

## **6. Transdutores, Sensores e Atuadores**

Igor Kondrasovas

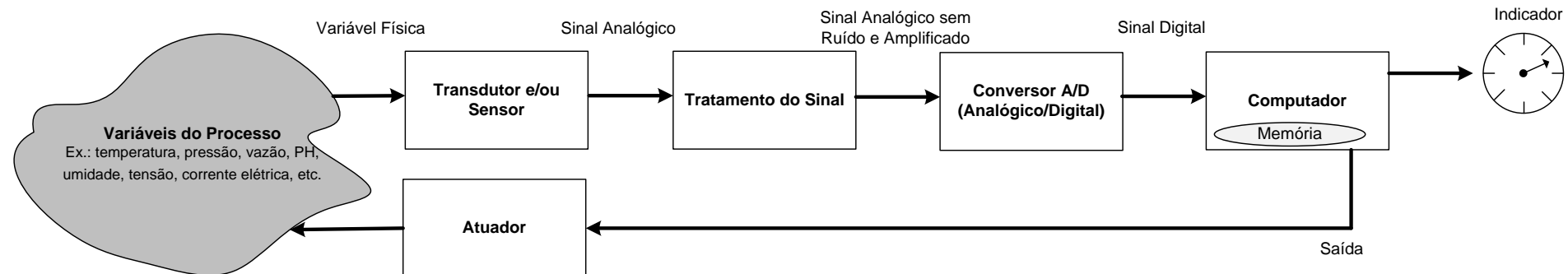
---

# Tópicos

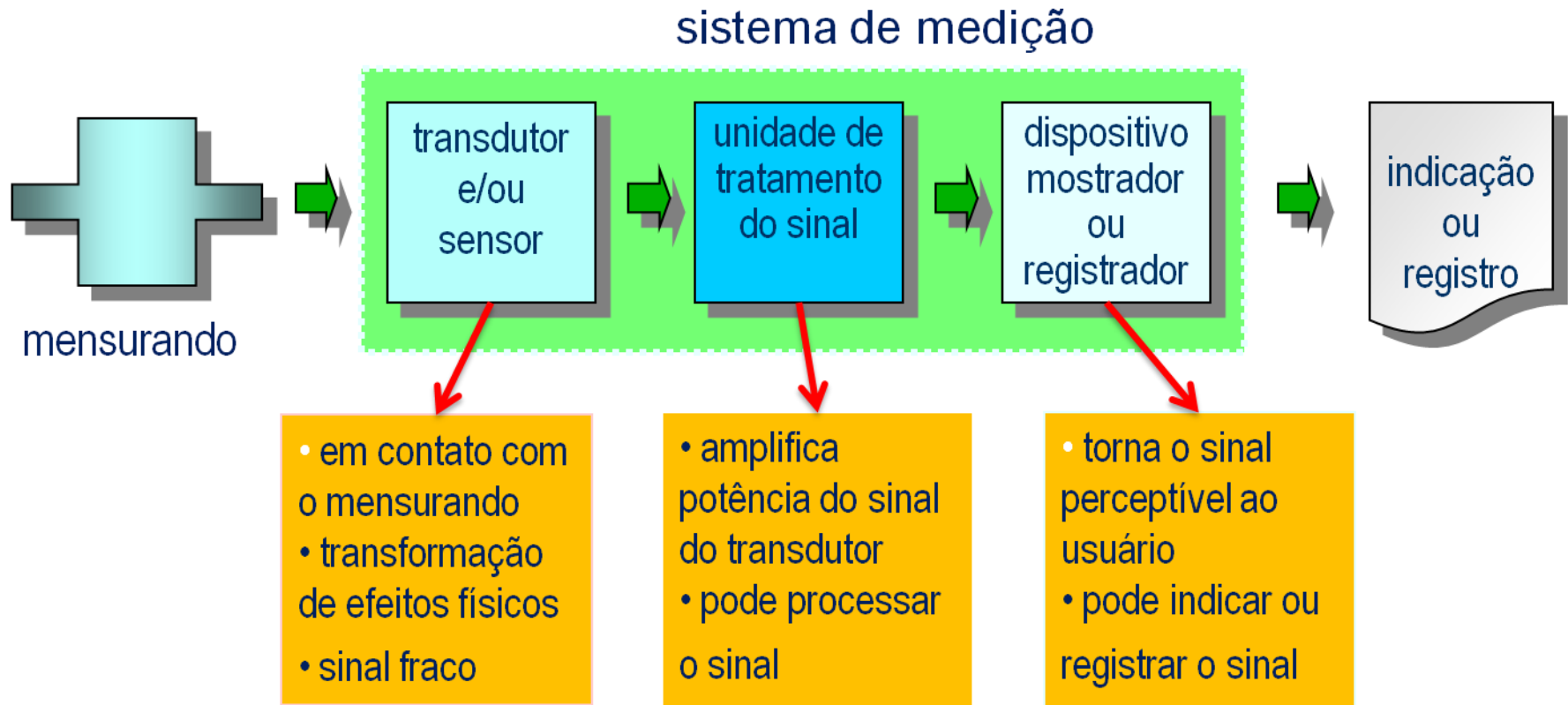
- Instrumentação
- Transdutores
- Sensores
- Atuadores

# Instrumentação

- Consiste no conjunto de dispositivos e técnicas utilizados para **monitorar e/ou controlar fenômenos físicos** que ocorrem em um sistema termodinâmico (processo).
- O termo instrumentação pode ser utilizado para fazer menção à área de trabalho dos técnicos e engenheiros que lidam com processos industriais (técnicos de operação, instrumentação, engenheiros de processamento, de instrumentação e de automação), mas também pode referir-se aos vários métodos e técnicas possíveis aplicadas aos **instrumentos**.
- Para controlar um processo industrial (independente de qual o produto fabricado ou sua área de atuação) é necessária a **medição e o controle de uma série de variáveis físicas e químicas**, e para isso se utiliza da instrumentação.



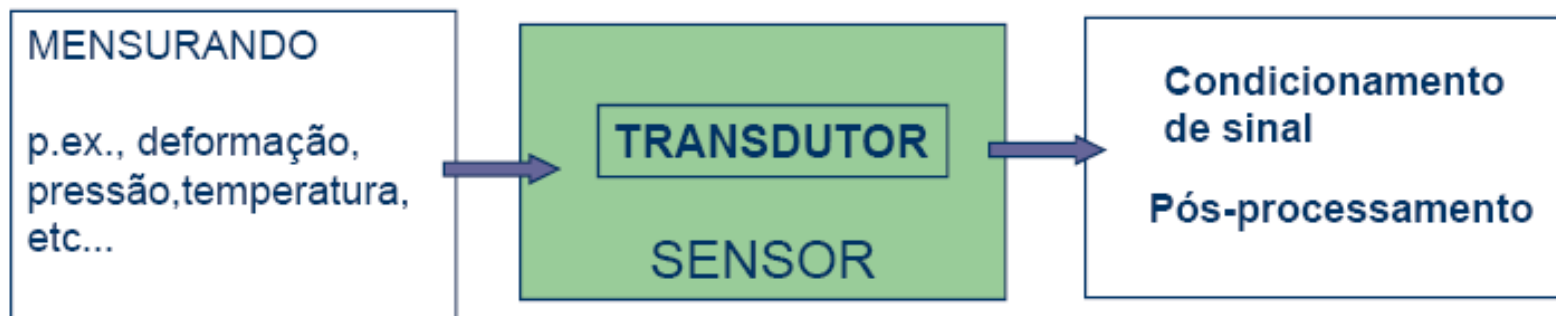
# Módulos Básicos de um Sistema de Medição



Fonte: material de aula do prof. Hélio Padilha - UFPR

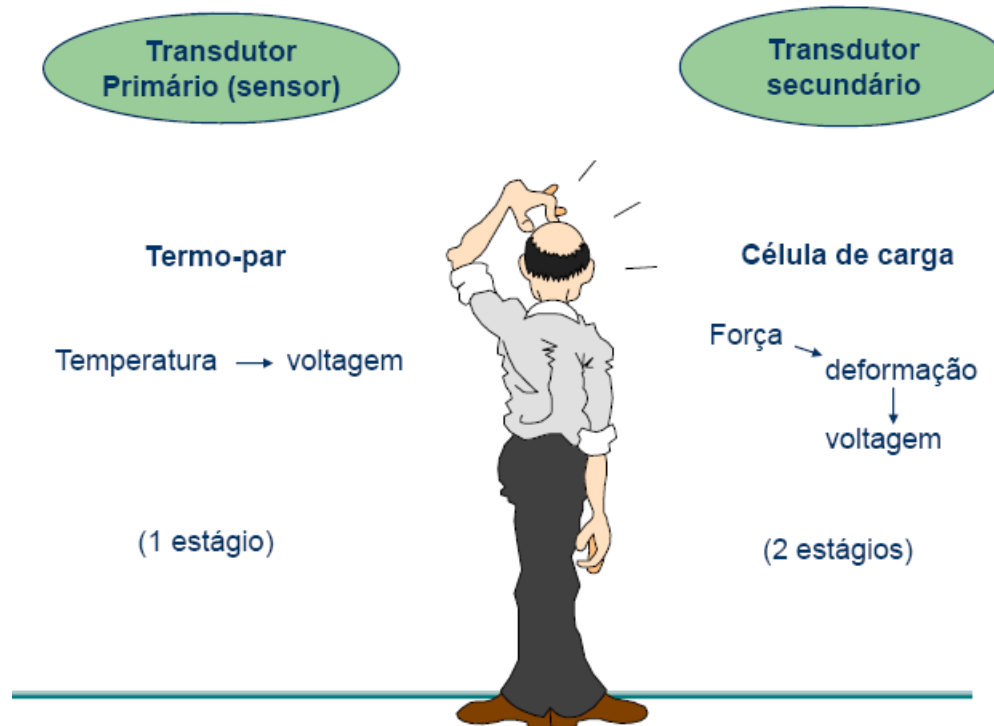
# Transdutores x Sensores

- Transdutores e sensores são amplamente usados em instrumentação.
- Um **transdutor** é um dispositivo que converte um tipo de energia qualquer em outro tipo de energia qualquer.
- Tipos de energia incluem (mas não estão limitados a essas): elétrica, mecânica, eletromagnética (incluindo luz), química, acústica ou térmica.
- O **sensor** é o elemento sensível do sistema.
- Ex: um transdutor de pressão não inclui apenas um sensor de pressão, mas a rede de compensação requerida para agrupar o sensor e compatibilizá-lo com outros tipos de transdutores.
- Medidor = sensor + transdutor



