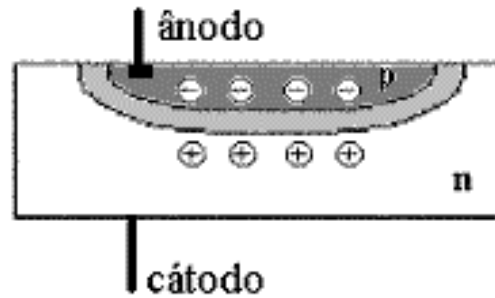
forma de tira comprida em forma de pente



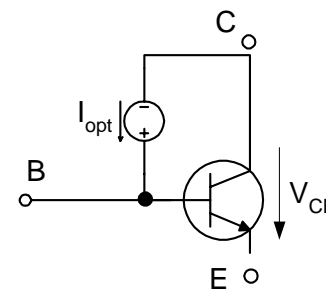
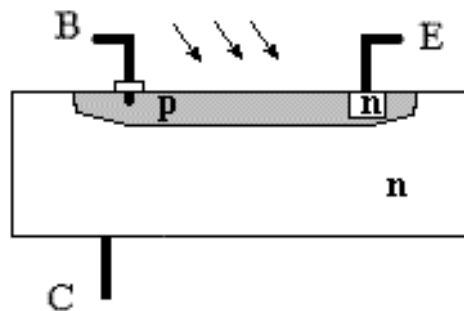
sulfureto de cádmio

# Sensores de radiação

- Efeito fotovoltaico: a incidência de iluminação gera portadores (pares electrão-lacuna) gerando uma tensão  $V_D$  na junção.



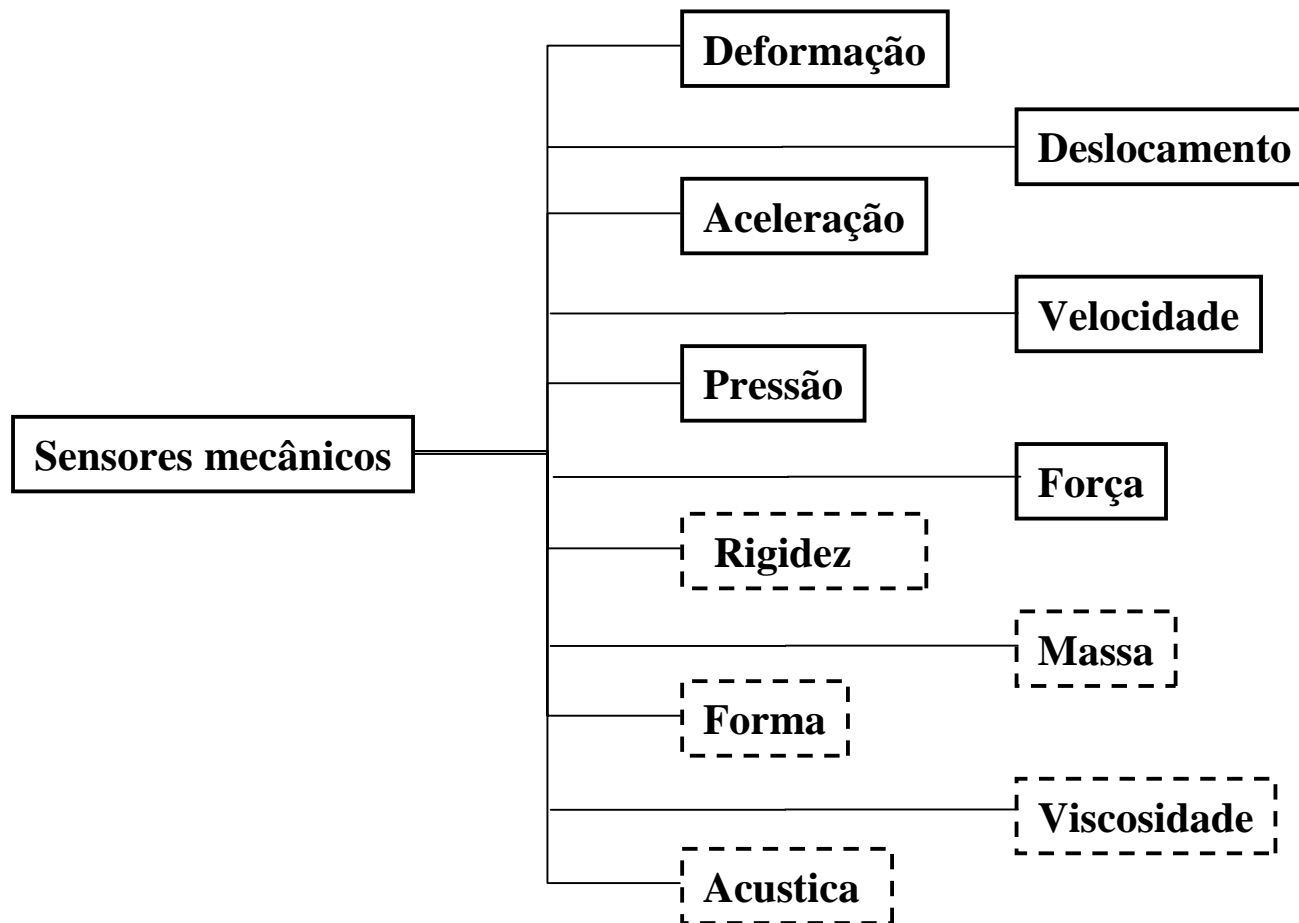
$$I_{opt} \propto L$$



# Sensores mecânicos

- Os sensores mecânicos são utilizados para medir grandezas, tais como:
  - Deslocamento, velocidade, aceleração, pressão, tensão, alongamento, massa, etc.
- O princípio de funcionamento:
  - Resistivo, capacitivo, indutivo, piezoresistivo, piezoelétrico.

# Sensores mecânicos



# Sensores mecânicos

- Sensores de deformação (extensómetros)
  - Uma força aplicada a um corpo provoca uma deformação (alteração das suas dimensões).
  - As grandezas que originam forças sobre os corpos podem ser medidas através de sensores de deformação.
- Aplicações:
  - Sensores de força para balanças electrónicas para cargas elevadas: células de carga
  - Sensores de pressão
  - Sensores de aceleração

# Sensores mecânicos

- Variação da resistência de um fio condutor dada a variação das dimensões:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

- Variação das dimensões (efeito resistivo)
- Variação da resistividade (efeito piezoresistivo)

# Sensores mecânicos

- **Lei de Hooke:**

- Para pequenas tensões aplicadas aos materiais (micro-deformações), o alongamento relativo na direcção da força é proporcional à força

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

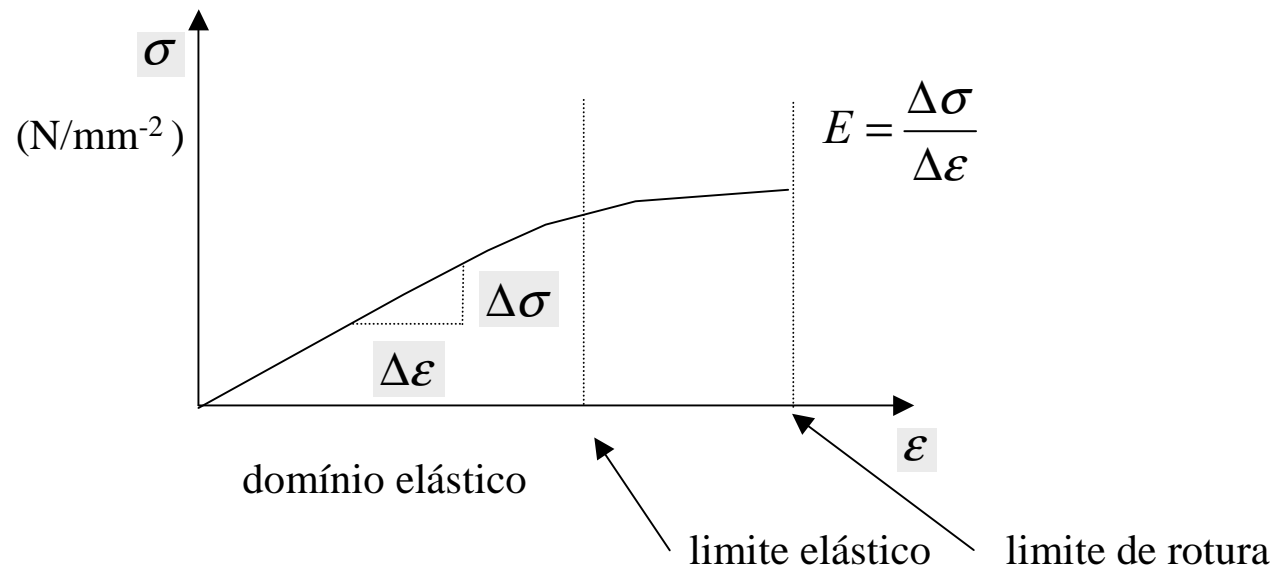
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Tensão (stress): força por unidade de área}$$

