



I.S.T.-DEM  
Secção de Sistemas  
jan. 1994. / mar.2002

# Sensores e Actuadores

J.R. AZINHEIRA

**Sensores e Actuadores:** duas facetas do tema conversão de sinal, no caminho unindo (um)a realidade física e o seu controlo automático.

No mundo da instrumentação e do controlo, os sensores e os actuadores são os olhos e as mãos do sistema. Eles não só lhe são indispensáveis como elo de ligação, como definem as capacidades e limitações da sua acção. Os diversos tipos de conversores permitem adaptar a linguagem dos vários componentes envolvidos, por forma a que possam comunicar.

A diversidade de informações susceptíveis de interessar um processo de controlo, a variedade e a constante evolução das soluções tecnológicas tornam impossível fornecer uma lista exaustiva ou definitiva dos sensores ou dos actuadores. Na realidade, nem será este o objectivo, mas sim, através da própria diversidade, fornecer comparações e soluções alternativas, concretizando as necessidades do controlo automático.

Seleccionando um leque de grandezas físicas dignas de interesse para o engenheiro, são apresentados os sensores que lhes dão acesso e a sua problemática específica. A grandeza final fornecida pela **cadeia de medida** é ou eléctrica analógica ou digital, a ser tratada por um computador, um autómato ou, genericamente, um microprocessador. Sempre que possível, são fornecidos exemplos reais.

A **cadeia de actuação** não é menos diversificada mas permite ser apresentada de uma forma mais sintética.

## 1.A CADEIA DE MEDIDA

### 1.1.instrumentação

Para qualificar o mundo que o rodeia e expressar noções de tamanho, de distância, de peso... o homem sentiu a necessidade de estabelecer comparações, primeiro com a experiência comum, depois com referências reconhecidas por todos, que o ajudaram a responder às perguntas: grande como?, longe como?, pesado como?...

Nasceram assim unidades e escalas de medidas que permitiam avaliar de forma quantitativa, objectiva e concisa, as grandezas físicas perceptíveis pelo homem.

Medir era comparar com a escala apropriada e associar um número à grandeza observada –note-se aqui que uma das definições do número real é a medida de um comprimento.

Com o aperfeiçoamento da descrição matemática das leis da física foram-se estabelecendo relações entre as diversas grandezas e criaram-se sistemas completos e coerentes de unidades cada vez melhor definidas, chegando-se em particular ao actual Sistema Internacional (SI). No sentido contrário, a metrologia também motiva, fundamenta e demonstra a evolução da ciência, estabelecendo o necessário elo entre o mundo da experiência e o discurso teórico.

Mas para medir, para associar um número a uma quantidade dada supõe-se que esta seja perfeita e univocamente conhecível. Isso seria a situação ideal. Na realidade o processo da medição não é tão simples, envolve frequentemente etapas diversas e carece sempre de um certo grau de incerteza (uncertainty).

*A noção de medida não vai sem as noções de erro (erro de medida ou erro admissível), de fiabilidade e de repetibilidade.*

Antes de toda e qualquer medição, além de se determinar claramente o que se pretende medir –e nem sempre será assim tão evidente–, é indispensável definir quais serão as unidades e a precisão (accuracy) pretendida, é aconselhável fazer-se uma avaliação do erro final.

#### **1.1.1.definições**

Como toda a ciência, a metrologia desenvolveu uma nomenclatura própria, para caracterizar o acto da medição e os erros a ele associados:

medir é atribuir a uma grandeza física reconhecida um valor numérico  $x_m$  usando uma escala adequada.

o valor exacto (convencional): devido às limitações dos instrumentos e de acordo com as próprias definições das unidades físicas, o valor exacto que o *medir* pretende obter é inacessível e é substituído convencionalmente pelo valor  $x_c$  que seria medido com o melhor dos instrumentos disponíveis: esta é uma definição indubitavelmente empírica e susceptível de evolução, motivada por uma realidade imperfeitamente conhecida.

o erro é a diferença (algébrica ou em valor absoluto) entre o valor medido  $x_m$  e o valor exacto  $x_c$ :

$$.e_{abs} = x_m - x_c \quad \text{erro absoluto, na unidade da medida}$$

$$.e_{rel} = (x_m - x_c) / x_m \quad \text{erro relativo, geralmente em percentagem}$$

$$.e_{fe} = (x_m - x_c) / x_{max} \quad \text{erro (relativo ao) fim-de-escala, em percentagem}$$

a gama de medida é o intervalo da grandeza física no qual um instrumento pode medir –a gama de medida relativa será a comparação relativa entre valor mínimo e valor máximo medíveis.

a precisão (accuracy) de umas medidas ou de um instrumento é um majorante do erro absoluto.

a **resolução** indica a capacidade de diferenciação de duas medidas próximas: é o menor valor  $dx_m$  para o qual a leitura de  $x_m + dx_m$  difere de  $x_m$ ; é muitas vezes erradamente confundida com o último dígito do instrumento.

a **sensibilidade** ou por vezes factor de escala estabelece a relação entre uma variação à entrada do instrumento e a variação por ele indicada.

a **repetibilidade** e a **reproducibilidade** são duas qualidades essenciais descrevendo a fiabilidade de uma medida, ou seja assegurando o seu valor intrínseco, independente de como foi obtido e unicamente função da grandeza física; respectivamente:

–a mesma medição, nas mesmas condições fornece o mesmo valor;

–outra medição, com outro princípio, fornece o mesmo valor;

a **calibração** é a determinação experimental da relação valor exacto-valor medido dada pelo instrumento, a verificação da sua precisão e da sua fiabilidade, sendo o valor exacto determinado com o apoio de um instrumento de precisão superior garantida.

### 1.1.2.a cadeia de medida ideal

Se originalmente a comparação visual e mecânica foi o instrumento essencial senão único da medição, a tecnologia veio introduzir ligações primeiro eléctricas e depois digitais, possibilitando a circulação de uma maior quantidade de informação, numa forma mais segura e mais precisa, permitindo uma utilização mais ambiciosa da medida.

Hoje em dia a função da medição não é meramente descritiva e ela é uma função imprescindível para todo processo automatizado.

A figura a seguir apresenta o esquema de funcionamento de um processo controlado por computador.

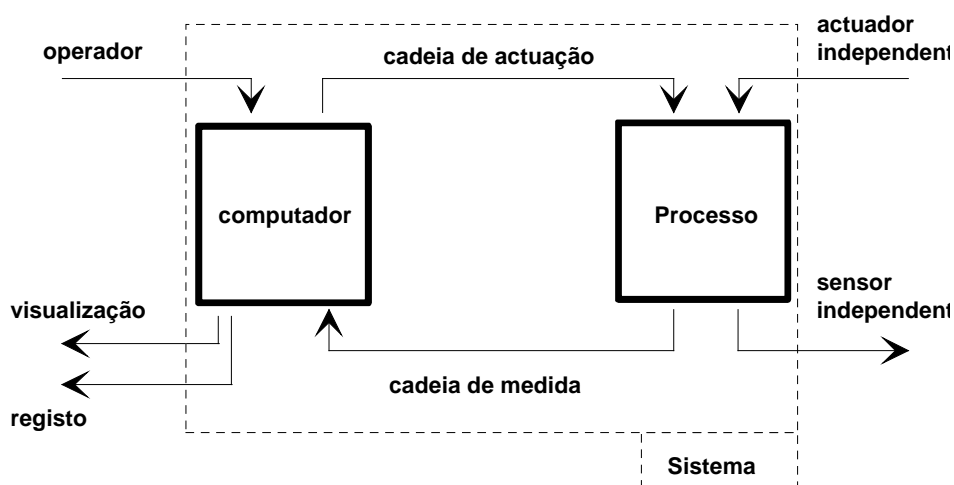


fig. um processo automatizado

O computador está no centro de um sistema completo recebendo, armazenando, processando e fornecendo informação automaticamente.

A cadeia de medida é aquela que traz a informação até ao computador, ao microcontrolador ou ao microprocessador segundo o caso.

Com duas finalidades:

- visualização, registo, análise de alguns parâmetros do processo, em tempo real ou *a posteriori*;
- obtenção de dados para a cadeia de actuação, para o controlo do processo.

A **cadeia de medida ideal** será assim composta pela sucessão de:

1. um parâmetro a medir (measurand), uma grandeza física ideal, pura, isenta de extra-informação;
2. um sensor ideal, exactamente e instantaneamente sensível ao parâmetro a medir, fornecendo directamente um sinal adequado a
3. um sistema de aquisição de dados e/ou a um computador.

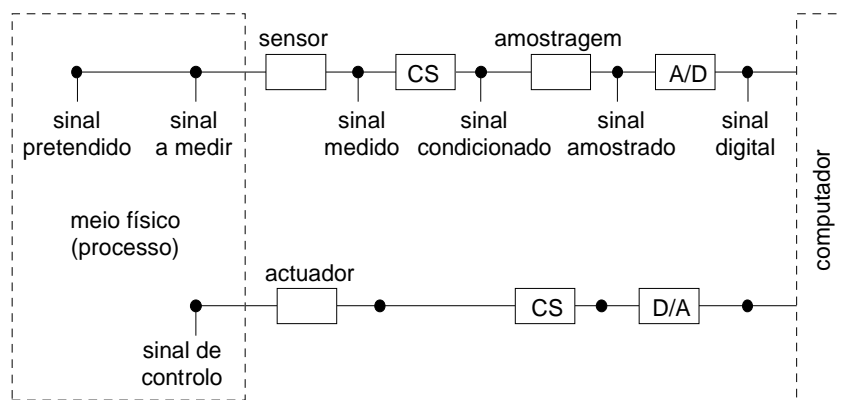


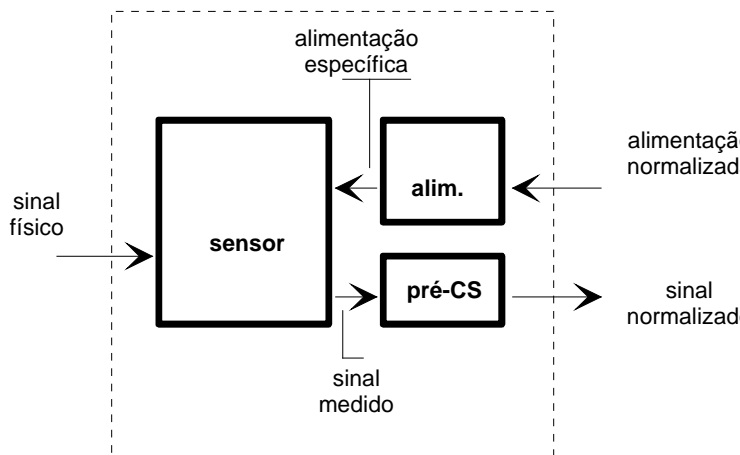
fig. cadeias de medida e de actuação

### 1.1.3.a cadeia de medida real

Devido às imperfeições da realidade e dos instrumentos disponíveis, a cadeia de medida real é composta de um maior número de itens operando em seqüência –e todos eles manipulam e alteram o sinal e introduzem no sinal de medida algum ruído e/ou algum atraso:

- i) O parâmetro a medir nunca está disponível isoladamente e vem sempre acompanhado de uma quantidade variável de informação indesejada. É claro que a noção de ruído depende das circunstâncias e que o mesmo sinal pode ora ser considerado indesejável ora ser ele próprio a informação pretendida.
- ii) O princípio físico do sensor frequentemente não detecta o próprio parâmetro mas sim um seu testemunho e intermediário, relacionado com ele pelas leis e pelo modelo do meio observado. Saliente-se também que, não existindo sensor ideal, sempre haverá algum erro introduzido na detecção.
- iii) O condicionamento de sinal a montante do sensor deve ser considerado sob dois aspectos:
  - por um lado, pode ser uma forma de corrigir, adaptar um sinal às particularidades e características do sensor, tendo em conta a conseqüente alteração do sinal e procurando reduzi-la: um exemplo seria uma montagem que permitisse evitar casos de saturação pondo em perigo a integridade do sensor;
  - por outro lado, esquecer ou menosprezá-lo pode levar a resultados muito inferiores às capacidades do equipamento utilizado: é em particular necessário cuidar as ligações entre um sensor (como um acelerómetro) e a estrutura que o recebe e verificar que nenhuma ressonância vem afectar as medidas.
- iv) O sensor propriamente dito é um engenho que transforma um sinal físico num sinal que na maioria dos casos é necessário condicionar, i.e. é necessário adequar a saída do sensor à entrada do sistema que o vai receber –de aquisição de dados tipicamente. Este condicionamento de sinal depende muito do tipo de sensor em causa, depende não só do tipo de saída que fornece (tensão contínua ou alternada, corrente, impedância...) mas também do tipo de medida que efectua e do princípio físico que utiliza. Para muitos sensores, outra fonte possível de ruído, esta não pertencendo de forma estrita à cadeia de medida, é a alimentação. Para facilitar a sua inserção no meio industrial, muitos sensores modernos já são vendidos com um módulo de alimentação e um módulo de pré-condicionamento de sinal standard. Por exemplo, sensores de posição LVDT (linear variable differential transformer) vêm acompanhados dum

conversor dc-ac para a alimentação e de um desmodulador e filtro de saída: obtém-se assim um sensor com alimentação e saída normalizadas em tensões contínuas.



**fig. um sensor com entrada e saída normalizadas**

v) Entre os vários tipos de condicionamento de sinal (CS) podem citar-se: amplificação, translação, filtragem em frequência, desmodulação, codificação, decodificação, conversão.

Se o CS pode trazer alguns inconvenientes (mudanças de fase ou não linearidades...) possivelmente significativas, ele é indispensável –por exemplo para cortar as frequências altas à entrada de um amostrador, e evitar assim o erro de *aliasing*.

A tendência actual é de transportar quando possível o tratamento do sinal para a fase digital e de só condicionar o que é mesmo impreterível.

De todas as formas, o CS corresponde a mais um elemento na CM introduzindo a sua própria função de transferência.

vi) O sinal analógico oriundo do CS é amostrado, seja via multiplexagem, seja directamente num conversor analógico-digital (A/D) para finalmente ser recebido, adquirido pelo computador.

Esta última etapa corresponde igualmente a uma adaptação do sinal mas com características específicas: o sinal muda de forma e passa do domínio contínuo para o domínio discreto e numérico.

A sequência dos vários elementos da CM pode ser ligeiramente diferente da que acaba de ser apresentada. A CM pode ser mais curta, mas no essencial, este é o itinerário seguido pela informação no seu caminho desde o meio físico até ao seu gestor, o computador.

Quando várias medições, de um mesmo parâmetro em vários locais ou de vários parâmetros correlacionados são efectuadas em paralelo e em simultâneo, é necessário analisar as diversas cadeias de medida e adequar em particular os tempos de resposta.

Em resumo, do ponto de vista do sinal, a cadeia de medida real é uma cadeia de funções de transferência cujo produto, a função de transferência global, é objecto de calibração e fornece a relação entre o sinal físico e o sinal medido, i.e. a própria medida.

#### **1.1.4. erros e calibração**

A apresentação da Cadeia de Medida mete em evidência a cadeia de erros que lhe está irremediavelmente associada, a cadeia de ruídos introduzidos no sinal por cada elo da cadeia.

Estes erros, tanto individualmente como globalmente para toda a CM, podem ser classificados de diversas formas.

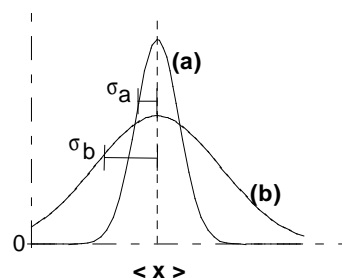
##### erros aleatórios e sistemáticos

**Erros aleatórios** são aqueles que são diferentes para várias medições nas mesmas condições.

Podem ser devidos a um parâmetro não controlado, a uma variação no tempo com período pequeno. São de forma genérica imprevisíveis e são tratados estatisticamente. Se for possível fazer um

grande número de medições, a distribuição dos valores medidos permite avaliar a qualidade da medida e a sua precisão (accuracy).

Por exemplo, se a distribuição é do tipo Normal ou Gaussiana, uma estimativa do valor é dado pela média  $\langle x \rangle$  e o desvio padrão ( $\sigma$ ) reflecte a imprecisão (uncertainty) da medida realizada.



para uma dist. Normal

$$|x - \langle x \rangle| < \sigma \quad 67\%$$

$$|x - \langle x \rangle| < 2\sigma \quad 95\%$$

fig. distribuições gaussianas de erros aleatórios

A forma da curva de distribuição é muito importante e pode até revelar que um sensor já não está operacional.

**Erros sistemáticos** são aqueles que se repetem para várias medições em condições idênticas.

Além das limitações possíveis do próprio sensor, entre as causas possíveis são de salientar:

- uma má definição do problema;
- uma má descrição físico-matemática da medição;
- a interferência, a perturbação causada pela inserção do sensor no meio em estudo –por exemplo, o sensor desvia o escoamento que pretende analisar, o sensor consome ou produz energia ;
- a influência de parâmetros exteriores, afectando o sensor –por exemplo a frequência de 50 Hz da rede eléctrica na Europa é uma fonte frequente de ruído:
- uma má colocação do sensor;
- maus procedimentos no processo de medição;
- não *linearidade* da resposta dum instrumento assumido como linear –um caso particular de não-linearidade é a *histerese*, fazendo com que uma medida depende da(s) medida(s) anterior(es);
- erro de quantificação, no conversor A/D;
- variação lenta de algum parâmetro, por desgaste, fadiga ou aquecimento –erro de origem parcialmente aleatória mas de consequências semelhantes às dos erros sistemáticos.

De modo genérico, estes erros podem ser tidos em conta, controlados ou corrigidos com a calibração dos instrumentos e da CM.

### erros estáticos ou dinâmicos

**Erros estáticos** são aqueles correspondendo a medições cujas condições não variam ou variam pouco durante a operação da medição.

**Erros dinâmicos** aparecem quando o meio observado evolui de forma dinâmica, devendo-se então considerar os tempos de resposta e os atrasos introduzidos na medição.

### a cadeia de erros

A distribuição dos erros ao longo das cadeias de medida e de actuação de um sistema qualquer obedece a alguma especificidade, de acordo com a função de cada elemento da cadeia.

Aos vários tipos de erros já apresentados é necessário acrescentar os erros relacionados com o sinal digital e o seu tratamento:

- i) o erro de sobreposição (aliasing) ao nível do amostrador, se a frequência de amostragem for inferior ao dobro da banda passante do sinal amostrado (frequência de Nyquist).

- ii) o erro de amostragem, seja ela simples ideal (Dirac), seja ela do tipo escalão (Sample and Hold), o sinal amostrado é sempre uma aproximação do sinal, aproximação melhor se a frequência de amostragem for mais elevada.
- iii) o erro de quantificação no conversor analógico-digital; este erro está associado à resolução  $\delta_q$  e é uma função decrescente do número de dígitos (bits) do conversor:

$$\delta_q = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2^n}$$

onde  $x_{\max}$  e  $x_{\min}$  são respectivamente os valores máximo e mínimo de entrada do conversor.

- iv) erros de truncatura ou de arredondamento no computador –entre outros tipos de erros da análise numérica.
- v) limitações e erros devidos a todos os atrasos (principalmente nos conversores e no computador) e ao não respeito da banda passante global do sistema e de cada um dos seus elementos.
- vi) erros de não-simultaneidade: se houver multiplexagem de vários sinais e se as constantes de tempo forem próximas do período de amostragem as amostras supostas simultâneas na realidade não o são e a comparação/relação entre os sinais pode ser alterada.

Por exemplo, se tivermos três sinais  $x(t)$ ,  $y(t)$  e  $z(t)$ , a amostra associada ao instante  $t$  do sinal  $x$  corresponde para  $y$  ao instante  $t+T/3$  e para  $z$  a  $t+2T/3$ : se para  $y$  a variação parece aceitável, para  $x$  e para  $z$  as variações entre  $t$  e  $t+2T/3$  são excessivas para as amostras serem consideradas simultâneas. Uma solução, cara talvez, consiste em introduzir um "Sample and Hold" (S/H) antes da multiplexagem para cada um dos sinais críticos, congelando os sinais nos seus valores para o tempo  $t$ .

|   |            |
|---|------------|
| Tipicamente as resoluções obtidas, relativas ao fim-de-escala, são: |            |
| • 8 bits  | : 0.4 %    |
| • 10 bits   | : 0.1 %    |
| • 12 bits   | : 0.025 %  |
| • 16 bits   | : 0.0015 % |

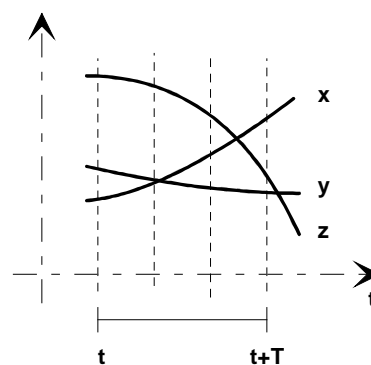


fig. erro de não simultaneidade

### calibração

A calibração de um instrumento ou de uma cadeia de medida é um processo que permite, com referências ou instrumentos de melhor qualidade (qualidade ela também aferida ou estável) averiguar e controlar a sua função de transferência, medir o desvio padrão dos erros aleatórios cometidos, corrigir a tabela de calibração e eventualmente a lei que dela se deduz –frequentemente a linearização da resposta. Normalmente uma ordem de grandeza é requerida entre as precisões do instrumento de calibração e a do instrumento calibrado.

Para sensores sujeitos a histerese é essencial proceder-se à calibração no sentido crescente e no sentido decrescente em toda a gama de medida.

A análise dos erros aleatórios para um ou vários valores permite verificar se o instrumento ainda está operacional, ainda oferece uma precisão adequada.

O historial das calibrações, que deve acompanhar o instrumento, indicará não só a sua boa manutenção mas também o possível desgaste das suas características.

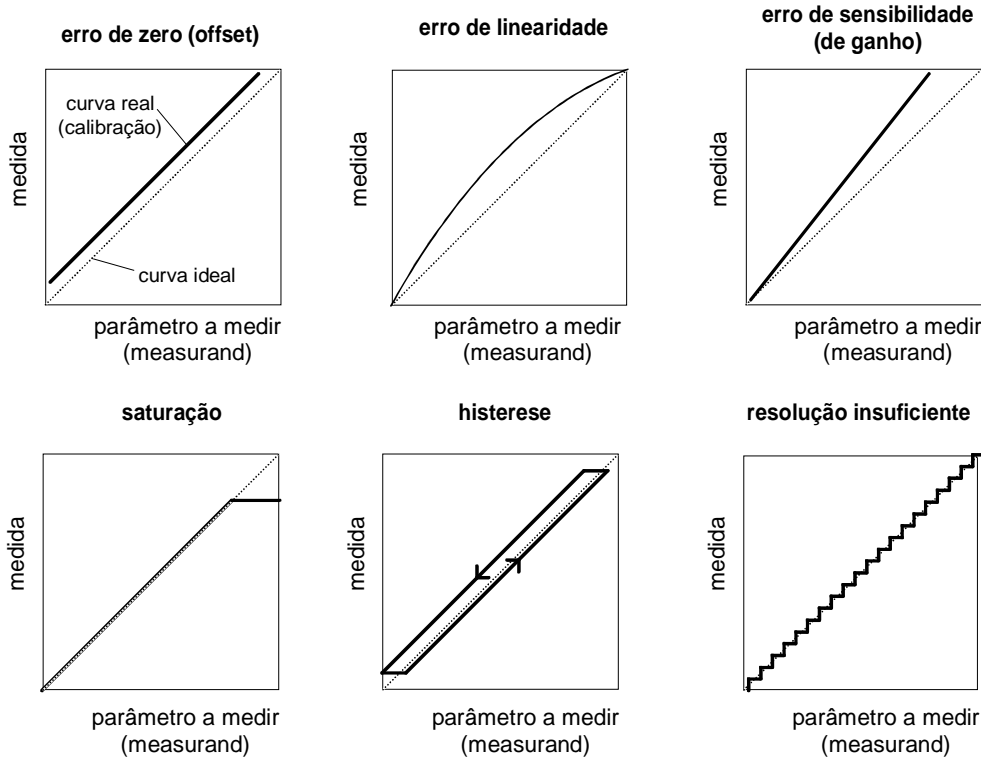
Para elementos sujeitos a erros dinâmicos é necessário obter-se a resposta em termos dinâmicos e, tipicamente, em função da frequência.

Sendo a calibração um processo moroso e delicado mas muito repetitivo, é aconselhável, quando possível, instalar-se um sistema de calibração automatizada gerida por computador, onde este faz variar a solicitação (entrada), recolhe a medição efectuada (saída), cria a tabela de entrada-saída de calibração, eventualmente compara com a anterior.

O rigor da calibração e dos procedimentos de calibração é fundamental e dele depende definitivamente a qualidade das medições efectuadas.



Alguns exemplos de erros detectáveis num processo de calibração são apresentados nas curvas seguintes.



### 1.1.5. protecção do ruído

A circulação da informação ao longo da cadeia de medida efectua-se essencialmente através de sinais eléctricos que é necessário proteger de eventuais interferências para não degradar a qualidade das medidas efectuadas –em particular quando se tratam de sinais de baixo nível, como sinal de termopares, extensómetros...

As fontes possíveis de ruído são múltiplas e nem sempre fáceis de identificar. Entre as possíveis regras simples para diminuir os riscos de ruído, citemos:

- assegurar os bons contactos nas várias ligações, ao longo dos cabos de sinal e de alimentação;
- cuidadosamente interligar os sinais de referência, massa ou terra (ground ou earth); as referências devem todas originar de um único ponto comum (numa montagem em estrela) e, se possível, separam-se as alimentações analógica e digital.

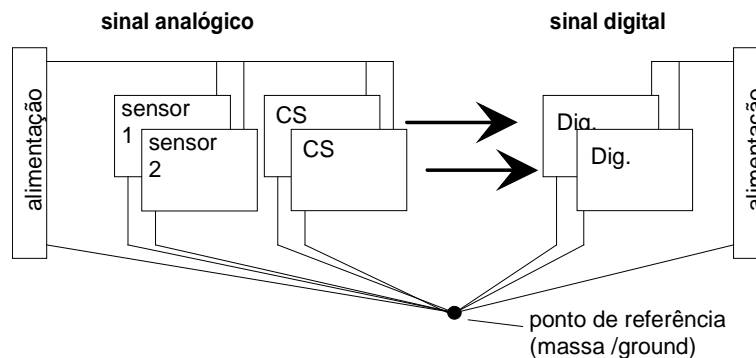


fig. ligações à massa separada, em estrela

- proteger sinais ou sensores críticos com blindagem (dos cabos e do condicionamento de sinal), sendo a blindagem ligada à massa –mas só num ponto, para não fechar o circuito (ground loop).

## 1.2.condicionamento do sinal analógico

### 1.2.1.introdução

O sinal fornecido por um sensor pode ser mecânico, químico, óptico mas geralmente será um sinal eléctrico, em corrente, carga, impedância ou, mais usual, em tensão contínua ou alterna (dc ou ac).

Os níveis de tensão podem ser inferiores a 1 Volt (para termopares ou extensómetros) e então são muito sensíveis ao ruído; sinais de nível mais elevado (de 3 a 30 V para os sinais digitais) são mais imunes ao ruído.

Dadas a variedade dos tipos de sinais fornecidos pelos sensores e as exigências do resto da CM, uma das mais frequentes operações em Condicionamento de Sinal consiste em corrigir/adaptar os níveis de tensão entre dois elementos sucessivos da CM.

Por exemplo o sinal em tensão fornecido por um termopar numa gama entre 0 e 20 mV para ser digitalizada num conversor de gama de entrada  $\pm 10$  V exige uma amplificação (x1000) e uma translação (zero shifting): esta função é realizada por um amplificador de tensão.

De forma genérica utilizam-se amplificadores para amplificar, atenuar, transladar, adaptar impedâncias, isolar... Existem não só amplificadores de tensão mas também amplificadores de corrente, amplificadores de carga, conversores corrente-tensão, conversores tensão-corrente, conversores carga-tensão...

O componente de base é em todos os casos o Amplificador Operacional –AmpOp.

### 1.2.2.amplificador operacional

Em síntese, um amplificador operacional é um amplificador de tensão linear de elevado ganho (A), cujo funcionamento pode ser esquematizado de acordo com a figura.

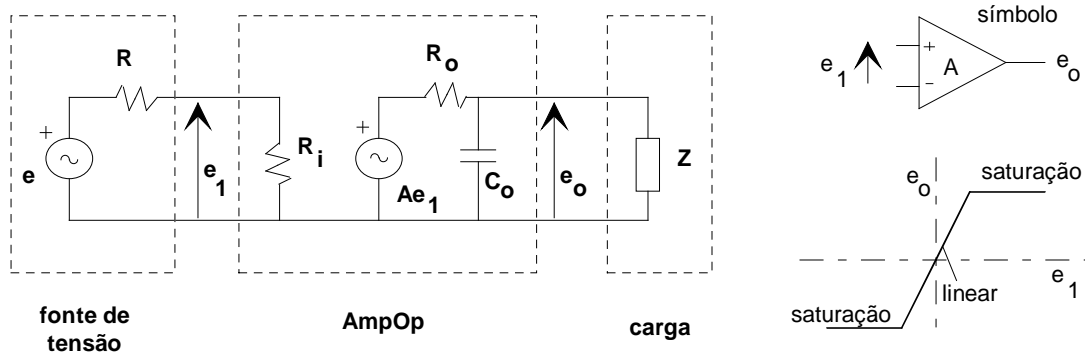


fig. o amplificador operacional

Na maioria dos casos o AmpOp pode ser aproximado pelo caso ideal (quando operando na zona linear).

Assim, a resistência de entrada  $R_i$  do amplificador deve ser grande e, inversamente, a resistência de saída  $R_o$  deve ser pequena –onde as resistências são comparadas com as impedâncias da fonte (R) e da carga (Z).