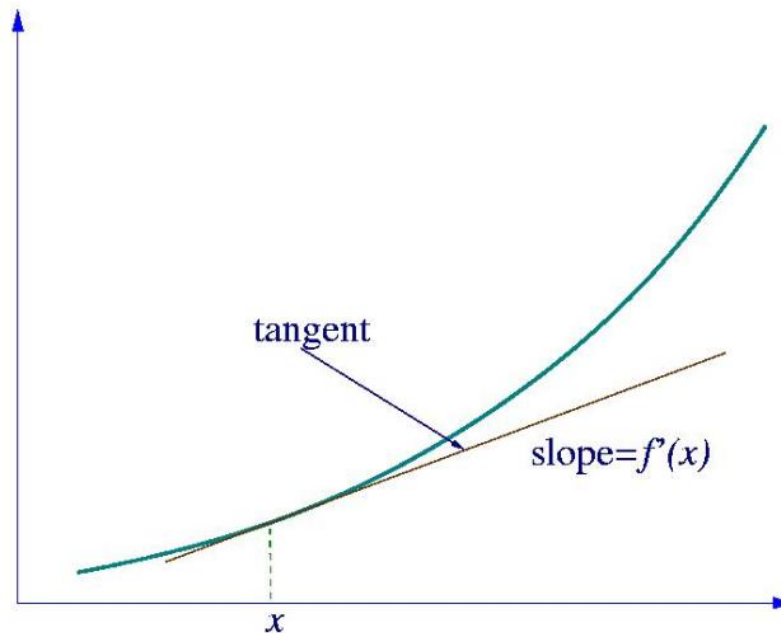
# Transdutores x Sensores

- **Sensor** detecta uma variável física de interesse. Ex: pressão, temperatura, força.
- **Transdutor** transforma essa variável em outra fácil de ser medida. Ex: transformar um sinal de temperatura em sinal elétrico.
- Muitas vezes os termos “sensor” e “transdutor” são usados indistintamente. Nesse caso, o **transdutor é o instrumento completo**, que engloba o sensor e os demais componentes.



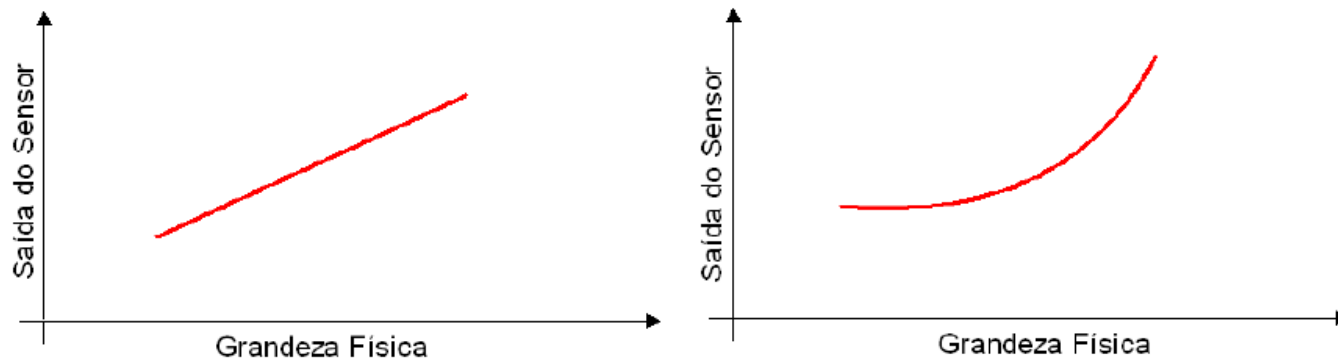
# Características Estáticas de um Instrumento

- Características que definem os parâmetros relevantes da transformação do sinal de entrada para um sinal de saída (**função de transferência**).
- A maioria dos transdutores possuem a relação entrada/saída não-linear. É necessário haver linearidade numa faixa de interesse (onde vão operar).
- Torna-se necessário o uso de funções matemáticas para a **linearização**. Ex:  $1/X$ ,  $X^m$ ,  $\log X$ ,  $AX+BX^3$



# Características Estáticas de um Instrumento

- Principais características:
- Linearidade: esse conceito se aplica a sensores analógicos. É a curva de saída do sensor, a partir da grandeza medida. Buscam-se respostas proporcionais às entradas, para facilitar a montagem do circuito de interface, porém nem sempre isso é possível, pois alguns tipos de sensores são não-lineares. A figura abaixo mostra a diferença entre um sensor linear e um não-linear:



- Faixa de medida (*range*): conjunto de valores da variável medida que estão compreendidos dentro do limite superior e inferior da capacidade de medida ou de transmissão do instrumento, sem destruição ou imprecisão do mesmo. Ex: um voltímetro mede de 100 a 300V;

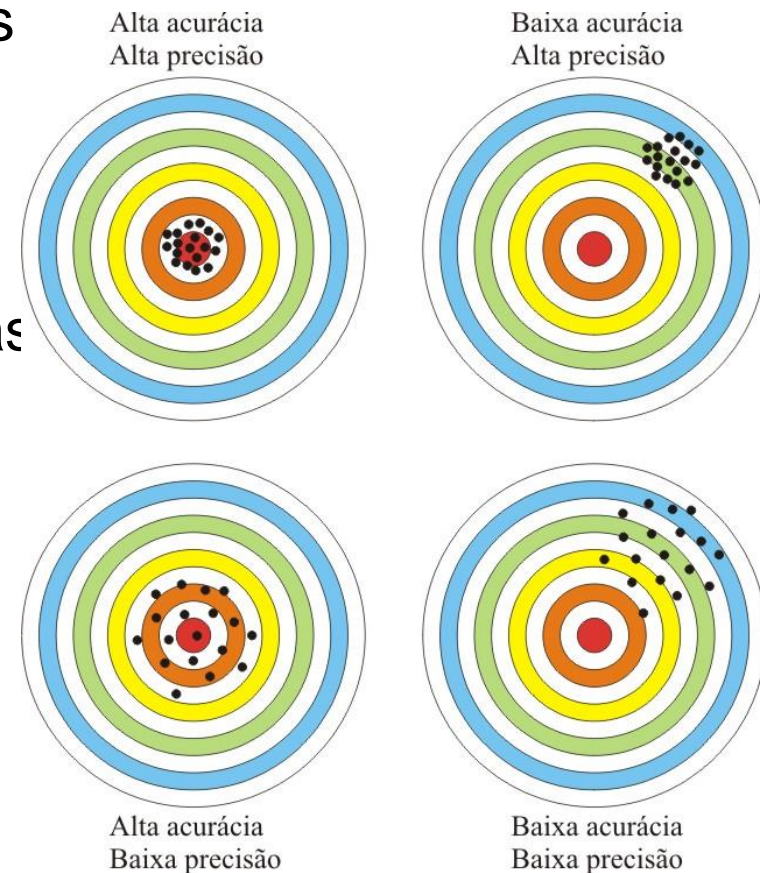


# Características Estáticas de um Instrumento

- Principais características:
- Alcance (*span*): é a diferença algébrica entre o valor superior e inferior da faixa de medida do instrumento. Ex: se a faixa de medida do instrumento é 100V a 300V, o alcance é 200V;
- Resolução: consiste na diferença entre os valores de duas marcas sucessivas do instrumento, valor de um divisão;
- Zona morta: é a máxima variação que a variável pode ter, sem provocar variações na indicação ou sinal de saída de um instrumento ou em valores absolutos do range do mesmo. A zona morta está incluída na histerese.
- Ex: p/ uma faixa de -50C a 50C com zona morta de 1%, o instrumento não apresentará variações de temperaturas inferiores ou iguais a 1C;
- Velocidade (ou tempo) de resposta: trata-se da velocidade com que o sensor fornece o valor da variável. O ideal é que o sensor possua uma resposta instantânea, pois uma resposta lenta pode prejudicar bastante a eficiência do sistema de controle;