$$\varepsilon = \frac{\delta l}{l} \quad \text{Alongamento relativo (strain)}$$

E – módulo (de elasticidade) de Young

# Sensores mecânicos

- O módulo de Young caracteriza a capacidade de um material se deformar mais ou menos sob a acção de uma força.



$E >$  limite elástico o corpo não recupera as dimensões iniciais



# Sensores mecânicos

- O alongamento numa direcção (x) provoca a contracção nas duas dimensões ortogonais (y e z):

$$\nu = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} = -\frac{\epsilon_z}{\epsilon_x}$$

$\nu$  : coeficiente de Poisson (varia entre 0,3 e 0,4)

# Sensores mecânicos

- Variação da resistência de um fio condutor dada a variação das dimensões (efeito resistivo):

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Admitindo  $\rho$  constante

$$\delta R = \frac{\rho}{A} \delta l - \rho l \frac{\delta A}{A^2}$$

$$\frac{\delta R}{R} = \frac{A}{l\rho} \rho \frac{1}{A} \delta l - \frac{A}{l\rho} \rho l \frac{\delta A}{A^2} = \frac{\delta l}{l} - \frac{\delta A}{A}$$

$$\frac{\delta A}{A} = \frac{\delta(\pi r^2)}{\pi r^2} = 2 \frac{\delta d}{d} = -2\nu \frac{\delta l}{l}$$

$$\frac{\delta R}{R} = \frac{\delta l}{l} - \frac{\delta A}{A} = \frac{\delta l}{l} (1 + 2\nu) = \frac{\sigma}{E} (1 + 2\nu)$$

$$\frac{\delta R}{R} = \frac{1}{AE} (1 + 2\nu) F$$

# Sensores mecânicos

- A resistividade varia com o volume (efeito piezoresistivo): a variação de volume altera a energia da banda proibida, variando o número de portadores de carga.

$$\frac{\delta \rho}{\rho} = C_B \frac{\delta V}{V}$$

- $C_B$  – constante de Brigdman:
  - baixa no metal (efeito resistivo)
  - elevada nos semicondutores (efeito piezoresistivo)

# Sensores mecânicos

- Uma força de tracção, apesar da diminuição da área, provoca o aumento do volume (aumentando a resistividade)

$$A = yz \quad V = A x$$

$$A' = (y + \Delta y)(z + \Delta z)$$

$$A' = yz + \Delta y \Delta z + y \Delta z + z \Delta y$$

$$A' = yz + y \nu \varepsilon_x z \nu \varepsilon_x - yz \nu \varepsilon_x - zy \nu \varepsilon_x$$

$$\Delta A = A' - A = xyz \nu^2 \varepsilon_x^2 - 2xyz \nu \varepsilon_x$$

$$\frac{\Delta y}{y} = \varepsilon_y \quad \frac{\Delta z}{z} = \varepsilon_z$$

$$\varepsilon_y = -\nu \varepsilon_x \quad \Delta y = -\nu \varepsilon_x y$$

$$\varepsilon_z = -\nu \varepsilon_x \quad \Delta z = -\nu \varepsilon_x z$$

# Sensores mecânicos

- Apesar da diminuição da área, o volume aumenta

$$\Delta V = x \Delta A + A \Delta x \qquad \Delta A = A' - A = xyzv^2 \epsilon_x^2 - 2xyzv \epsilon_x$$

$$\Delta V = x yz v^2 \epsilon_x^2 - 2x yz v \epsilon_x + yz x \epsilon_x$$

2ª ordem

$$\Delta V \approx x yz \epsilon_x (1 - 2\nu) \quad \nu = 0,3 \text{ a } 0,4 \quad \Delta V > 0 \quad \text{o volume aumenta}$$

# Sensores mecânicos

- Efeito piezoresistivo: variação da resistividade com a força

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad \frac{\delta \rho}{\rho} = C_B \frac{\delta V}{V}$$

$$\frac{\delta V}{V} = C_B \frac{\delta \left( l \frac{\pi d^2}{4} \right)}{l \frac{\pi d^2}{4}} = C_B \left( \frac{\delta l}{l} + 2 \frac{\delta d}{d} \right) = C_B (1 - 2\nu) \frac{\delta l}{l}$$

# Sensores mecânicos

- Variação da resistência de um fio condutor devido ao efeito de uma força: galga de fio, galga extensométrica ou extensômetro resistivo (strain gauge).

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

$$\delta R = \underbrace{\frac{l}{A} \delta \rho} + \underbrace{\rho \delta \frac{l}{A}}$$

$$\frac{\delta R}{R} = \underbrace{\frac{\delta \rho}{\rho}} + \underbrace{\frac{\delta l}{l} - \frac{\delta A}{A}}$$

Variação de  $\rho$ : efeito piezoresistivo

Variação de  $l$  e  $A$ : efeito resistivo

# Sensores mecânicos

$$\frac{\delta R}{R} = \underbrace{\frac{\delta \rho}{\rho}} + \underbrace{\frac{\delta l}{l} - \frac{\delta A}{A}} = \underbrace{C_B(1-2\nu)} \frac{\delta l}{l} + \underbrace{\frac{\delta l}{l}(1+2\nu)}$$

$$\frac{\delta R}{R} = [1+2\nu + C_B(1-2\nu)] \frac{\delta l}{l} = G_e \frac{\delta l}{l}$$

$$\Delta R = R G_e \varepsilon \quad \varepsilon = \frac{F}{EA}$$

$$\Delta R = R G_e \frac{F}{EA} = G_e \frac{R}{EA} F \quad \text{Equação do extensômetro}$$



# Sensores mecânicos

A força não é geralmente aplicada directamente ao extensómetro, mas a um elemento ligado ao extensómetro.

$$\Delta R = R \frac{G_e}{EA} F$$

Variação da resistência proporcional à força

$G_e$ :

Si tipo n: 100 a 140

Si tipo p: -100 a -170

Metais: 1,6 a 2

A sensibilidade dos extensómetros semicondutores muito maior que nos metais

# Sensores mecânicos

- Extensômetros
  - metálicos
  - semicondutores
  - de polímeros semicondutores

$R_g$

# Sensores mecânicos

## Extensores metálicos:

- Filamento (0,025 mm) disposto em ziguezague, entre duas placas que são aparafusadas à peça cuja deformação se quer medir
- Filamento disposto em ziguezague sobre substrato que pode ser colado sobre a peça a medir
- Filamento condutor enrolado sobre substrato em forma de chapa
- Filme ou fita condutores depositados sobre substrato (mais pequenos)
- Filmes metálicos em forma de roseta para medir esforços em várias direcções

<http://www.dur.ac.uk/richard.scott/gauges.html>

[http://www.omega.com/Pressure/pdf/STRAIN\\_GAGES.pdf](http://www.omega.com/Pressure/pdf/STRAIN_GAGES.pdf)