Obtém-se então uma tensão de saída ( $e_o$ ) proporcional à tensão da fonte (e).

$$e_1 \approx e \frac{R_i}{R + R_i} \approx e \quad R_i \gg R$$

$$e_o \approx A e_1 \frac{Z}{Z + R_o} \approx A e_1 \quad R_o \ll Z$$

$$\Rightarrow \boxed{e_o = A e_1}$$

### tratamento do sinal analógico

O AmpOp é um componente versátil de primeira importância para o condicionamento do sinal analógico e logo de toda cadeia de medida –ou quase.

As três configurações amplificadoras mais usuais do AmpOp com uma única entrada, são apresentadas na figura seguinte e têm respectivamente ganhos positivo, negativo e unitário –seguidor de tensão.

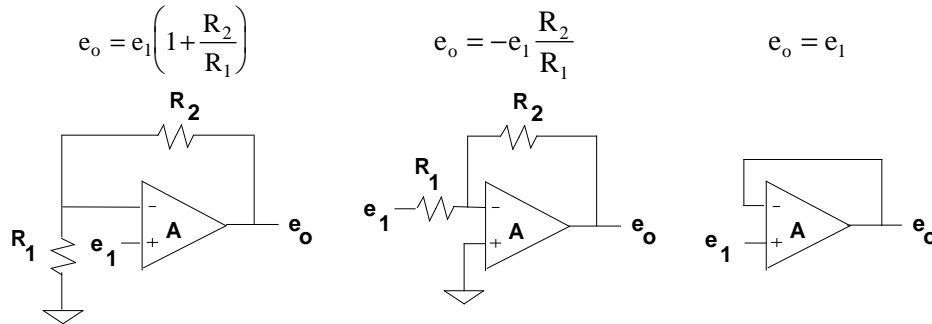


fig. configurações usuais com Amplificadores Operacionais

Além da simples amplificação, entre as possíveis utilizações do AmpOp em tratamento do sinal, citemos: somar sinais, fazer diferenças, inverter, derivar, integrar, comparar, rectificar...

|  |   |
|--|---|
| <p><b>somador</b></p>                  | <p><b>subtrator</b></p>                     |
| <p><b>inversor</b></p>                 | <p><b>derivador</b></p>                     |
| <p><b>integrador</b></p>               | <p><b>comparador</b></p>                    |
| <p><b>comparador com histerese</b></p> | <p><b>rectificador de onda completa</b></p> |

configuração diferencial

Em configuração diferencial as duas entradas recebem dois sinais a subtrair.

Uma propriedade importante é neste caso a capacidade de distinguir os dois sinais apesar do seu "modo comum"

$$e_{cm} \approx \frac{e_1 + e_2}{2}$$

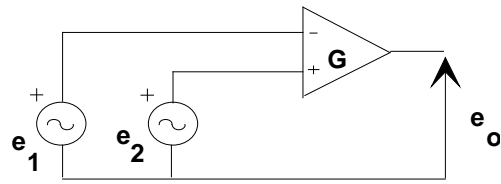
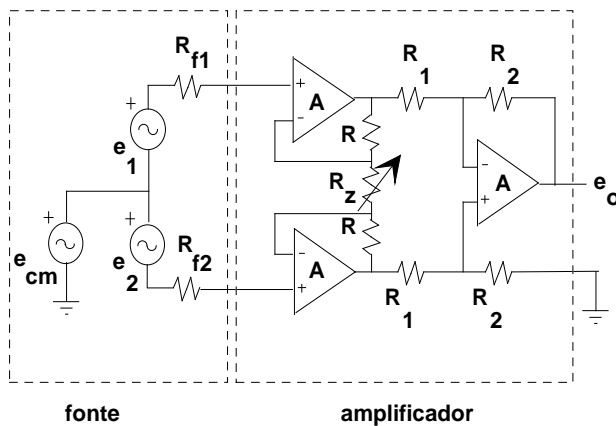


fig. amplificador diferencial

Esta propriedade (Common Mode Rejection Ratio –CMRR) é geralmente quantificada em decibéis:

- o ganho em modo comum  $A_{cm}$  é obtido quando  $e_1 = e_2 = e_{cm}$  ;
- o ganho diferencial  $A_d$  é obtido para  $e_{cm} = 0$  ;
- finalmente  $CMRR_{dB} = 20 \log_{10} (A_d / A_{cm})$ .

Num amplificador diferencial de instrumentação (que inclui 3 AmpOp's), a simetria entre as duas entradas é assegurada no primeiro andar de amplificação e consegue-se uma melhor diferenciação.



$$e_o = \left(1 + 2 \frac{R}{R_z}\right) \frac{R_2}{R_1} (e_2 - e_1)$$

fig. amplificador de instrumentação

Um caso importante onde é necessário ter cuidado com a tensão de modo comum  $e_{cm}$  é quando na cadeia existem dois pontos ligados à terra: os dois pontos têm normalmente potenciais diferentes e entre eles a tensão  $e_{cm}$  induz uma passagem de corrente pelo circuito de blindagem e, consequentemente, ruído no sinal de medida.

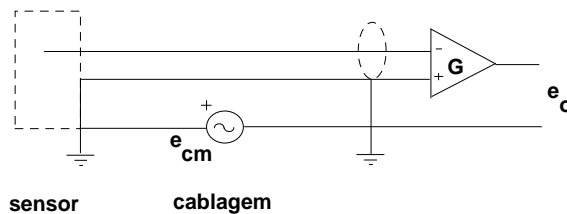


fig. "ground loop"

resposta em frequência

Outro parâmetro importante é o comportamento do amplificador em função da frequência. A impedância de saída é geralmente pequena, mas a largura de banda do AmpOp está limitada pelo seu

carácter capacitivo ( $C_o$ ) e a resposta do AmpOp em frequência apresenta uma característica de filtro passa-baixo. Se A e G são respectivamente os ganhos em malha aberta e fechada, o comportamento típico de um amplificador operacional é apresentado na figura seguinte, sendo o produto da banda passante ou largura de banda (bandwidth –BW) pelo ganho (G) sensivelmente constante.

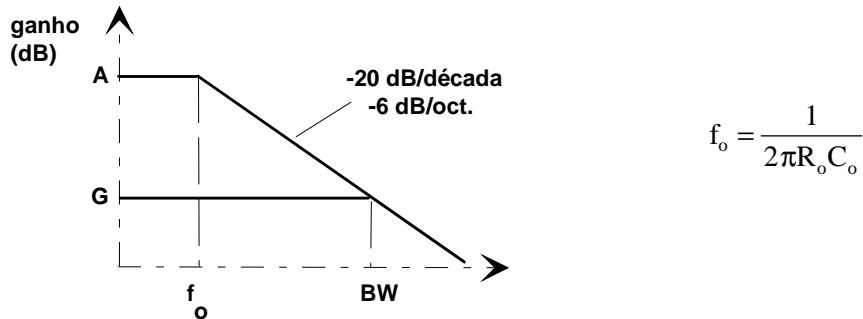


fig. banda passante de um amplificador de tensã

valores típicos

Em resumo, o Amplificador Operacional deve ter:

- elevada impedância de entrada  $Z_i$  (tip.  $10^5..10^{14}$ );
- reduzida impedância de saída  $Z_o$ ;
- ganho elevado e/ou ajustável (tip.  $A \approx 10^6$ ;  $G \approx 10^{-1}..10^3$ );
- possível ajuste do zero (tip.  $\pm 100\%$ );
- banda passante adequada (tip.  $GBW = 10^6$ );
- boa rejeição do modo comum (tip.  $CMRR \approx 60..120$  dB).

|                    | LM741            | LF356             | LM312             | LM324                     |            |                                |
|--------------------|------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|------------|--------------------------------|
| <b>Vos</b>         | 5                | 3                 | 2                 | 7                         | mV         | = $ e_p - e_n $ para $e_o = 0$ |
| <b>IB</b>          | 500              | 0.03              | 1.5               | 45                        | nA         | = $ i_p - i_n $ para $e_o = 0$ |
| <b>GBW</b>         | 1                | 5                 | 1                 | 1                         | MHz        |                                |
| <b>CMRR</b>        | 90               | 100               | 100               | 85                        | dB         |                                |
| <b>"slew rate"</b> | 0.5              | 12                | -                 | -                         | V/ $\mu$ s | = $ de_o/dt $ máximo           |
| <b>alimentação</b> | $\pm 3.. \pm 22$ | $\pm 15.. \pm 18$ | $\pm 15.. \pm 18$ | 3..32                     | Vdc        |                                |
| <b>consumo</b>     | 2.8              | 5                 | 0.3               | 3                         | mA         |                                |
| <b>preço ap.</b>   | 100              | 200               | 600               | 100                       | PTE        |                                |
|                    | barato           | baixo IB          | baixo consumo     | alim. unipolar, 4 AmpOp's |            |                                |

características de uns AmpOp's usuais (da National)

outros amplificadores

Outros exemplos de amplificadores disponíveis são:

- o amplificador para isolamento, oferecendo uma grande separação entre entradas e saída, tolerando tensões de modo comum da ordem do kiloVolt, com resistências de entrada superiores a  $10^{11}\Omega$  e com CMRR de 120 dB. O isolamento pode ser feito introduzindo uma ligação por transformador, por luz (opto-isolador), por efeito Hall. Geralmente têm comportamento não linear para as baixas frequências. Outro isolamento possível é modulando o sinal, em frequência ou com Pulse Width Modulation (PWM).
- o amplificador de corrente: se o sensor for uma fonte de corrente (como para uma célula fotovoltaica) o conversor da figura seguinte permite obter um sinal de saída em tensão contínua proporcional à intensidade de corrente no sensor.

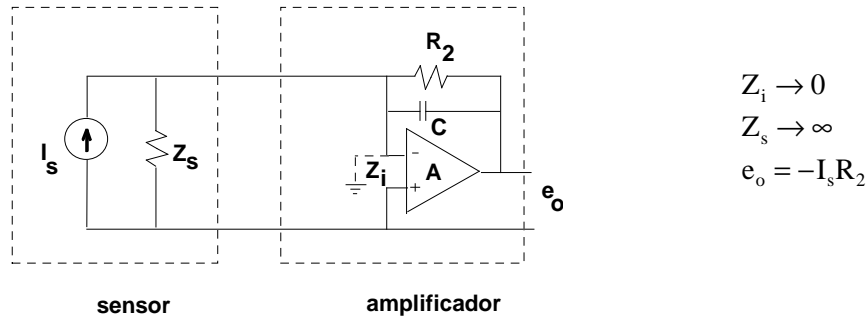


fig. conversor corrente-tensão

- o amplificador de carga: um sensor piezoelétrico por exemplo é uma fonte de carga e um conversor carga-tensão permite obter um sinal em tensão dc.

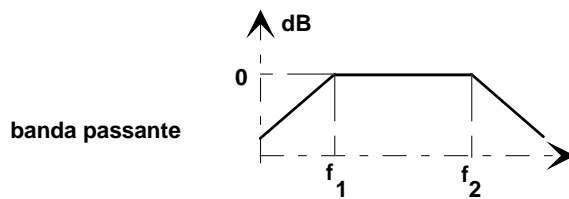
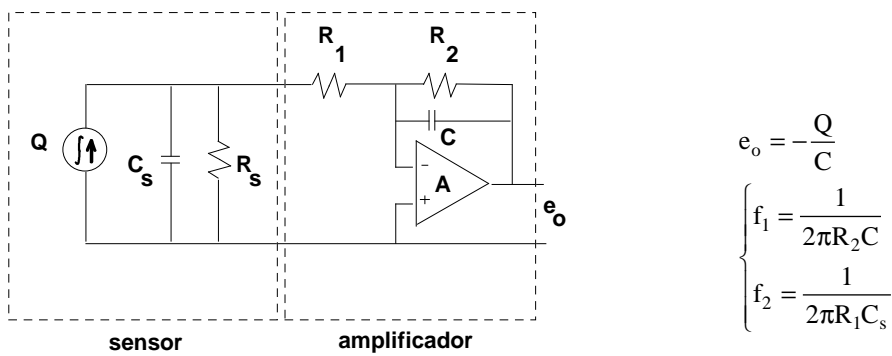


fig. conversor carga-tensão

### 1.2.3.filtros

Um filtro é um elemento de Condicionamento de Sinal utilizado para "limpar" o sinal, essencialmente corrigindo a amplitude e/ou a fase, em função da frequência.

**Filtros passivos** utilizam exclusivamente componentes passivos, em circuitos RLC. **Filtros activos**, além destes componentes, utilizam Amplificadores Operacionais –e logo requerem alimentação.

Os filtros activos:

- por um lado são mais pequenos, mais leves, mais baratos, sem bobinas, com impedâncias alta à entrada e baixa à saída, são ajustáveis e simples;
- por outro lado requerem alimentação estabilizada, têm ruídos de baixa e/ou alta frequência, saturam com amplitudes elevadas, têm frequência limitada a uma banda de 0.1Hz a 1 MHz.

Os quatro tipos de filtros mais usuais são o filtro passa-baixo, o passa-alto, o passa-banda e o corta-banda.

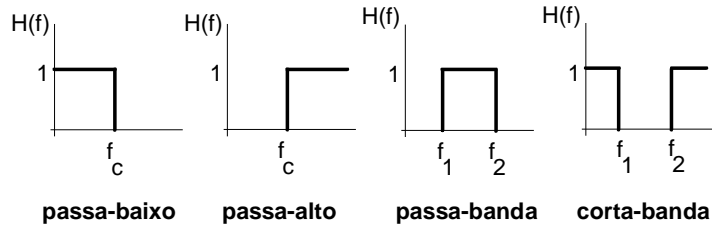
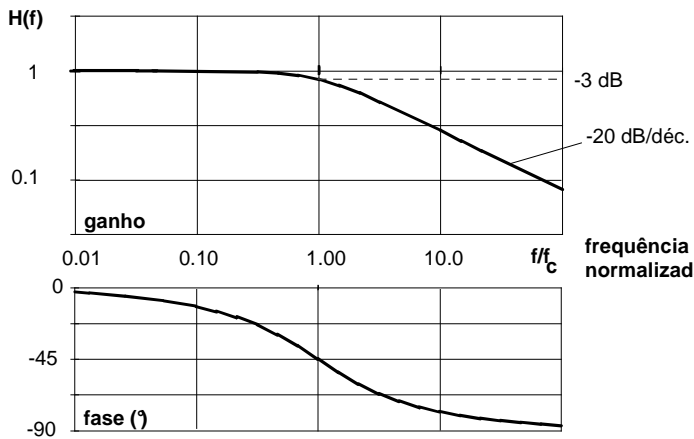


fig. filtros ideais

Para filtros reais, o corte não é absoluto e a curva é algo mais perturbada. Por exemplo para um filtro passa-baixo de 1ª ordem, a atenuação depois do corte varia com a frequência segundo uma tangente de -20 dB/década (-6 dB/octava).



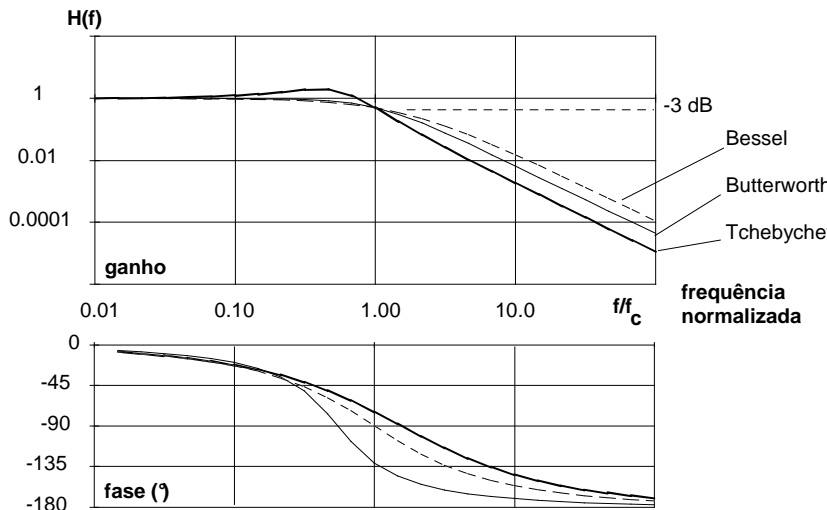
$$H(s) = \frac{1}{1 + \tau s}$$

ou

$$H(f) = \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_c}}$$

fig. filtro passa-baixo real (de 1ª ordem)

Existem filtros de 2ª, 3ª, 4ª, 5ª... ordem de vários tipos (Bessel, Butterworth, Tchebichev, Cauet) cada um com os seus prós e os seus contras. Por exemplo, filtros de Butterworth são adequados para sinais harmónicos; filtros de Bessel adaptam-se bem a transitórios.



$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

ou

$$H(f) = \frac{1}{1 + 2j\zeta \frac{f}{f_c} - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}$$

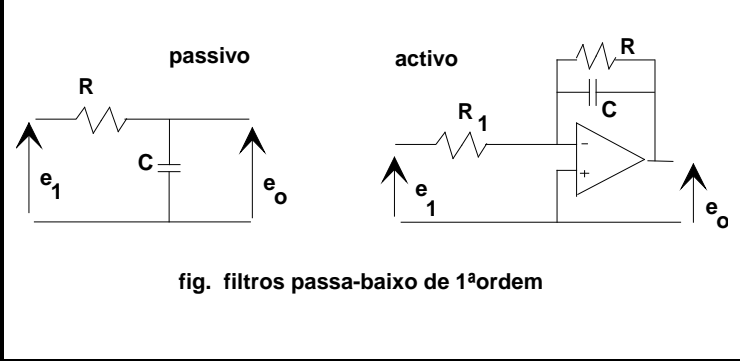
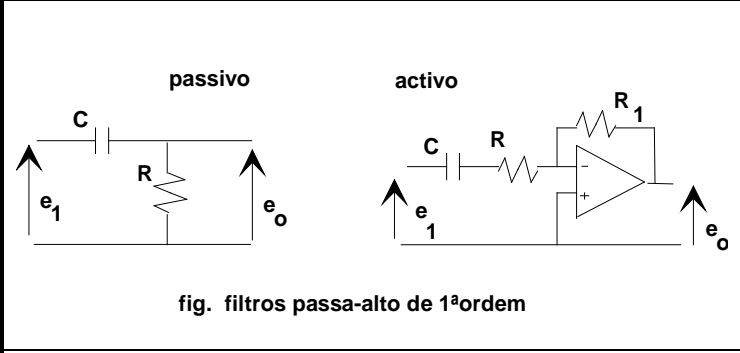
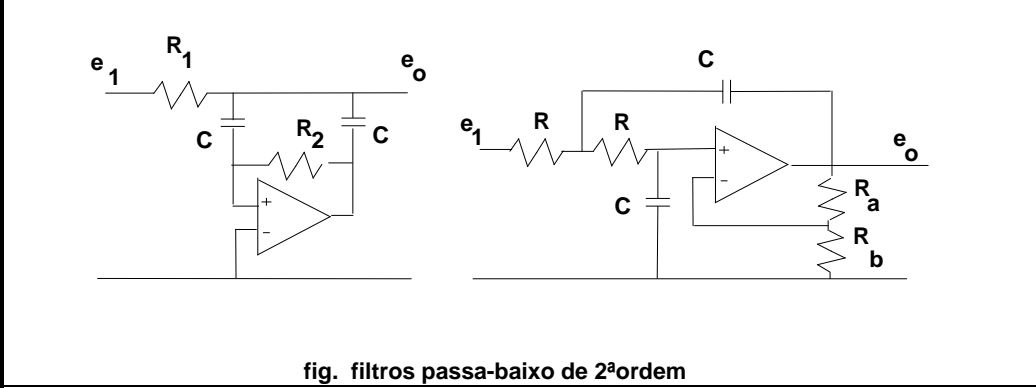
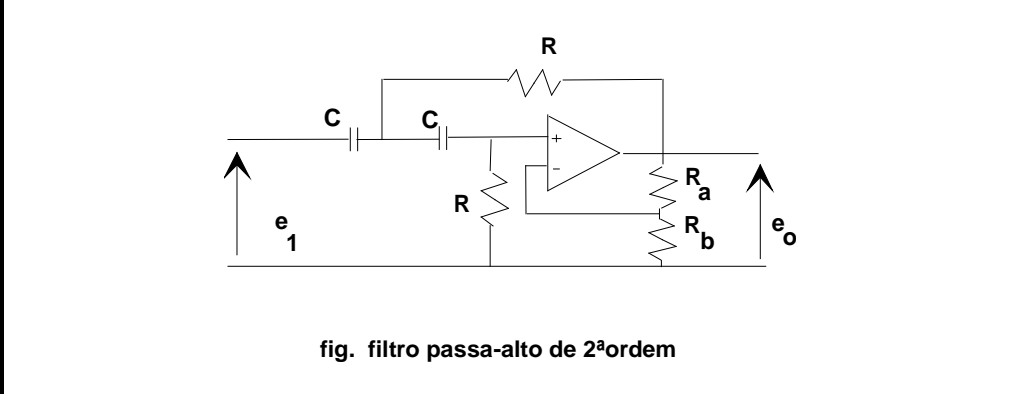
fig. filtros passa-baixo de 2ª ordem

Em género de conclusão, note-se que:

- um amplificador tem sempre a sua resposta em frequência e o seu consequente efeito de filtro;

- um filtro é sempre uma alteração do sinal: quando possível é melhor dispensá-lo; se é indispensável, porque inerente ao sensor ou à CM, é necessário ter em conta a função de transferência que introduz, calibrá-la e eventualmente corrigi-la.

Exemplos de circuitos para filtros de 1ª e 2ª ordem são apresentados nas figuras seguintes:

|   |   |
|---|---|
|  <p style="text-align: center;"><b>fig. filtros passa-baixo de 1ª ordem</b></p>   | <p>passivo<br/> <math display="block">H(s) = \frac{1}{1 + s RC}</math></p> <p>activo<br/> <math display="block">H(s) = -\frac{R / R_1}{1 + s RC}</math></p>           |
|  <p style="text-align: center;"><b>fig. filtros passa-alto de 1ª ordem</b></p>   | <p>passivo<br/> <math display="block">H(s) = \frac{s RC}{1 + s RC}</math></p> <p>activo<br/> <math display="block">H(s) = -\frac{(R_1 / R) s RC}{1 + s RC}</math></p> |
|  <p style="text-align: center;"><b>fig. filtros passa-baixo de 2ª ordem</b></p> |   |
|  <p style="text-align: center;"><b>fig. filtro passa-alto de 2ª ordem</b></p>   |   |



### **1.3.aquisição e sinal digital**

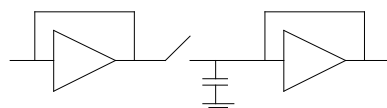
Detectado o sinal físico e convertido (geralmente num sinal analógico eléctrico em tensão dc ou ac), após condicionamento, o sinal será fornecido ao computador sob forma digital.

Entre os vários passos da aquisição de dados, citemos o "Sample and Hold", a multiplexagem, a conversão analógico-digital.

#### **1.3.1.aquisição de dados**

##### **sample-and-hold**

Como já foi visto na apresentação da amostragem, é por vezes necessário assegurar a simultaneidade dos sinais adquiridos, enviando em paralelo uma ordem a um elemento da cadeia de medida que congela o valor do sinal para a sua posterior conversão. Esta operação, "sample and hold" (S/H) é efectuada num circuito integrado ou num circuito do tipo apresentado na figura.



**fig. exemplo de S/H**

##### **exemplo de especificações de S/H (ADZ346)**

|                   |               |                   |
|-------------------|---------------|-------------------|
| tensão de entrada | $\pm 10$      | V                 |
| impedância $Z_i$  | 3             | k $\Omega$        |
| ganho             | -1            |                   |
| erro              | $< \pm 0.002$ | %                 |
| banda passante    | 1.4           | MHz               |
| tempo de resposta | 2             | $\mu$ s (a 0.01%) |
| alimentação       | $\pm 12..18$  | V                 |

##### **multiplexagem analógica**

Até agora uma cadeia de medida tinha sido considerada de forma isolada, para o encaminhamento de um único sinal desde o meio físico até à aquisição de dados. Quando vários parâmetros (mais de 1000 em alguns casos) têm de ser medidos simultaneamente, é necessário juntar os vários sinais e fazê-los passar por um número reduzido de canais:

- para gravar os dados num gravador com somente 14 ou 28 pistas;
- para transmitir os dados via telemetria, normalmente num único canal FM;
- para economizar componentes caros como os conversores analógico-digitais.

Esta operação é a multiplexagem, para a qual existem duas variantes:

- a multiplexagem em frequência
- a multiplexagem no tempo.

Multiplexar em frequência consiste em modular cada canal numa frequência própria e depois misturá-los. A separação dos vários canais efectua-se com filtros passa-banda.

Uma vantagem deste método consiste em transmitir todos os sinais em paralelo e em simultâneo, sem amostragem inerente, como na multiplexagem no tempo. No entanto é uma solução complexa, normalmente analógica, que requer a utilização de componentes de transmissão com bandas passantes largas: esta solução é preferencialmente utilizada para sinais de altas frequências (até vários kHz) como seria o caso de vibrações de estruturas.

A multiplexagem no tempo é por suposto a mais simples – e a mais utilizada com equipamento digital. Consiste simplesmente na amostragem sequencial dos vários sinais, eventualmente inserindo um sinal de sincronismo para a identificação dos vários canais.

O sinal resultante (do tipo pulse amplitude modulation – PAM) é uma sequência de impulsos de duração fixa ( $T$ ) e de amplitude proporcional a cada um dos sinais.

O período de amostragem para cada canal é múltiplo de  $T$ , igual a  $(n+m)T$  no caso de  $n$  sinais multiplexados com  $m$  sinais de sincronismo.

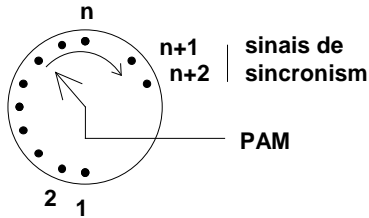


fig. multiplexagem no tempo

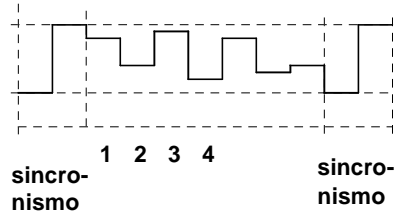


fig. exemplo de sinal PAM

Se para algum sinal for necessária uma frequência de amostragem superior, é possível supercomutá-lo, i.e. repeti-lo (por exemplo 4 vezes) no seio do mesmo ciclo, obtendo assim um período de amostragem inferior (igual a  $T/4$  no exemplo).

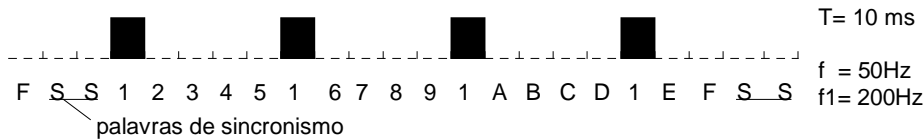


fig. exemplo de supercomutação

O inverso é igualmente possível, um canal não aparecendo em todos os ciclos, resultando numa frequência de amostragem inferior.

A digitalização do sinal PAM num conversor analógico-digital fornece um sinal PCM (pulse code modulation), originalmente em paralelo, eventualmente codificado depois em série.

| exemplo de um CI MPX (ADG7501/2) |                 |
|----------------------------------|-----------------|
| número de sinais                 | 8:1 ou 4x2:1    |
| resist. na ligação               | <300 $\Omega$   |
| tempo para ligar                 | 0.8 $\mu$ s     |
| tempo para desligar              | 0.8 $\mu$ s     |
| tensão de alimentação            | < $\pm$ 17 V dc |
| consumo                          | <30 mW          |

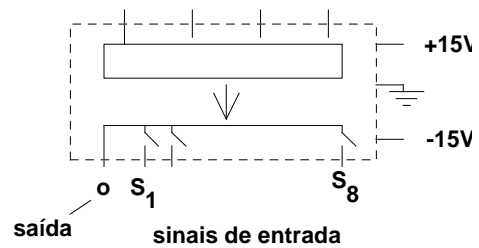


fig. esquema de um multiplexador de 8 entradas

### conversão analógico-digital

Se não é o único, o conversor analógico-digital (A/D) é o principal meio de digitalização dos sinais e, como tal, elemento essencial da maioria das cadeias de medida.

O sinal de entrada é genericamente um sinal em tensão contínua ou pseudo-contínua. O sinal de saída é um sinal digital paralelo.

Um conversor A/D essencialmente compara o sinal de entrada  $V_i$  a um sinal de referência  $V_{ref}$ , fornecendo um número binário codificando o valor da razão  $V_i/V_{ref}$ .

Entre as várias técnicas de obter essa comparação, citemos: a conversão simultânea, a aproximação iterativa, a integração por rampa, o contador incremental.

**a) conversão simultânea**

No conversor simultâneo (flash converter) a tensão de referência é dividida em  $2^N$  intervalos, sendo a tensão  $V_i$  comparada com cada um dos  $2^N - 1$  pontos. Um conversor lógico traduz em seguida os valores das  $2^N - 1$  comparações num sinal binário de  $N$  bits.

Esta solução muito rápida é no entanto difícil de aplicar directamente digamos num conversor de 12 bits, que implicaria o uso de 4095 comparadores. Uma forma de reduzir o número de comparações é de fazer a conversão em duas etapas: uma conversão de oito bits fornece os mais significativos, a diferença é em seguida convertida com quatro bits, fornecendo os bits menos significativos.

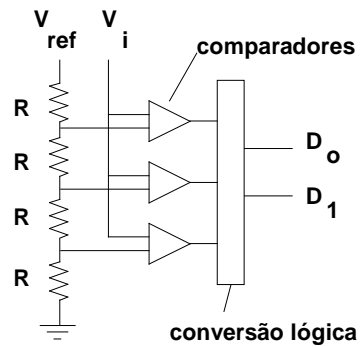


fig. esquema de um conversor simultâneo binário

**b) aproximação iterativa**

Neste conversor iterativo, os  $N$  bits, do mais significativo (MSB) ao menos significativo (LSB), são determinados por comparação do sinal  $V_i$  com a tensão fornecida na conversão do código binário num sinal analógico. No início da conversão o único bit a "1" é o mais significativo, confirmado ou não pelo comparador; segue-se-lhe o segundo, posto a "1" e também verificado; e assim até ao menos significativo onde a conversão é concluída.