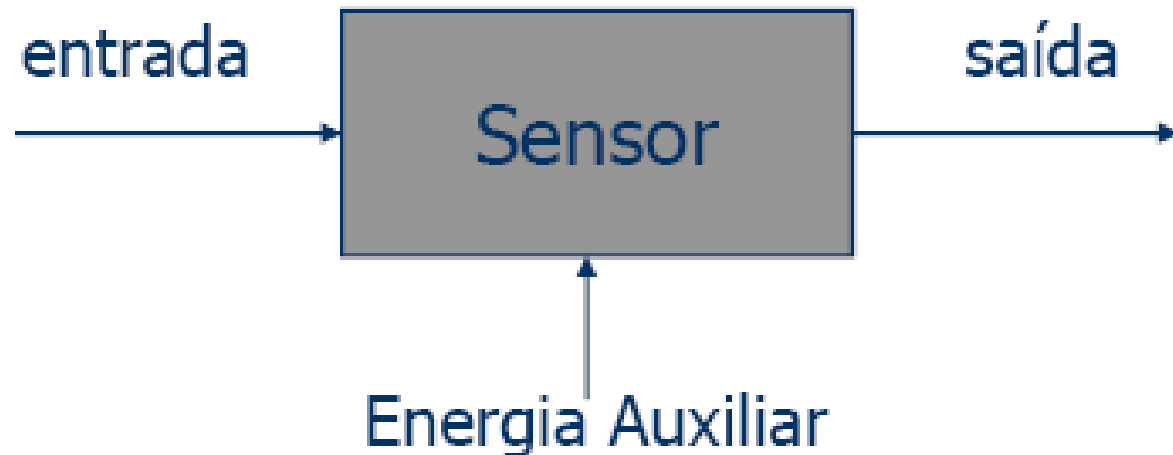
# Características Estáticas de um Instrumento

- Principais características:
  - Acurácia (ou Exatidão): é o maior valor de erro estático (erro do processo em regime permanente) que um instrumento pode ter ao longo de sua faixa de trabalho. Refere-se a medidas livres de erro, ou ao grau de conformidade entre o objeto medido e o padrão.
  - Precisão: descreve as proximidades das medidas. A proximidade dos resultados que foram obtidos experimentalmente da mesma forma.



# Classificação dos Sensores

- Quanto à operação:
- **Ativos:** não precisam de alimentação externa para produzir um sinal de saída. Ex: o termopar produz um sinal elétrico quando é aquecido.
- **Passivos:** precisam ser alimentados para gerar um sinal de saída. Ex: a termoresistência requer uma entrada de energia para excitar o r



Fonte: material de aula dos profs. Nunes, Marcílio e Larissa – Poli/USP

# Classificação dos Sensores

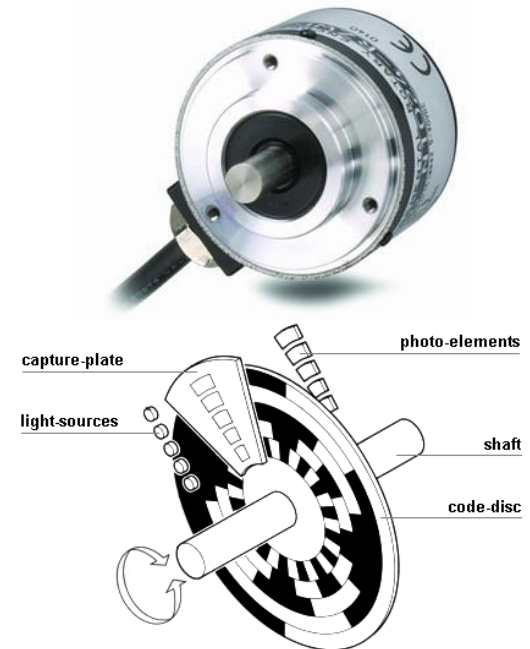
- Quanto à função:
- **Analógico:** Fornece um sinal analógico de saída. Ex: tensão, ângulo de rotação (potenciômetro).
- **Discreto:** fornece um sinal de natureza binária, onde os valores estão associados aos estados lógicos. Ex: chaves, encoders.



Potenciômetro



Termopar



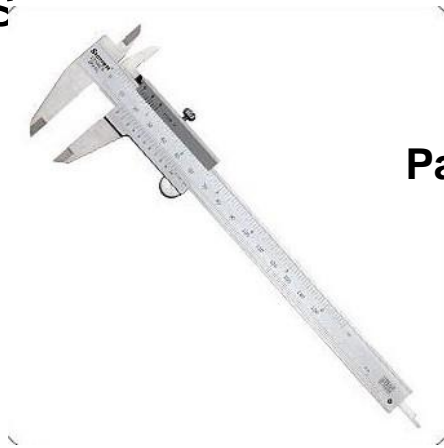
Encoder

# Classificação dos Sensores

- Quanto à grandeza física resultante:
- Mecânicos
  - Mensurando é transformado em deslocamento e movimento .
- Elétricos
  - Mensurando é transformado em tensão devido à variação de resistência elétrica, capacitância, indutância e carga elétrica.
- Magnéticos
  - Mensurando é transformado em campo magnético.
- Ópticos
  - Mensurando é transformado em sinal óptico.
- Acústicos
  - Mensurando é transformado em frequência (ressonância) e amplitude (emissão acústica).
- Químicos
  - Mensurando é transformado em alteração da condutividade elétrica.
- Biológicos
  - Mensurando é transformado em nível de atividade metabólica.

# Sensores Mecânicos

- Dimensionais:



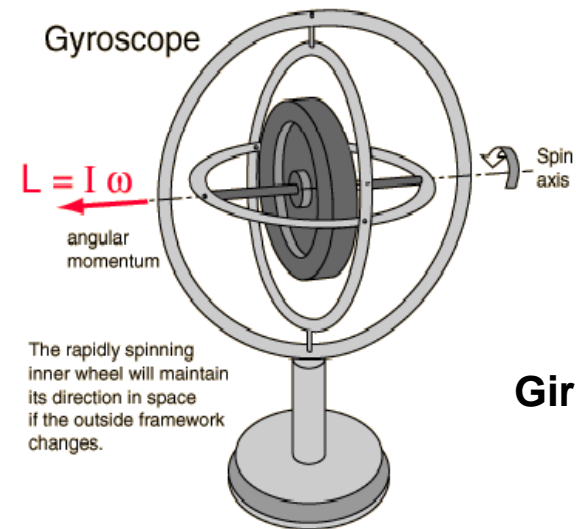
Paquímetro

- De movimento e direção:



Velocímetro

Odômetro



Giroscópio

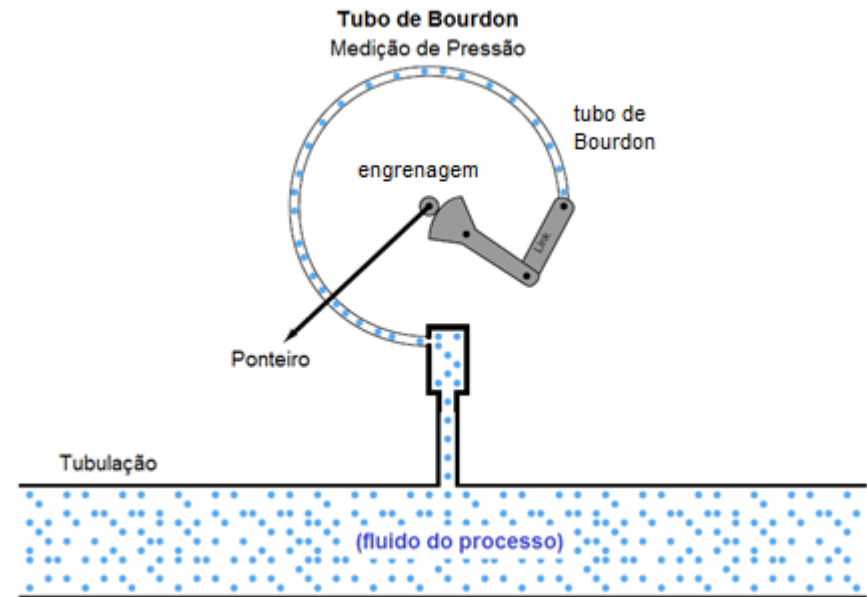
# Sensores Mecânicos

- De pressão:

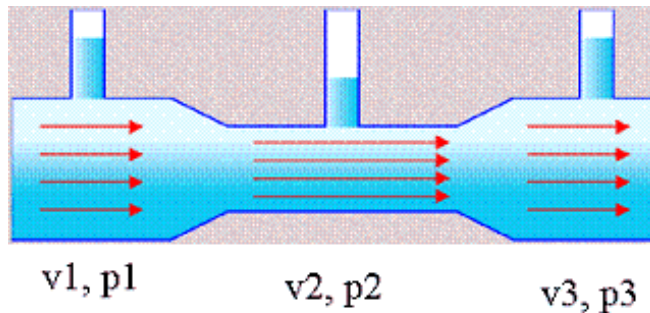
**Manômetro tubo Bourdon:** tubo em forma de C, fechado em uma extremidade. A variação de pressão faz um ponteiro se movimentar, indicando a pressão numa escala circular.

Pressão  $\Rightarrow$  deslocamento

Aplicações: cilindros de gás comprimido em indústrias e hospitais.