# Sensores mecânicos

- Extensômetros semicondutores
  - Micromaquinados e realizados com tecnologia de  $R_i$  circuitos integrados.  
 $R_g$
  - Mais sensíveis.
  - Menos lineares
  - Mais frágeis, suportam menos esforços e mais sensíveis à temperatura
  - Tipo n ( $G_e > 0$ ) ou tipo p ( $G_e < 0$ )
  - Associados a diafragmas (sensores de pressão e caudal)

# Sensores mecânicos

## Extensômetros de polímeros semicondutores

- Propriedades piezoresistivas acentuadas  $R_1$
- Lâmina de polímeros sobre a qual são depositados padrões metálicos  $R$

$$R_L = A e^{\frac{B}{F}}$$

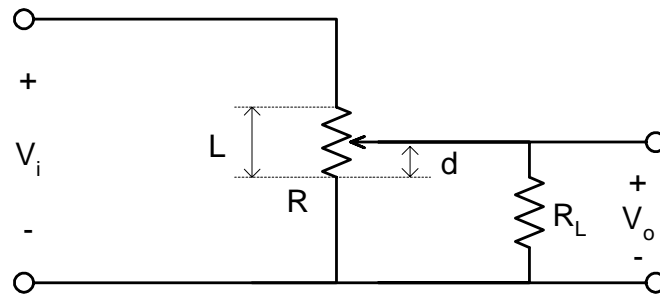
- Também designados por FSR (Force Sensitive Resistor)
- Menos exactos que os metálicos

# Sensores mecânicos

- Sensores de deslocamento (movimento e posição)
  - Com contacto: sensor ligado mecanicamente ao corpo que se desloca.
  - Efeitos: resistivos, indutivos, capacitivos, electromagnéticos, feixes de radiação.

# Sensores mecânicos

- Sensores de deslocamento resistivos (potenciométricos)

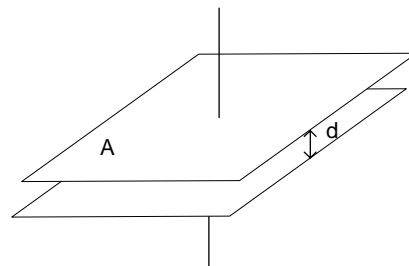


$$R_L = \infty \quad V_o = \frac{d}{L} V_i \quad x = \frac{d}{L}$$

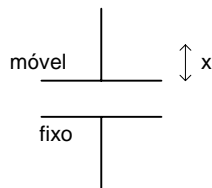
$$R_L \neq \infty \quad V_o = \frac{x V_i}{1 + x(1-x) \frac{R}{R_L}}$$

# Sensores mecânicos

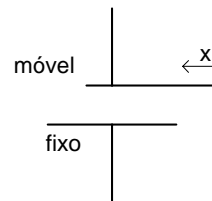
- Sensores de deslocamento capacitivos



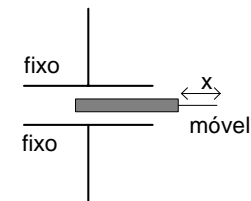
$$C = \epsilon \frac{A}{d}$$



$$\frac{\delta C}{\delta d} = -\epsilon \frac{A}{d^2}$$



$$\frac{\delta C}{\delta A} = \frac{\epsilon}{d}$$

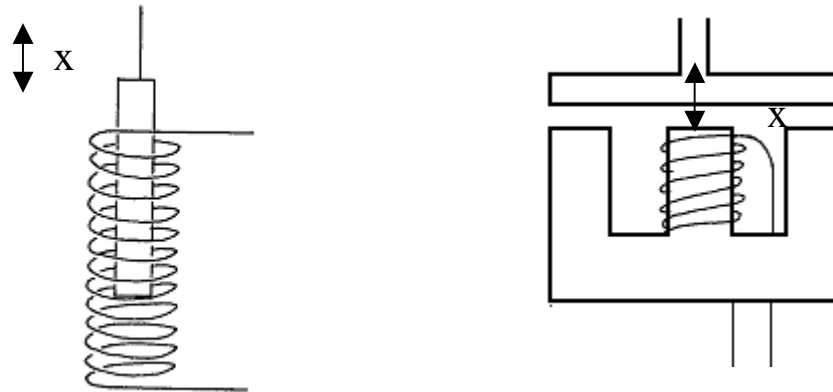


$$\frac{\delta C}{\delta \epsilon} = \frac{A}{d}$$



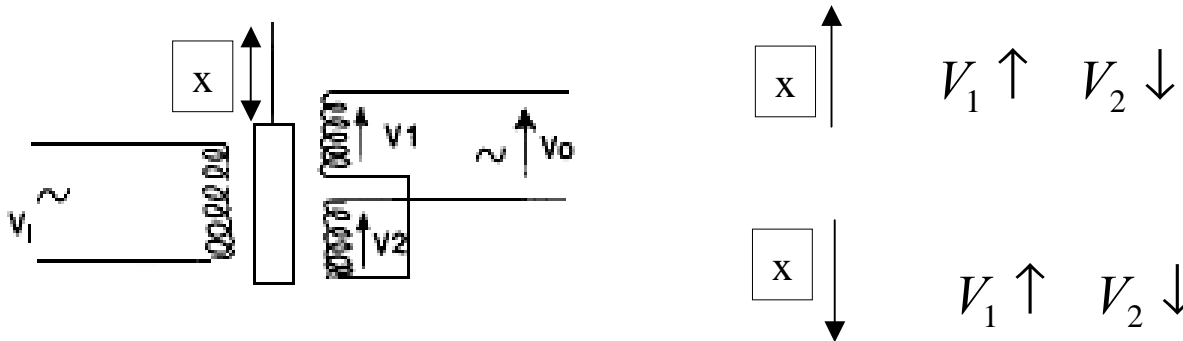
# Sensores mecânicos

- Sensores de deslocamento indutivos  
deslocamento provoca alteração da autoindução de uma bobina



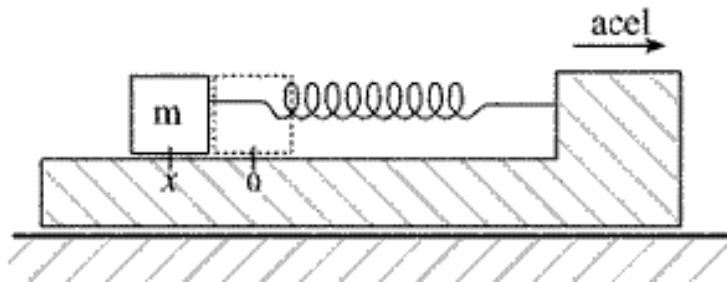
# Sensores mecânicos

- Sensores de deslocamento electromagnéticos:  
LVDT (Linear variable differential transformer): convertem deslocamento numa tensão AC ( $V_o$ )



# Sensores mecânicos

- Sensores de aceleração ou acelerômetros
  - Princípio de funcionamento da maioria: aceleração medida pelo deslocamento da massa  $m$