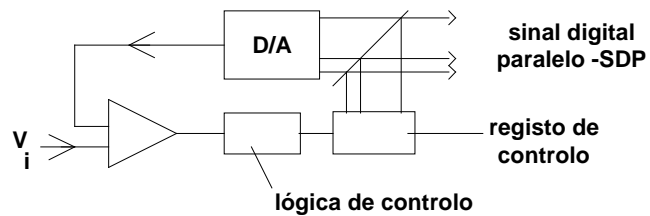


fig. aproximação iterativa

Este tipo de conversor permite frequências de até 1 MHz, com resoluções de até 16 bits –quanto mais resolução mais tempo requer a conversão, para mais comparações e uma melhor estabilidade.

**c) integração em rampa**

Conversores por integração contabilizam o tempo, o número de impulsos de relógio, necessários para que a integração de um sinal de referência equilibre o sinal de entrada  $V_i$ , sendo o tempo necessário proporcional ao valor da tensão  $V_i$ .

Obtém-se uma melhor resolução para frequências mais modestas.

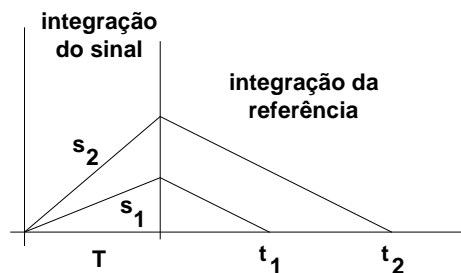


fig. conversor por integração dupla

**d) contador incremental**

A cada impulso de relógio, este conversor compara o valor digitalizado  $D_n$  traduzido no conversor D/A com o sinal de entrada  $V_i$ ; em função do resultado da comparação o valor de  $D_n$  é in- ou de-crementado no contador. A conversão é efectuada em contínuo, acompanhando o sinal analógico –enquanto a variação deste não for superior à frequência de relógio.

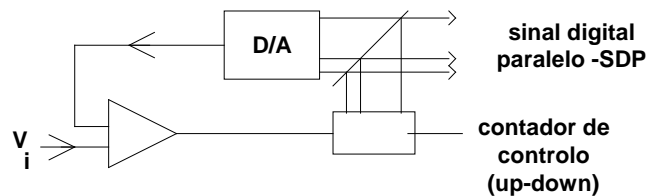


fig. contador incremental (tracking)

A título de exemplo, a tabela seguinte apresenta dados de vários conversores A/D.

| conversores A/D (ADC) "Analog Devices" |       |         |             |         |              |      |
|--|-------|---------|-------------|---------|--------------|------|
|  | AD573 | AD578   | AD1377      | AD770   | AD1170       |      |
| tipo de conversão                      | iter. | iter.   | iter.       | flash   | integração   |      |
| resolução                              | 10    | 12      | 16          | 8       | 18           | bits |
| tempo de conversão                     | 30    | 6       | 10          | <0.006  | 4..110(ms)   | μs   |
| precisão                               | 1 LSB | 0.1%    | <0.1%       | 1 LSB   | <0.001%      |      |
| offset                                 | 1 LSB | 0.1%    | 1/2 LSB     |         |              |      |
| $Z_i$                                  | 5k    | 5/10k   | 260         | 100M    | 1.9/3.8/7.5k | Ω    |
| $V_i$ unipolar                         | 10    | 10/20   | 5/10/20     |         |              | V    |
| $V_i$ bipolar                          | ±5    | ±5/±10  | ±2.5/±5/±10 | ±1      | ±5           | V    |
| alimentação                            | +5-15 | +5±15   |             | ±5      | ±15          | V    |
| saída                                  | SDP   | SDP/SDS | SDP         | SDP/SDS | SDS          |      |
| tempo de aquecimento                   |       |         | 1           |         | 10           | min  |

### conversão digital-analógico

Este componente será sobretudo um elemento da cadeia de actuação. No entanto convém apresentá-lo aqui, devido à sua grande utilização como instrumento para a conversão inversa, de analógico para digital.

Dois soluções são utilizadas: a somação ponderada e a escada.

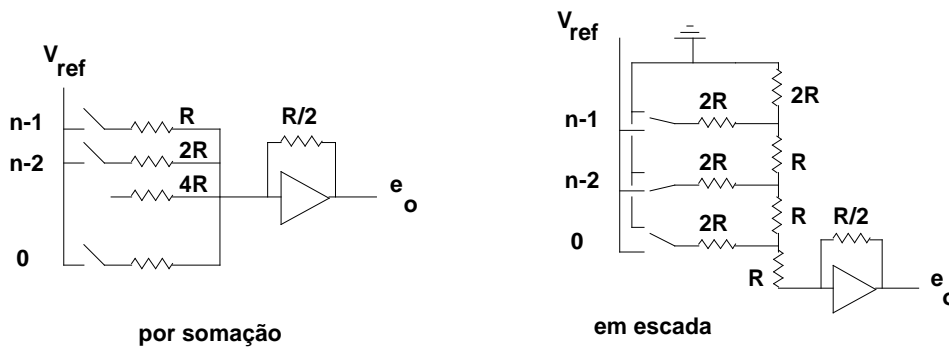


fig. conversão D/A

O sinal de saída, em tensão contínua normalmente, pode ser:

- unipolar (0..10V por exemplo) ou bipolar (-5..+5V);
- com resolução de 8 a 16 bits (por exemplo);
- numa amplitude total de 5/10/20...V.

Existem igualmente conversores D/A com um sinal de saída em corrente.

Conversores D/A apresentam uma não-linearidade de  $\pm 1/2$  LSB, um ganho e offset ajustáveis, uma tensão de referência de 5/10/15 V, erros de transientes da ordem dos mili-Volts, tempos de resposta de alguns micro-segundos.

A forma do sinal é geralmente do tipo escada (ordem zero), sendo o erro decrescente em função da frequência de actualização do sinal digital.

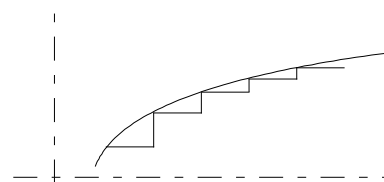


fig. sinal de saída do conversor D/A

| conversores D/A (DAC) "Analog Devices" |         |             |          |          |         |
|--|---------|-------------|----------|----------|---------|
|  | AD557   | AD561       | AD662    | AD569    |         |
| tipo de saída                          | tensão  | tensão      | corrente | tensão   |         |
| resolução                              | 8       | 10          | 12       | 16       | bits    |
| tempo de conversão                     | 0.8     | 0.25        | <1       | <5       | $\mu$ s |
| precisão                               | <1      | <1/2        | <1       | 1        | LSB     |
| alimentação                            | +5-15   | +5 $\pm$ 15 | $\pm$ 5  | $\pm$ 15 | V       |
| saída                                  | 0..2.56 | 0..2.56     | <2.4 mA  | -5..5    | V       |

### 1.3.2.sinal digital

Genericamente o sinal digital veicula informação discretizada, codificada em termos equivalentes a "0"s e "1"s. Por exemplo, sinais TTL, de tensões nominais 0 e 5 V dc, poderão associar uma tensão digamos inferior a 0.8 V ao nível baixo "0" e uma tensão superior a 2.4 V ao nível alto "1".

#### sinal digital paralelo

O sinal digital paralelo (SDP), com N bits, correspondendo a uma informação decimal entre 0 e  $2^N-1$ , é a forma mais natural de transferir dados para ou desde um computador –o número N de bits transferidos simultaneamente (palavra de dados) pode não ser o número de bits de funcionamento do microprocessador, sendo então alguma adaptação necessária.

O valor contido nos N bits é actualizado de acordo com uma ordem (de relógio...) oriunda do computador ou de outro interveniente no processo. A frequência de actualização  $1/T$  corresponde à frequência de transmissão da informação: será normalmente inferior ou igual à frequência de amostragem.

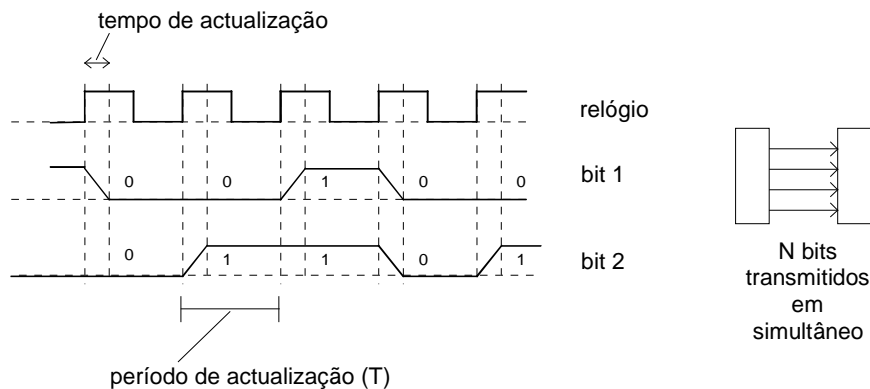


fig. sinal digital paralelo

#### sinal digital série

O sinal digital série (SDS) organiza em sequência os N bits de cada palavra dos dados digitais, de acordo com uma codificação ou um protocolo que estabelece a passagem de paralelo para série e vice-versa. Além das características eléctricas das ligações segundo as várias normas (RS232, RS422, RS423, RS485), são definidos:

- a frequência do relógio (baud rate, com valores típicos normalizados múltiplos de 1200baud, chegando até aos mega baud), se este não for transmitido;
- o número e ordem dos bits de dados; o número eventual de bits de separação de palavras (start e stop bits);
- os bits (de paridade) ou as palavras (checksum, CRC) de detecção de erros...

A frequência de transmissão da informação (baud rate) deverá obrigatoriamente ser superior ou igual a  $N/T$ .

Um exemplo simples de codificação é a codificação Pulse Code Modulation –PCM– da qual são apresentadas duas versões na figura seguinte.

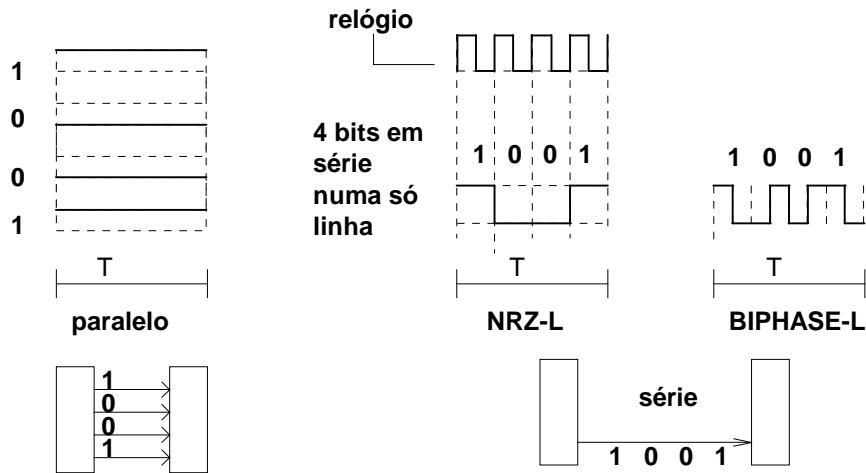


fig. codificação série -PCM

A telemetria rádio é um caso crítico de utilização de SDS onde a informação adquirida pela instrumentação tem que ser tele-comunicada (via rádio por exemplo), normalmente em frequência modulada, para um ponto afastado, fixo, onde será recebida e tratada.

O SDP é posto em série e fornecido ao modulador (Voltage Controlled Oscillator –VCO) de onde será encaminhado até à antena emissora. Neste caso a codificação em Biφ (bi-phase) tem a vantagem de inserir o sinal de relógio, facilitando o sincronismo à recepção, e a desvantagem de duplicar a frequência de transmissão necessária.

trem de impulsos

Outro exemplo de sinal digital será um sinal de frequência variável: um único bit/impulso é transmitido de modo intermitente, com amplitude constante, sendo a informação a frequência dos impulsos.

Uma primeira forma deste sinal pode ser um sinal analógico alterno de amplitude fixa e frequência variável: o trem de impulsos será então fornecido por um detector de passagens pelo zero, de preferência no mesmo sentido (detector sensível à fase).

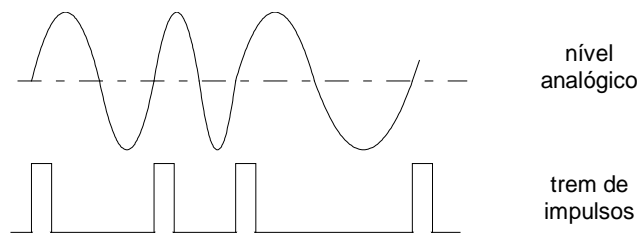


fig. sinal em frequência

Já em digital (numérico), duas maneiras de converter a informação são:

- a. contando os impulsos ( $n_a$ ) durante um período de tempo dado  $T_a$ :  $f_a = n_a/T_a$ ;
- b. contar o tempo ( $t_b$ ) entre dois impulsos –com um sinal de relógio em paralelo:  $f_b = 1/t_b$ .

Sendo o sinal digital paralelo o objecto final da CM e tendo os sinais digitais uma imunidade ao ruído superior, é recomendado digitalizar o mais cedo possível, quando isto é técnica e economicamente viável.

Alguns sensores fornecem directamente um sinal digital paralelo ou série, outros fornecem um trem de impulsos, outros enfim um sinal em tensão alterna de frequência variável: são soluções que permitem encurtar –nem sempre simplificar– a cadeia de medida.

#### **1.4.conclusão**

As formas assumidas pela Cadeia de Medida são muito variáveis, diferenciadas pela grandeza medida, pelo princípio utilizado pelo sensor, pela ordem de grandeza...

O Condicionamento de Sinal depende essencialmente do tipo de sensor utilizado:

- resistivo, a grandeza medida é detectada através de uma variação de resistência no sensor;
- capacitivo, a grandeza medida provoca uma variação de capacidade;
- indutivo, a grandeza medida provoca uma variação de indutância;

...

sendo o objectivo primeiro conseguir levar o sinal numa forma adequada e limpa até ao sistema de aquisição de dados e ao microprocessador.

Os capítulos seguintes vão dedicar-se à apresentação de diversos sensores utilizados para a medição das grandezas mecânicas mais comuns.

Sempre que possível, apresentar-se-ão as características específicas em termos de condicionamento de sinal e as soluções mais frequentes.

## 2. SENSORES DO MOVIMENTO

### 2.1. posição, deslocação linear

O posicionamento mecânico pode dividir-se em dois temas ligeiramente distintos:

1. medição de uma posição de forma quantitativa e (normalmente) linear;
2. detecção de proximidade, de um alvo a posicionar, de um intruso...

Mesmo se os princípios em jogo são similares, os sensores utilizados para estes dois fins têm características que justificam uma apresentação separada.

#### 2.1.1. sensor potenciométrico

Este sensor opera simplesmente como um divisor de tensão cujo ponto móvel (2) segue o movimento (de translação no caso presente) que se deseja medir: obtém-se uma tensão de saída  $e_o$  proporcional à tensão de alimentação  $e_1$  e à deslocação  $x$  do ponto móvel.

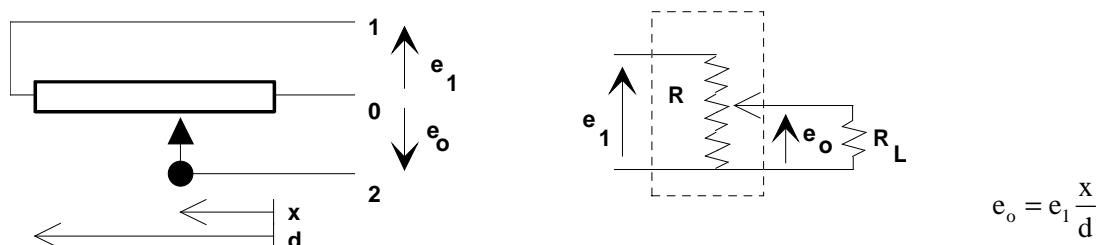


fig. princípio do sensor potenciométrico

A parte móvel do sensor pode estar apoiada (por uma mola) contra o objecto em movimento ou pode estar rigidamente ligada a ele (enroscado por exemplo).

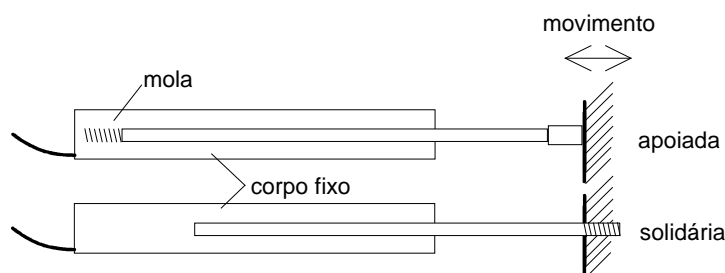


fig. soluções apoiada e solidária para a ligação da parte móvel

Existem dois tipos de resistências utilizadas nestes sensores: uns têm um enrolamento helicoidal, outros um filme cerâmico, plástico ou metálico linear. Uma diferença notável entre estes dois tipos é que a resolução dos primeiros é finita e a dos segundos é praticamente "infinita".

Estes sensores são simples de concepção e de utilização (CS) e relativamente baratos.

Em compensação, devido ao contacto físico entre partes fixa e móvel, as suas características deterioram-se com o uso e a sua vida é limitada.

Pela mesma razão, a gama de frequências do sinal é reduzida, tipicamente limitada ao quasi-estático, entre 0 e 5 Hz.

O erro mais significativo com estes sensores provém do "efeito de carga" e da não-linearidade resultante do valor finito da impedância a jusante  $R_L$ .



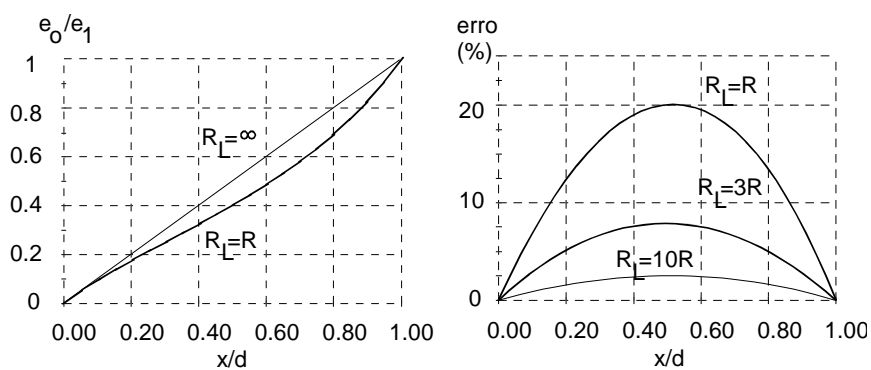


fig. não-linearidade por "efeito de carga"

Numa montagem com sensores potenciométricos é aconselhado:

- se a resistência R for pequena: substituir a fonte de tensão por uma de corrente estabilizada;
- utilizar cabos de fraca resistência de forma a respeitar a relação  $R_{cabos} \ll R \ll R_L$ .

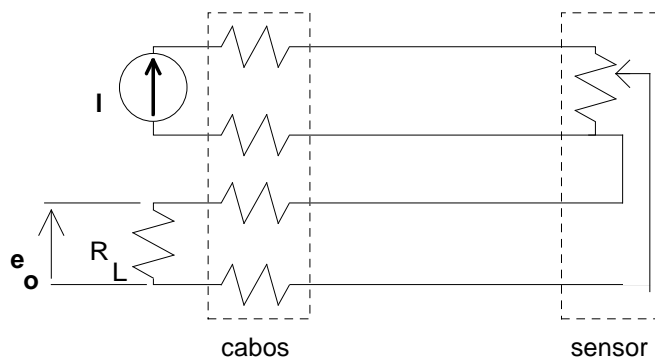


fig. CS do sensor potenciométrico

Características de alguns sensores disponíveis no mercado são apresentadas na tabela seguinte.

| sensores de posição potenciométricos |           |                        |
|--------------------------------------|-----------|------------------------|
| gama de medida ( $x_{max}$ )         | 10..2000  | mm                     |
| linearidade                          | 0.05..0.5 | %                      |
| resolução                            | < 0.01    | %                      |
| tempo de vida                        | > $10^6$  | ciclos (força < 40 gf) |
| velocidade máxima                    | 5         | m/s                    |
| aceleração máxima                    | 15        | $m/s^2$                |
| alimentação ( $e_1$ )                | 5..50     | V ac/dc                |
| sinal de saída ( $e_o$ )             | 0.5..99.5 | % $e_1$                |
| resistência (R)                      | 0.5..10   | $k\Omega$              |
| temperatura de func.                 | -40..85   | $^{\circ}C$            |

### 2.1.2. sensores LVDT

Os sensores de precisão mais usados para medições de deslocamentos lineares são transformadores lineares (Linear Variable Differential Transformer –LVDT).

O enrolamento primário do transformador é alimentado em tensão alternada ( $e_1$ ); um núcleo ferromagnético comunica o fluxo a dois enrolamentos secundários, sendo a distribuição da tensão entre estes dois enrolamentos função da posição ( $x$ ) do núcleo.

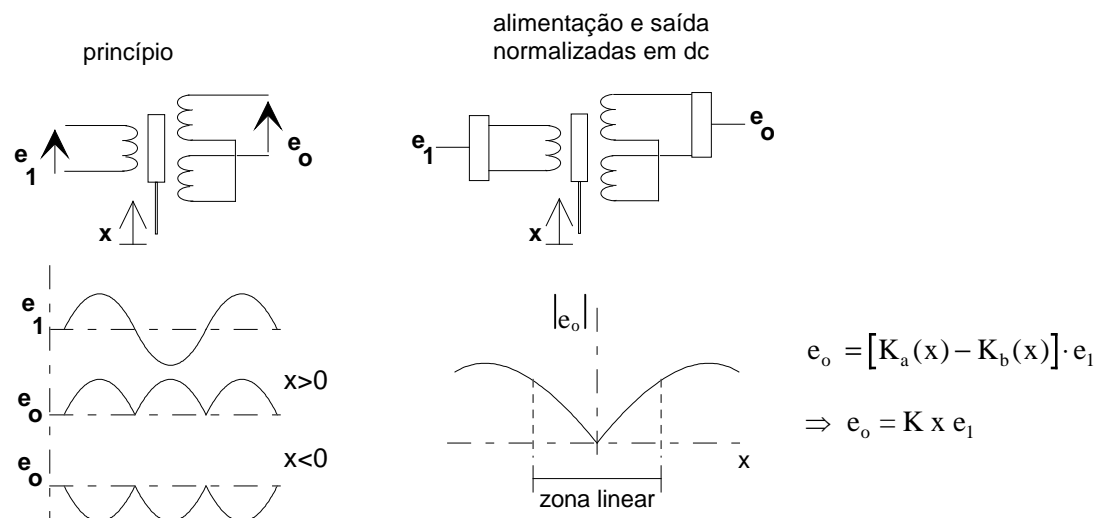


fig. sensor LVDT

Numa certa gama de deslocamentos  $|x| < x_{max}$  a resposta, em tensão à saída do sensor ( $e_o$ ), é uma função linear da posição  $x$ .

Para converter a tensão alternada  $e_o$  para o contínuo é necessário um desmodulador sensível à fase, para detectar a passagem pela origem (desfasagem de  $180^\circ$ ) e fornecer um valor algébrico para a totalidade da zona linear.

Sensores disponíveis no mercado já incorporam (eventualmente em opção) o circuito modulador de alimentação –um conversor dc-ac– e um circuito de pré-CS que desmodula a saída para um sinal normalizado em tensão contínua.

Comentários:

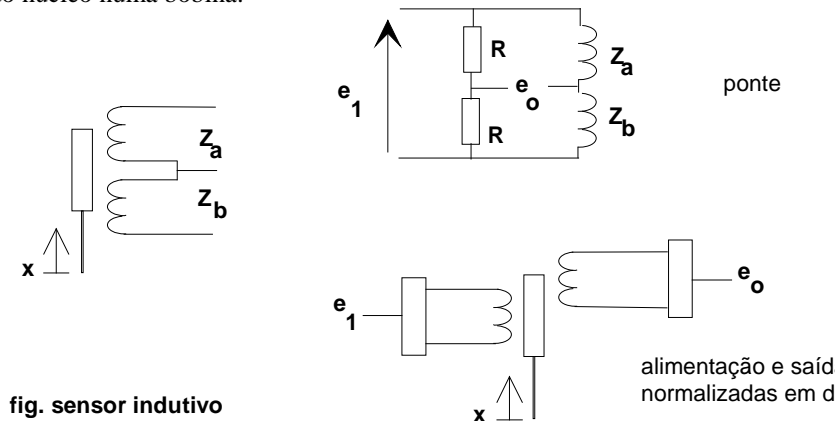
- de concepção simples, estes sensores são mecanicamente práticos e sólidos.
- o elemento móvel está isolado e não consome muita energia mecânica.
- é sensível, linear e contínuo: tem uma resolução virtualmente infinita.
- é pouco sensível a variações de temperatura e tem pouca deriva no tempo (drift).
- é um filtro passa baixo, limitado em frequência.

Características típicas de sensores disponíveis no mercado são apresentadas na tabela seguinte.

| sensores de posição LVDT     |         |                  |
|------------------------------|---------|------------------|
| gama de medida ( $x_{max}$ ) | 1..300  | mm               |
| linearidade                  | 0.05..1 | % (carga 1 MΩ)   |
| resolução                    | inf.    |                  |
| tempo de vida                | inf.    |                  |
| tempo de resposta            | 1.5     | ms               |
| resposta em frequência       | -3      | dB (a 100 Hz)    |
| alimentação ( $e_1$ )        | 10..24  | V dc (10 mA)     |
|                              | 1..10   | V ac (1..20 kHz) |
| sinal de saída ( $e_o$ )     | 50      | mV/V/mm          |
| resistência de carga $R_L$   | 10..100 | kΩ               |
| temperatura de func.         | -40..85 | °C               |

### 2.1.3. sensores indutivos

Com princípio próximo do anterior, estes sensores utilizam a variação da indutância em função da posição do núcleo numa bobina.



A figura mostra o princípio e como é possível instalar o sensor numa ponte para obter um sinal de saída ( $e_o$ ) proporcional ao deslocamento  $x$  do núcleo.

A linearidade é melhor que 1%, mas numa gama (linear) mais reduzida que no caso do sensor LVDT. A gama típica (comprimento da zona linear) pode ir até os 600 mm, mas o comprimento total do sensor tem que ser o dobro.

A alimentação em corrente alternada é efectuada em frequências da ordem de 1 a 20 kHz.

### 2.1.4. sensores capacitivos

Estes sensores utilizam a proporcionalidade entre a capacitância  $C$  e a distância  $x$  separando as armaduras de um condensador:

$$C = \epsilon \frac{A}{x}$$

onde  $\epsilon$  é a constante dielétrica do meio entre as duas armaduras ( $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_o$ , produto da permissividade relativa, igual 1.0006 para o ar, pela permissividade do vácuo, igual a  $8.85 \cdot 10^{-12}$  F/m) e  $A$  é a área útil destas.

Por razões de dimensões óbvias, a área está limitada ( $< 5 \times 5 \text{ cm}^2$  digamos),  $\epsilon_r$  ronda 1, o que, para obter um sinal utilizável, conduz a distâncias  $x$  muito reduzidas, da ordem de 0.05 mm ou menos. A manufatura de tal sensor é muito delicada e a sua capacidade  $C$  é muito sensível às variações de  $x$  para valores tão pequenos –devido à temperatura e/ou a esforços:

$$\frac{dC}{dx} = -\epsilon \frac{A}{x^2}$$

No entanto, para pequenas oscilações à volta de um ponto estável, pode considerar-se que

$$\frac{dC}{C} = -\frac{dx}{x}$$

A utilização mais frequente deste princípio de sensor capacitivo é para a medição de pressões ou de variações de pressão (em acústica) através do deslocamento de uma membrana que é simultaneamente uma das armaduras do condensador. O sensor pode ser absoluto ou diferencial.

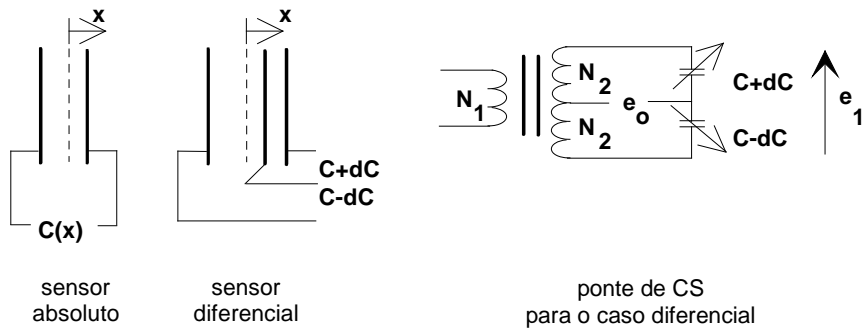


fig. sensores capacitivos de deslocamento

### 2.1.5. extensómetros

Um condutor resistivo qualquer, digamos cilíndrico de comprimento  $L$ , tem uma resistência proporcional ao seu comprimento:

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

onde  $\rho$  é a resistividade do material do condutor e  $A$  a área da sua secção, suposta constante.

Se houver uma variação  $\delta L$  do comprimento do condutor simultaneamente haverá variações  $\delta A$  da secção e  $\delta \rho$  da resistividade (a deformação do cristal provoca uma alteração das suas características eléctricas: é o *efeito piezoeléctrico*) mas, resumindo, em termos relativos, a variação da resistência pode ser considerada como função linear do alongamento:

$$\frac{\delta R}{R} = k \frac{\delta L}{L}$$

onde o coeficiente de proporcionalidade  $k$  incorpora as três variações:

$$k = 1 + 2\sigma + \frac{\delta \rho / \rho}{\delta L / L}$$

É este o princípio básico dos extensómetros resistivos, sensores genéricos utilizados para medir deformações de corpos sólidos.

Os extensómetros mais usuais são de folha metálica, colada ao espécime em observação com desdobraimento da extensão do condutor e reduzida secção, de forma a obter maior resistência e maior sensibilidade.

Realizam-se extensómetros sensíveis numa única direcção ou em várias direcções conjuntamente, associando em roseta várias zonas activas com ângulos de 45, 90 ou 120°.