- De vazão:



$$\begin{aligned} v_1 &< v_2 \\ p_1 &> p_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_2 &> v_3 \\ p_2 &< p_3 \end{aligned}$$

**Tubo de Venturi**

Vazão  $\Rightarrow$  deslocamento

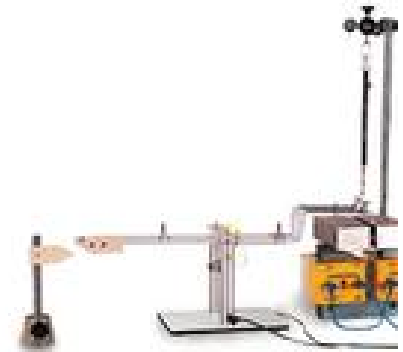
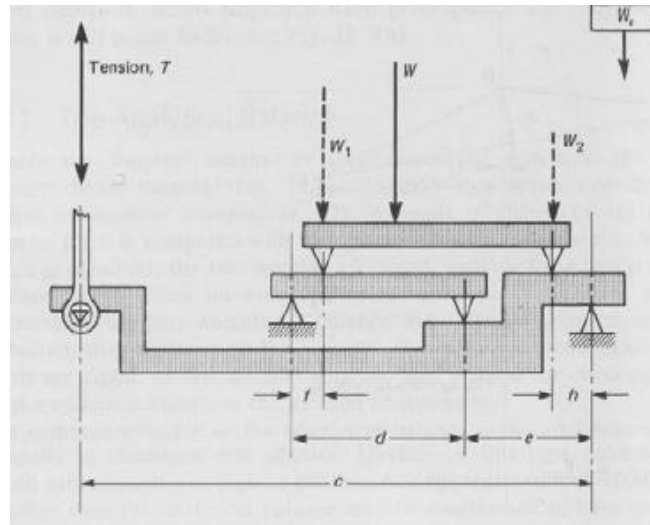
$$Q = kA_2 \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_1 - p_2}$$



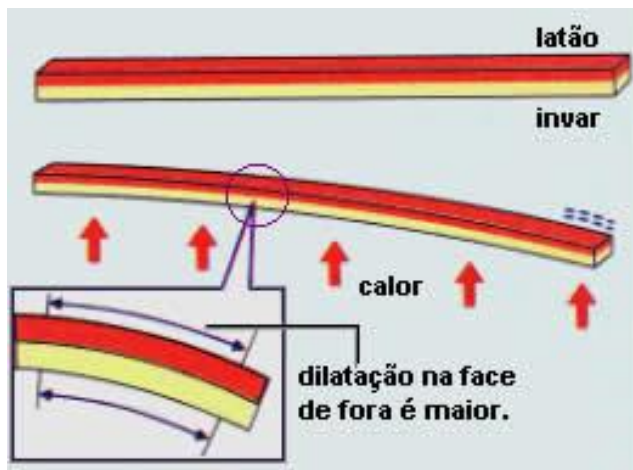
# Sensores Mecânicos

- De massa:

Balança analítica  
Balança pendular  
Balança torsional (de Cavendish)



- De temperatura:



Lâmina bimetálica



Termômetro de coluna

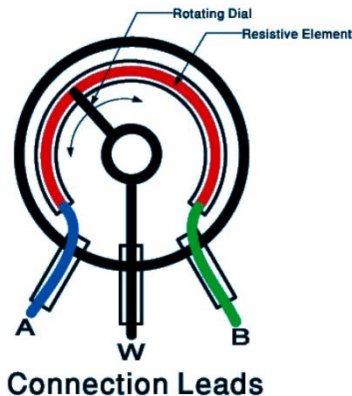


# Sensores Elétricos

- Divididos em:
- Passivos:
  - Resistivos
  - Indutivos
  - Capacitivos
- Ativos:
  - Termoelétrico
  - Piezoelétrico
  - Fotoelétrico

# Sensores Elétricos

- Resistivos:
  - A resistência elétrica varia de acordo com a variável medida.



**Potenciômetro:** formado por um resistor e um contato deslizante sobre uma superfície condutiva. A posição do contato se transforma numa resistência.

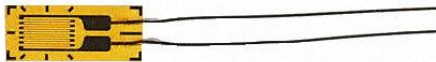
Posição  $\Rightarrow$  resistência elétrica

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

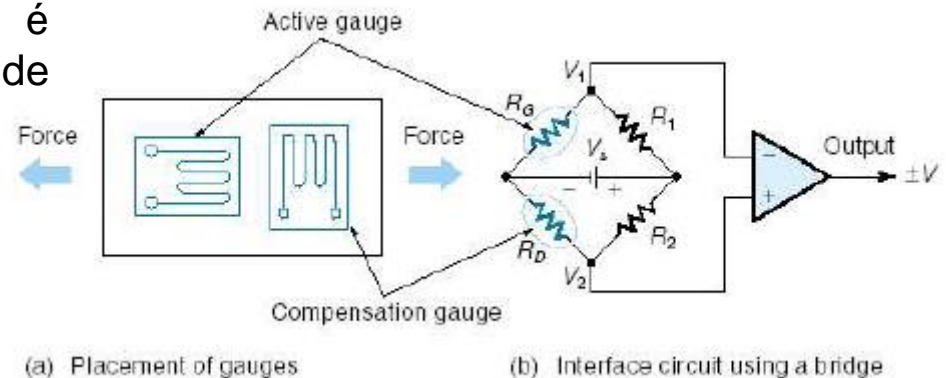
**Extensômetro (*strain gauge*):** uma força aplicada (tensão mecânica) é transformada numa variação de resistência.

Tensão mecânica  $\Rightarrow$  resistência elétrica

Aplicações: células de carga



$$R = \frac{\rho l}{A}$$
$$\varepsilon = \frac{1}{G.F.} \frac{\Delta R}{R}$$



# Sensores Elétricos

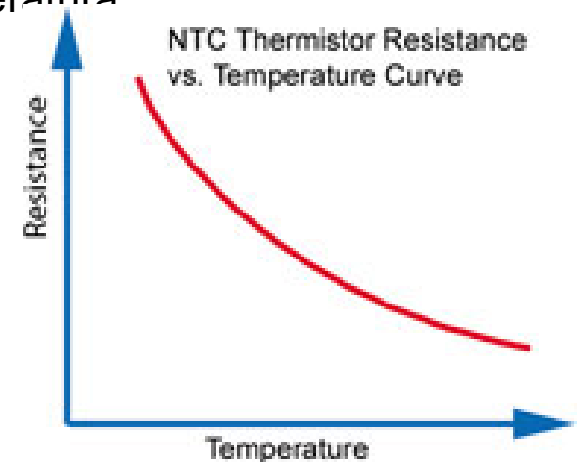
- Resistivos:
  - A resistência elétrica varia de acordo com a variável medida.

## Termistores:

- Também conhecidos como termômetros RTD (*Resistance Temperature Detectors*).
- São formados por material semicondutor óxido-metálico
- Temperatura  $\Rightarrow$  resistência elétrica
- Positivos (*PTC – Positive Temperature Coefficient*): elevação do valor da resistência com o aumento da temperatura (platina)
- Negativos (*NTC – Negative Temperature Coefficient*): diminuição da resistência com o aumento da temperatura (cerâmica)

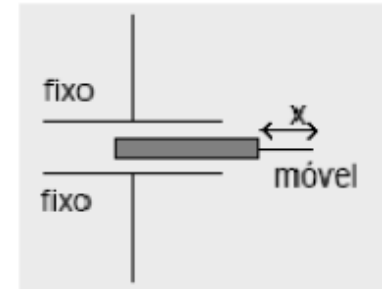
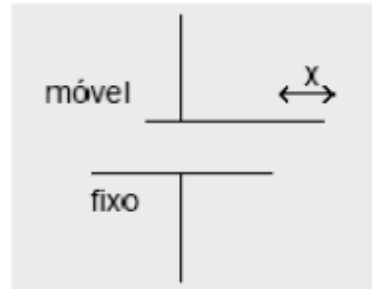
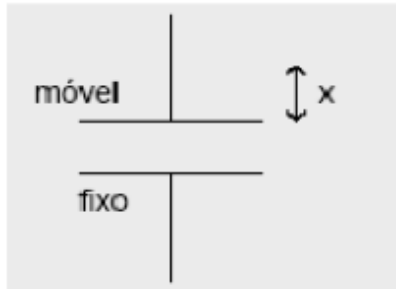
$$R(T) = R_0 \left[ 1 + A(T - T_0) + B(T - T_0)^2 \right]$$

$$R(T) = R_0 \exp \left[ \beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]$$



# Sensores Elétricos

- Capacitivos:
  - Variação da capacitância por alteração no posicionamento dos eletrodos ou por alteração do dielétrico.



Fonte: material de aula dos profs. Nunes, Marcílio e Larissa – Poli/USP

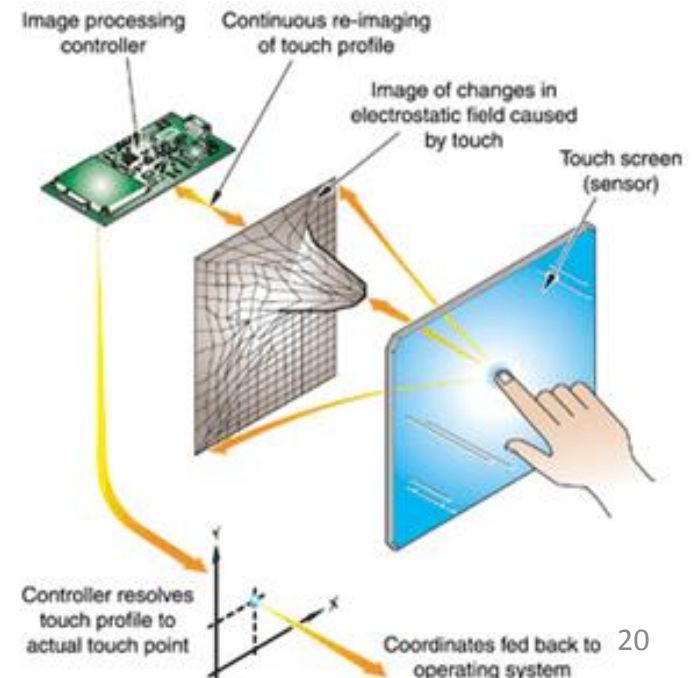
**Posição ou toque:** a capacitância é função da área das placas  $A$ , da constante dielétrica do meio  $K$  e da distância entre as placas  $d$ .