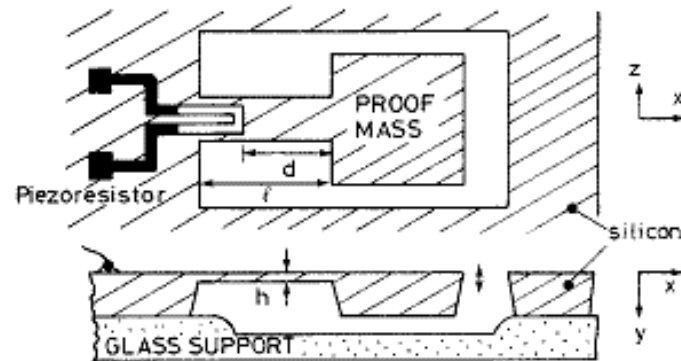
$$F = ma$$

$$F = kx$$

$$a = \frac{kx}{m}$$

# Sensores mecânicos

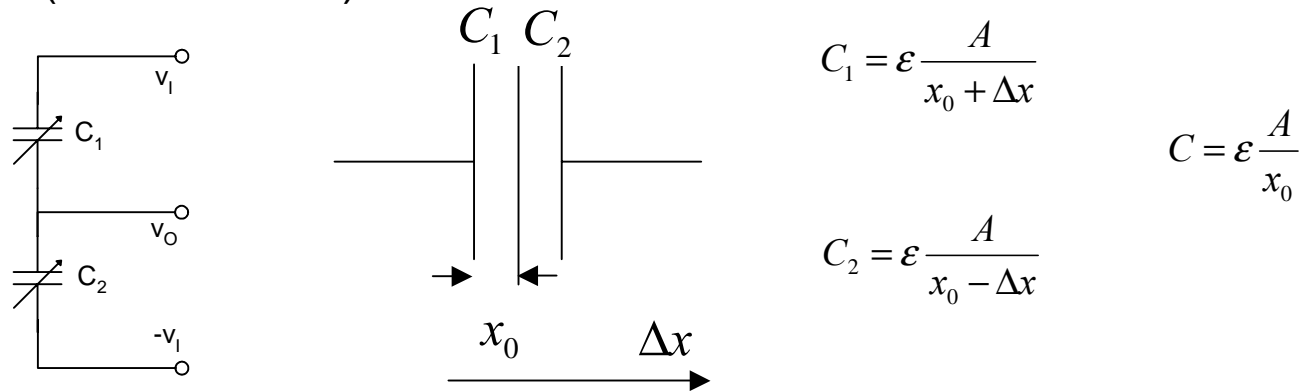
- Deslocamento medido por extensômetro micromaquinado (Si) :



Microsensors, Principles and Applications, J.W. Gardner

# Sensores mecânicos

- Deslocamento medido por efeito capacitivo diferencial (ex: ADXL-50)

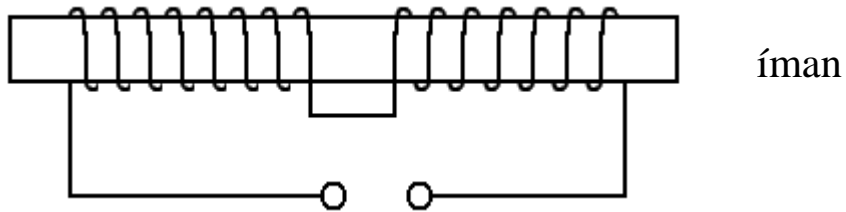


$$v_o = -v_I + \frac{C_1}{C_1 + C_2} 2v_I \quad C_1 + C_2 = \epsilon A \frac{(x_0 + \Delta x + x_0 - \Delta x)}{(x_0 + \Delta x)(x_0 - \Delta x)} = 2\epsilon A \frac{x_0}{x_0^2 + \Delta x^2} \approx 2 \frac{\epsilon A}{x_0} = 2C$$

$$v_o = -v_I + \frac{C_1}{C_1 + C_2} 2v_I = \frac{-v_I(x_0 + \Delta x) + x_0 v_I}{x_0 + \Delta x} = -\frac{\Delta x}{x_0 + \Delta x} v_I \approx -\frac{\Delta x}{x_0} v_I$$

# Sensores mecânicos

- Sensores de velocidade



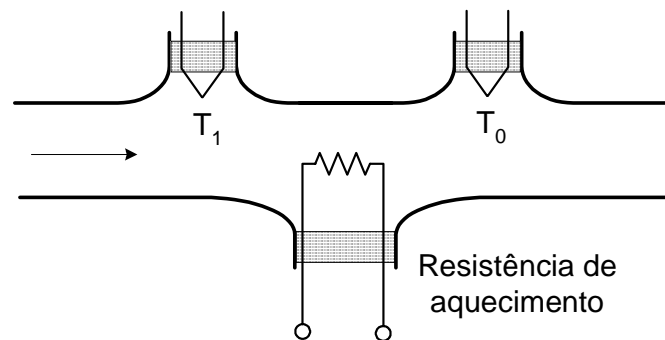
$$f.e.m = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dx} \frac{dx}{dt}$$

$$f.e.m = -N \frac{d\Phi}{dx} v$$

$$\text{Se } \frac{d\Phi}{dx} = c^{te} \text{ têm-se } f.e.m = k v$$

# Sensores mecânicos

- Sensores de velocidade de fluidos (sensores de fluxo)
  - com base nas diferenças de temperatura



- com base nas diferenças de pressão
- com base na variação da frequência do som devida ao movimento do fluido

# Sensores mecânicos

- Sensores de velocidade
  - Detecção da velocidade através da variação da frequência entre a radiação emitida e a reflexão recebida por um corpo que se move à velocidade  $v$

$$A \cos\left(\frac{2\pi c}{\lambda} t\right)$$

radiação emitida

$$A \cos\left(\frac{2\pi(c-v)}{\lambda} t\right)$$

radiação recebida por um  
objecto com velocidade  $v$

$$\Delta f = \frac{v}{\lambda}$$

diferença de frequência entre as duas ondas proporcional à velocidade



# Sensores mecânicos

- Sensores força, pressão e velocidade
  - Princípio de funcionamento: variação de tensão com a força por efeito piezoelétrico.
  - Efeito piezoelétrico: uma força aplicada num material origina o aparecimento de cargas na superfície porque os átomos do cristal deslocam-se quando uma força é aplicada a um cristal.

# Sensores mecânicos

- Um acelerómetro apresenta uma tensão que varia com a aceleração:

$$v = \frac{cA}{b+A} \quad c = 10V; \quad b = 10g \quad A(g) \quad 1g = 10m/s^2$$

- Qual o valor da tensão na saída do acelerómetro para uma aceleração de 1g?

$$v = \frac{10 \times 1}{10 + 1} = 0,91V$$

- Qual a sensibilidade deste acelerómetro para acelerações perto de 1g e de 5g?

$$S = \frac{\partial v}{\partial A} \quad S = \frac{c(b+A) - cA}{(b+A)^2} = \frac{cb}{(b+A)^2} \quad \begin{array}{l} S = 0,82V/g \\ S = 0,44V/g \end{array}$$

# Sensores mecânicos

- Qual o erro de linearidade para uma aceleração de 1g?

$$V(A) = \frac{cA_0}{b + A_0} + \frac{cb}{(b + A_0)^2}(A - A_0) - \frac{cb}{(b + A_0)^3}(A - A_0)^2$$