As dimensões mais diversas permitem encontrar para cada caso a melhor solução -material sensível, geometria, cola adaptada ao material do espécime...

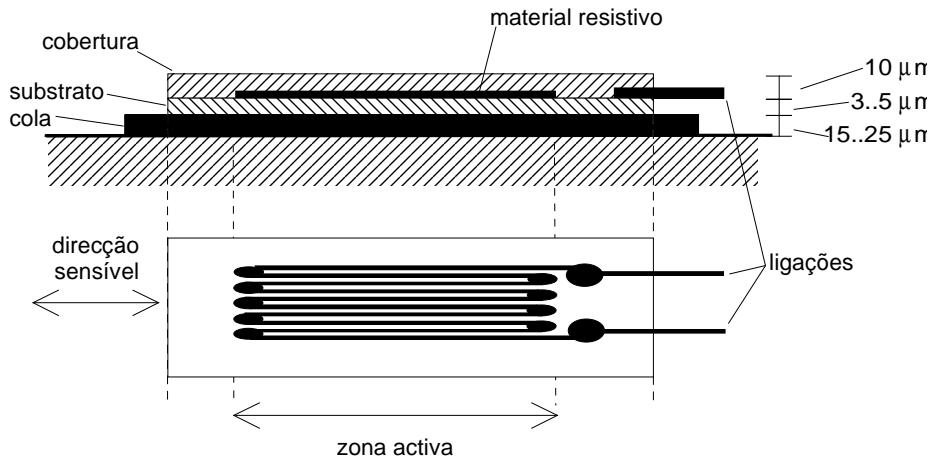


fig. extensómetro de folha metálica colada

O factor de sensibilidade  $k$  é tipicamente da ordem de 2 (até 5) para extensómetros metálicos. Extensómetros com semi-condutores (piezo-resistivos) têm factores de sensibilidade que variam numa gama de -100 a 200.

No entanto estes extensómetros, mais sensíveis, sofrem de não-linearidade, uma grande influência da temperatura na resistência e no factor  $k$ : utilizam-se para sinais de muito baixo nível e alta frequência, com um filtro passa-alto para cortar os desvios de baixa frequência.

A detecção da resistência variável é normalmente feita inserindo o extensómetro numa ponte resistiva, usando-se preferencialmente um (ou dois) pares de extensómetros variando em sentidos contrários.

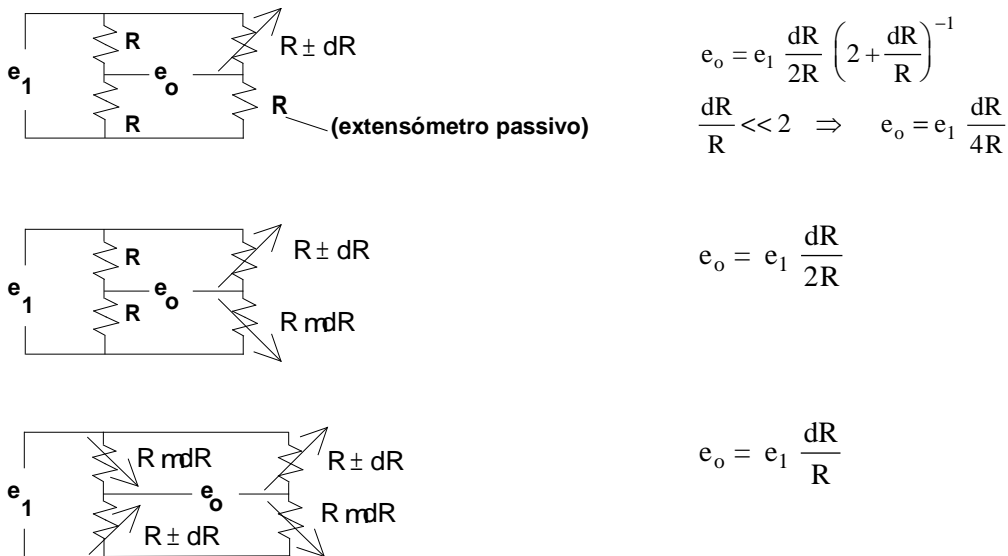


fig. configurações de pontes para os casos de um, dois ou quatro extensómetros activos

O uso de um extensómetro passivo (dummy) é uma maneira prática de reduzir os efeitos da temperatura, no caso de haver um único sensor submetido a grandes variações de temperatura. O segundo extensómetro deve ser colocado na mesma posição para sentir os mesmos efeitos de temperatura mas permanecendo imune aos esforços a medir –pode ser o segundo braço de uma roseta a 90° por exemplo.

Quando os cabos ligando sensor e ponte são compridos, eles introduzem uma resistência desconhecida e função das condições ambientais atravessadas. É então necessário inserir as resistências

dos cabos nos vários braços das pontes de forma equilibrada. Quando possível devem escolher-se extensómetros com resistência maior para reduzir a influência dos cabos.

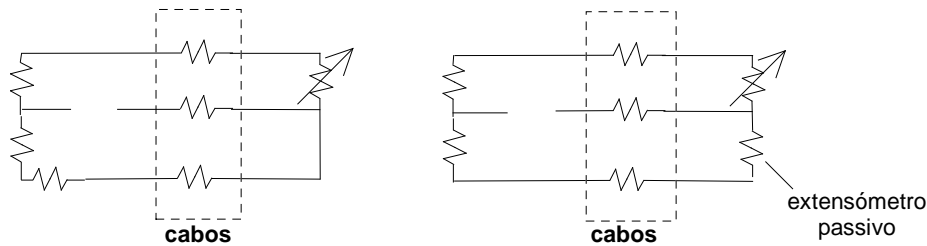


fig. inclusão das resistências da cablagem (ponte afastada do sensor)

As pontes de extensómetros são muito sensíveis às tensões (eléctricas) de modo comum. A sua alimentação por uma fonte não ligada à terra (massa) é preferível, por forma a evitar "ground loops", devendo-se fazer a ligação à terra no final da Cadeia de Medida –num ponto comum às várias cadeias, se há vários parâmetros medidos. Amplificadores de instrumentação devem ser usados.

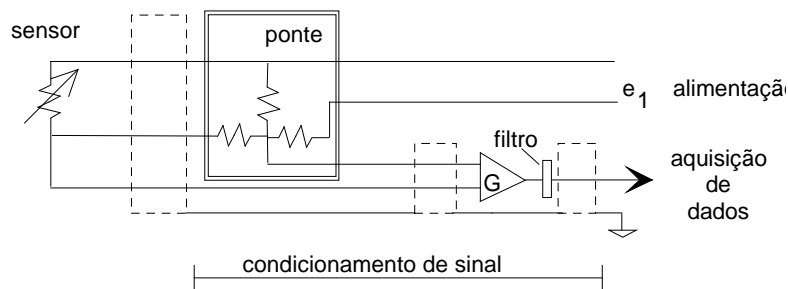


fig. a cadeia de medida do extensómetro

O potenciómetro introduzido para o ajuste do zero é habitual mas, quando possível, é melhor evitá-lo, evitando-se assim correcções ou ajustes manuais e eliminando-se uma fonte suplementar de ruído: o lugar mais apropriado para a correcção dos desvios lentos (drifts) é o tratamento/processamento dos dados, em numérico. O equilíbrio das pontes deve ser feito em laboratório –de acordo com os extensómetros instalados, claro.

Valores típicos relativos a extensómetros são apresentados na tabela seguinte.

| extensómetros                           |           |                              |
|---|-----------|------------------------------|
| gama de medida ( $\epsilon_{\max}$ )    | 50 000    | $\mu\text{m/m}$              |
| k                                       | $2 \pm 1$ | %                            |
| histerese                               | $\pm 1$   | $\mu\text{m/m}$              |
| resolução                               | inf.      |                              |
| tempo de vida                           | $>10^7$   | ciclos                       |
| alimentação                             | 1..36     | V                            |
| resistência                             | 100..700  | $\Omega$                     |
| temperatura de func.                    | -50..170  | $^{\circ}\text{C}$ (ou mais) |
| sensibilidade à temp.(conf. metal/liga) | 1..65     | $10^{-6}/\text{K}$           |
| dimensões (direcção sensível)           | 0.6..150  | mm (activo)                  |
|   | 8..170    | mm (total)                   |

Comentários: este tipo de elemento-sensor tem várias características importantes, justificando o seu emprego para um vasto leque de medições onde as deformações não passam de um testemunho:

- sinal medido eléctrico;
- dimensões e peso reduzidos;
- medições em estática e em dinâmica;
- alta resolução;
- possibilidade de uso em condições adversas (como 750°C e acelerações de 160 000 g);

O uso de extensómetros para medir deslocações *stricto sensu* pode ser demonstrado com o seguinte exemplo: uma barra encastrada (vide figura) é equipada com um par de extensómetros junto da sua base que através do momento de flexão medem a força aplicada no extremo livre da barra (F) e/ou o seu deslocamento (y):

$$\epsilon_{\max} = \frac{M}{EI} = -\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

implica que y é proporcional a  $\epsilon_{\max}$ .

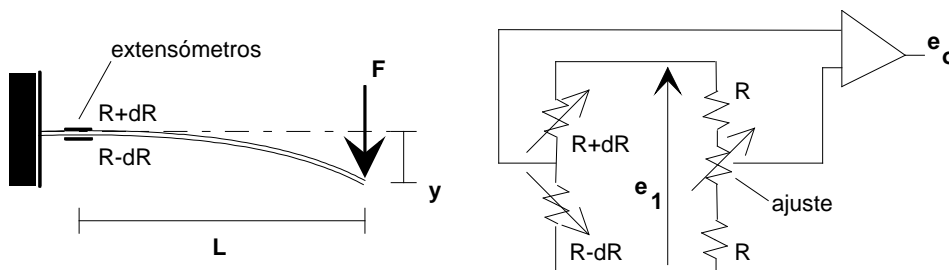


fig. medição de deslocações com extensómetros

### 2.1.6. sensores ópticos

Vários tipos de sensores utilizam a luz como veículo da informação e em particular raios laser.

O sensor em si pode ser:

- a) um fotosensor de posição cujo sinal é proporcional à intensidade luminosa incidente e à posição: existem sensores otimizados para a luz monocromática do laser detectando a posição do feixe laser com uma precisão melhor que 1  $\mu\text{m}$ , deduzindo-se a posição (x) por simples triangulação.

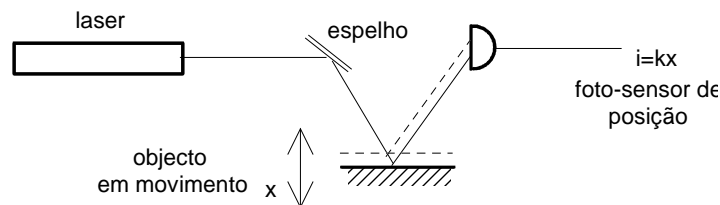


fig. laser e foto-sensor de posição

- b) uma câmara digital onde o sensor é uma matriz rectangular (bidimensional) de fotosensores também pode servir de sensor para o caso anterior, a posição sendo aqui fornecida pelas coordenadas do ponto de impacto do raio laser. De uma forma mais geral, se uma imagem varia no espaço, a câmara pode detectar esse movimento.

c)um foto-detector (PhotoMultiplier –PM): considere-se o feixe laser da figura dividido (a 50%) em E, indo um feixe reflectir-se no objecto em movimento O para se vir novamente encontrar com o outro, formando interferências detectadas por um foto-detector: contando as passagens de zonas claras/escuras obtém-se um sensor incremental com resolução da ordem de  $\lambda/4$  ( $\approx 80$  nm)!

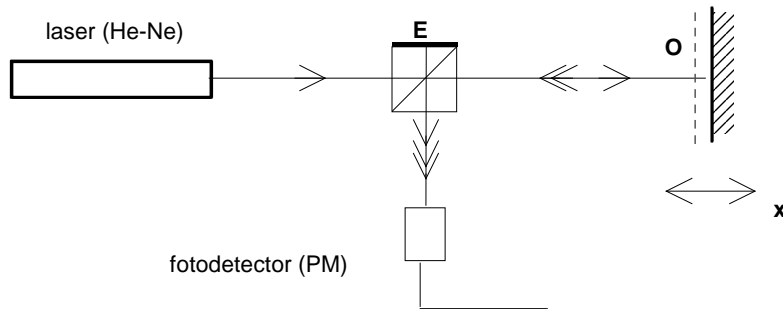


fig. laser e fotomultiplicador (interferências)

| exemplo de sensor de posição óptico (micro-epsilon messtechnik) |                  |     |
|---|------------------|-----|
| princípio   | triangulação (a) |     |
| gama de medida  | 5, 10, 20        | mm  |
| afastamento médio do alvo                                       | 59               | mm  |
| resolução   | 0.005            | %FS |
| linearidade   | 0.03             | %FS |
| laser   | 670              | nm  |
| frequência máxima   | 10               | kHz |
| saída analógica   | $\pm 5/0..10$    | Vdc |
| saída digital   | série RS485      |     |
| temperatura de func.  | 5..40            | °C  |
| alimentação   | $\pm 12,24,5$    | Vdc |
| tempo de vida (laser)   | 50 000           | h   |



### **2.1.7.outros sensores/meios de medição da posição**

Entre outros sensores de posição citemos:

- o radio-altímetro/sonar mede o tempo que separa o envio de um impulso e a sua recepção após reflexão no obstáculo: conhecendo-se a velocidade de propagação da onda deduz-se o afastamento do dito obstáculo;
- se dois radio-faróis de localização conhecida são recebidos por um veículo com ângulos  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  em relação ao norte ou a um terceiro, pode-se deduzir por intersecção a posição absoluta do veículo;
- um exemplo de sensor de posição absoluta para aeronaves ou veículos terrestres, utilizando como "faróis" satélites dedicados, são os sistemas GPS (Global Positioning System), que fornecem (segundo os catálogos) as três coordenadas (x, y, z) com erros possivelmente inferiores ao metro e a frequências da ordem de 1 Hz.

## 2.2.proximidade

Baseados nos princípios, indutivo, capacitivo, óptico, etc, existem sensores de posição com características específicas: são sensores de proximidade.

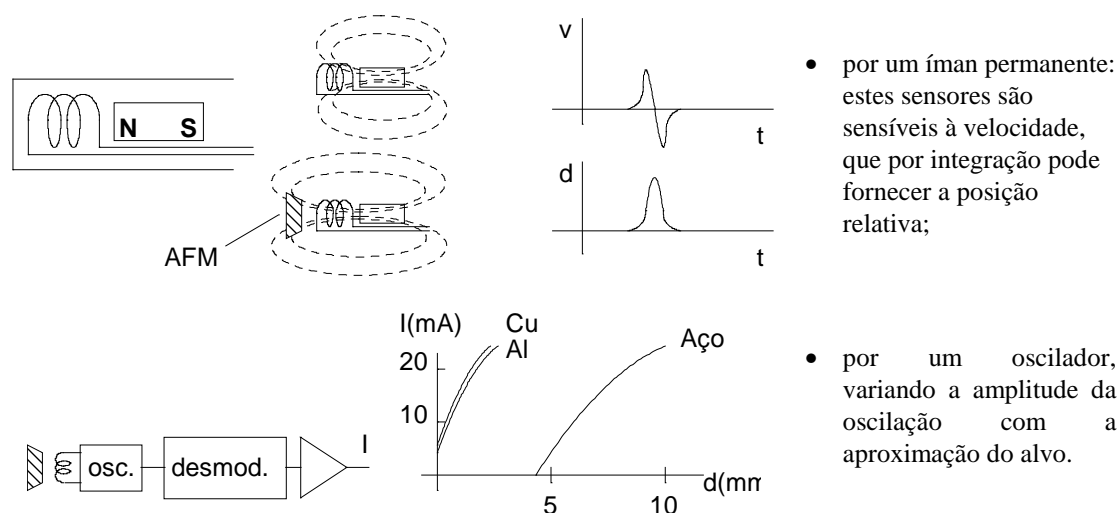
A utilização mais frequente destes sensores é como interruptores: um circuito de comparação com uma referência pré-escolhida permite filtrar o sinal analógico e fornecer um valor dual, do tipo liga/desliga.

### 2.2.1.sensor indutivo

Sensores indutivos são sensíveis à presença do alvo ferro-magnético (AFM) através da variação de campo magnético provocada pela sua aproximação, variação detectada por um enrolamento de pequenas dimensões junto à face do sensor.

No caso de alvos de Alumínio (Al) ou Cobre (Cu), o alcance do sensor é reduzido num factor de cerca de 0.1 a 0.2.

O campo pode ser gerado:

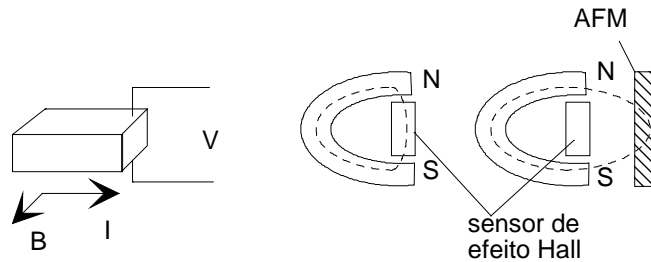


A título de exemplo, citemos os dados técnicos de um sensor indutivo.

| um sensor de proximidade indutivo |          |                      |
|-----------------------------------|----------|----------------------|
| gama (alcance)                    | 0..5     | mm                   |
| alimentação                       | 1..10    | V ac (1..50 kHz)     |
| nominal                           | 5        | V (a 5 kHz)          |
| resistência de carga              | 1        | kΩ                   |
| resistência interna               | 2x 162   | Ω                    |
| corrente nominal                  | 6.5      | mA                   |
| gama de temperaturas              | -40..150 | °C                   |
| sensibilidade à temp.             | < 5      | % (5 mm; -10..100°C) |
| gama de pressões                  | 0..70    | bar                  |
| dimensões                         | 24 x 35  | mm(diam) x mm        |
| peso                              | 70       | g                    |

### 2.2.2. sensor de efeito Hall

O efeito Hall decorre da força de Lorentz, força aplicada por um campo magnético sobre uma carga em movimento:  $\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$ .

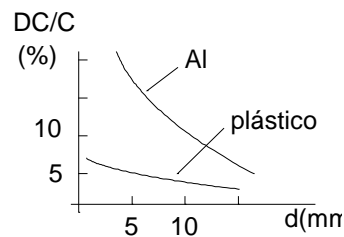
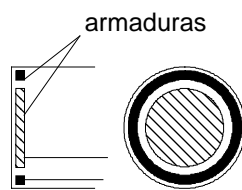


Se um material, imerso num campo magnético (B), é percorrido por uma corrente ( $\vec{I} \perp \vec{B}$ ), gera-se assim no terceiro eixo uma tensão proporcional a IB.

Com materiais semicondutores, esta tensão é mensurável e obtém-se assim um sensor de efeito Hall, que detecta a aproximação de um alvo ferromagnético.

### 2.2.3. sensor capacitivo

Neste caso é a variação de constante dielétrica entre as duas armaduras de um condensador que é detectada.



Uma vantagem de este tipo de sensor é que autoriza alvos não ferromagnéticos.

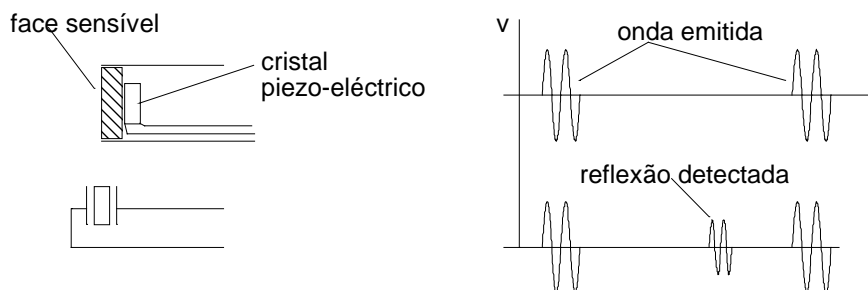
As variações relativas de capacidade, com alcances de cerca de 1 cm, rondam os 5..20%.

Eventualmente o sensor pode fazer parte de um circuito oscilante algo similar ao caso do sensor indutivo.

### 2.2.4. sensor ultra-sónico

O sensor ultra-sónico emite periodicamente um curto trem de onda ultra-sónica e detecta depois a onda reflectida no obstáculo/alvo. O tempo separando emissão e detecção é a medida da distância ao alvo.

O elemento sensível em si é um cristal piezo-cerâmico junto à face anterior do sensor, funcionando simultaneamente como emissor e receptor.

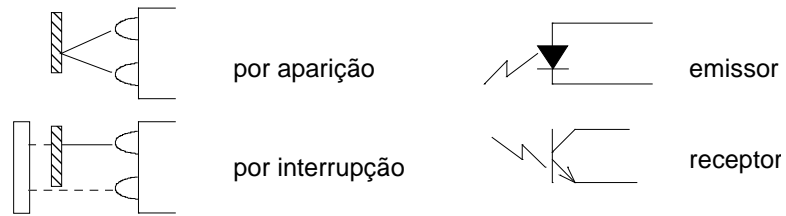


Este sensor tem normalmente um alcance maior, da ordem do metro.

Existem circuitos integrados monolíticos (LM1812 p.e.) para simultaneamente gerar e detectar as ondas emitida e reflectida.

### 2.2.5.sensor óptico

No caso do sensor óptico, uma onda luminosa é emitida por um LED, normalmente no infra-vermelho, e a sua reflexão no alvo é detectada por um foto-sensor (foto-transistor, foto-resistência ou outro). Em alternativa, o alvo pode ser detectado não ao reflectir o feixe luminoso mas ao interromper o contacto entre emissor, reflector e receptor.



Neste caso o alcance vai da dezena de centímetros a vários metros.

## 2.3. posição, deslocação angular

### 2.3.1. sensores analógicos

#### potenciômetros

Princípio e características destes sensores são similares aos dos seus homólogos lineares.

São divisores de tensão que fornecem uma saída em tensão proporcional ao ângulo entre um eixo móvel e o corpo fixo (ou vice-versa) –vide figura.

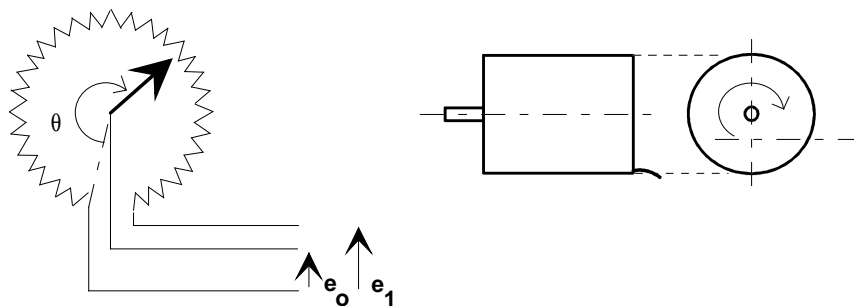


fig. sensor angular potenciométrico

A título de exemplo, seguem alguns valores típicos de sensores disponíveis no mercado:

| sensor de posição angular potenciométrico |                     |                     |             |
|---|---------------------|---------------------|-------------|
| diâmetro                                  | 8.5                 | 2.5                 | "(2.54 cm)  |
| gama de medida                            | 352                 | 358                 | °           |
| resistência                               | 7..20               | 80..100             | kΩ          |
| linearidade                               | <0.2                | <0.075              | %           |
| binário máximo                            | 2                   | 8                   | g cm        |
| velocidade máxima                         | 3600                | 1000                | °/s         |
| vida útil                                 | > 5 10 <sup>7</sup> | > 2 10 <sup>7</sup> | (3 Hz, 60°) |

#### resolvers

Estes sensores indutivos são transformadores (cf. o movimento linear) fornecendo um sinal proporcional aos seno e cosseno entre o eixo e o corpo do sensor.

Se o rotor (ver figura) for alimentado com uma tensão alterna  $e_r = E_r \exp(j\omega t)$ , ele produz um fluxo magnético  $B_r$  e induz no estator uma tensão alterna  $e_A$  proporcional ao seno do ângulo rodado pelo eixo, a partir de um zero adequado.

Uma desvantagem deste tipo de sensor pode ser devida ao seno introduzido:

- a relação entre saída e ângulo não é linear;
- limita a gama de aplicabilidade a uma gama de 180°.

No entanto:

- se o parâmetro interessante for directamente o seno do ângulo este pode ser o sensor ideal;
- em conjugação com o sinal  $e_B$  fornecido por um segundo enrolamento no estator, ele proporcional ao cosseno, obtém-se a gama completa dos 360°.

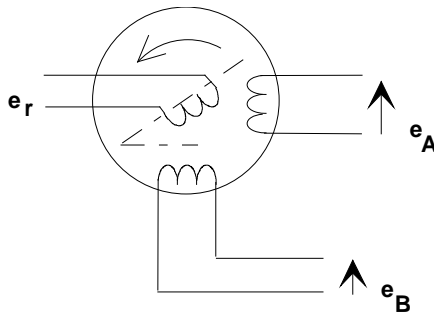


fig. resolvers

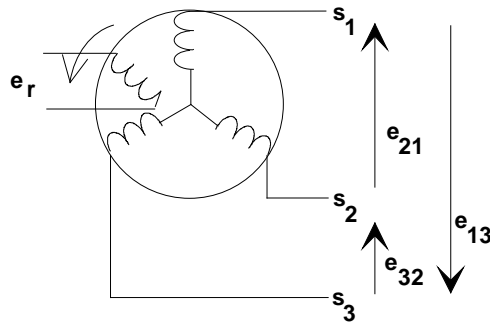


fig. synchros

| no caso do resolver  | no caso do synchro  |
|--|---|
| $e_A = K_A \sin(\theta) \sin(\omega t + \alpha_A)$ $e_B = K_B \cos(\theta) \sin(\omega t + \alpha_B)$ $e_r = K_r \cos(\omega t)$ | $e_{13} = K_1 \sin(\theta) \sin(\omega t + \alpha_1)$ $e_{32} = K_2 \sin(\theta + 2\pi / 3) \sin(\omega t + \alpha_2)$ $e_{21} = K_3 \sin(\theta - 2\pi / 3) \sin(\omega t + \alpha_3)$ |
| no caso ideal:<br>$\alpha_A = \alpha_B = 0; K_A = K_B$   | no caso ideal:<br>$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0; K_1 = K_2 = K_3$   |
| conduzindo a $\frac{e_A}{e_B} = \tan(\theta)$  |   |

synchros

O princípio de funcionamento destes sensores é parecido ao anterior, substituindo-se neste caso o enrolamento "monofásico" do estator por um enrolamento trifásico. Os três sinais fornecidos  $s_1$ ,  $s_2$  e  $s_3$  permitem uma determinação do ângulo na gama dos  $360^\circ$ . A saída tripla é de um tipo específico dito "sinal synchro".

Para ambos estes dois tipos de sensores, resolvers e synchros, a precisão é melhor que  $4'$  de arco. Necessitam de uma alimentação em ac mas, não havendo contacto, não há erosão nem uso mecânico e o binário consumido é inferior tipicamente a meio grama-centímetro.

transformadores lineares

Ainda na continuidade dos sensores indutivos e próximos dos sensores LVDT lineares, existem sensores de posição angular baseados em transformadores fornecendo uma tensão proporcional ao ângulo observado.

A título de exemplo apresentamos na tabela seguinte as características de um sensor no qual já estão incluídos o modulador de alimentação e o desmodulador de pré-CS.

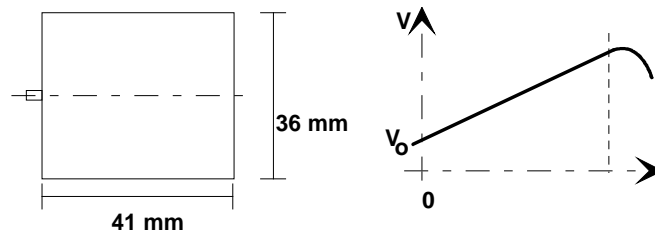


fig. resposta de um sensor tipo lvdt

| <b>sensor de posição angular do tipo LVDT</b> |          |              |
|---|----------|--------------|
| dimensões                                     | 36 x 41  | mm(diam)x mm |
| peso  | 100      | g            |
| gama  | 4..300   | °            |
| alimentação                                   | 10       | V dc (50 mA) |
| sensibilidade                                 | 33..470  | mV/° (dc)    |
| tensão $V_o$                                  | 50..3600 | mV           |
| linearidade                                   | < 0.5    | %            |
| resolução                                     | inf.     |              |
| resistência de carga                          | 10       | k $\Omega$   |
| binário máximo                                | 0.5      | g cm         |

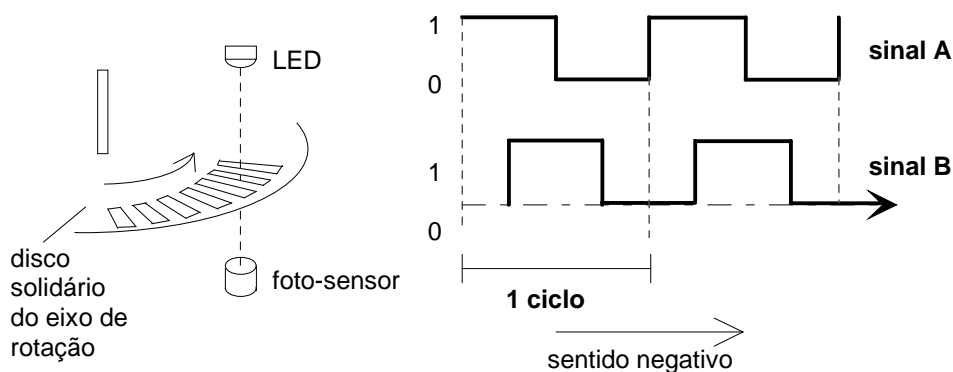
### 2.3.2.sensores digitais

#### codificadores ópticos incrementais

Entre os vários codificadores digitais (encoders), os ópticos são os de maior relevo.