Posição  $\Rightarrow$  capacitância

$$C = \frac{kA}{d}$$

A variação na capacitância é convertida em desvio na frequência de um oscilador ou em desvio de tensão numa ponte.

Aplicações: *touch screen*



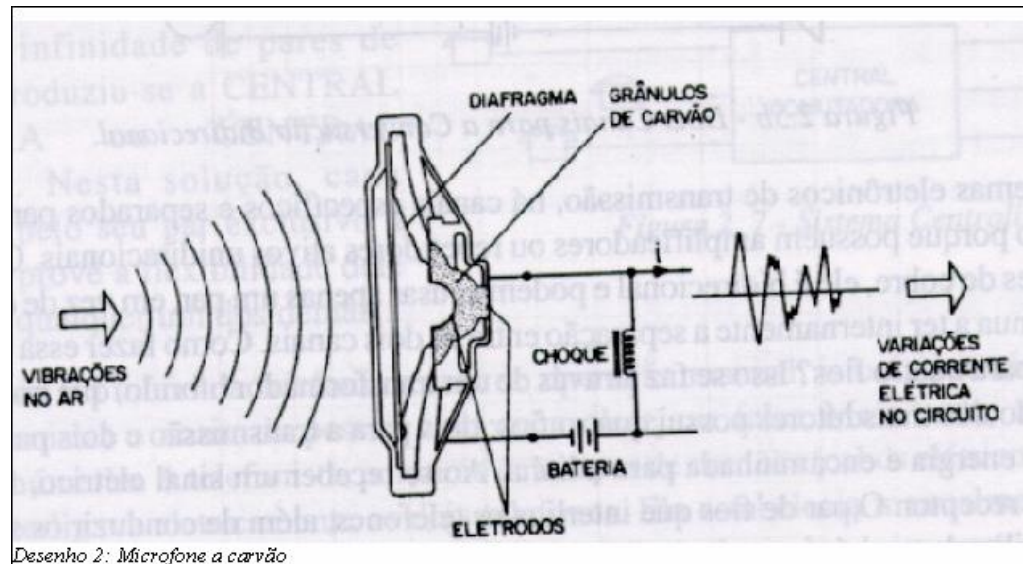
# Sensores Elétricos

- Capacitivos:
  - Variação da capacitância por alteração no posicionamento dos eletrodos ou por alteração do dielétrico.

**Som:** um diafragma vibra em função da frequência e da amplitude das ondas sonoras incidentes (constituindo um dos eletrodos do capacitor). A vibração do diafragma induz uma variação na capacitância, cujo sinal é posteriormente processado e amplificado eletronicamente.

Pressão sonora  $\Rightarrow$  capacitância

Aplicações: microfone de eletreto (usado em escutas)



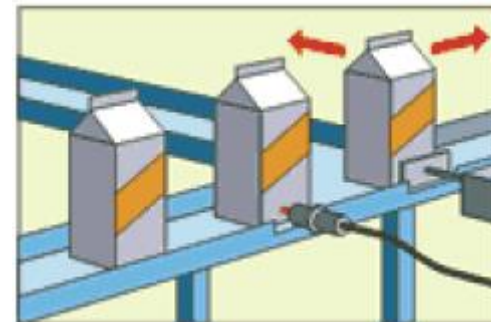
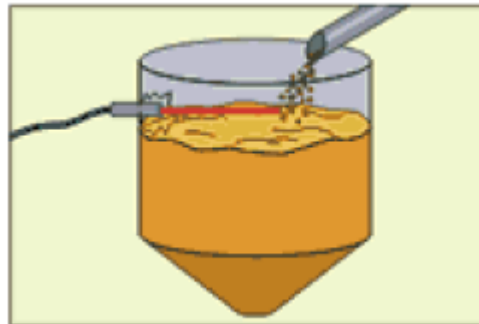
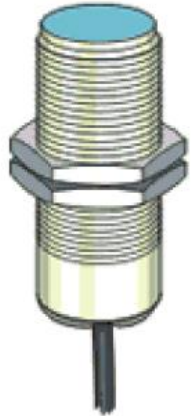
# Sensores Elétricos

- Capacitivos:
  - Variação da capacitância por alteração no posicionamento dos eletrodos ou por alteração do dielétrico.

**Deslocamento:** ocorre uma variação linear da constante dielétrica do material do capacitor de acordo com o deslocamento do objeto cujo movimento se pretende medir.

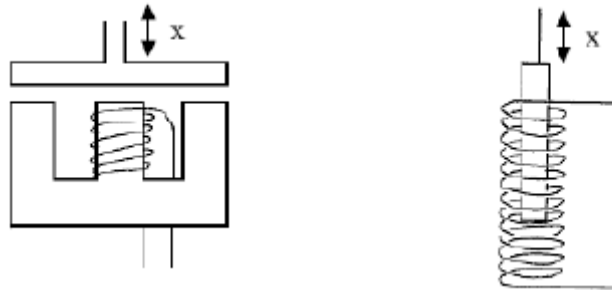
Deslocamento  $\Rightarrow$  capacitância

Aplicações: detectar aproximação de materiais orgânicos, plásticos, líquidos, madeiras, papéis, metais, etc.



# Sensores Elétricos

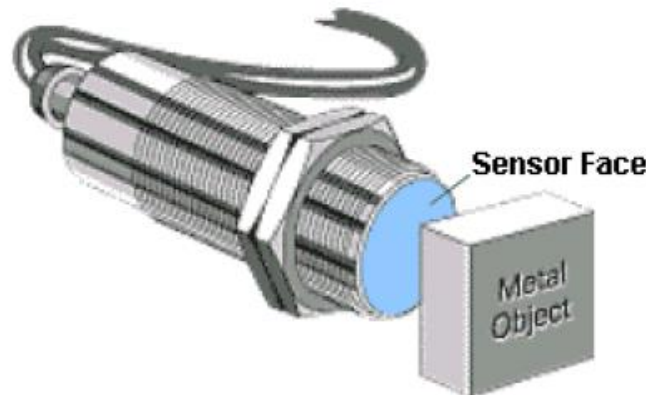
- Indutivos:
  - Quando uma corrente percorre a bobina do indutor, um campo magnético é formado. Consiste na variação da auto-indução de uma bobina por variação externa do fluxo ou variação do núcleo.



Fonte: material de aula dos profs. Nunes, Marcílio e Larissa – Poli/USP

**Deslocamento:** utilizados para detectar a aproximação de **peças metálicas**.

Deslocamento  $\Rightarrow$  indutância

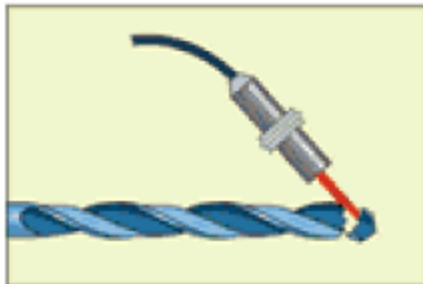




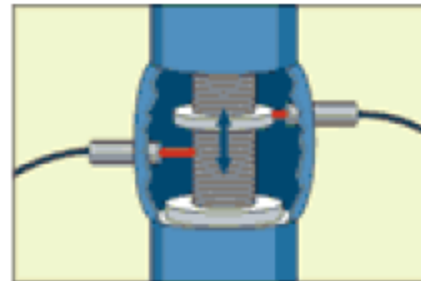
# Sensores Elétricos

- Indutivos:
  - Quando uma corrente percorre a bobina do indutor, um campo magnético é formado. Consiste na variação da auto-indução de uma bobina por variação externa do fluxo ou variação do núcleo.

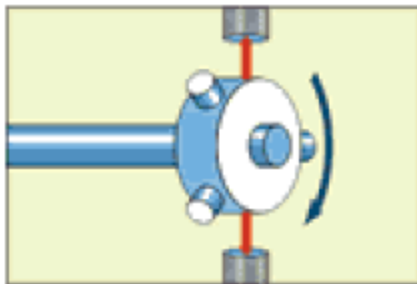
## Aplicações:



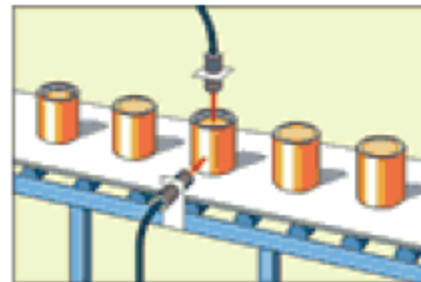
**Deteção de Broca Quebrada**



**Deteção de Válvula totalmente aberta ou fechada**



**Controle de direção**

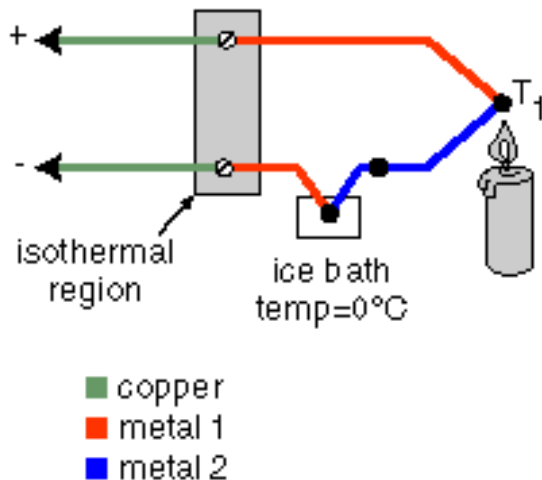


**Contagem e detecção**

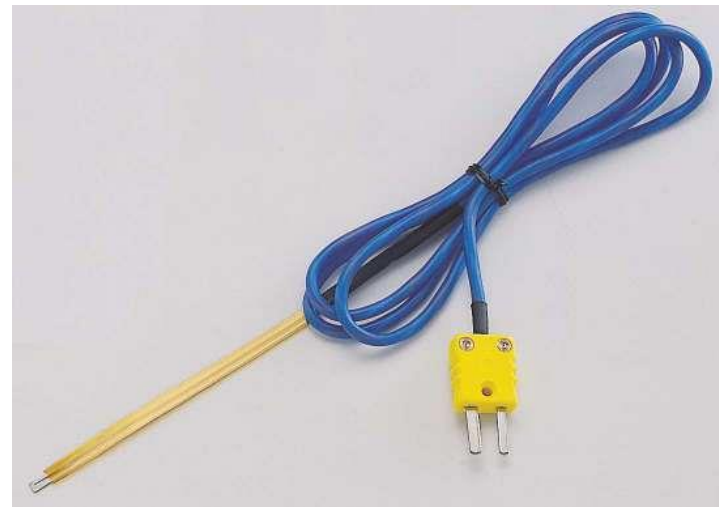


# Sensores Ativos Termoeletricos

- Termopares (TC – *Thermocouples*):
  - Usam o efeito de *Seebeck*: se dois condutores metálicos A e B (metais puros ou ligas) formam um circuito fechado e portanto duas junções A e B, aparecerá uma força eletromotriz (FEM) termoeletrica e uma corrente percorrerá o circuito se cada uma das junções estiver a temperaturas  $T_1$  e  $T_2$  distintas.
  - Essa FEM é facilmente detectável por um milivoltímetro ligado à junta de referência (também chamada de junta fria).
  - Temperatura  $\Rightarrow$  tensão elétrica
  - Vários tipos, definidos de acordo com os materiais usados: T, E, J, K, S, R, B

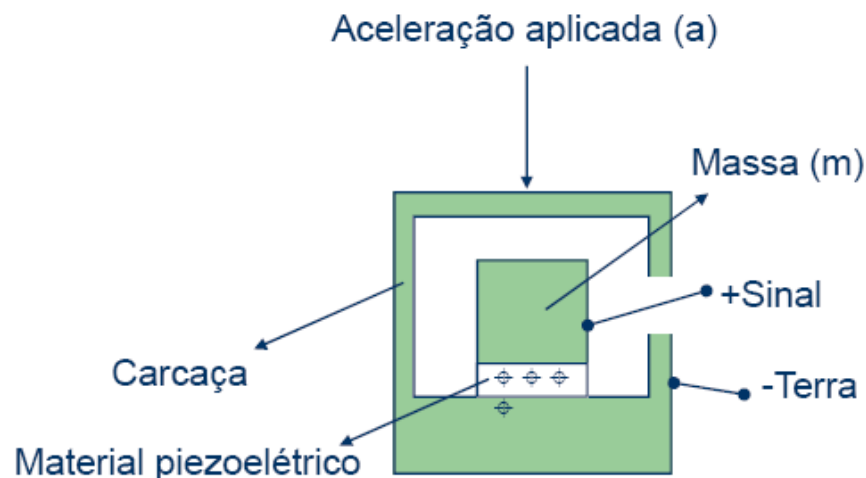


**Termopar tipo K - Cromel (+) x Alumel (-)**



# Sensores Ativos Piezoelétricos: Geração de Carga Elétrica

- Piezoelétricos
- Alguns cristais desenvolvem cargas elétricas em sua rede cristalina quando submetidos a um esforço mecânico.
- A carga gerada tem valor muito baixo, necessitando de um circuito de amplificação e condicionamento de sinal.
- Força  $\Rightarrow$  carga elétrica (ou vice-versa)



Acumulação de partículas carregadas no cristal.

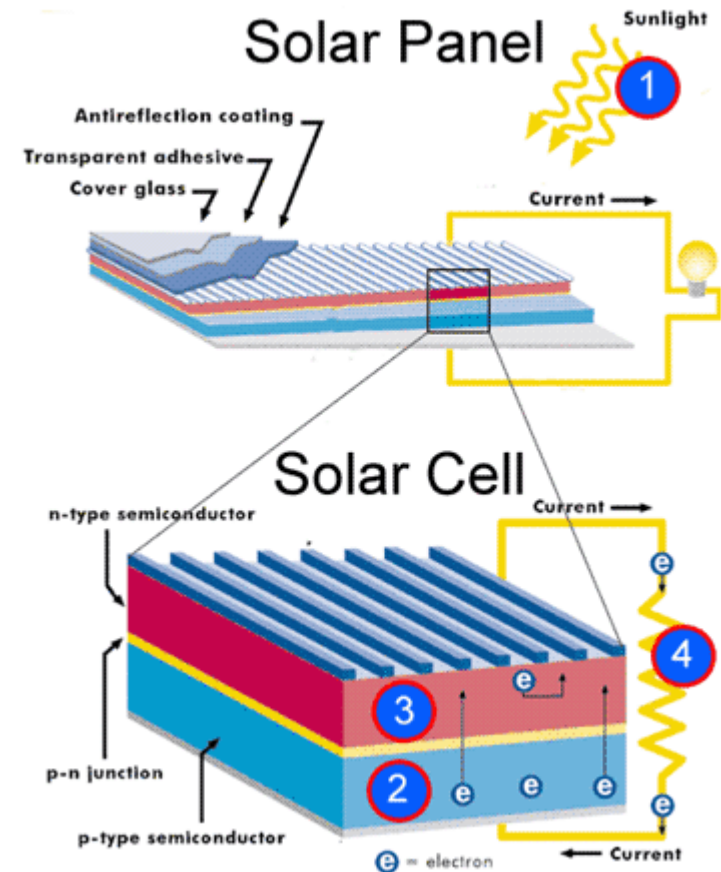
$$++ \propto F \propto a$$

O sinal elétrico de saída é  
proporcional (Sensibilidade)  
à aceleração aplicada



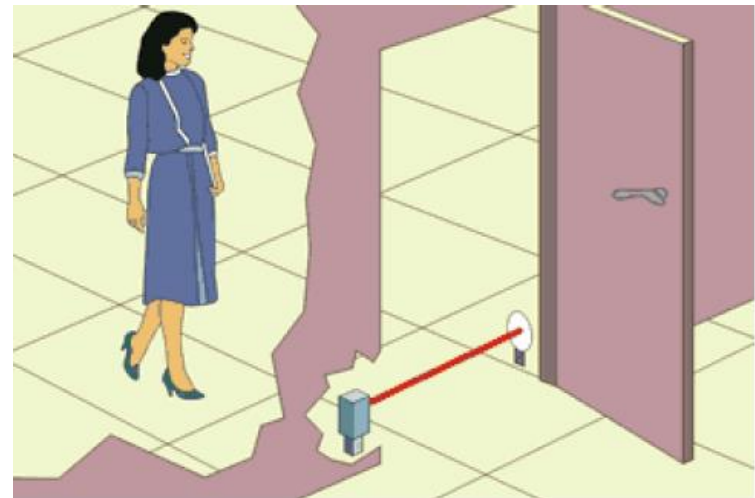
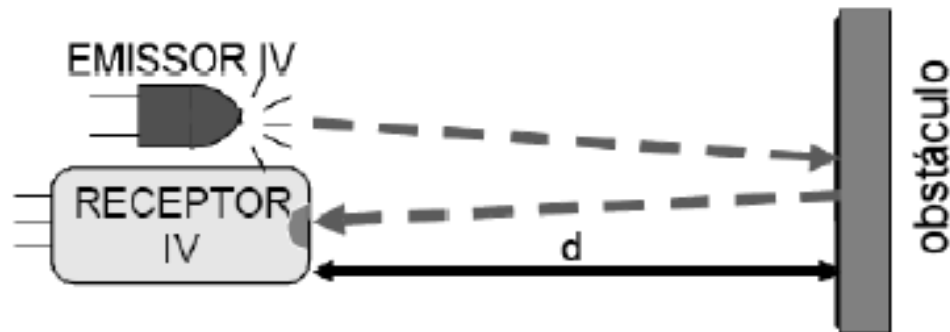
# Sensores Ativos Fotoelétricos

- Efeito Foto-Voltaico:
  - Geração de tensão elétrica de saída em resposta à incidência de luz.
  - Energia luminosa  $\Rightarrow$  tensão elétrica
  - Aplicações: painéis solares



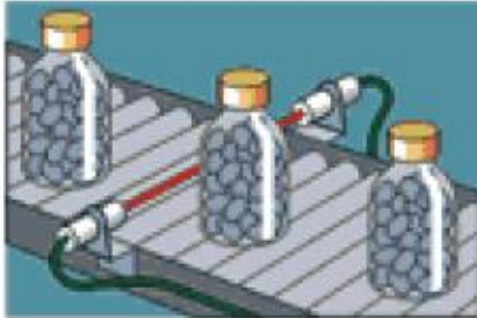
# Sensores Ópticos

- Também conhecidos como sensores fotoelétricos, manipulam a luz de forma a detectar a presença de objetos.
- Sensor óptico de proximidade: detecta a proximidade de um objeto (obstáculo) pela sua influência na propagação de um sinal óptico (luz infravermelha).
- Distâncias mensuráveis  $\cong 5\text{-}100\text{ cm}$