$$A_0 = 0 \quad \frac{cb}{b^2} = \frac{c}{b} = 1V/g$$

$$\frac{cb}{b^3} = \frac{c}{b^2} = 0.1V/g^2$$

$$A_0 = 0 \quad V(A) = A - 0,1A^2$$

$$A = 1g \Rightarrow \text{erro} = \frac{0,1}{1} = 10\%$$

# Sensores mecânicos

- Considerando que o sensor está também sujeito a uma vibração da forma

$$0,01 \text{sen}(2\pi 30t)$$

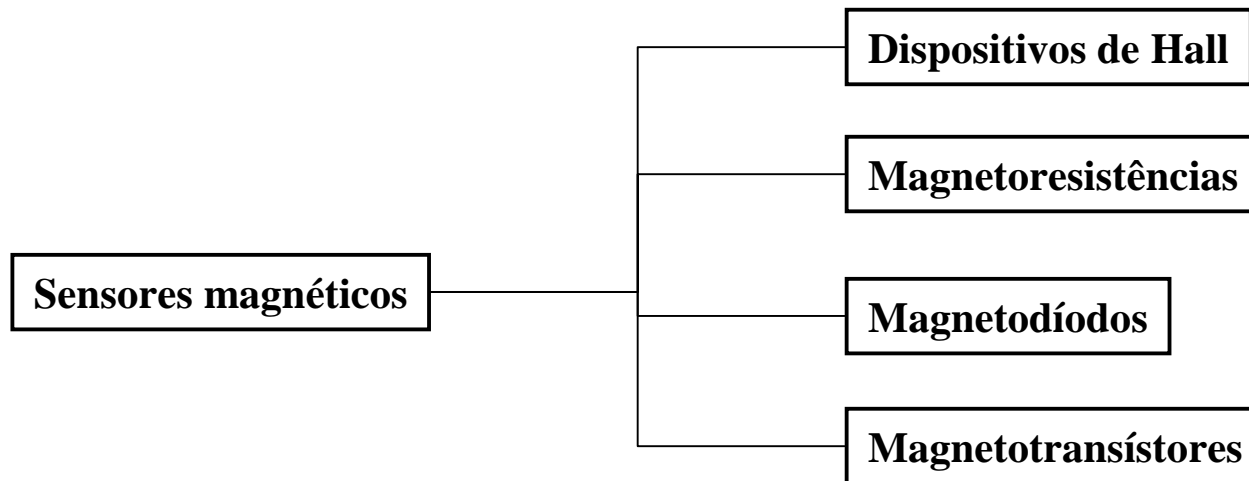
verifique a existência de distorção harmónica.

$$V(A) = 0,01 \text{sen}(60\pi t) - 0,00001 \text{sen}^2(60\pi t)$$

$$\text{sen}^2 x = 1 - \cos^2 x$$

$$\cos^2 x = \frac{1}{2}(1 + \cos 2x) \quad 2^{\text{a}} \text{ harmónica}$$

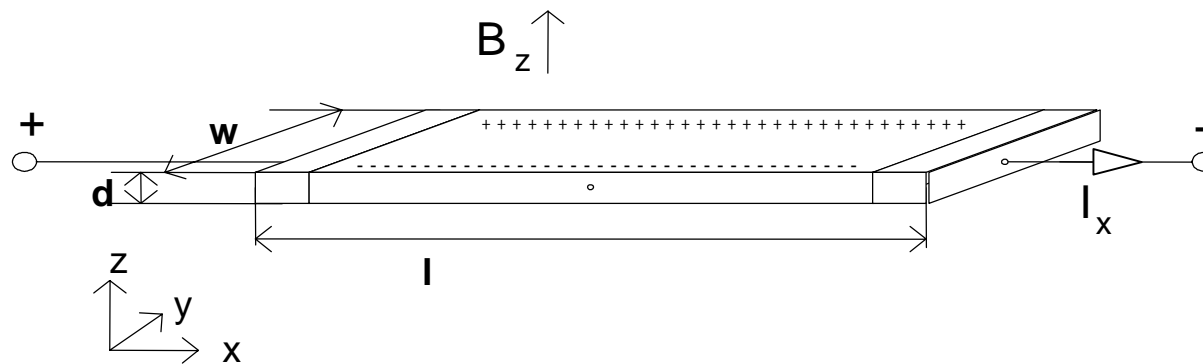
# Sensores magnéticos



# Sensores magnéticos

- Efeito de Hall
  - Uma carga eléctrica  $q$  em movimento num campo magnético  $B$  com velocidade  $v$  fica sujeito à força de Lorentz

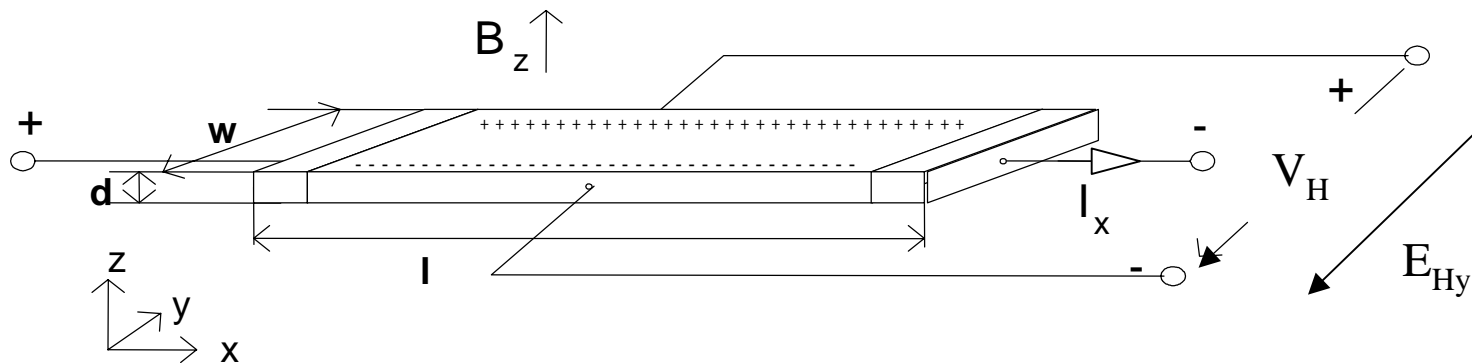
$$F = -q(v \times B)$$



- A força de Lorentz provoca a deflexão dos electrões: cargas positivas de um lado e cargas negativas do outro.

# Sensores magnéticos

- Efeito de Hall
  - As cargas positivas de um lado e cargas negativas do outro geram um campo eléctrico, efeito de Hall, que se opõe à força de Lorentz.

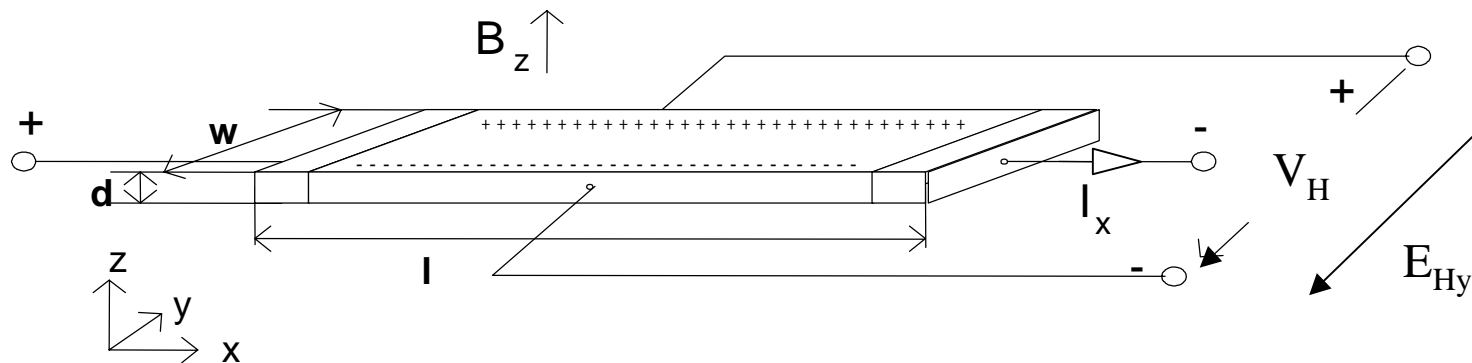


em equilíbrio

$$qE_{Hy} = qv_x B_z \quad E_{Hy} = v_x B_z$$

# Sensores magnéticos

- Efeito de Hall



$$E_y = v_x B_z \quad E_x \quad J_x = -nqv_x = -nq\mu_n E_x$$

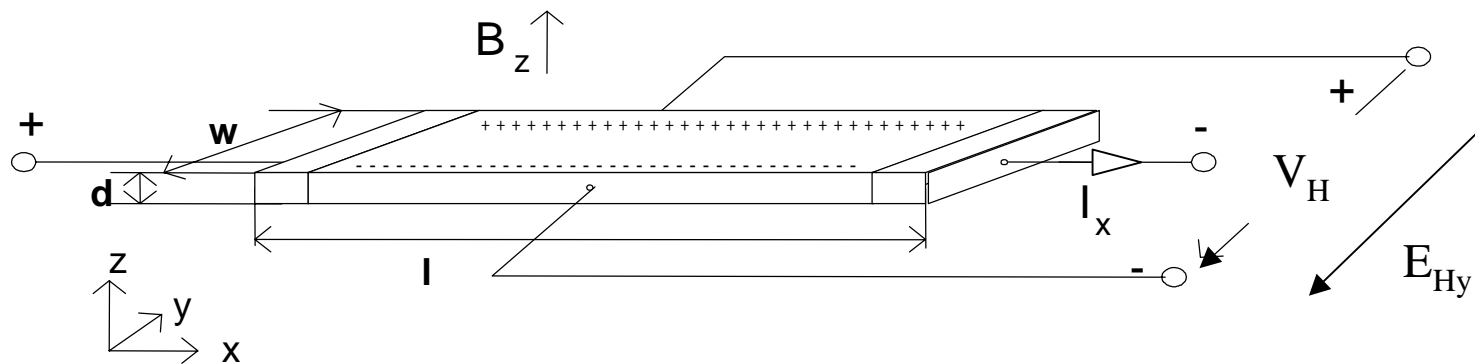
o ângulo entre o campo resultante e a direcção da corrente, designa-se por ângulo de Hall:

$$\tan \theta = \frac{E_y}{E_x} = \frac{R_H J_x B_z}{E_x} = \frac{R_H q n \mu_n E_x B_z}{E_x} = \mu_n B_z$$



# Sensores magnéticos

- Dispositivos de Hall ( $R_H$  coeficiente de Hall)



em equilíbrio

$$V_H = wE_H = wv_x B_z$$

$$V_H = -w \frac{I_x}{wd nq} B_z = -\frac{1}{nq} \frac{I_x B_z}{d}$$

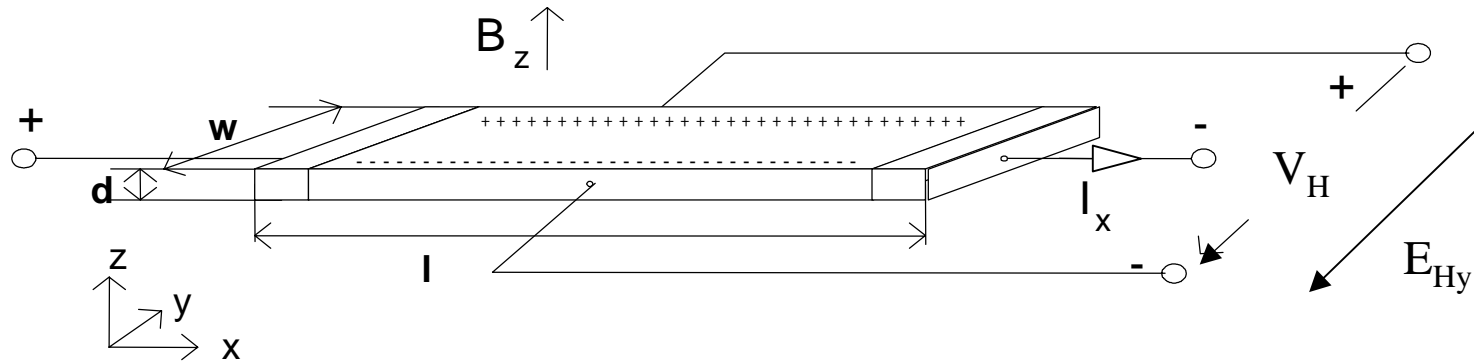
$$J_x = -nqv_x$$

$$J_x = \frac{I_x}{wd}$$

$$v_x = -\frac{J_x}{nq} = -\frac{I_x}{wd nq}$$

# Sensores magnéticos

A tensão de Hall é proporcional à corrente e ao campo magnético:  $R_H$  constante de Hall



$$V_H = -\frac{1}{nq} \frac{I_x B_z}{d}$$

$$R_H = -\frac{1}{nq}$$

$$R_H = -\frac{1}{nq} r G$$

$$V_H = R_H \frac{I_x B_z}{d}$$

$r$  – factor de correcção com base experimental

$G$  – factor de correcção de geometria quando

$l < w$ , depende de  $l/w$

# Sensores magnéticos

- Efeito de Hall em semicondutores

$$E_y = v_x B_z$$

Velocidade de deriva e densidade de corrente de electrões e lacunas

$$J_n = -nqv_n$$

$$J_p = nqv_p$$

$$v_n = -\mu_n E$$

$$v_p = \mu_p E$$

# Sensores magnéticos

- Densidade de corrente de elétrons e lacunas segundo y

$$J_{ny} = qn\mu_n E_y \quad J_{py} = qp\mu_p E_y \quad J_y = J_{ny} + J_{py} = (qn\mu_n + qp\mu_p) E_y$$

$$v_n = -\mu_n E \quad v_p = \mu_p E$$

$$E_y = v_x B_z$$

$$E_y = \frac{J_y}{qn\mu_n + qp\mu_p}$$

$$J_y = (-qn\mu_n^2 + qp\mu_p^2) E_x B_z$$

$$E_y = \frac{(-qn\mu_n^2 + qp\mu_p^2) E_x B_z}{qn\mu_n - qp\mu_p}$$

$$E_x = \frac{J_x}{qn\mu_n + qp\mu_p}$$

$$E_y = \frac{(-qn\mu_n^2 + qp\mu_p^2) B_z}{qn\mu_n + qp\mu_p} \frac{J_x}{qn\mu_n + qp\mu_p}$$

# Sensores magnéticos

$$E_y = \frac{(-qn\mu_n^2 + qp\mu_p^2)B_z}{qn\mu_n + qp\mu_p} \frac{J_x}{qn\mu_n + qp\mu_p}$$

$$E_y = \frac{(p\mu_p^2 - n\mu_n^2)J_x B_z}{q(n\mu_n + p\mu_p)^2} \quad E_y = R_H J_x B_z$$

$$n \gg p \Rightarrow R_H = -\frac{1}{qn}$$

$$R_H = \frac{(p\mu_p^2 - n\mu_n^2)}{q(n\mu_n + p\mu_p)(n\mu_n + p\mu_p)}$$

$$n \ll p \Rightarrow R_H = \frac{1}{qp}$$

$$n = p = n_i \Rightarrow R_H = \frac{\mu_p - \mu_n}{qn_i(\mu_n + \mu_p)}$$

# Sensores magnéticos

Sensibilidades semi-relativas

$$S_I = \left| \frac{1}{I_x} \frac{\partial V_H}{\partial B_z} \right| = \frac{r G}{nqd} = R_H \frac{r G}{d}$$

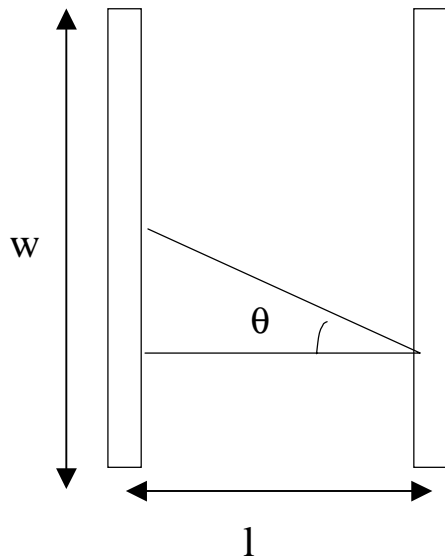
$$S_V = \left| \frac{1}{V} \frac{\partial V_H}{\partial B_z} \right| = R_H \frac{r G}{dR}$$

$$\frac{w}{l} > 1$$

Para ter alta sensibilidade

# Sensores magnéticos

- Magnetoresistências semicondutoras (efeito de Hall)
  - A resistência de um semicondutor é influenciada pela aplicação de um campo magnético: a força de Lorentz roda as linhas da corrente.



$$\tan \theta = \frac{E_y}{E_x} = \frac{R_H J_x B_z}{E_x} = \frac{R_H q n \mu_n E_x B_z}{E_x} = \mu_n B_z$$

ângulos pequenos  $R = R_0 (1 + \tan^2 \theta)$

$R_0$ : resistência sem campo magnético aplicado

# Sensores magnéticos

- Um dispositivo de Hall é integrado em tecnologia bipolar, sendo formado pela camada epitaxial tipo n, cuja densidade de impurezas é  $N_D = 4,5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . A camada epitaxial tem uma espessura de 20  $\mu\text{m}$  sendo a resistividade  $\rho = 1 \text{ }\Omega\text{cm}$ . Admita  $l = 300 \text{ }\mu\text{m}$  e  $w = 100 \text{ }\mu\text{m}$ . A corrente aplicada é  $I = 6,7 \text{ mA}$  e o campo magnético  $B = 1 \text{ T}$ .