O seu princípio de funcionamento é bastante simples (ver figura):

- uma fonte luminosa (LED infra-vermelho por exemplo) emite um feixe luminoso;
- um disco com gretas distribuídas de forma regular acompanha o eixo móvel, intercepta intermitentemente o feixe de luz;
- um foto-sensor detecta a sucessão de claro/escuro que acompanha a rotação do eixo móvel e fornece um impulso para cada greta;
- contando os pulsos e conhecendo o ângulo inicial, obtém-se por dedução (e cálculo) a posição do eixo.



**fig. codificador óptico incremental**

Na prática:

- a saída já é fornecida sob a forma de um sinal rectangular digital TTL/CMOS;
- para se saber o sentido do movimento, é fornecido um segundo sinal desfasado do primeiro de cerca de 90°, em avanço ou em atraso em função da direcção.

A título de exemplo, seguem alguns valores típicos de sensores disponíveis no mercado:

| <b>codificadores ópticos incrementais (encoders)</b> |                  |                  |            |
|--|------------------|------------------|------------|
| diâmetro   | 25               | 80               | mm         |
| comprimento  | 25               | 50               | mm         |
| gama de medida                                       | >360             | >360             | °          |
| resolução  | 25               | 1000             | imp./volta |
| precisão   | 30               | 4                | ' de arco  |
| alimentação  | 5 (25)           | 5 (100)          | V dc(mA)   |
| saída  | TTL/CMOS         |                  |            |
| freq.máxima  | 50               | 50               | kHz        |
| velocidade mecânica máxima                           | 500              | 1000             | rpm        |
| binário máximo                                       | 3                | 150              | g cm       |
| vida útil (LED)                                      | >10 <sup>5</sup> | >10 <sup>7</sup> | h          |

Note-se aqui que também existem codificadores ópticos incrementais lineares, funcionando exactamente sobre o mesmo princípio.

**codificadores digitais absolutos**

O anterior sinal digital fornece digamos 1 bit de informação, correspondendo ao claro/escuro detectado, que é necessário "integrar" para se obter a posição absoluta do eixo de rotação. Se para cada posição angular houver um número N de bits, uma codificação binária destes bits permite definir 2<sup>N</sup> ângulos distintos.

É este o princípio dos codificadores digitais absolutos (shaft encoders). Um disco é dividido em 2<sup>N</sup> sectores com N bits (LED) a serem detectados por N foto-sensores alinhados radialmente. O código binário utilizado normalmente é o código de Gray para o qual dois números sucessivos só diferem de um dígito, o que diminui a sensibilidade do sensor a um eventual mau alinhamento dos LED-detectores.

**tabela**

| dec | bin  | Gray |
|-----|------|------|
| 1   | 0001 | 0001 |
| 2   | 0010 | 0011 |
| 3   | 0011 | 0010 |
| 4   | 0100 | 0110 |
| 5   | 0101 | 0111 |
| 6   | 0110 | 0101 |
| 7   | 0111 | 0100 |
| 8   | 1000 | 1100 |
| ... |      |      |

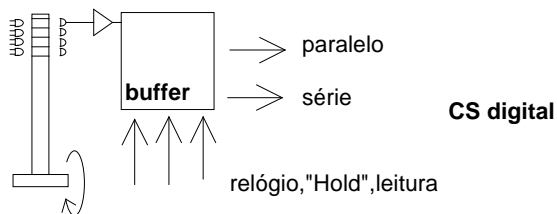
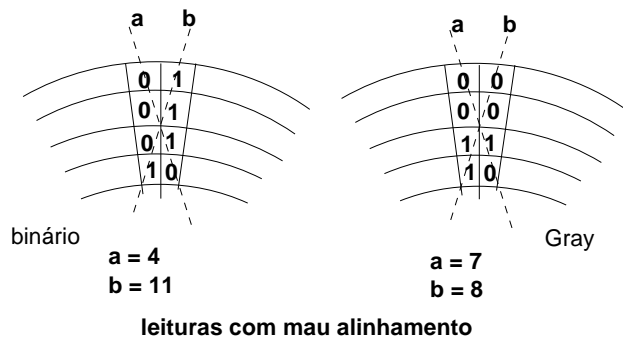


fig. codificador digital absoluto

A resolução **Error! Reference source not found.** obtida é função do número N de bits utilizados:



$$\delta = \frac{\text{gama}}{2^N} = \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{2^N}$$

Tipicamente o erro plena escala é o erro de quantificação.

Com  $N = 12$  e uma gama de  $360^\circ$  obtém-se uma resolução de  $5.4' = 0.09^\circ$ .

### 2.3.3. sensores específicos

#### inclinómetros

Estes sensores medem o ângulo entre a base do seu corpo e a horizontal. Apresentamos aqui dois tipos de inclinómetros, ambos para medições estáticas ou sem acelerações.

Inclinómetros baseados em pêndulos medem a posição angular da vertical, apontada pelo pêndulo, em relação ao corpo do sensor. O sensor pode ser do tipo potenciómetro ou synchro; a medida pode ser feita num ou dois eixos, neste caso com dois sensores perpendiculares. O pêndulo move-se normalmente num fluido amortecedor (silicone por exemplo).

As gamas de medida e demais características correspondem àquelas dos sensores de posição angular utilizados.

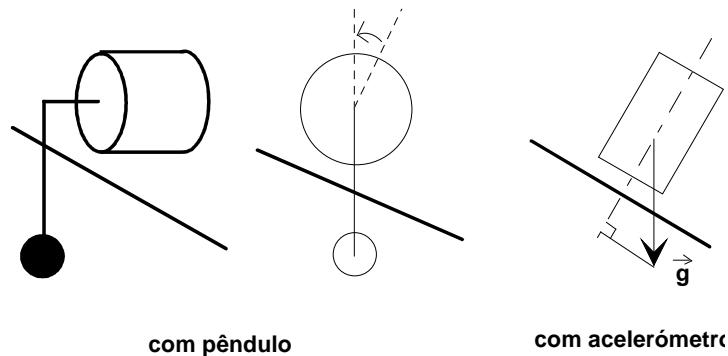


fig. inclinómetros

Inclinómetros baseados em acelerómetros lineares medem a componente da aceleração da gravidade projectada no eixo sensível do acelerómetro. O sinal é assim proporcional ao seno do ângulo formado por esse eixo e a vertical.

#### bússolas

Bússolas, ou magnetómetros, são sensores destinados a medir o ângulo entre o corpo do instrumento e o norte magnético (azimute), ou seja entre um eixo horizontal ligado ao instrumento e o meridiano (magnético) terrestre.

Devido ao campo magnético terrestre ser fraco e para evitar interferências com campos criados pelos circuitos eléctricos, o magnetómetro deve normalmente ser afastado do resto dos equipamentos.

A saída analógica tem duas formas alternativas, ambas com sinais em tensão contínua:

- sinal único proporcional ao azimute;
- dois sinais funções lineares do seno e do coseno do azimute.

## 2.4.velocidade

Para medir velocidades, uma primeira hipótese seria medir posições e logo derivar (ou medir acelerações e integrá-las) mas é melhor, quando possível, medir a própria velocidade, porque:

- a diferenciação é um filtro passa-alto;
- a integração é um filtro passa-baixo;
- ambas introduzem erros e ruído dispensáveis.

Uma excepção importante é o codificador incremental que na realidade é um sensor digital de velocidade. A contagem dos impulsos por unidade de tempo ou medição do tempo entre dois impulsos fornece a informação desejada, proporcional à velocidade.

### 2.4.1.velocidades lineares

Sensores indutivos do tipo "pick-up", com magneto móvel (moving magnet) ou bobina móvel (moving coil) geram uma tensão alterna proporcional à velocidade linear relativa ( $v$ ):

$$e = Bl v$$

onde  $B$  é o campo magnético e  $l$  o comprimento do fio da bobina.

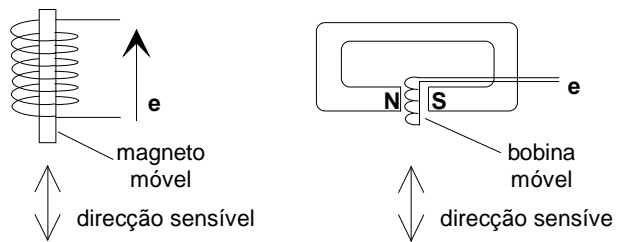


fig. pick-up

As sensibilidades de ambos os tipos de sensores varia:

- para o magneto móvel de 16.5 a 250 mV/(m/s);
- para a bobina móvel de 4 a 3000 mV/(m/s).

As gamas de frequência vão até 10 a 20 kHz.

### 2.4.2.velocidades angulares –taquímetros

Entre os vários princípios utilizados para medir velocidades de rotação, os de maior relevância são os geradores de tipo contínuo (dc) ou alternado (ac).

Nos taquímetros-geradores dc, um campo magnético solidário do eixo em movimento roda e produz na bobina do estator uma tensão contínua proporcional à velocidade de rotação.

Nos taquímetros-geradores ac, de princípio similar, o enrolamento tem um eixo perpendicular com o eixo de rotação. A tensão gerada é alternada, de amplitude e de frequência moduladas, ambas proporcionais à velocidade.

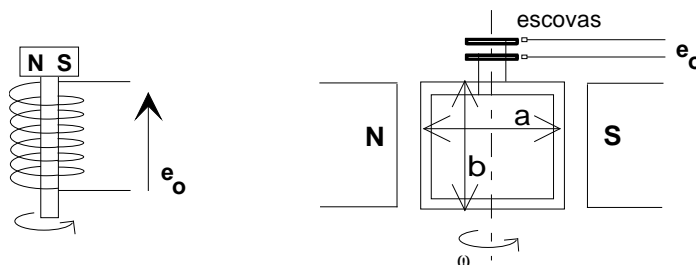


fig. taquímetro-gerador dc e ac

taquímetro dc

A desmodulação da amplitude fornece um taquímetro analógico dc: se o único enrolamento do gerador ac for substituído por 12 enrolamentos de 15 em 15° e as escovas fizerem sequencialmente contacto com um deles 12, obtém-se um ângulo efectivo  $|\theta_e| < 7.5^\circ$  para o qual o coseno é sensivelmente igual à unidade: a tensão é assim quase contínua, com uma ligeira ondulação (ripple), proporcional à velocidade angular  $\omega$ .

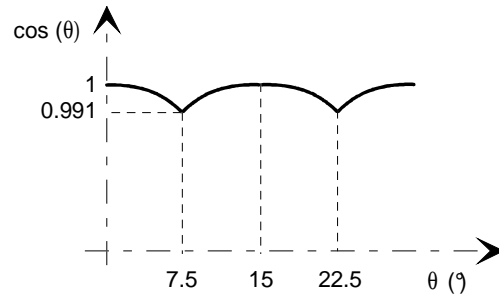


fig. gerador dc a partir de um gerador ac

medição da frequência

No entanto a amplitude é mais sensível ao ruído que a frequência e é normalmente utilizada a frequência do sinal para fornecer a medida. Isto é feito num conversor frequência-tensão (Frequency to Voltage Converter –FVC).

Neste circuito, usualmente integrado, um primeiro módulo usa um comparador para detectar a passagem pelo zero no sentido positivo, produzindo a cada vez um impulso, e um segundo módulo conta os impulsos, soma e filtra, fornecendo uma tensão final proporcional à frequência do sinal de entrada.

Alternativamente, a contagem dos impulsos durante um período de tempo fixo fornece directamente uma conversão digital da frequência.

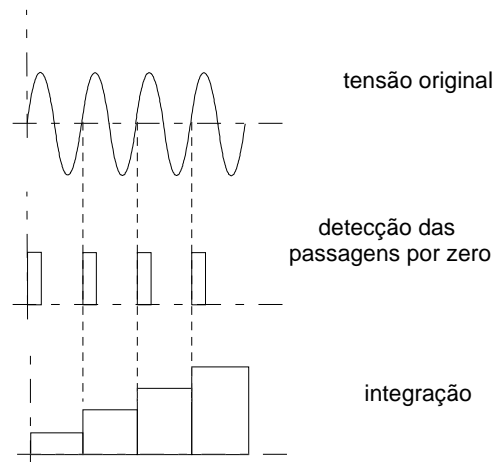


fig. conversão frequência-tensão

**2.4.3. velocidades angulares –geradores de impulsos**

Aplicando a filosofia do codificador incremental, existem sensores de velocidade com geradores de impulsos baseados noutros princípios (capacitivos, indutivos, etc).

Por exemplo, num medidor de caudal, um magneto solidário do rotor da turbina origina um impulso de tensão a cada passagem em frente de um enrolamento fixo exterior à canalização (ver figura).

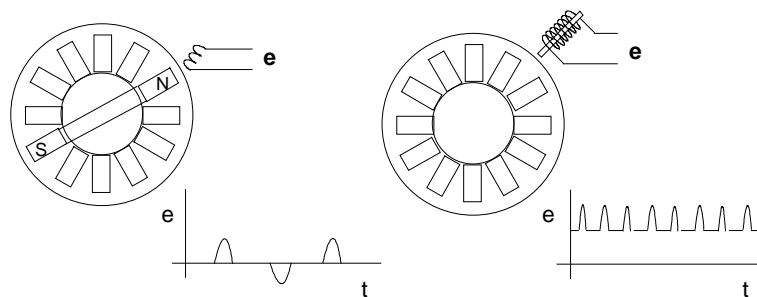


fig. geradores de impulsos indutivos

Outra versão, igualmente indutiva, baseia-se numa turbina em material ferromagnético, cujas pás, ao passarem pelo eixo de um enrolamento fixo, lhe alteram a auto-indutância e geram um impulso de tensão no enrolamento.

### 2.4.4. velocidades angulares por arrasto

#### arrasto magnético

Este sensor, em uso nos velocímetros de automóveis, é essencialmente composto de um ímã solidário do eixo rotativo, rodando frente a um disco (ou campânula –cup) de alumínio e induzindo neste correntes magnéticas (de Foucault –eddy currents) e um momento de arrasto, tendendo a acompanhar a rotação. Este momento é equilibrado pelo binário exercido por uma mola (por exemplo) num ângulo  $\theta$  proporcional ao binário e proporcional à velocidade de rotação.

Precisões de até 0.3% são obtidas, numa gama de medida que atinge as 3000 rpm.

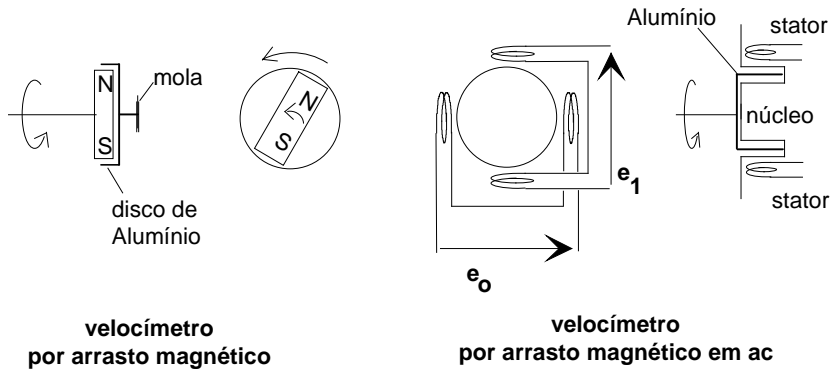


fig. velocidade angular por arrasto magnético

#### arrasto alimentado em ac

Correntes magnéticas de Foucault são ainda aqui o transmissor do sinal, da informação. Um corpo cilíndrico de alumínio roda no eixo de um estator equipado com dois enrolamentos a 90° (ver figura). Sendo o primeiro alimentado em corrente alterna, induzem-se correntes magnéticas no alumínio e gera-se uma f.e.m. alterna no segundo enrolamento, de amplitude proporcional à velocidade de rotação do alumínio.

### 2.4.5. velocidades angulares inerciais –giroscópios

Nos casos de um avião ou de um submarino por exemplo, livres de todo o contacto com a terra, nenhum ponto fixo está disponível para servir de referência para a determinação das posições linear ou angular do corpo em movimento em relação à terra. Dois tipos de sensores *embarcados* permitem a obtenção dessas posições ou de suas derivadas: acelerómetros lineares (adiante apresentados) e giroscópios.

O princípio, o funcionamento e os problemas do giroscópio são bastante complexos e aqui limitar-nos-emos a uma apresentação simplificada da ideia.

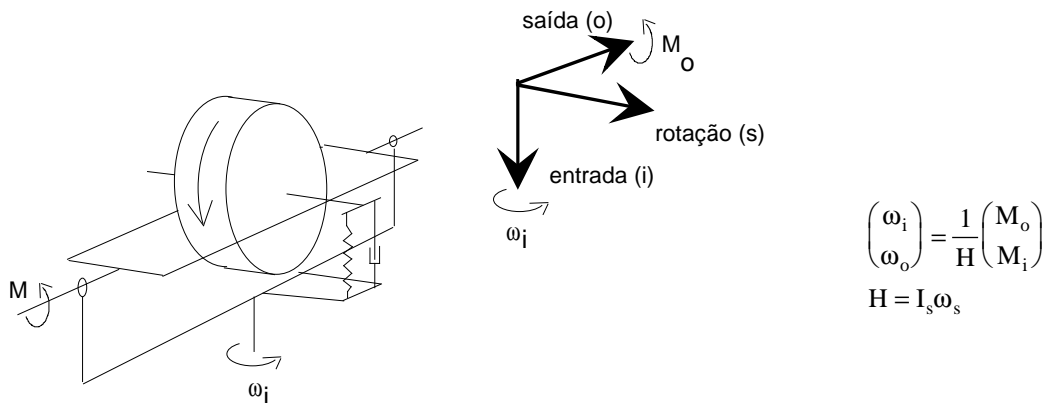


fig. o princípio do giroscópio

Um giroscópio de razão (rate gyroscope) é essencialmente um corpo pesado com simetria cilíndrica animado (por um motor eléctrico) de uma grande velocidade de rotação, isto é com um elevado momento angular  $H$  em torno do seu eixo principal ( $\underline{s}$ ). O efeito giroscópico, consequência da lei de Newton aplicada a um corpo em rotação, consiste na troca de eixos entre os momentos exteriores aplicados e as rotações segundo os dois eixos transversos ( $\underline{i}$  e  $\underline{o}$ ).

Um giroscópio com um único grau de liberdade ( $\underline{o}$ ) é sensível às rotações no outro eixo ( $\underline{i}$ ). Um giroscópio com dois graus de liberdade é sensível nos dois eixos transversos ( $\underline{i}$  e  $\underline{o}$ ).

Uma rotação  $\omega_i$  imposta segundo o eixo  $\underline{i}$  induz um momento  $M_o$  no eixo  $\underline{o}$ . Este momento é equilibrado por um binário exterior cujo valor algébrico é assim proporcional à velocidade angular  $\omega_i$ .

Na prática, os binários exteriores são fornecidos:

- por molas (e amortecedores) medindo-se então o ângulo  $\theta_o$  de equilíbrio com potenciómetros ou synchros
- ou por um controlo em malha fechada, sendo aí medida a intensidade de corrente necessária para fornecer o binário.

A realização do princípio acima descrito é delicadíssima e numerosos erros vêm limitar a precisão obtida, erros que devem ser calibrados e tidos em conta —em navegação os erros são integrados e a precisão deve ser melhor que  $0.01^\circ/h$ .

Entre as várias fontes de erros citemos:

- atritos, histereses, interferências magnéticas, efeitos da temperatura na mecânica do sensor;
- acelerações lineares/angulares, desequilíbrio dinâmico e não-isoelasticidade;
- maus alinhamentos dos eixos;
- vibrações.

Valores típicos para giroscópios com um único grau de liberdade são apresentados na tabela seguinte.

| <b>giroscópios</b>              |            |                      |
|---------------------------------|------------|----------------------|
| gama ( $\omega_{max}$ )         | 10..5000   | $^\circ/s$           |
| resolução ( $\omega_{min}$ )    | 0.01..0.08 | $^\circ/s$           |
| histerese                       | 0.1        | $\% \omega$          |
| desajuste do zero               | 0.1..0.5   | $^\circ/s$           |
| binário de desequilíbrio        | <0.1       | $\% \omega_{max}/g$  |
| relação de saída                | ajustável  |                      |
| sensibilidade à ac.ang.         | <0.1       | $^\circ/s/(rad/s^2)$ |
| frequência natural              | 10..120    | Hz                   |
| factor de amortecimento         | 0.1..1     |                      |
| veloc.de rotação ( $\omega_s$ ) | $2\pi 400$ | rad/s                |
| momento angular (H)             | 0.001..0.1 | Nms                  |

Existem giroscópios para medição da posição angular, chamados giroscópios de atitude ou verticais, por medirem os ângulos entre a horizontal e o veículo. Estes sensores são ainda mais delicados (na sua manufactura e utilização) e caros que os giroscópios de razão.

Recentemente têm aparecido novos sensores de velocidades angulares baseados no princípio piezoeléctrico e sem componentes móveis, com características próximas dos giroscópios de razão mas a custos muito inferiores.

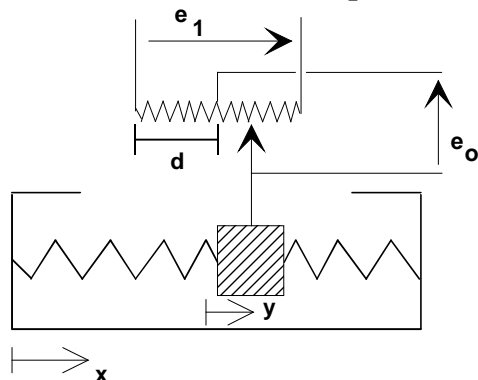
**sensor de velocidade angular piezoelétrico Murata enc 05s**

|  |             |                   |
|--|-------------|-------------------|
| gama de medida                                     | ±90         | °/s               |
| zero ou offset (para $\omega = 0$ )                | 2.5         | Vdc               |
| sensibilidade (scale factor)                       | 0.8         | mVdc/(°/s)        |
| linearidade  | 5           | % FS              |
| deriva do zero (offset drift)                      | ±0.5        | Vdc               |
| estabilidade da sensibilidade (scale factor drift) | ±20         | %                 |
| largura de banda                                   | 50          | Hz                |
| ruído  | 200         | mV <sub>rms</sub> |
| alimentação  | 2.5/5       | Vdc               |
| corrente de alimentação                            | 10          | mA                |
| peso   | 3.5         | g                 |
| dimensões  | 20x13.2x7.1 | mm                |

## 2.5.aceleração

Pela própria segunda lei de Newton ou pelo princípio de d'Alembert, acelerações e forças são detectadas simultaneamente. A forma mais natural de medir acelerações é através da força de inércia.

### 2.5.1.acelerómetros lineares potenciométricos



$$e_o = e_1 \frac{y}{2d}$$

fig. acelerómetro linear potenciométrico

No caso destes sensores a força de inércia linear

$$m a = m \frac{d^2 x}{dt^2}$$

é equilibrada pela força de uma mola cujo deslocamento  $y$ , função linear da aceleração aplicada (em situação estacionária), é medido por um sensor potenciométrico.

A mola pode ser do tipo linear, barra de flexão (cantilever), etc. Amortecimento fluido é normalmente aplicado. A função de transferência é típica de um sistema de 2ª ordem, com frequências naturais da ordem da dezena de Hertz e factores de amortecimento (fraco) numa gama de 0.1 a 1. As precisões conseguidas são próximas daquelas dos sensores de posição potenciométricos.

### 2.5.2.acelerómetros servo-controlados

A força de equilíbrio pode ser fornecida por um actuador de forma a manter a posição no zero, sendo então a medida da aceleração fornecida pela intensidade alimentando o actuador, proporcional à força aplicada.

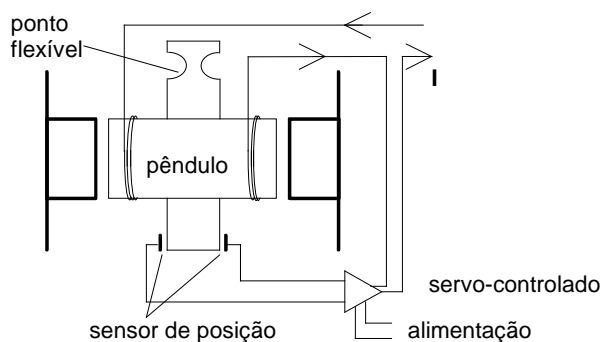


fig.acelerómetro servo-controlado

O sensor de posição (pickoff) para o ajuste do zero pode ser de tipo capacitivo, indutivo, óptico ou por extensómetros.

Alguns dados típicos para estes acelerómetros de qualidade são apresentados na tabela seguinte –aqui  $g$  simboliza a aceleração da gravidade.

| acelerómetros servo-controlados |                    |                              |
|---------------------------------|--------------------|------------------------------|
| gama ( $a_{max}$ )              | 10..400            | g                            |
| banda passante                  | 0..300             | Hz                           |
| sensibilidade                   | 1..4               | mA/g                         |
| linearidade                     | $<3 \cdot 10^{-5}$ | g                            |
| resolução ( $a_{min}$ )         | $10^{-6}$          | g                            |
| repetibilidade                  | $6 \cdot 10^{-5}$  | g                            |
| mau alinhamento                 | $10^{-3}$          | g/g                          |
| sensibilidade à temp.           | $<30$              | $\mu\text{g/K}$              |
| sens. às vibrações              | $<50$              | $\mu\text{g/g}^2$ (15 g rms) |
| temperatura operacional         | -55..107           | $^{\circ}\text{C}$           |
| peso                            | 80                 | g                            |

### 2.5.3. acelerómetros piezoelétricos

No caso dos acelerómetros piezoelétricos, a força de equilíbrio resulta da compressão/desformação de um cristal piezoelétrico (substituindo a mola) gerando neste uma carga Q proporcional à força de inércia ( $F = ma$ ) aplicada:

$$Q = k F = k ma$$

onde k é a constante piezoelétrica característica do cristal (da ordem de alguns pC/N).

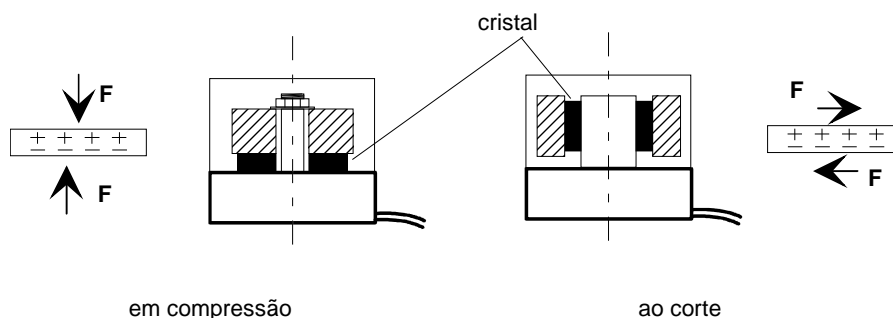


fig. acelerómetros piezo-elétricos

O cristal é colocado entre duas placas condutoras e constitui assim um condensador entre cujas armaduras aparece uma tensão

$$e_o = \frac{Q}{C_s}$$

proporcional à carga gerada e inversamente à capacidade  $C_s$  do cristal.

A grande sensibilidade do sensor piezoelétrico deve-se à grande rigidez do seu cristal mas esta também lhe confere um comportamento essencialmente não-amortecido, divergente para as frequências próximas da sua frequência natural  $f_n$ . A resposta do sensor  $A(f)$  vê-se assim limitada a:



- $f < 0.2 f_n$  para obter erros inferiores a 4%;
- $f < 0.1 f_n$  para obter erros inferiores a 1%.

Além disso, é necessário não submeter o sensor a solicitações próximas da ressonância, arriscando-se a afectar a sua integridade, ou até destruí-lo.

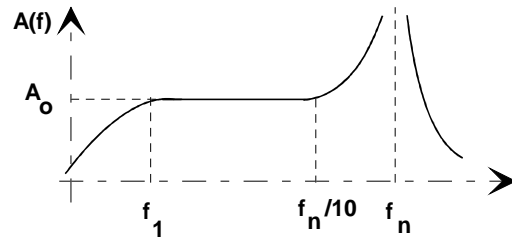


fig. resposta do sensor isolado

A baixas frequências a carga gerada tem tendência em dissipar-se, devido a fugas de corrente, internas ou externas ao sensor.

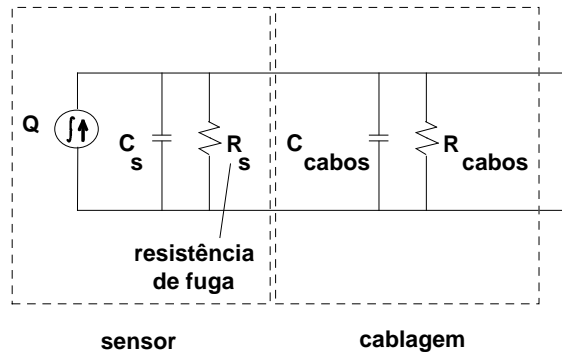


fig. esquema equivalente do acelerómetro piezo-eléctrico em conjunto com a cablagem

O sensor piezoeléctrico pode ser considerado como a junção em paralelo de um gerador de carga  $Q$ , de um condensador  $C_s$  e de uma resistência de fuga  $R_s$ , resultando assim num sistema passa-alto, de frequência de corte

$$f_1 = \frac{1}{2R_s C_s}$$

com valores típicos de:  $R_s = 1 \text{ G}\Omega$ ,  $C_s = 1 \text{ nF}$ ,  $f_1 = 0.1 \text{ Hz}$ .

Acelerómetros piezoeléctricos não são utilizados em estática mas sim para medir vibrações.

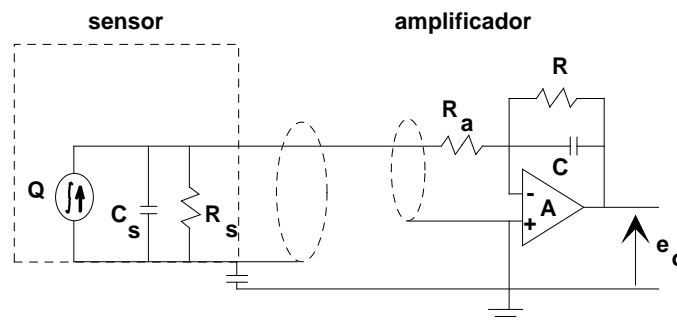


fig. amplificador de carga

Para o condicionamento de sinal, é possível utilizar um amplificador de tensão, mas é preferível recorrer a um amplificador de carga que fornece directamente uma tensão proporcional à carga gerada  $Q$ . Esquecendo a ressonância, o sistema é um filtro passa-banda com frequências de corte  $f_1 = 1/2\pi RC$  (independente das características a montante do amplificador) e  $f_2 = 1/2\pi R_a C_s$ .