# Sensores Ópticos

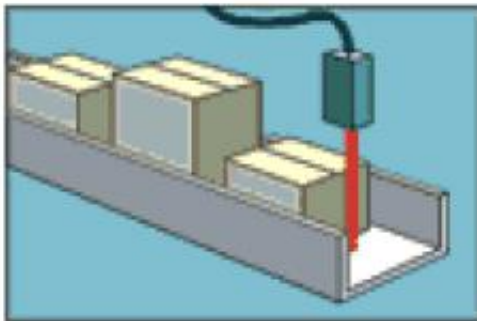
- Aplicações:



**Verificação de  
Objetos em  
Vidros**



**Contagem de  
Garrafas**



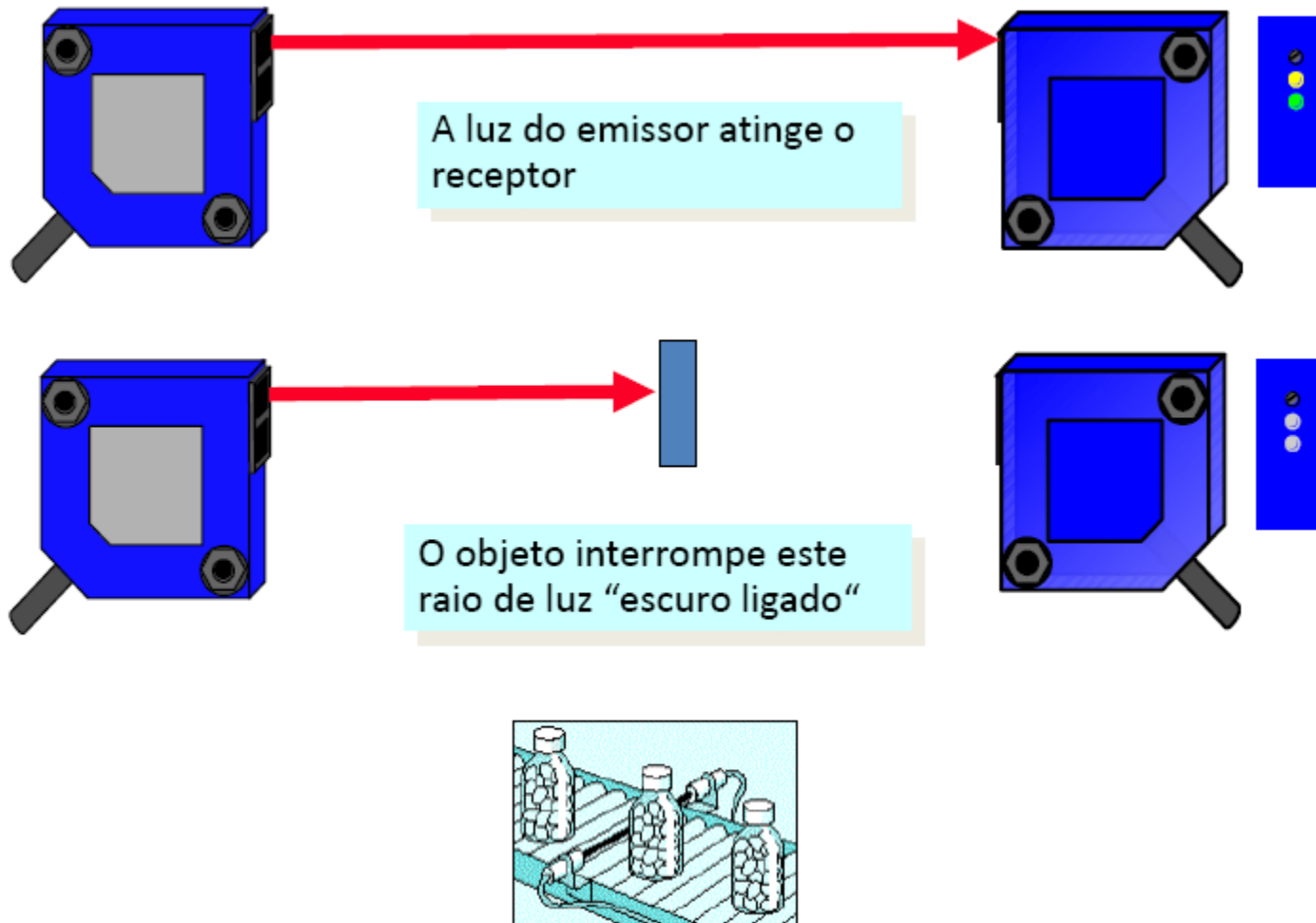
**Detecção de  
altura**



**Lavação de  
Carros**

# Sensores Ópticos

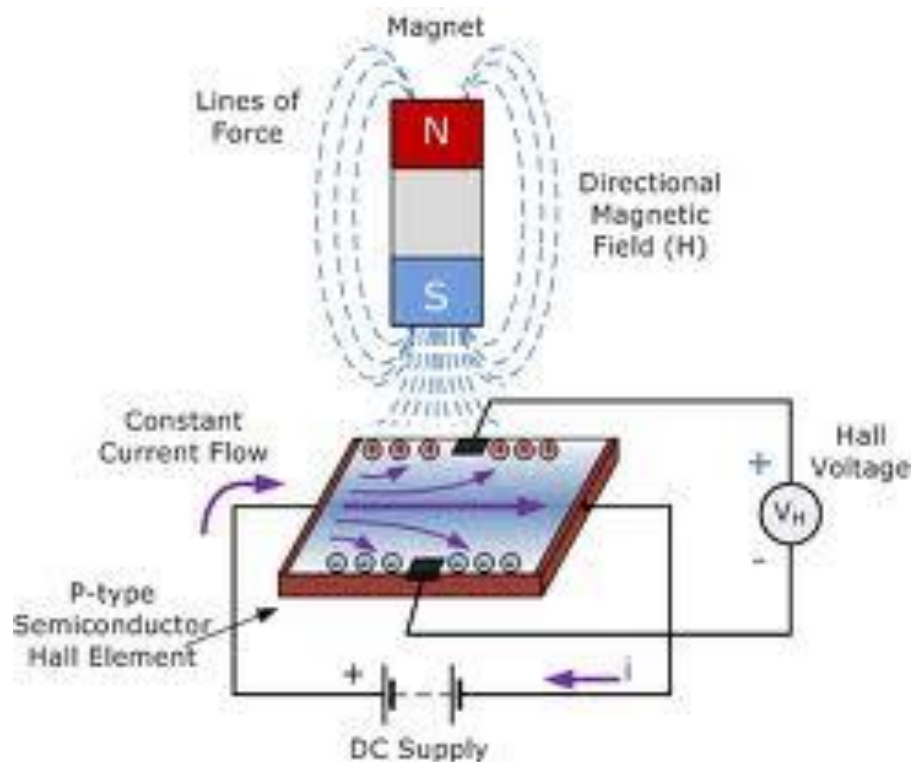
- Aplicações:





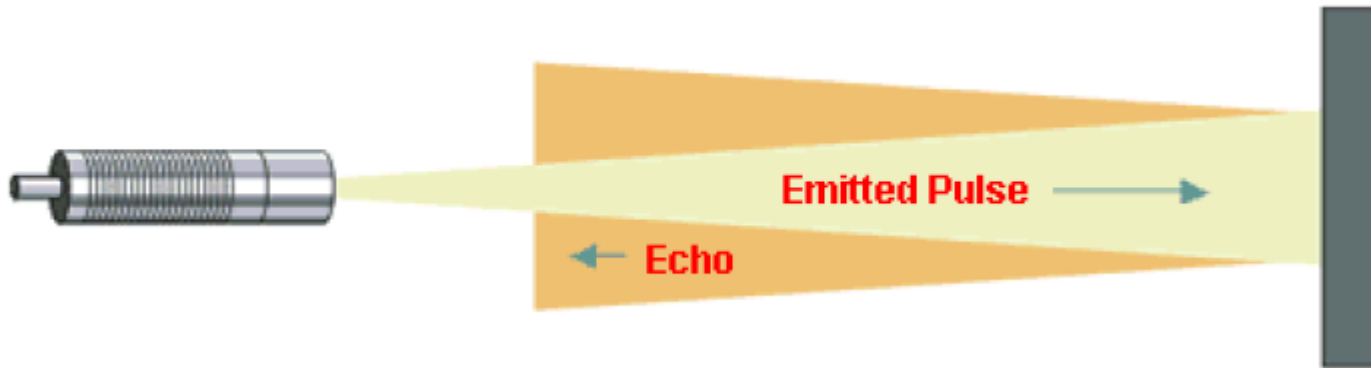
# Sensores Magnéticos

- Sensor que é acionado quando entra em contato com um campo magnético.
- Geralmente é constituído por um material ferro-magnético, ou seja, Ferro, Níquel, etc.
- Efeito *Hall*: geração de uma diferença de potencial proporcional a um campo magnético



# Sensores Acústicos

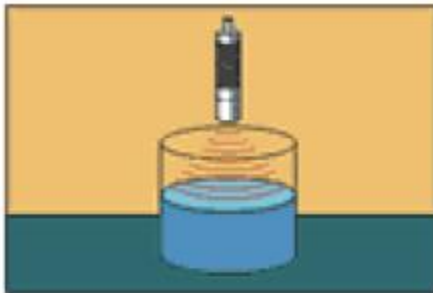
- Também conhecidos como sensores ultrasônicos.
- Transmissão e recepção de onda sonora de alta frequência que pode ser refletida ou interrompida por um objeto a ser detectado.
- Princípio de funcionamento: o emissor envia impulsos ultrasônicos sobre o objeto analisado. As ondas sonoras voltam ao detector depois de um certo tempo proporcional à distância.