Dados:

$$\mu_n = 0,14 \text{ m}^2/\text{Vs}$$

$$1 \text{ T} = 10^4 \text{ Gauss}$$

$$q = 1,60218 \times 10^{-19} \text{ C}$$



# Sensores magnéticos

- Determine:
  1. O coeficiente de Hall

$$R_H = -\frac{1}{nq} = -\frac{1}{N_D q} = \frac{10^{-15}}{4,5 \cdot 1,60218 \cdot 10^{-19}} = -1,387 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{C}$$

2. A tensão de Hall

$$V_H = -\frac{R_H B_z I_x}{d} = -\frac{1,387 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 6,7 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^{-6}} = -0,46 \text{ V}$$

3. O ângulo de Hall

$$\tan \theta = \mu_n B_z = 0,14 \Rightarrow \theta = 8^\circ$$

# Sensores magnéticos

## 4. A sensibilidade semi-relativa com a tensão

$$V_H = \frac{R_H I_x B_z}{d} = \frac{R_H B_z}{d} \frac{V}{R} \quad S_V = \left| \frac{1}{V} \frac{\partial V_H}{\partial B_z} \right| = b \frac{R_H}{dR} = \frac{1,387 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^{-6} R}$$

$$R = \rho \frac{l}{S} = 1 \frac{300 \cdot 10^{-4}}{100 \cdot 10^{-4} \cdot 20 \cdot 10^{-4}} = 1,5 \cdot 10^3 \Omega$$

$$S_V = \frac{1,387 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^{-6} \cdot 1,5 \cdot 10^3} = 0,46 \cdot 10^5 T^{-1}$$

# Sensores magnéticos

- Magnetoresistências em materiais magnéticos
  - quando um campo magnético é aplicado a magnetização roda, afectando o percurso dos portadores de carga

$$R_{\theta} = R_0 - (R_0 - R_{90^{\circ}}) \sin^2 \theta$$

$R_0$  é a resistência quando a corrente e a magnetização são paralelos

$R_{90}$  é a resistência quando a corrente e o campo são perpendiculares

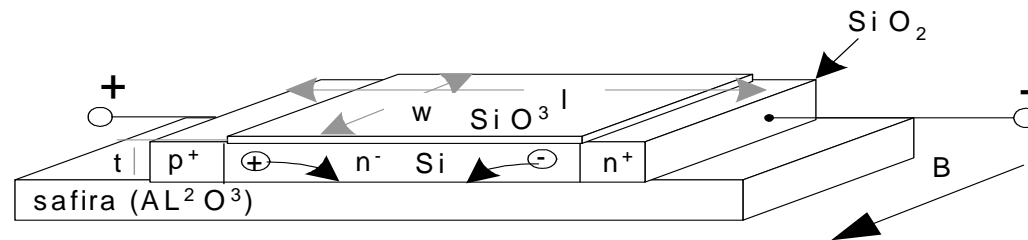
$R_{45^{\circ}}$  é um valor utilizado (boa sensibilidade)

- efeito muito maior que nos semicondutores
- para combinar este efeito com circuitos electrónicos utilizam-se camadas magnéticas com circuitos integrados em silício.

# Sensores magnéticos

- Magnetodíodos
  - A característica  $I(V)$  de um díodo pode ser modificada por uma campo magnético.
  - Na polarização directa a corrente depende da injeção e difusão dos portadores de carga e da geração e recombinação na zona de depleção.
  - Nos tipos habituais de díodos a zona de depleção é muito pequena na polarização directa, sendo a corrente dependente da difusão.
  - Nos magnetodíodos a zona de depleção é maior para reforçar o efeito de geração e recombinação, existindo superfícies para as quais os portadores se deslocam por efeito do campo magnético.

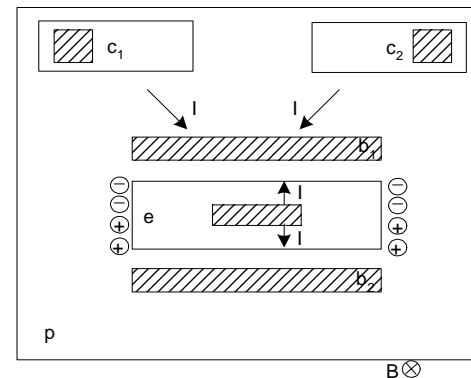
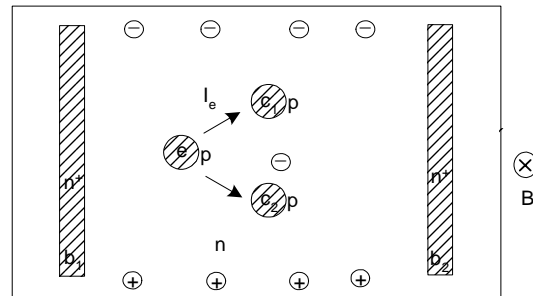
# Sensores magnéticos



- Díodo formado pela estrutura p+ n- n+, com a zona central longa, com baixa concentração de impurezas e tempo de vida dos portadores elevada.
- A interface Si – Si O<sub>2</sub> tem velocidade de recombinação baixa e a interface Si – safira tem velocidade de recombinação alta.
- Por acção do campo magnético electrões e lacunas são dirigidos para a interface Si – safira e a recombinação aumenta. Para a mesma tensão aplicada na junção a corrente aumenta. Por acção de um campo eléctrico de sentido contrário a recombinação na interface Si – Si O<sub>2</sub> diminui.
- São não lineares, sensíveis a variações da temperatura e de difícil reprodutibilidade

# Sensores magnéticos

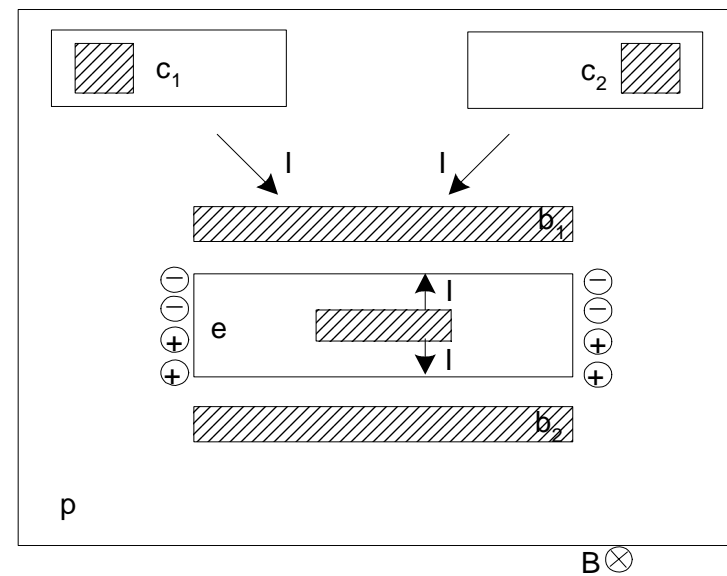
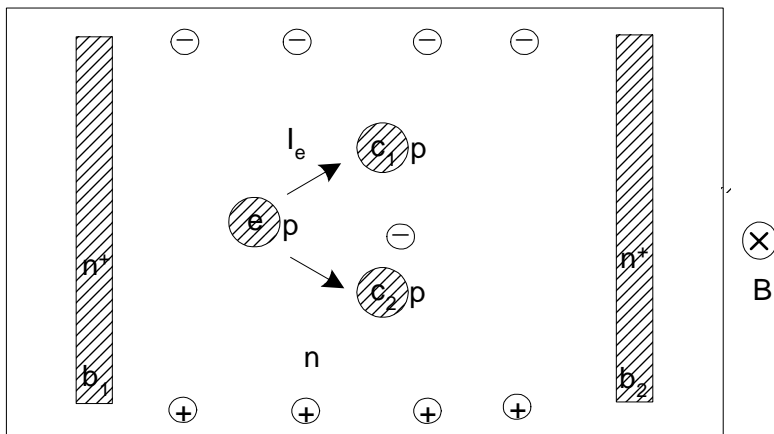
- Magnetotransístores
  - A característica de transístores pode ser modificada por um campo magnético.
  - Utilizam-se as tecnologias dos bipolares e dos MOS para realizar magnetotransístores.
  - A maior parte dos magnetotransístores tem um emissor ou fonte e mais de um coletor ou dreno.