A resposta do amplificador de carga ao ruído e os valores das impedâncias em jogo obrigam a considerar o conjunto acelerómetro-cabos-amplificador como um todo.

Os acelerómetros disponíveis no mercado vêm opcional ou preferencialmente acompanhados pelos amplificadores e cabos adequados.

Alguns valores típicos actuais:

| <b>acelerómetros piezoeléctricos</b> |              |             |                        |
|--------------------------------------|--------------|-------------|------------------------|
|                                      | <b>acel.</b> | <b>amp.</b> |                        |
| banda passante (de)                  | 0.1..1       | 0.003       | Hz                     |
| " (até)                              | 1..54        | 200         | kHz                    |
| frequência natural                   | 4..180       |             | kHz                    |
| sensibilidade                        | 0.004..1000  |             | pC/(m/s <sup>2</sup> ) |
| "                                    |              | 0.1 10      | V/pC                   |
| alimentação                          |              | ±15         | Vdc                    |
| temperatura operacional              | -85..400     |             | °C                     |
| peso                                 | 0.5..500     |             | g                      |

### 2.5.4. acelerómetros piezo-resistivos

Existem igualmente acelerómetros piezo-resistivos onde extensómetros semi-condutores medem os esforços resultando da força de inércia.

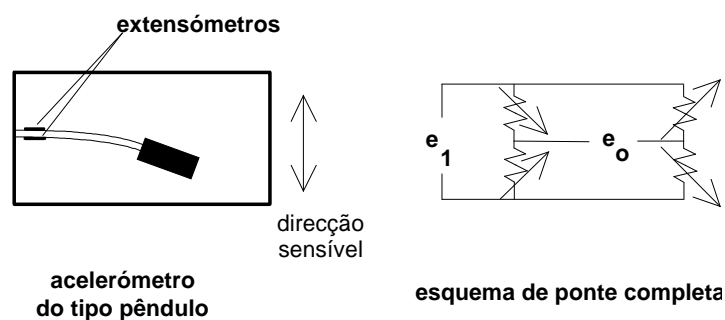


fig. acelerómetro piezo-resistivo

A configuração do sensor é normalmente aquela de uma ponte completa fornecendo um sinal em tensão dc  $e_o$  proporcional à tensão de alimentação  $e_1$  e à aceleração aplicada.

Alguns valores típicos de sensores existindo no mercado são apresentados na tabela seguinte.

| <b>acelerómetros piezo-resistivos</b> |             |                                 |
|---------------------------------------|-------------|---------------------------------|
| gama                                  | 2..100 000  | g                               |
| frequência natural                    | 1.2..125    | kHz                             |
| factor de amortecimento               | 0..0.707    |                                 |
| sensibilidade                         | 0.6..8      | $\mu\text{V}/\text{V}/\text{g}$ |
| linearidade                           | <1          | %                               |
| sensibilidade transversa              | <3          | %                               |
| alimentação                           | 5..15       | V dc                            |
| zero (offset)                         | <25         | mV (25°C)                       |
| impedância de entrada                 | 1500..6000  | $\Omega$                        |
| impedância de saída                   | 800..6000   | $\Omega$                        |
| temperatura operacional               | -40..125    | °C                              |
| sens. à temperatura                   | ±4 (±4)     | mV (%/100°C)                    |
| dimensões (peso)                      | 8 x 8 x 4   | mm (0.4 g)                      |
| "                                     | 12.7 x 22.9 | mm <sub>Hex</sub> x mm (28 g)   |

### 3.GRANDEZAS MECÂNICAS

#### 3.1.forças

A medição de forças aplica normalmente o princípio de identidade entre acção e reacção exemplificado no equilíbrio de forças da equação mecânica simples:

$$F = m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx$$

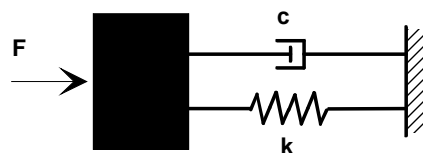


fig. a equação mecânica

conduzindo ao equilíbrio estático entre força aplicada e força elástica:

$$F = k x$$

A medição do deslocamento, ou mais geralmente da força equilibrante, de mais fácil avaliação, permite determinar o valor da força aplicada F.

Segundo o caso e o método utilizado, a força equilibrante pode:

- ser do mesmo tipo que a força a medir, como nas balanças clássicas;
- ser fornecida por uma mola linear, espiral ou de torção;
- resultar da deformação elástica de um corpo de prova;
- ser uma pressão, contra uma parede intermediária;
- ser produzida por um actuador servo-controlado;
- ser somente a força de inércia.

#### 3.1.1.balanças

A força a medir na balança clássica é a força da gravidade. Procura-se equilibrar em volta de um ponto fixo os momentos do peso indeterminado e de um peso de referência conhecido. Os braços podem ser iguais ou não.

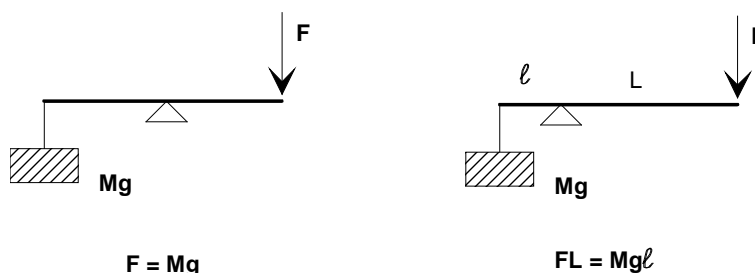


fig. balança analítica

Balanças modernas utilizam outros métodos para determinar o peso.

### 3.1.2.dinamómetros de mola

A tracção ou compressão de uma mola linear na sua gama elástica, de acordo com a equação mecânica acima referida, relaciona força aplicada e deslocamento. Este deslocamento pode ser directamente visualizado, numa escala linear junta à mola, convertido mecanicamente ou detectado por um sensor de posição, do tipo LVDT por exemplo.

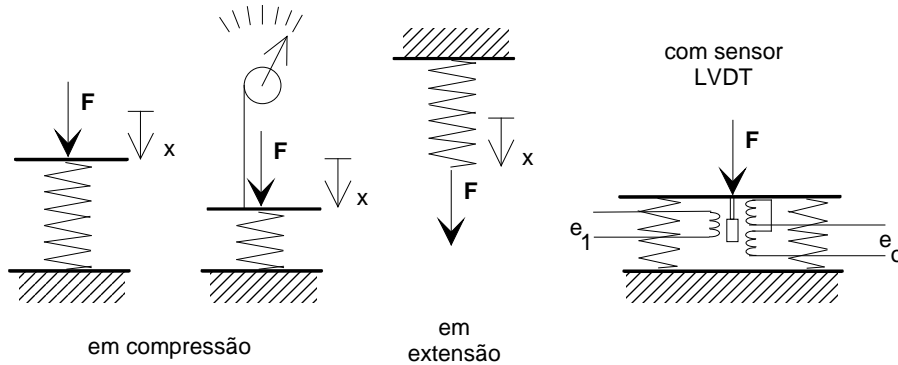


fig. dinamómetros com molas lineares

Em alternativa, a mola pode ser espiral ou uma barra de torção, sendo então medido o ângulo de rotação provocado pela força a medir.

### 3.1.3.deformação elástica

O método talvez mais usado resulta da deformação elástica de um corpo de prova. As deformações são medidas por sensores de deslocamento ou por extensómetros.

Uma primeira variante deste método utiliza corpos de prova em compressão ou tracção, sendo estas medidas por extensometria.

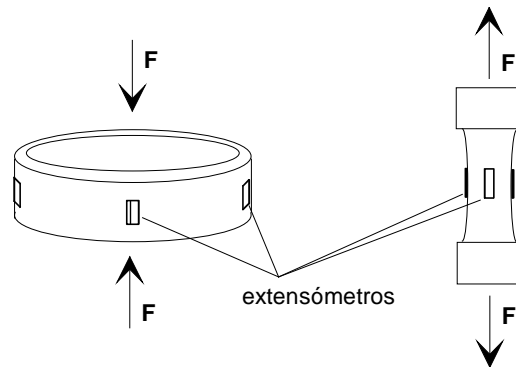


fig. corpos de prova em compressão/tracção

Uma segunda variante utiliza corpos de prova em flexão.

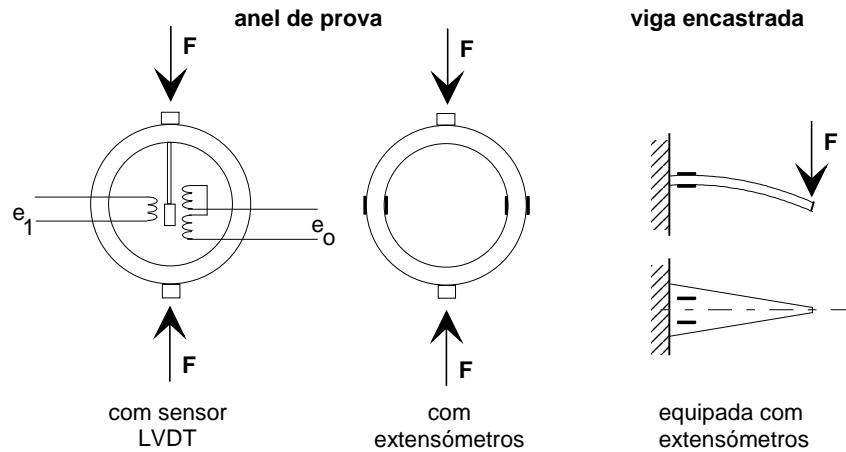


fig. dois exemplos de corpos de prova em flexão

Um exemplo de material em flexão seria um anel como o apresentado na figura, equipado com uma ponte de extensómetros ou com um sensor LVDT.

Outro exemplo de elemento elástico seria uma viga encastrada (cantilever) equipada com uma ponte completa de extensómetros para medir o momento de flexão e fornecendo directamente um sinal proporcional à força aplicada.

Uma solução mais prática e versátil de corpos de prova utilizados essencialmente em flexão é aplicada nas células de carga (load cells). São geralmente corpos cilíndricos, de dimensões adequadas às gamas de medida pretendidas, sobre cujas bases são aplicadas as forças a medir. A flexão medida pode ser:

- numa base, diafragma sensível nesse caso;
- ou nas paredes laterais.

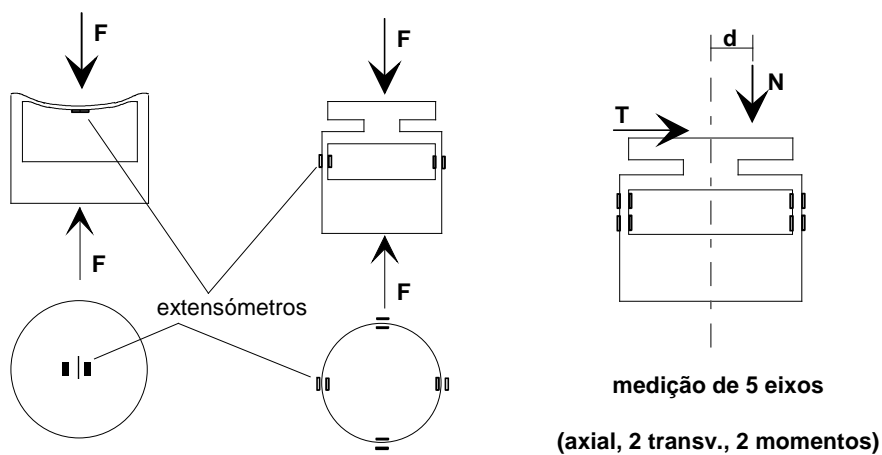


fig. exemplos de células de carga cilíndricas

Estas células de carga estão normalmente preparadas para medições axiais, em compressão ou tracção. É possível obter —quicá por encomenda— células para medições segundo os outros eixos ou medição de momentos, conforme a configuração em causa.

Na tabela seguinte apresentam-se as características de três células de carga disponíveis no mercado.

| células de carga         |       |       |        |           |
|--------------------------|-------|-------|--------|-----------|
| gama                     | 0.25  | 1     | 500    | kN        |
| dimensões (comp x diam.) | 50x15 | 8x200 | 60x200 | mm        |
| linearidade              | 0.05  | 0.25  | 0.2    | %         |
| histerese                |       | 0.1   | 0.15   | %         |
| repetibilidade           |       | 0.1   | 0.05   | %         |
| sobrecarga               | 50    | 50    | 50     | %         |
| alimentação              | 10    | 10    | 15     | V dc      |
| sensibilidade            | 2     | 2     | 4      | mV/V f.e. |
| sens. à temperatura      |       | 0.04  |        | %/°C      |

Muitas balanças de precisão modernas utilizam células de carga e/ou extensómetros como princípio de medição do peso.

### 3.1.4.conversão para pressão

A força equilibrante pode resultar da pressão exercida por um fluido gasoso ou líquido: é neste caso medida a pressão com um sensor do tipo manómetro mecânico ou eléctrico.

A força produzida pela pressão é o produto desta pela área actuante.

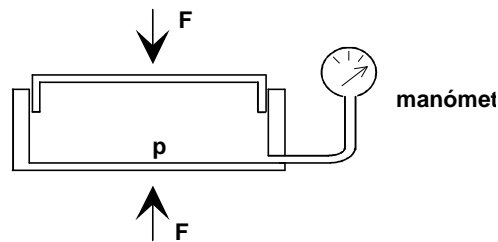


fig. conversão para pressão

### 3.1.5.equilíbrio por servo-actuator

Num sistema de muita precisão mas normalmente limitado a pequenas forças (<1 kN) a força equilibrante é produzida por um servo-actuator de forma a anular o deslocamento (vide figura) detectado por um sensor de posição. A força actuante é proporcional à intensidade de corrente fornecida ao actuator.

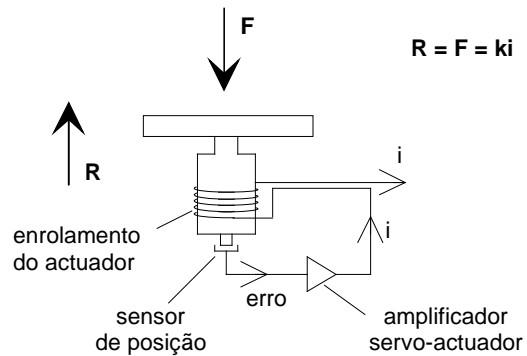


fig. equilíbrio por servo-actuator

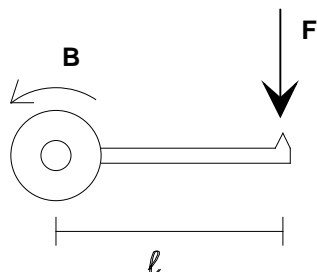
### 3.1.6.outros métodos

A medição da aceleração permite avaliar a força actuando sobre um corpo "livre".

A medição da frequência de vibração de um fio em tensão permite precisões da ordem de 0.03% na determinação da tensão imposta ao fio.

### 3.2.binários

Um binário (torque) é o produto de uma força por uma distância. Em estática, essa relação permite obter a medida de um binário medindo a força por ele exercida com um braço de comprimento conhecido.



$$B = F \ell$$

fig. equilíbrio estático por uma força

Em rotação, sendo o binário fornecido por um motor e transmitido por um veio a um receptor qualquer, duas soluções são utilizadas:

- a técnica do dinamómetro –aqui o nome designa a medição de potências;
- a medição da torção no veio.

#### 3.2.1.medição de potência

No primeiro caso o receptor é substituído por um dispositivo de absorção de energia e, conhecendo-se ou medindo-se a potência (P) dissipada por este e a velocidade de rotação ( $\omega$ ), obtém-se o binário exercido através da relação:

$$P = B\omega$$

A absorção de energia pode ser:

- com um sistema de travão (e o arrefecimento adequado para evacuar o calor produzido): o momento resultante não é, neste caso, determinável com grande precisão ( $\omega < 2000$  rpm,  $P < 150$  kW, erro  $\approx 0.5..5\%$ );
- com um sistema de travão hidráulico ( $\omega < 10\ 000$  rpm,  $P < 18$  MW, erro  $\approx 0.1..5\%$ );
- com um gerador eléctrico –a energia é aqui essencialmente convertida em energia eléctrica ( $\omega < 4000$  rpm,  $P < 25$  MW, erro  $\approx 0.1..0.2\%$ );
- com disco(s) de arrasto magnético (por correntes de Foucault –eddy currents) utilizado(s) então como travão ( $\omega < 6000$  rpm,  $P < 250$  kW, erro  $\approx 0.2..0.5\%$ ).

#### 3.2.2.medição de torção

A segunda solução mede a torção do veio de transmissão entre motor e receptor: submetido a dois binários em equilíbrio (para uma situação estacionária) aplicados a cada um dos seus extremos, o veio de transmissão está sujeito a uma torção elástica proporcional ao binário transmitido.

O método mais prático para a medição da torção é com uma ponte de quatro extensómetros colocados simetricamente e com um ângulo de  $45^\circ$  com o eixo do veio (vide figura) por forma a anular os efeitos dos esforços axiais de compressão e os momentos de flexão.

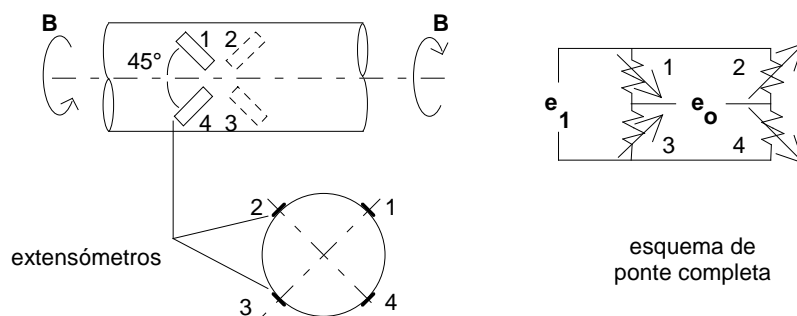


fig. medição de binário/torsão por extensometria

Estando o veio em rotação, a alimentação da ponte e a leitura do sinal de medida devem ser feitas:

- via contactos e escovas (slip-rings/brushes) –caso a na tabela;
- via sistemas indutivos ou capacitivos –caso b.

Existem no mercado sensores aplicando uma destas variantes num elemento de veio a inserir como intermediário no veio de transmissão a testar.

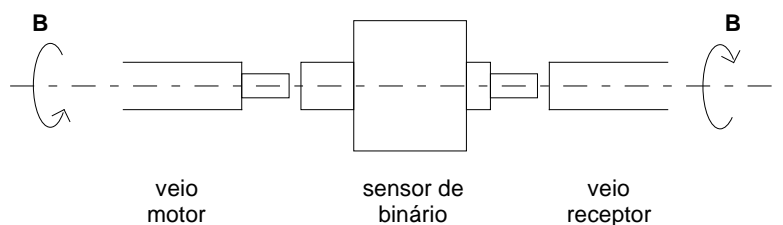


fig. sensor de binário inserido no veio de transmissão

A título de exemplo, apresentam-se na tabela seguinte os dados técnicos de três sensores de binário por torção disponíveis no mercado. Dois deles vêm acompanhados de codificadores incrementais (encoders) para a medição simultânea da velocidade e logo da potência.

| medição de binário por torção |        |        |        |         |
|-------------------------------|--------|--------|--------|---------|
| gama de binários              | <2     | <1.35  | <0.011 | kNm     |
| gama de velocidades           | <10000 | <1000  | <5000  | rpm     |
| gama de potências             | <2000  | <130   | <6     | kW      |
| linearidade                   |        | 0.25   | 0.25   | % pe    |
| alimentação                   |        | 10     | 10     | V dc/ac |
| sensibilidade                 |        | 2      |        | mV/V pe |
| transmissão do sinal          | caso b | caso a | caso a |         |
| codificador p/vel. ang.       | sim    | não    | sim    |         |
| resolução                     | N/A    |        | 360    | /volta  |
| saída                         | N/A    |        | TTL    | (10 mA) |



### 3.3.pressão

A relação fundamental de definição da grandeza física **pressão** expressa esta como uma força por unidade de superfície

$$p = \frac{F}{A}$$

o que no Sistema Internacional (SI) induz a definição da unidade de pressão, o Pascal

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} / \text{m}^2 (= 1 \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-2})$$

A medição da pressão vai assim efectuar-se geralmente através da medição de uma força e, como esta, vai ser obtida estabelecendo o equilíbrio com uma força de referência.

#### 3.3.1.medição directa por coluna de líquido

Usualmente pressões eram e são medidas de forma relativamente precisa equilibrando-as com a pressão exercida por uma coluna de líquido –este é um equilíbrio de pressões.

A forma mais simples de tal *manómetro* consiste num tubo de vidro em U contendo um líquido de massa específica  $\rho$  e nos extremos do qual são aplicadas duas pressões  $p_1$  e  $p_2$ .

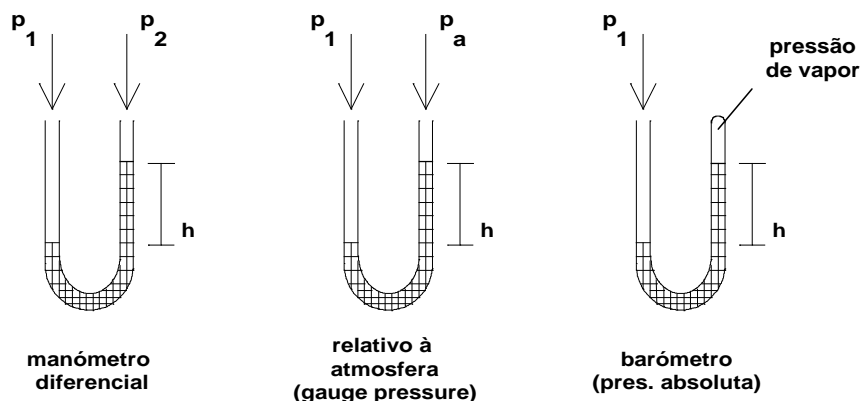


fig. manómetros por coluna de líquido -tubos em U

A leitura do desnível ( $h$ ) entre as duas colunas de líquido fornece directamente a diferença entre as duas pressões

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho gh$$

Por princípio a medição é diferencial. No entanto, obtém-se dois instrumentos "quase absolutos" substituindo-se a pressão  $p_2$ , digamos:

- pela atmosfera: neste caso importante na prática a pressão obtida é relativa à pressão ambiente (gauge pressure);
- por uma pressão nula, ou na realidade igual à pressão de vapor do líquido utilizado (que para o mercúrio a uma temperatura de 20°C é de 0.16 Pa), a medição é praticamente absoluta (absolute pressure): é o caso do barómetro tradicional.

Algumas adaptações do tubo em U permitem alargar a gama das medições possíveis ou a precisão obtida.

$$p_1 - p_2 = \rho gh \left( 1 + \frac{A_2}{A_1} \right) \quad p_1 - p_2 = \rho gL \sin \alpha$$

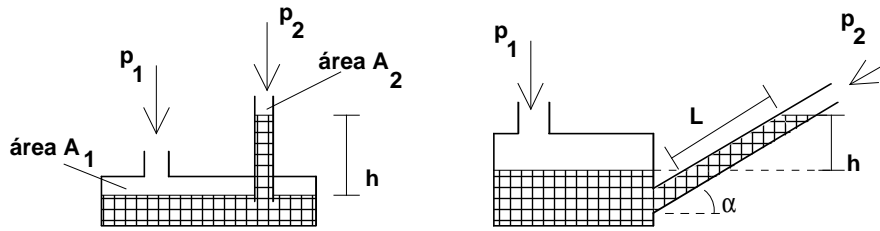


fig. manómetros por coluna de líquido

No entanto, a precisão da medida depende de alguns cuidados e de eventuais correcções:

- das variações de densidade do líquido em função da temperatura –e possivelmente da sua evaporação;
- das variações da geometria do manómetro –dilatações, contracções em função de temperatura e pressões;
- dos erros de leitura devido ao menisco –efeito da capilaridade do líquido;
- da influência da altitude;
- da variação da gravidade.

A medição só se pode efectuar em condições estáticas.

A conversão da variação do nível de líquido numa grandeza eléctrica é possível mas pouco utilizada para medições de pressão.

### 3.3.2.unidades

As unidades práticas de pressão estão relacionadas com a utilização deste primeiro princípio de medição, com dois líquidos de referência:

- a água ( $\rho = 1 \text{ kg / m}^3$ ):  $1 \text{ m}_{\text{H}_2\text{O}} = 9.8 \text{ Pa}$
- o mercúrio ( $\rho = 13.6 \text{ kg / m}^3$ ):  $1 \text{ Torr} = 1 \text{ mm}_{\text{Hg}} = 0.133 \text{ Pa}$ .

Refiram-se ainda as unidades práticas do SI e as unidades anglo-saxónicas:

- $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 100 \text{ kPa}$ ;
- $1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa} = 101.325 \text{ kPa}$ ;
- $1 \text{ psi} = 6.888 \text{ kPa} (= 1 \text{ lb/sq in})$

existindo três variantes desta última, **psid**, **psig** e **psia**, correspondendo aos três tipos de medições acima referidos, respectivamente diferencial, relativa à atmosfera (gauge) e absoluta.

Medições de pressão cobrem uma gama inusualmente vasta, desde vácuos de  $10^{-9} \text{ Pa}$  até altas pressões de cerca de  $10^9 \text{ Pa}$ .

### 3.3.3.medição por deformação elástica

Para uma série de sensores mecânicos, de forma análoga ao já visto para a medição de forças lineares, a força que realiza o equilíbrio com aquela exercida pela pressão resulta da deformação elástica de um corpo sólido (metálico ou não), sendo as deslocações observadas convertidas em medidas de pressão.

#### diafragmas

Para pressões relativamente baixas (até  $1 \text{ MPa}$ ), o elemento deformado é um simples diafragma, liso, ondulado ou associado em pares, formando cápsulas, para multiplicar a sensibilidade.

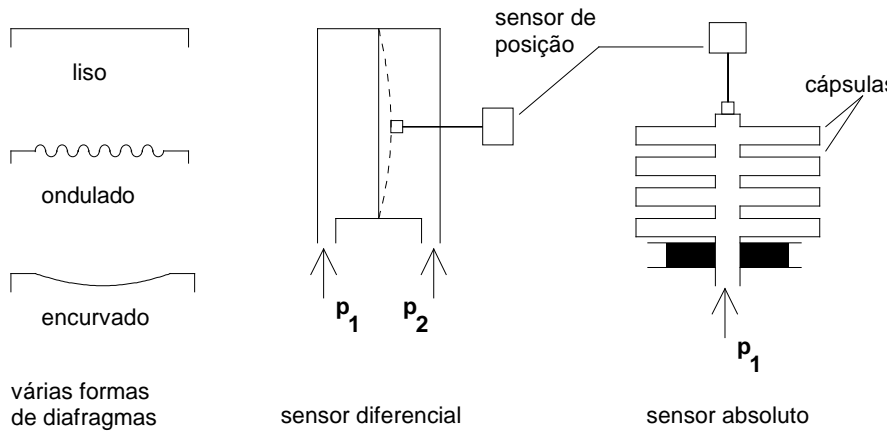


fig. sensores de pressão -diafragmas

Um sensor de deslocções, apontado no centro do diafragma, fornece uma medida proporcional à pressão diferencial ou absoluta aplicada.

Conversão e escalas mecánicas permitem obter precisões de cerca de 0.1 % em gamas que vão desde 1 Pa até 2 MPa –a gama de medida é função da geometria e do material utilizados.

foles

O princípio do sensor de pressão por fole (bellows) é muito similar ao anterior caso das cápsulas em série.

Um fole é aqui um corpo complexo composto de vários elementos com simetria de revolução associados em série (ver figura), deformáveis essencialmente na direcção axial. A deformação, compressão ou tracção, provoca a deslocação de um dos extremos e fornece assim uma medida da pressão aplicada –no exterior ou no interior do fole. A medição é normalmente relativa à pressão atmosférica.

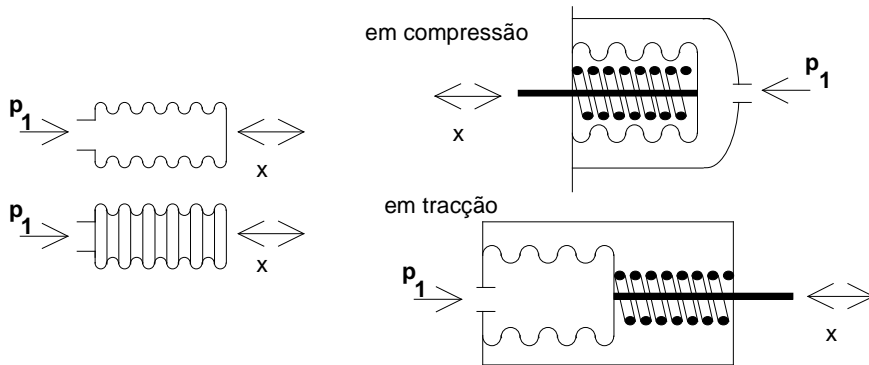


fig. sensores de pressão -foles

O fole pode eventualmente ser reforçado por uma mola, somada assim em paralelo à mola constituída pelo fole.

Neste caso a relação simplificada entre deslocação ( $x$ ) e pressão aplicada  $p$  é

$$p = \frac{x}{A_e} (K_f + K_m) = Kx$$

onde  $A_e$  é a área efectiva do fole,  $K_f$  a constante elástica da mola equivalente ao fole,  $K_m$  a constante da mola e  $K$  a razão de proporcionalidade resultante.

O material utilizado pode ser o latão, cobre, bronze, aço inox... para foies com 10 a 20 elementos e com de meia polegada a doze polegadas de diâmetro.

A gama possível vai de 200 Pa a 2 MPa, com precisões de até 0.1% e uma boa linearidade.