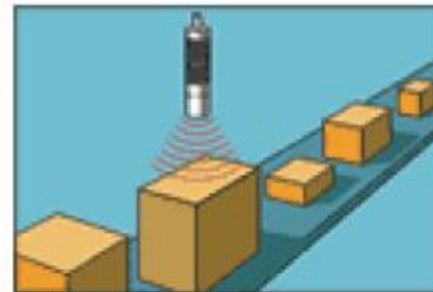


# Sensores Acústicos

- Aplicações:



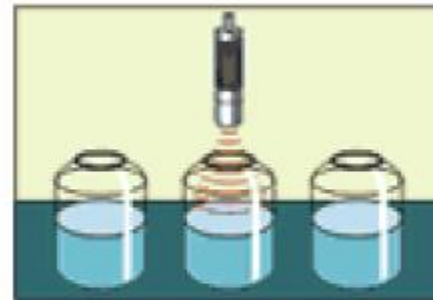
**Medição de Nível**



**Controle de  
Altura de Objetos**



**Anti-Colisão**

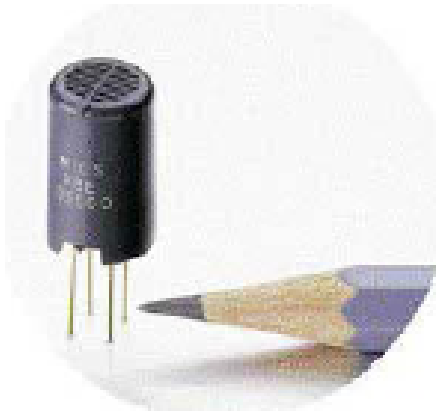


**Nível em pequenos  
frascos**



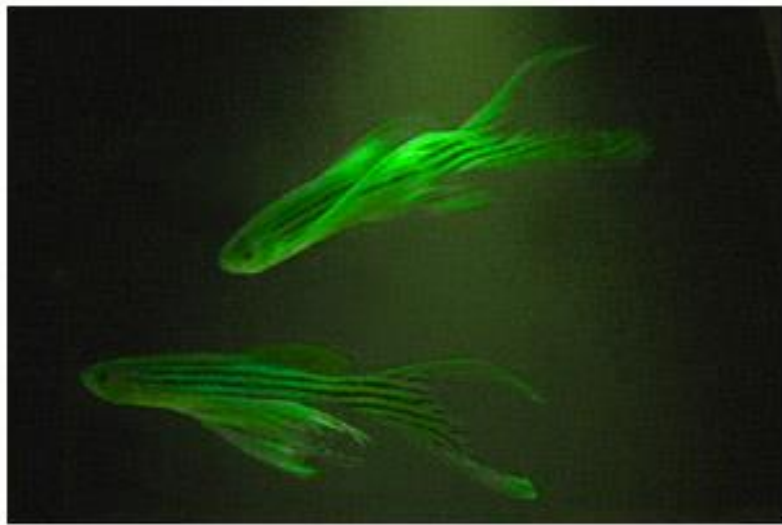
# Sensores Químicos

- Exemplo: detector de CO
  - CO interage com  $O_2$  do sensor
  - Libera  $CO_2$  e elétrons que se impregnam no filme sensor aumentando sua condutividade e diminuindo sua resistência



# Sensores Biológicos

- Luciferase: enzimas em certos organismos luminosos são usadas para detectar níveis (bem baixos) de metabólicos.
- Energia química  $\Rightarrow$  Energia luminosa (bioluminescência)



# Atuadores

- São responsáveis pela **variação de parâmetros do processo** a ser controlado.
- Recebem um sinal proveniente do controlador e agem sobre o sistema controlado.
- Praticamente todas as ações físicas realizáveis por um operador humano sobre um processo podem ser realizadas (com maior precisão) por um atuador controlado eletronicamente.
- Principais atuadores:
  - Motores elétricos: controle de movimentos de rotação e deslocamentos;
  - Válvulas hidráulicas e pneumáticas: controle de fluxo;
  - Bombas: controle de fluxo e nível;
  - Resistências elétricas: controle de aquecimento;
  - Compressores: controle de refrigeração/climatização.

# Motores Elétricos

- Controle de movimentos de rotação e deslocamentos.



Motor de Indução (assíncrono)



Motor Síncrono



Motor de Corrente Contínua



Motor de Passo

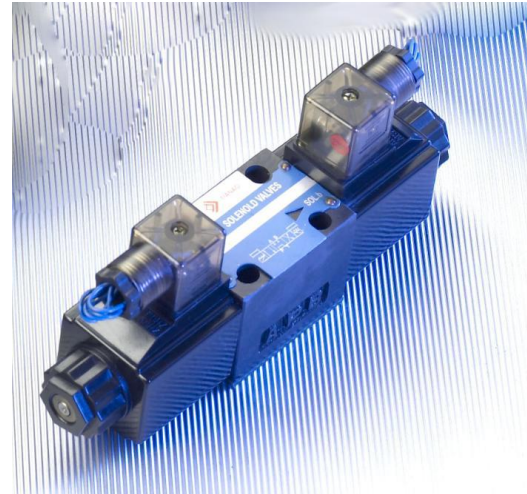


# Válvulas Hidráulicas e Pneumáticas

- Controle de fluxo. Podem ser acionadas mecanicamente ou eletricamente.



Válvula Pneumática

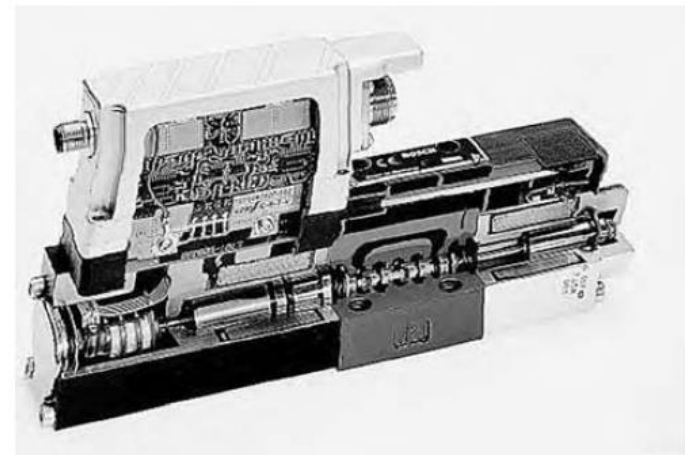


Válvula Hidráulica



Eletroválvula Pneumática

Válvula Pneumática



Válvula proporcional de fluxo (Bosch)

# Bombas

- Controle de fluxo e nível.



Bomba de vácuo pneumática



Bomba Centrífuga



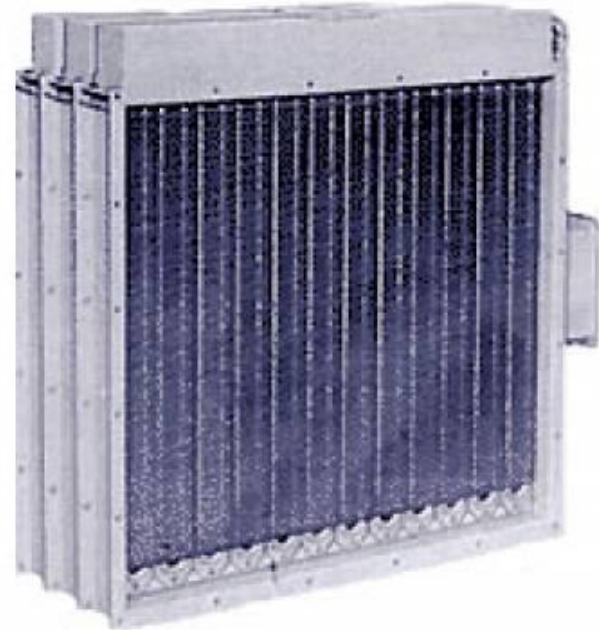
Motobomba

# Resistências Elétricas

- Controle de aquecimento.



Resistências Elétricas



Aquecedor Industrial



# Compressores

- Controle de refrigeração/climatização.



Compressor para refrigeração



Compressor de Ar

# Leitura Complementar

- Fornecedores de Sensores e Atuadores
  - <http://www.nei.com.br/area/empresas+sensores+transdutores+transmissores.html>
- Sensores de Visão
  - [www.pollux.com.br](http://www.pollux.com.br)
- Projeto Construindo Cidades Inteligentes (CIA2)
  - <http://www.nr2.ufpr.br/~cia2/>

# Bibliografia

- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. Volume 2. LTC, 2007.
- THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. **Sensores Industriais – Fundamentos e Aplicações**. 5ª ed. São Paulo: Érica, 2005.
- Material de aula do prof. Marcelo Coelho – Instituto Federal – Santos/SP:  
<http://www.gmsie.usp.br/Downloads/SelByCat.aspx?Category=PMR-2470>.
- Material de aula dos profs. Nunes, Marcílio e Larissa – Poli/USP:  
<http://marcelocoelho.net/SENAI-PSDI.htm>
- Material de aula do prof. Hélio Padilha -
- <http://www.automacaoindustrial.com/instrumentacao/index.php>