- Magnetotransístores laterais e verticais

# Sensores magnéticos

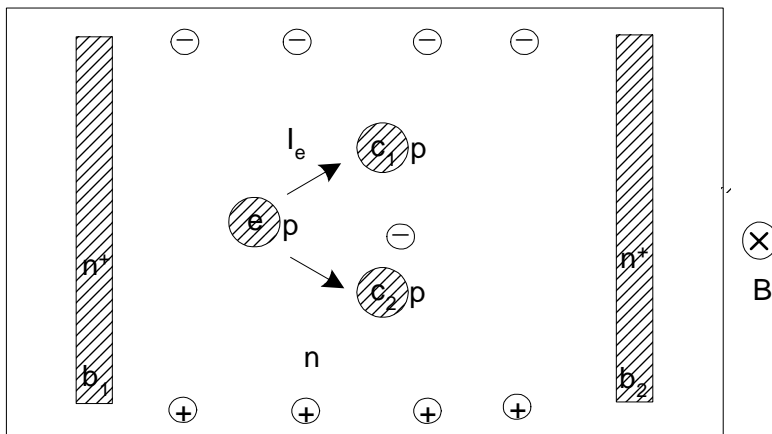
- Existem dois mecanismos: deflexão como nos dispositivos de Hall e modulação da injeção do emissor.



# Sensores magnéticos

Magnetotransístor lateral: a corrente flui na superfície do silício

- Mecanismo de deflecção



pnp

Os portadores tipo p de  $I_e$  são deflectidos de um ângulo  $\theta$ , havendo uma variação da corrente nos colectores ( $I_c$ )

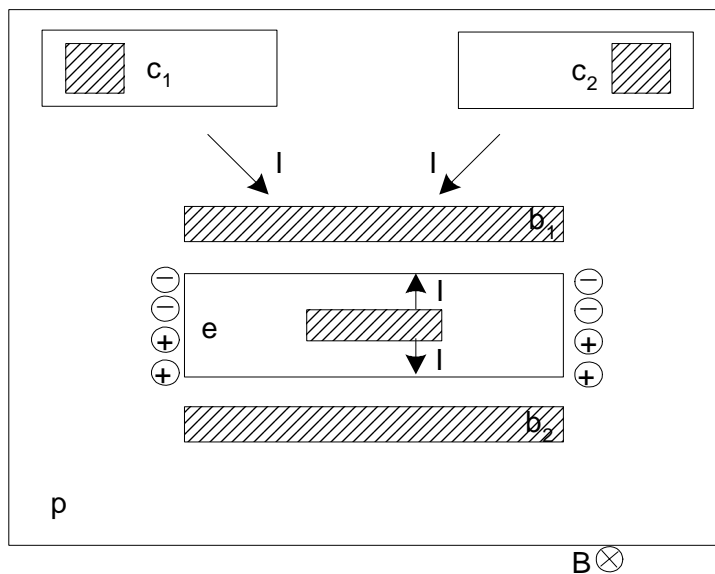
$$\Delta I_c = k(\mu_n + \mu_p)BI_e$$



# Sensores magnéticos

Magnetotransistor lateral: a corrente flui na superfície do silício

- Mecanismo de modulação de injeção



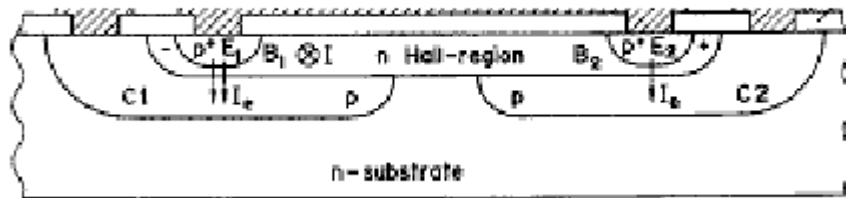
pnp

Por efeito do campo magnético quando a corrente no colector 1 aumenta a do colector 2 diminui.

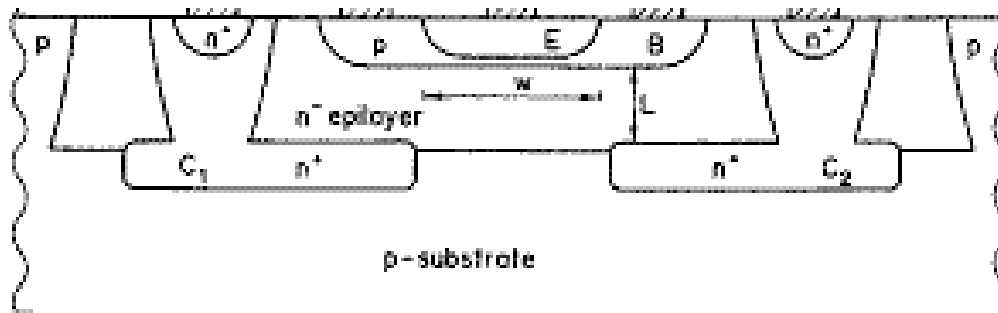
A diferença de correntes mede o campo magnético.

# Sensores magnéticos

## Magnetotransistores verticais



DAMS - Differential Amplification Magnetic Sensor



Vertical dual-collector magnetotransistor

Silicon Sensors, S. Middelhoek, S. Audet

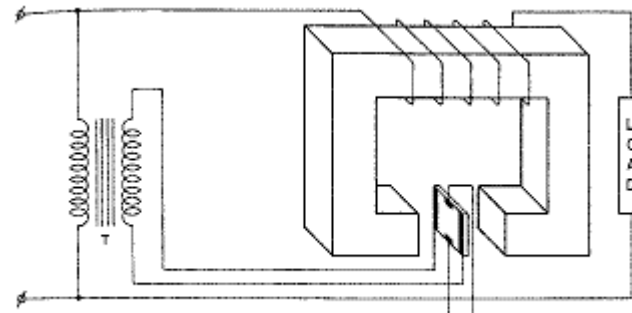
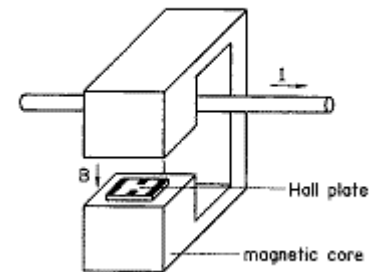
# Sensores magnéticos

## Aplicações

- Medição do campo magnético
- Medição da corrente eléctrica, sem contacto: o núcleo é magnetizado pela corrente a medir.

<http://www.sentron.ch/support/downloads/CSA-1.pdf>

- Cabeças de leitura de discos magnéticos
- Sensores de deslocamento, velocidade e aceleração (sem contacto)
- Medidores de potência



Silicon Sensors, S. Middelhoek, S. Audet