### tubos Bourdon

A forma mais simples adoptada para este sensor de pressão é o tubo em C (ver figura), tubo de secção não circular com uma extremidade fechada e à outra extremidade é aplicada a pressão a medir. Sob o efeito da pressão interna a secção arredonda-se e o tubo endireita-se.

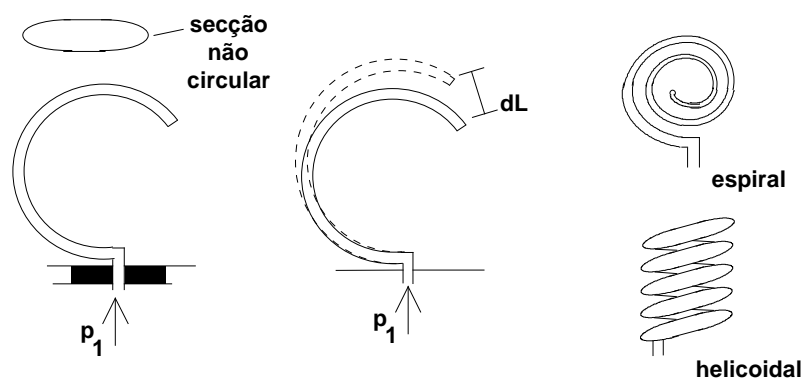


fig. sensores de pressão -tubos de Bourdon

Sendo a boca do tubo fixa, a deslocação do extremo fechado fornece uma medida da pressão  $p_1$  no interior do tubo, geralmente sob uma forma linearizada:

$$dL = K p_1.$$

Para se obter uma maior sensibilidade, o tubo pode ter uma forma em espiral ou helicoidal (ver figura).

Os materiais utilizados cobrem quase toda a gama dos metais ou das ligas elásticas com propriedades suficientes. As dimensões rondam os centímetros (1..5) de diâmetro, com secções de uma ou duas décimas de polegada por seis décimas (3x7 mm).

A gama de medida coberta por este tipo de sensor de pressão vai de 35 kPa até 1 GPa, com precisões de 5% até 0.1%.

### **3.3.4.conversão eléctrica**

Os sensores elásticos acima apresentados convertem pressões em deslocações. Sensores de posição podem por sua vez converter estas e fornecer um sinal eléctrico.

Os sensores utilizados para este efeito são do tipo capacitivo, indutivo, resistivo ou LVDT.

### sensor capacitivo

Utilizado em particular para medições em acústica, o sensor capacitivo de diafragma merece sem dúvida destaque.

Configurações diferencial e absoluta são possíveis.

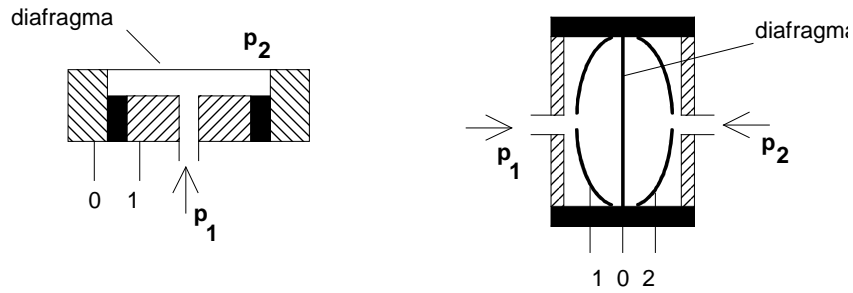
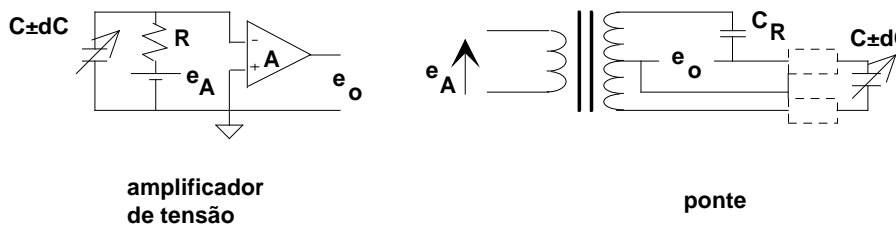


fig. sensores capacitivos de diafragma

A variação de capacidade entre a armadura móvel (o diafragma) e a(s) armadura(s) fixa(s) devido à deformação/deslocação do diafragma pode ser detectada com um amplificador de tensão, com um amplificador de carga ou com uma ponte.



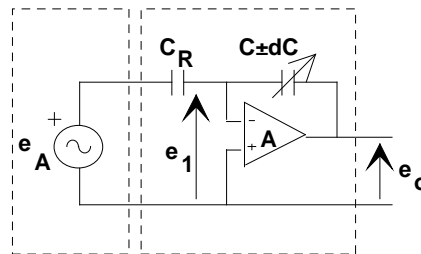
A solução com amplificador de tensão requiere a proximidade entre os vários elementos da cadeia, sensor-cabos-amplificador, para não se somarem as fugas e capacidades dos cabos em paralelo.

Tendo uma resistência de entrada  $R_i$  do amplificador elevada ( $R_i \gg R$ ) então o circuito é tipicamente um filtro RC passa-alto com frequência de corte  $f_1 = 1/2\pi RC$ . Esta solução não permite assim medições estáticas.

A solução com amplificador de carga, fornece uma relação mais directa, obtendo-se à saída uma tensão  $e_o$

$$e_o = - \frac{1}{C} \int i_c dt = - \frac{C_R}{C} e_A$$

$$e_o = - e_A C_R \frac{x}{\epsilon A} = - k x e_A$$



amplificador de carga

proporcional à tensão alterna de alimentação  $e_A$  e directamente proporcional à distância  $x$  entre as armaduras.

Neste caso:

- não é necessário recorrer a nenhuma aproximação quanto à amplitude das variações em  $x$ ;
- medições estáticas podem ser efectuadas;
- é necessário desmodular o sinal, modulado em amplitude.

A ponte com transformador é uma óptima solução para medições de pequenas variações à volta de um valor médio constante. As características de precisão da ponte são independentes da temperatura, da tensão de alimentação e da capacidade da cablagem.

Medições em absoluto, à volta de um ponto médio  $C_o = C_R$ , fornecem um sinal de saída

$$e_o = \frac{e_1}{2} \frac{dC}{2C \pm dC}$$

que para pequenas oscilações ( $dC \ll C$ ) é uma função linear do deslocamento  $dx$ :

$$e_o \approx \frac{e_1}{2} \frac{dC}{C} = - \frac{e_1}{2} \frac{dx}{x}$$

O sinal de alimentação pode ter frequências variando entre 100 Hz e 10 kHz.

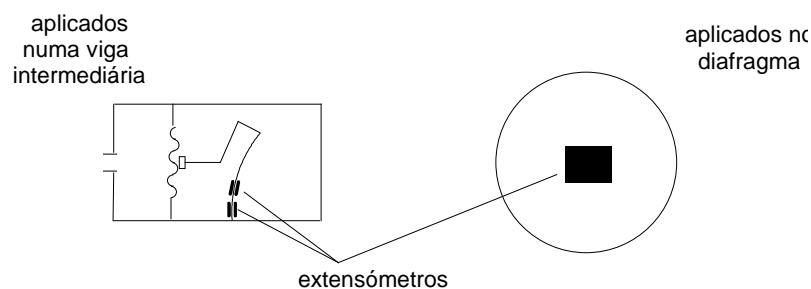
Sensores de pressão capacitivos permitem medições numa gama de 0.01 Pa a 200 kPa, com linearidades de 0.1% ou melhor e tempos de resposta de 2 s até 10 ms.

Estas óptimas características são acompanhadas de dois aspectos negativos: a sua manufactura delicada e o condicionamento do sinal tornam-nos caros.

### sensor resistivo

A utilização de extensómetros metálicos ou semi-condutores associados a diafragmas metálicos ou não (de silicone por exemplo) permite obter sensores eléctricos de pressão de dimensões reduzidas e óptima resolução.

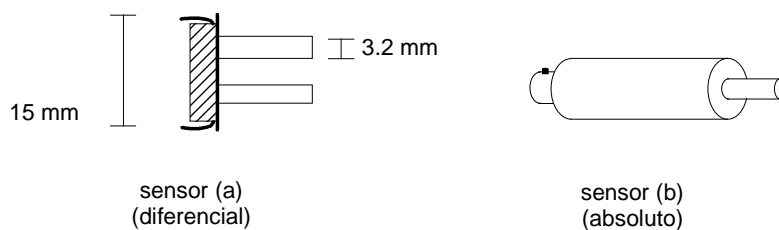
O diafragma pode ser directamente equipado com extensómetros ou comunicar as suas deslocações a um elemento elástico intermediário.



**fig. sensores resistivos**

A configuração eléctrica é normalmente de uma ponte completa. Existem sensores dos três tipos, diferenciais (d, g) e absolutos (a).

A tabela seguinte apresenta as características de dois destes sensores resistivos.



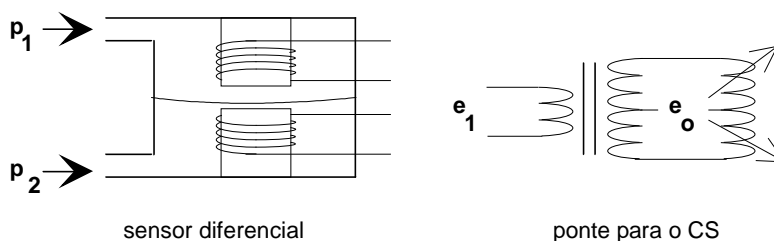
**fig. dois sensores resistivos de dimensões reduzidas**

| <b>sensores de pressão resistivos</b> |          |            |            |
|---------------------------------------|----------|------------|------------|
|                                       | (a)      | (b)        |            |
| gama diferencial (d,g)                | 14..700  | 17.5..3500 | kPa        |
| gama em absoluto (a)                  | 30..200  | 70000      | kPa        |
| alimentação                           | 10 (1.5) | 10         | V dc(mA)   |
| resistência                           | 5        |            | k $\Omega$ |
| sensibilidade                         | 75..150  | 100        | mV pe      |
| linear./histerese                     | 0.1      | 0.1        | %          |
| erro do zero                          | 0.5      | 0.3        | %          |
| sens. à temperatura                   | 0.022    | 0.009      | %/°C       |
| tempo de resposta                     | 1        |            | ms         |
| temperatura operacional               | 0..50    | -54..120   | °C         |
| peso                                  | 3        |            | g          |

### sensor indutivo

O sensor de posição pode ser do tipo LVDT ou de relutância variável –neste caso um diafragma ferromagnético pode ser utilizado.

Existem sensores destes tipos em configurações diferencial ou absoluta para medições numa gama de 1 Pa a 1 GPa, com precisões de até 0.2% e tempos de resposta de 0.1 s a 2 s.



**fig. sensores indutivos de diafragma**

|   |                 |           |
|---|-----------------|-----------|
| A título de exemplo, um sensor diferencial deste tipo disponível no mercado propõe: |                 |           |
| gama de medida  | 1..2000         | kPa;      |
| sensibilidade   | $\pm 8.. \pm 4$ | mV/V/kPa; |
| alimentação em ac   | 5               | kHz.      |

### 3.4.nível de líquido

A medição de níveis de líquido em reservatórios ou em tanques é uma função importante em muitos processos, para:

- conhecer a quantidade de líquido gasto ou disponível;
- verificar que o nível está de acordo com o estipulado: pode actuar então como um interruptor, emitir um sinal de alarme, ligar uma bomba...

Entre os vários métodos utilizados, destacam-se:

- os métodos directos determinando a posição da superfície do líquido;
- os métodos hidrostáticos, medindo a pressão na base do reservatório.

As precisões normalmente conseguidas e as gamas de medida resultam da medição do parâmetro em causa (posição, força, pressão...).

Todos estes métodos destinam-se a medições estáticas e com recipientes fixos.

#### 3.4.1.posição da superfície

Uma solução simples consiste na adição ao lado do reservatório de um tubo de vidro (sight glass) equipado de uma escala para a leitura do nível.

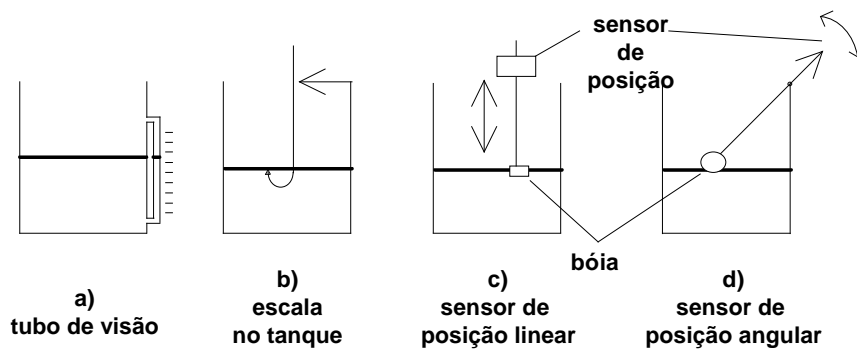


fig. nível de líquido por posição da superfície

Uma segunda solução consiste em relacionar a posição da superfície, detectada por exemplo com uma bóia, com uma escala adequada ligada ao tanque (b) ou um sensor de posição. A configuração mecânica e o movimento da bóia podem ser linear (c) ou de rotação (d).

A interface também pode servir para reflectir uma onda (ultra-sónica), sendo então medida a sua posição pelo tempo separando emissão e recepção, de um impulso por exemplo.

A velocidade de propagação da onda é um parâmetro essencial, que depende da compressibilidade e da densidade do líquido em causa.

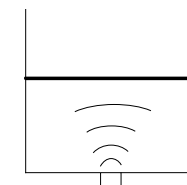


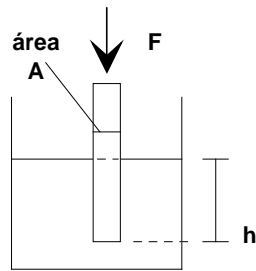
fig. nível de líquido por sonar

#### 3.4.2.conversão mecânica

##### conversão em força

Neste caso o agente da medição é novamente uma bóia mas agora utilizada para conversão do nível numa força, segundo o princípio da impulsão de Arquímedes.





$$mg + F = ghA (\rho_{\text{líq.}} - \rho_{\text{ar}})$$

fig. medição de nível por impulsão

Normalmente, a configuração será de balança, medindo-se a força por exemplo por equilíbrio servo-controlado, "anulando" o deslocamento.

conversão em pressão

A lei determinando a pressão na base de uma coluna de líquido

$$P = \rho g h$$

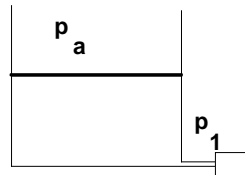
onde  $\rho$  é a massa específica do líquido e  $g$  a aceleração da gravidade, permite medir a altura  $h$  de líquido num reservatório através da pressão existindo no fundo.

A configuração pode ser absoluta, relativa ao ambiente (gauge), no caso de um tanque aberto, ou diferencial, entre gás e base do reservatório, para um tanque fechado.

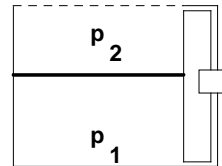
A altura do líquido é dada, em função da geometria, pelas fórmulas:

$$h = \frac{P_1 - P_a}{\rho g}$$

$$h = \frac{P_1 - P_2}{\rho g}$$



pressão absoluta



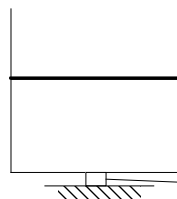
pressão diferencial

fig. nível de líquido por pressão

conversão em peso

A medição do volume de líquido através do seu peso é outro método utilizado, pesando-se o reservatório com uma célula de carga e deduzindo-se em seguida o volume  $V$ :

$$P_{\text{total}} = P_{\text{recipiente}} + \rho g V$$



célula de carga

fig. nível de líquido por pesagem do reservatório

### 3.4.3. leitura directa da altura por sonda capacitiva

A sonda capacitiva é um dispositivo utilizando a diferença entre as características dieléctricas do líquido e do gás que se lhe sobrepõe para determinar a altura de líquido.

A geometria da sonda é normalmente cilíndrica, com dois condutores concêntricos entre os quais o líquido sobe e desce livremente, nivelado com o líquido do reservatório, fazendo variar assim a capacidade do sensor de acordo com a relação linear

$$C = \frac{A_o}{d} \frac{h \epsilon_{\text{liq.}} + (H-h) \epsilon_{\text{gás}}}{H}$$

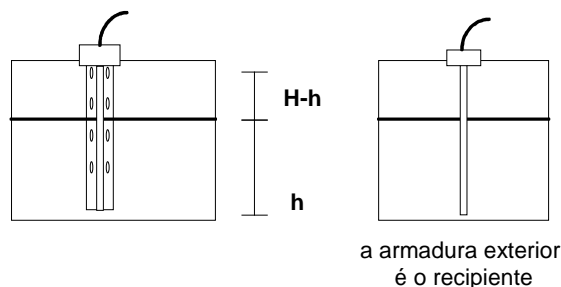


fig. sonda capacitiva

onde  $h$  é a altura de líquido na sonda de comprimento  $H$ ,  $A$  é a área efectiva das armaduras separadas por uma distância  $d$ ,  $\epsilon_0$  é a permissividade do vácuo, igual a  $8.85 \cdot 10^{-12}$  F/m e  $\epsilon_{\text{liq.}}$  e  $\epsilon_{\text{gás}}$  são as permissividades relativas do líquido e do gás.

A título indicativo, citemos as permissividades de alguns fluidos comuns:

|                 |        |        |
|-----------------|--------|--------|
| ar              | 1.0006 | a 25°C |
| água pura       | 78.5   |        |
| água            | 50..80 |        |
| etanol          | 24.3   |        |
| CO <sub>2</sub> | 1.6    |        |
| NH <sub>3</sub> | 16.9   |        |

Alternativamente, a armadura exterior pode ser o próprio recipiente, obtendo-se eventualmente uma curva não linear.

Um integrado como o LM1830 permite efectuar o condicionamento de sinal de sondas capacitivas deste tipo, fornecendo em paralelo saídas ac e dc.

### 3.4.4. determinação discreta

A determinação discreta da presença/ausência de líquido num dado ponto permite:

- numa cadeia de controlo, impor um nível mínimo/máximo de líquido;
- com vários sensores/interruptores, obter uma leitura digital do nível de líquido.

Sensores discretos possíveis são de vários tipos, entre os quais:

- resistivos: a absorção de calor por parte do líquido ou do gás são diferentes e alteram a resistência;
- capacitivos: do tipo sonda capacitiva pontual;
- ópticos: uma série de LEDs e foto-sensores dos dois lados de um tubo de visão.

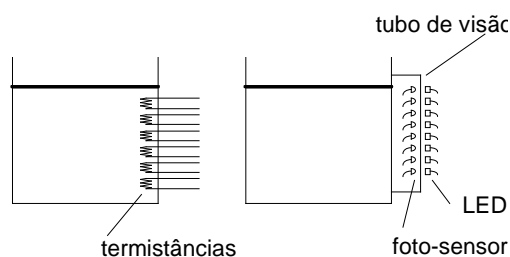


fig. leitura digital de níveis

### **3.4.5.caso do reservatório não fixo**

Os sensores apresentados medem níveis de líquido em situações estáticas.

Quando há movimento em torno de uma posição de equilíbrio, o sensor fornece uma leitura oscilando em torno de uma posição média: um filtro passa-baixo é usualmente a solução, supondo-se que o nível de líquido varia lentamente.

No caso de um avião (ou de outro veículo) a posição do sensor e a atitude do avião influenciam as medidas e é necessário corrigir os valores medidos.

## 4. MEDIDAS EM ESCOAMENTOS

Entre os fenómenos físicos comuns de acesso mais difícil para o homem figura a mecânica dos fluidos –talvez porque muito pouco está directamente palpável ou sensível e só constatado nos seus efeitos: as leis geralmente utilizadas são leis empíricas.

No mundo dos escoamentos, três parâmetros são normalmente objecto de medições:

- a velocidade do escoamento: velocidade local  $v = v(x,t)$ , função do espaço e do tempo; velocidade local estacionária  $v = v(x)$ , média da primeira no tempo; velocidade média  $V$ , média no espaço;
- o caudal volumétrico (volume flow rate)  $Q$ , produto da velocidade média  $V$  pela área  $A$  perpendicular ao escoamento (cross section) –expresso em  $m^3/s$  em unidades do SI;
- o caudal mássico (mass flow rate)  $\phi$ , produto do anterior pela densidade  $\rho$  do fluido –expresso em  $kg/s$  em unidades do SI.

Outros parâmetros como a densidade, a temperatura, a viscosidade, a composição, etc, podem eventualmente ser medidos.

### 4.1. definições

Escoamentos podem tomar aspectos muito diversificados. Sem entrar em pormenores, citemos algumas noções diferenciando os vários tipos de escoamentos.

#### geometria aberta ou fechada

Fechada como no caso de escoamentos em tubos. Aberta como num canal ou em volta de um veículo.

#### fluido incompressível ou compressível

Todos os fluidos são compressíveis mas, na maioria dos casos, os líquidos podem ser considerados como incompressíveis.

Quem diz incompressível diz de densidade constante: os caudais são equivalentes e proporcionais:  $\phi = \rho Q$ .

Quem diz compressível diz de densidade variável e com ondas de propagação da variação de densidade (e de pressão), ondas acústicas. A velocidade dessas ondas, velocidade do som ( $c$ ), é função do fluido, da temperatura e eventualmente da pressão.

Para o ar, considerado gás perfeito, em condições usuais

$$c_{\text{ar}} = \sqrt{\gamma RT} \approx \sqrt{1.4 \times 287 \times 298} \approx 346 \text{ m/s.}$$

A título comparativo, nas mesmas condições na água

$$c_{\text{água}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \approx \sqrt{\frac{2.2 \cdot 10^9}{997}} \approx 1490 \text{ m/s.}$$

Em função do número de Mach  $\left( M = \frac{v}{c} \right)$  podem distinguir-se três casos:

- para velocidades pequenas,  $M < 0.2$ , o escoamento pode ser considerado como incompressível, obedecendo a leis simplificadas;
- para  $0.2 < M < 1$ , o escoamento compressível é subsónico;
- para  $M > 1$  o escoamento é supersónico, com o aparecimento de ondas de choque e características totalmente diferentes.

**viscosidade**

Num fluido ideal, as únicas forças presentes resultam da pressão e são perpendiculares às paredes. Num escoamento real, não uniforme, os gradientes de velocidade geram forças tangenciais no seio do fluido, proporcionais ao gradiente ( $T_y = \mu \partial v / \partial y$ ): o coeficiente de proporcionalidade é a viscosidade dinâmica  $\mu$  (expressa em  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  no sistema SI;  $1 \text{ Poise} = 10^{-1} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ), definindo-se igualmente a viscosidade cinemática  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  (em  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $1 \text{ Stoke} = 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

A título de exemplo, a  $20^\circ\text{C}$ ,

- para a água  $\mu = 10^{-3} \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-1} = 1 \text{ cP}$ ;
- para o ar  $\mu = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$ .

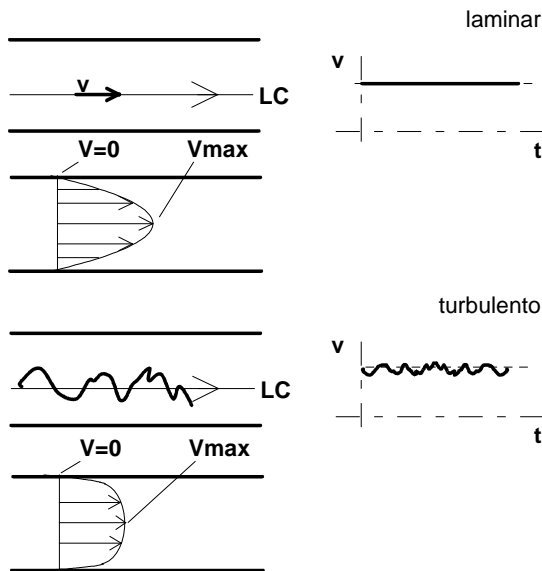
A viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) é essencialmente uma função da temperatura do fluido, função crescente no caso dos gases ( $\mu_{\text{ar}}(100^\circ\text{C}) = 2.2 \cdot 10^{-5} \text{ SI}$ ) e decrescente no caso dos líquidos ( $\mu_{\text{água}}(100^\circ\text{C}) = 0.28 \cdot 10^{-3} \text{ SI}$ ).

Em função do número de Reynolds,

$$\text{Re} = \frac{VL}{\nu}$$

que compara forças de inércia no numerador e forças viscosas no denominador, distinguem-se dois tipos de escoamentos:

- para baixos valores de  $\text{Re}$ , essencialmente viscoso, o escoamento é dito laminar;
- para elevados valores de  $\text{Re}$ , dominado pelas forças de inércia, o escoamento é dito turbulento.



**fig. escoamentos laminar e turbulento**

Em laminar, as partículas de fluido seguem as linhas de corrente (LC).

Num tubo, o perfil de velocidades, em regime estabelecido, é parabólico.

Em turbulento, a linha de corrente é uma simples média. A velocidade flutua à volta de um valor médio.

Os gradientes de velocidade junto da parede são muito mais elevados.

A definição do comprimento de referência  $L$  e a transição laminar-turbulento dependem da geometria:

- em geometria aberta,  $L$  é o comprimento desde o bordo de ataque,  $Re$  é então local, a transição efectua-se para  $Re = 10^5$ ;
- em geometria fechada,  $L$  é dado por  $L = \frac{4A}{P}$ , onde  $A$  é a área transversa e  $P$  o perímetro molhado. Para tubos de secção circular  $L = D$ . A transição laminar-turbulento ocorre para  $Re = 2000$ .

### equações

As leis de conservação aplicadas à mecânica dos fluidos em regime estacionário, seguindo uma linha de corrente, conduzem a:

- conservação de massa, equação de continuidade:

$$\phi = \text{cste} = \rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2$$

- conservação de energia, equação de Bernoulli:

$$p + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho gh = \text{cste}$$

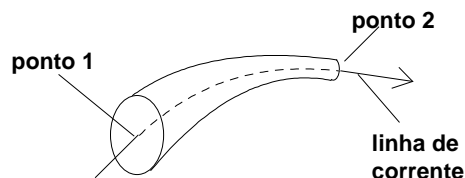


fig. ao longo de uma linha de corrente  
-conservação da massa e da energia

No caso incompressível, de densidade constante, obtém-se:

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 = \text{cste}$$

$$e \quad \frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + h = \text{cste} = H \text{ (head)}$$

sendo nesta última equação a energia expressa em altura (hauteur, head) equivalente (frequentemente em metros de coluna de água).

No caso compressível, a energia potencial ( $\rho gh$ ) é normalmente desprezável e obtém-se a equação de energia

$$p + \rho \frac{V^2}{2} = \text{cste} = p_t$$

onde:

- $p_t$  é a pressão total,
- $p$  a pressão estática e
- $p_d = \rho \frac{V^2}{2}$  é a pressão dinâmica.

### 4.2. medições locais

O objectivo de medições locais pode ser:

- medições do valor local da velocidade,  $v(x, t)$  ou  $v(x)$ ;
- medição representativa do escoamento.

A medição é considerada local se as dimensões da sonda são pequenas em relação ao gradiente e à geometria do escoamento.

### 4.2.1.tubo de pitot

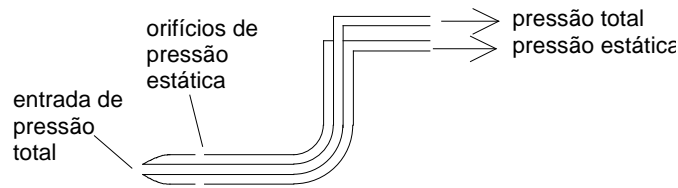


fig. sonda Pitot -pressões total e estática

Um tubo de pitot é uma sonda de dimensões pequenas mas adequadas ao número de Reynolds do escoamento. Aplicando a lei de Bernoulli, a partir

- da pressão total, obtida no orifício frontal e
- da pressão estática fornecida por orifícios laterais, perpendiculares ao escoamento,

obtém-se a pressão dinâmica, detectada por um sensor de pressão diferencial, de onde se pode calcular a velocidade no ponto sondado.

Cuidados a ter com medições Pitot:

- a geometria da sonda e em particular a localização e forma dos orifícios da tomada de estática têm grande influência nos resultados e obedecem a regras estritas;
- o alinhamento da sonda com o escoamento tem que ser cuidado, para não perturbar e para não fornecer medidas erradas -devido ao ângulo de incidência;
- em subsónico compressível, a equação de Bernoulli deve ser substituída, introduzindo-se o número de Mach:

$$p_t = p \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \approx p + \rho \frac{V^2}{2} \left( 1 + \frac{M^2}{4} \right) ;$$

para o supersónico, sonda e equações são diferentes;

iv) a densidade  $\rho$ , em particular, é função da temperatura;

v) a medição é local: é necessário um modelo do escoamento ou calibração para se obter o caudal.

Na prática as sondas têm um factor de recuperação  $K$  da pressão dinâmica, função da geometria...

$$p_t = p \left( 1 + K \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

Sondas de Prandtl, de cabeça hemisférica e dimensões normalizadas, têm coeficiente  $K$  entre 0.9 e 1. Sondas fore-and-aft, onde a tomada de estática é substituída por uma tomada de fuga (ver figura), permitem quase duplicar a sensibilidade.

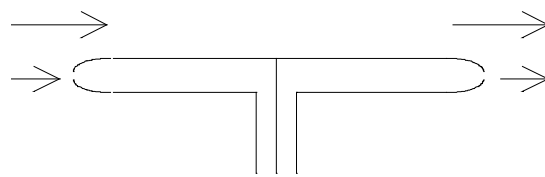


fig. sonda fore-and aft

As características dos tubos de Pitot são função do número de Mach, do número de Reynolds, da geometria. Para medições usuais industriais, precisões de 0.5% são possíveis para  $M < 0.2$  e para ângulos de incidência inferiores a  $12^\circ$ .

Opcionalmente estas sondas podem vir equipadas de termopares, para permitir uma compensação em temperatura.

| Exemplo de características de sondas de Pitot: |                       |              |
|--|-----------------------|--------------|
|  | Prandtl               | fore-and-aft |
| coef. de recuperação K                         | 1                     | 1.8          |
| velocidade máxima $M_{max}$                    | 0.26                  |              |
| âng. incidência máx.                           | 20                    | °            |
| precisão                                       | 1                     | %            |
| temperatura de operação                        | -20..600              | °C           |
| fluido   | ar, gás, água         |              |
| dimensões (diam.)                              | 2..25                 | mm           |
| material                                       | latão, aço inoxidável |              |

### 4.2.2. anemometria de fio quente

O método do fio quente utiliza a variação da convecção (transferência de calor entre um sólido e um fluido) com a velocidade do fluido.

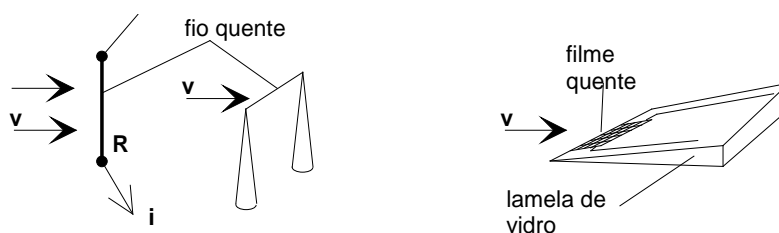


fig. anemometria de fio quente

Um fio quente (condutor com resistência R) é introduzido no escoamento e, em situação estacionária, o calor produzido W é levado pelo fluido por convecção:

$$W = Ri^2 = hA(T_R - T_f)$$

onde i é a intensidade de corrente eléctrica no fio, A a sua área,  $T_R$  a sua temperatura,  $T_f$  a temperatura do fluido e h o coeficiente de convecção, função da raiz da velocidade do fluido

$$h = C_0 + C_1\sqrt{v}.$$

A relação entre a intensidade i e a velocidade v é finalmente do tipo

$$i^2 = C_2 + C_3\sqrt{v}.$$

As medições são efectuadas a temperatura (e logo tensão) ou a corrente constante, variando respectivamente a corrente ou a tensão para voltar ao equilíbrio térmico e deduzir então a velocidade.

Entre os cuidados a ter, citemos:

- i) a medição é sensível ao alinhamento da sonda;
- ii) a sonda é frágil e deve ser escolhida em função do fluido;
- iii) com líquidos condutores, pode desencadear-se um processo de electrolise, falseando as medidas;
- iv) a altas velocidades, o escoamento induz vibrações do fio: uma solução consiste em trocar o fio por um filme condutor, depositado por exemplo numa lamela de vidro (ver figura).

O material do fio pode ser platina, uma liga de platina ou tungsténio. Dimensões usuais rondam os 25mm×25µm(diam).

Medições em gases cobrem a gama 0.1..500 m/s, para temperaturas até 750°C. Em líquidos as velocidades são menores, 0.01..5 m/s com fio quente, até 25 m/s com filme quente.

A anemometria de fio quente permite medições com uma precisão melhor que 1% e com tempos de resposta permitindo ter acesso às flutuações do regime turbulento (≈1 ms).



### 4.2.3. anemometria laser Doppler (LDA)

Esta técnica de medições locais em escoamentos tem a grande vantagem de ser não-intrusiva, de não alterar o escoamento.

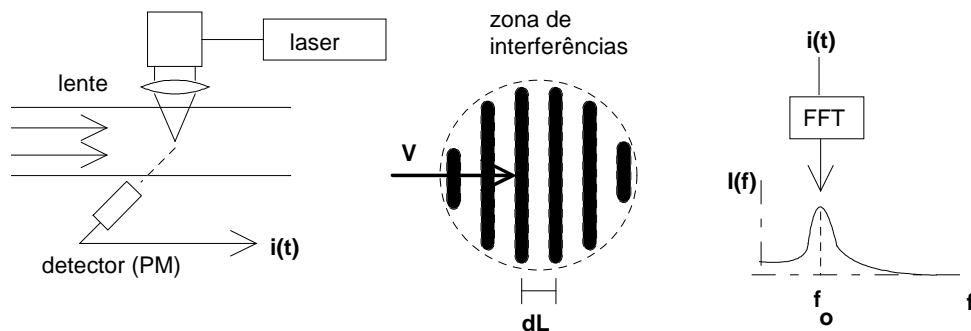


fig. anemometria laser

O princípio técnico pode ser esquematizado da forma seguinte:

- um feixe laser (de argão Ar tipicamente) é dividido em dois e focalizado por uma lente no seio do escoamento a medir;
- no ponto de cruzamento dos dois feixes cria-se uma zona de dimensões reduzidas (da ordem do milímetro) de interferências;
- partículas imersas no fluido (gotas, partículas eventualmente injectadas como fumo de cigarro) ao passarem pelas zonas claras/escuras reflectem a luz com uma frequência  $F = v/dL$  proporcional à sua velocidade ( $v$ ) e inversamente à distância entre duas zonas claras sucessivas ( $dL$ );
- um sensor foto-multiplicador (photo-multiplier –PM) detecta a intensidade luminosa reflectida e gera uma corrente proporcional;
- finalmente, após o CS, o computador adquire a função do tempo, por FFT obtém a frequência e logo a velocidade pretendida.

Por ajuste da posição de focalização, consegue-se um perfil das velocidades no escoamento.

Entre as vantagens da anemometria laser, citemos:

- a não intrusão;
- a boa resolução espacial;
- gama relativa de 1:100 000;
- a possibilidade de obter duas componentes em simultâneo, com dois feixes laser (as duas frequências do laser Ar) focalizados em perpendicular no mesmo ponto;
- há uma medição da dispersão da velocidade;
- precisão <1%.

Entre os inconvenientes:

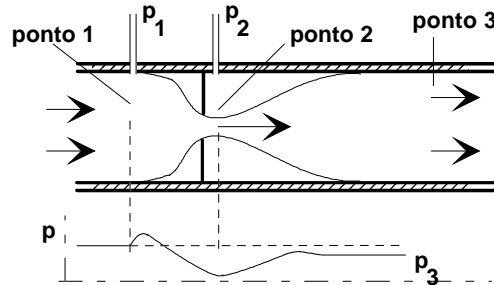
- ajuste, alinhamento e tratamento são complexos e onerosos;
- as partículas podem não acompanhar o escoamento;
- medições essencialmente em estacionário;
- se houver gradientes de temperatura, eles desviam os feixes laser, perturbam o alinhamento e resulta uma certa imprecisão espacial;
- fluido e tubo devem ser transparentes;
- é uma técnica de laboratório, i.e. não tipicamente industrial.

A aplicação desta técnica num avião permite medições da velocidade do ar até 300 km/h com uma óptima precisão.

### 4.3. medição de caudais volumétricos

#### 4.3.1. pressão diferencial

Na passagem por um obstáculo, a contracção do escoamento acompanha-se de variações de pressão e velocidade, de acordo com as leis de conservação, que no caso incompressível horizontal se escrevem:



$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2$$

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g}$$

fig. passagem por uma obstrução

Medida a pressão diferencial  $\Delta p = p_1 - p_2$ , deduz-se a velocidade

$$V_2 = \sqrt{\frac{2\Delta p / \rho}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}$$

ou o caudal

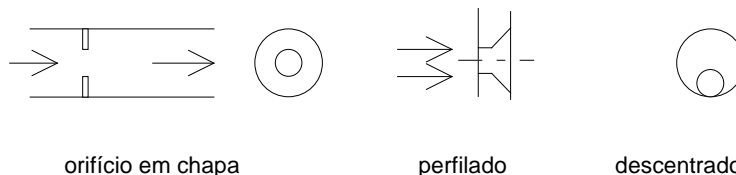
$$Q = A_2 V_2 = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

Na prática a área  $A_2$  não é conhecida e utiliza-se uma relação empírica introduzindo a área do orifício  $A_o$

$$Q = \frac{CA_o}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

onde o coeficiente  $C$  é objecto de calibração.

Quando o obstáculo é uma placa com orifício (de dimensões e geometria normalizadas) o coeficiente  $C$  não é constante, é próximo de 0.6 para  $Re > 10^3$  mas para velocidades inferiores depende da velocidade e das áreas de uma forma não linear.



orifício em chapa

perfilado

descentrado

fig. variação de pressão com obstruções simples

Existem outros obstáculos, menos radicais, impondo perdas de pressão ( $p_3-p_1$ ) menores, mas de manufactura mais delicada.

A gama relativa de medida é geralmente de 1:3. Precisões de até 0.5% são possíveis, 2% são normais.

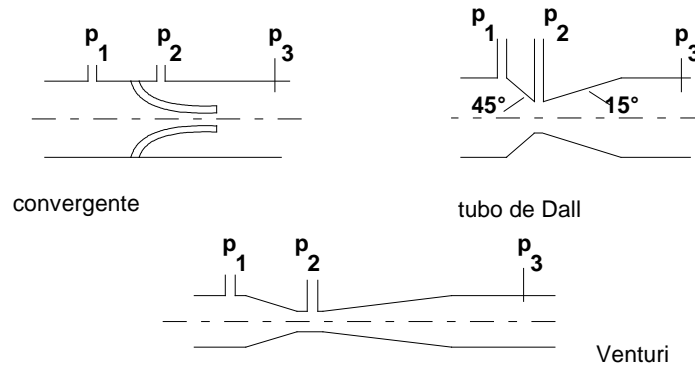


fig. outras geometrias

| Tabela comparativa das medições por obstruções |       |          |         |      |    |
|--|-------|----------|---------|------|----|
|  | orif. | conv.    | venturi | Dall |    |
| precisão                                       | 1..2  | 0.9..1.5 | 0.75    | 1    | %  |
| sensibilidade ( $\Delta p$ )                   | 200   | 160      | 40      | 50   | Pa |
| perda de pressão ( $p_3 - p_1$ )               | 60    | 40       | 10      | 10   | %  |
| coeficiente C                                  | 0.6   |          | 0.96    |      |    |
| custo  | -     | ++       | +++     | ++   |    |

Uma vez conhecida a tabela de calibração do coeficiente C, a leitura de um sensor de pressão diferencial fornece a medida do caudal procurado, através de uma relação não linear (raiz).

Para escoamentos compressíveis, se o orifício for muito pequeno, existe uma velocidade crítica, onde se atinge a velocidade do som em  $A_2$ , a partir da qual o caudal é independente da pressão a jusante

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{\text{crítica}} = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma + 1}}$$

Para o ar ( $\gamma = 1.4$ ), a razão de pressões crítica é igual a 0.9.

### 4.3.2.pressão diferencial em laminar

Em laminar a queda de pressão ao longo da parede é proporcional ao comprimento da parede, à viscosidade e à velocidade.



$$\Delta p = C\mu LV$$

fig. variação de pressão em laminar

Utilizando esta relação linear  $V - \Delta p$ , obrigando o fluido a um escoamento laminar na passagem por uma série de tubos ou entre várias placas em paralelo, obtém-se uma pressão diferencial  $\Delta p$  medível proporcional à velocidade.

| medição de caudal por queda de pressão em laminar |                                 |               |
|---|---------------------------------|---------------|
| gama de caudais                                   | 1..200                          | l/min         |
| fluido  | ar ou gases                     |               |
| $\Delta p$ nominal                                | 10..100                         | Pa            |
| pressão estática máxima                           | 1                               | bar           |
| Reynolds máximo                                   | $10^5..10^7$                    |               |
| material  | Alumínio, inox, latão, silicone |               |
| dim. (tubular: 200 l/min)                         | 15x270                          | mm(diam.)x mm |
| dim. (placas: 2 l/min)                            | 255x30x30                       | mm            |
| dim. (placas: 200 l/min)                          | 585x65x48                       | mm            |

### 4.3.3.rotâmetros

Em alternativa aos sistemas de área constante/pressão variável existem sistemas para os quais a queda de pressão é constante mas varia a área, os rotâmetros.

Um flutuador (algo mais denso que o fluido utilizado) é posto num tubo vertical cónico (estreito em baixo e largo por cima). O escoamento ascendente do fluido a medir leva o flutuador consigo até uma posição onde as forças de gravidade, pressão, impulsão e viscosidade se equilibrem, em regime estacionário.

O caudal é uma função linear da área disponível entre flutuador e tubo e é normalmente uma função afim da posição (x) do flutuador:

$$Q = A + Bx.$$

A medição dessa posição pode ser:

- visual, se o tubo for de vidro, equipado de uma escala para a leitura do caudal;
- magnética, se o flutuador incluir um íman detectado por um sensor exterior (vide figura).

A forma do flutuador pode variar desde a simples esfera até formas mais complexas que permitam assegurar a estabilidade mecânica (normalmente em rotação sobre si próprio, daí o nome) e uma melhor detecção da posição.

A forma do tubo, a sua secção pode não ser simplesmente cónica.

A medição pode ser efectuada numa derivação do caudal, devendo-se depois fazer a conversão para o caudal total.

As características dos rotâmetros podem resumir-se:

- fraca perda de pressão;
- linearidade entre 1% e 5%;
- precisão de 1% a 2%;
- gamas até 400 l/min de água (equivalente) ou 9 m<sup>3</sup>/min de ar (equivalente);
- sofre influência de variações da temperatura, através da alteração da viscosidade ou de dilatações de flutuador e tubo;
- tem velocidade mínima de funcionamento;
- é vulnerável a impulsos do tipo "golpe de arfete";
- relativamente barato;
- limpa-se automaticamente, por gravidade.

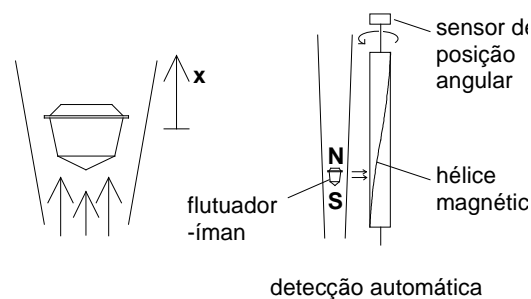


fig. rotâmetros

| exemplos de rotâmetros |           |         |         |       |                      |
|------------------------|-----------|---------|---------|-------|----------------------|
|                        | água      | água    | água    | ar    |                      |
| gama                   | 1..320    |         |         |       | cm <sup>3</sup> /min |
| "                      |           | 0.1..2  | 20..500 |       | l/min                |
| "                      |           |         |         | 5..9  | m <sup>3</sup> /min  |
| Δp                     | 0.1..3    | 0.2..15 | 5..10   | 5..10 | Pa                   |
| dim. ligações          | 1/16..1/8 | 1/4     | 3       | 3     | " (in.)              |

Quando o líquido a medir não é nem água, no caso líquido, nem ar, no caso de gases, os caudais serão inversamente proporcionais a raiz das densidades relativas:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}$$

#### 4.3.4. sensor magnético

Com fluidos condutores, uma solução para a medição de caudais volumétricos baseia-se na lei de Maxwell, segundo a qual num condutor de comprimento  $l$  em movimento num campo magnético de intensidade  $B$  se gera uma fem  $e_o$

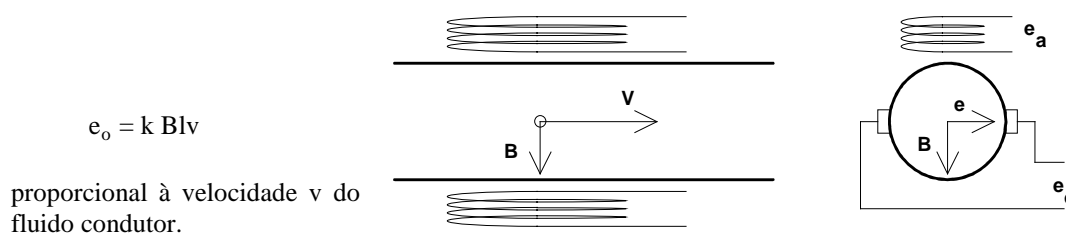


fig. medição de caudal por princípio magnético

Aplicando este princípio, gera-se um campo magnético perpendicular com o eixo do tubo e detecta-se a diferença de potencial gerada no segundo eixo transversal, obtendo assim uma medida do caudal volumétrico  $Q$ .

Entre as características da técnica citemos:

- é não intrusiva;
- é bidireccional;
- é insensível a variações de temperatura (enquanto não variar a condutividade do fluido);
- tem linearidade de  $\approx 0.5\%$  e precisão de  $0.5\%..5\%$ ;
- resposta rápida;
- o sinal fornecido é fraco ( $\approx 1$  mV plena escala);
- o fluido tem de ter uma condutividade  $> 10^{-6} \Omega^{-1}cm^{-1}$  –por exemplo, uma solução de sal NaCl a 5% em peso a 18°C tem uma condutividade de  $7 \cdot 10^{-2} \Omega^{-1}cm^{-1}$ .

Medições efectuam-se com água, ácidos, bases, produtos alimentares, pasta de papel...

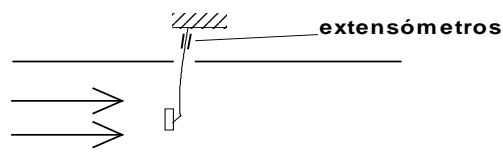
A alimentação pode ser em corrente alterna ou contínua. Os diâmetros dos tubos vão de uns milímetros até o metro e meio, com gamas relativas de 1:10.

**Exemplo de especificações de dois sensores magnéticos e do seu CS (Turbo)**

|                    | <b>MG711/F</b> | <b>MG711/E</b> |        |
|--------------------|----------------|----------------|--------|
| diâm. ligações     | 1.5..40        | 15..2000       | mm     |
| temperatura máxima | 1180           | 180            | °C     |
| pressão máxima     | 25             | 320            | bar    |
| material           | Al, cerâmica   | aço inox.      |        |
|                    | <b>PC2</b>     | <b>PR2</b>     |        |
| saída analógica    | 0..20          | 0..20          | mA     |
| saída digital      | opc.           | opc.           |        |
| precisão           | 1              | 0.5            | %      |
| alimentação        | rede/24        | rede/12/24     | Vac/dc |

**4.3.5. medição por arrasto**

Citemos uma solução para medir a velocidade e logo o caudal volumétrico a partir de uma força: o arrasto  $F$  provocado sobre um corpo imerso é proporcional ao quadrado da velocidade  $V$  do escoamento, à área frontal  $A$  do obstáculo e à densidade do fluido:



$$F = C_x A \frac{1}{2} \rho V^2$$

**fig. medição de caudal por arrasto**

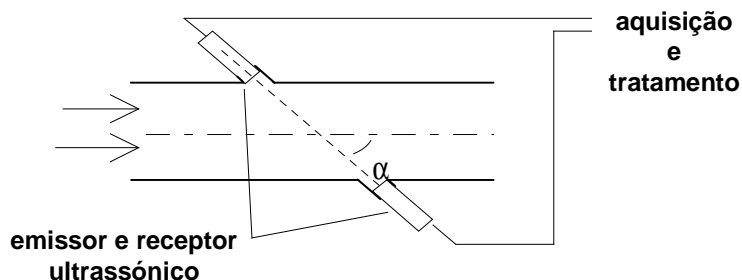
Um extensómetro permite medir a força exercida sobre o obstáculo e dela, após calibração, pode-se deduzir o caudal  $Q$ .

Medições em líquidos, em gamas de 3..40000 l/min, mas com gamas relativas reduzidas de cerca de 1:3, consegue-se uma precisão de cerca de 1%.

Um exemplo de sensor disponível no mercado (Turbo Gardex) permite medições com líquidos ou gases, com precisões de 2%, para pressões <25 bar e temperaturas <250°C. Com água a gama de medida é de 0.4..1350 m<sup>3</sup>/h; com ar a gama é de 12..40500 m<sup>3</sup>/h.

**4.3.6. medição por ultra-sons**

Se uma onda, acústica no caso presente, atravessa um escoamento com um ângulo  $\alpha$  haverá uma diferença entre a frequência emitida e a frequência recebida proporcional à velocidade do escoamento: é o efeito Doppler.



$$\Delta f = \frac{V \cos(\alpha)}{l}$$

**fig. medição de velocidade por efeito Doppler em transmissões acústicas**

Baseadas neste princípio, medições com ultra-sons são efectuadas em líquidos ou gases, em gamas relativas de 1:20, com precisões de 1..4%.

#### 4.3.7. velocidade por turbina

Neste caso, um corpo simétrico, com  $n$  pás, é introduzido no escoamento e, sob a pressão exercida nas pás, roda com uma velocidade angular proporcional à velocidade do fluido  $\omega = KV$ .

As pás passando no alinhamento dum enrolamento modificam a sua auto-indutância e geram um trem de impulsos eléctricos, cuja frequência é proporcional a  $n$ , e logo à velocidade do escoamento.

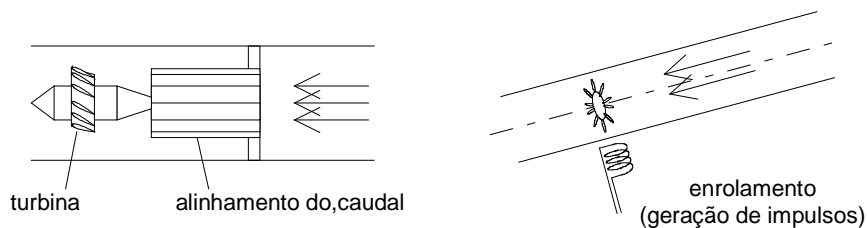


fig. medição de velocidade por turbina

Medições realizam-se em gamas de 0.001..500 m<sup>3</sup>/min (gamas relativas de 1:15), em gases e de 0.05..120000 l/min em líquidos, com precisões de até 0.25% e tempos de resposta de 2..10 ms.

Um exemplo de sensor disponível no mercado (Turbo Quant) permite medições com uma precisão de 0.5% numa gama relativa de 1:10. Com água a gama de medida é de 0.06..2700 m<sup>3</sup>/h, para pressões <320 bar e temperaturas -100..250°C.

#### 4.3.8. velocidade por detecção de vórtices

Um obstáculo no meio do escoamento provoca o aparecimento de vórtices (eddies) a jusante do obstáculo, cuja frequência depende do caudal volumétrico. A medição é independente do número de Reynolds.

A detecção dos vórtices pode ser:

- por sensor de pressão acústica;
- por sonda de temperatura, termistância por exemplo.

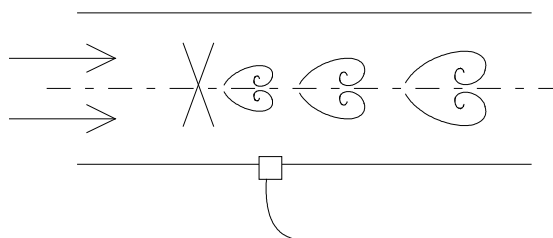


fig. medição de velocidade por detecção de vórtices

Medições efectuam-se em líquidos ou gases em gamas relativas de 1:100, com precisões de 0.75%. A medição em frequência é aqui muito ruidosa, sujeita a calibração, difícil para baixas velocidades. No entanto, a medição é intrinsecamente digital.

A título de exemplo, o sensor Turbo Fluidistor permite medições em gases e líquidos com precisões respectivas de 1.5% e 0.5%. A gama de medida, com líquidos começa em 0.009 m<sup>3</sup>/h, com gases começa em 0.17 m<sup>3</sup>/h. A gama de pressões vai até 25 bar, a gama de temperaturas é de -40..150°C.

### 4.3.9. medições em geometria aberta

Para medições de caudais de água em canais, o método da obstrução é geralmente aplicado, existindo fórmulas empíricas para deduzir o caudal  $Q$  a partir da elevação  $h$  do líquido por cima da abertura.

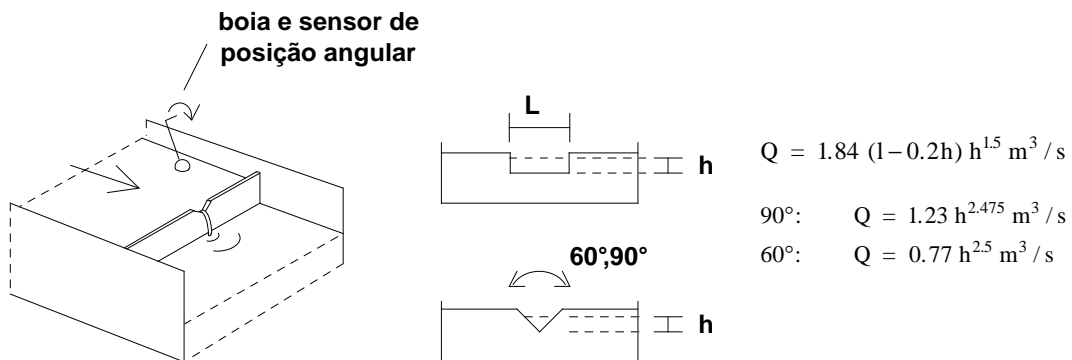


fig. medição de caudais em canais

Medem-se caudais de 0.6..2000  $\text{m}^3/\text{h}$  com abertura rectangular, de 0..30  $\text{m}^3/\text{h}$  com abertura triangular.

### 4.4. medições de volume transferido

Aqui não são medidos velocidade nem caudal, mas sim o volume de fluido efectivamente transferido (positive displacement). Se o tempo for fornecido em paralelo, obter-se-á o caudal.

Para medir o volume, o fluido é obrigado a passar por um volume de geometria conhecida, medindo-se então o número de vezes que o enche. A configuração mecânica pode ser rotativa ou alterna (pistão ou êmbolo).

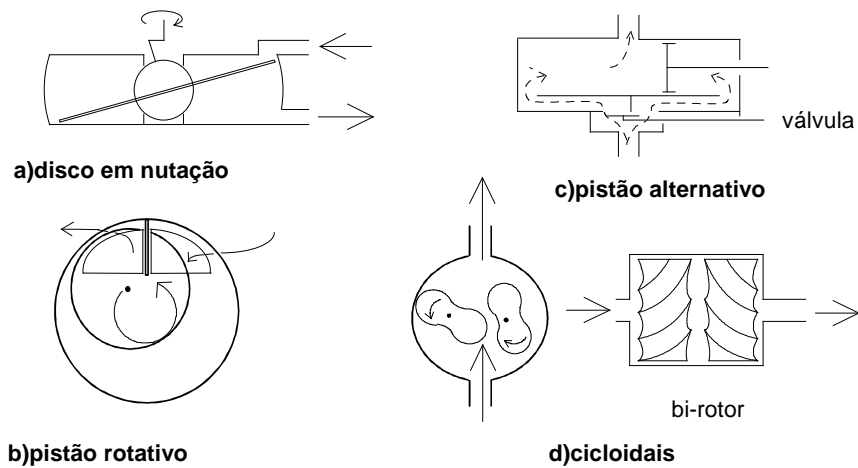


fig. medição de volume transferido



A título comparativo entre as várias soluções em volume:

|                       | a      | b      | c   | d                |
|-----------------------|--------|--------|-----|------------------|
| gama (líquido)        | 5..600 | 4..600 |     | 0.1..64000 l/min |
| gama relativa         |        | 1:5    |     |                  |
| pressão estática máx. | 150    | 400    |     | 1200 psi         |
| precisão              | 1..2   | 0.2..1 | 0.2 | 0.25 %           |
| repetibilidade        |        | 0.015  |     | 0.015 %          |

### 4.5.caudais mássicos

#### 4.5.1.medição volumétrica e de densidade em paralelo

A densidade pode ser medida, eventualmente numa derivação do escoamento, por diversos métodos baseados em princípios como:

- impulsão;
- gravidade;
- ultra-sons, impedância acústica;
- absorção de radiações;
- medição de pressão e temperatura e dedução da densidade.

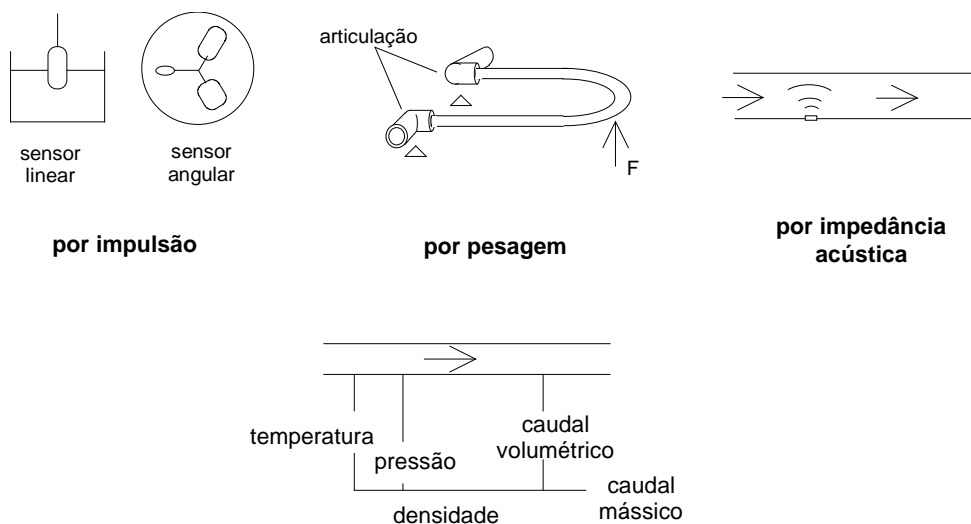


fig. medição da densidade em paralelo -obtenção do caudal mássico

Conhecendo-se a densidade  $\rho$  e a velocidade média ou o caudal volumétrico  $Q$ , obtém-se o caudal mássico

$$\phi = \rho Q.$$

### 4.5.2. medição térmica

Considere-se a montagem apresentada na figura do lado.

A quantidade  $q$  de calor fornecida (electricamente) ao fluido, propaga-se preferencialmente a jusante, provocando assim uma diferença de temperatura entre as duas sondas.

Em regime estacionário,  $q$  é dado por uma relação quase linear do caudal mássico:

$$q = k \phi^n (T_2 - T_1) \quad \text{com } n \approx 0.8.$$

Obtém-se assim medições em gamas de  $10^{-9}..10^{-3}$  kg/s (em gases), com precisões de 1%, repetibilidade de 2%, constante de tempo de 3 s, diferença de temperaturas de 1°C e temperaturas até 100°C, com pressão estática até 200 MPa.

A técnica é quase não intrusiva mas só é possível com caudais pequenos.

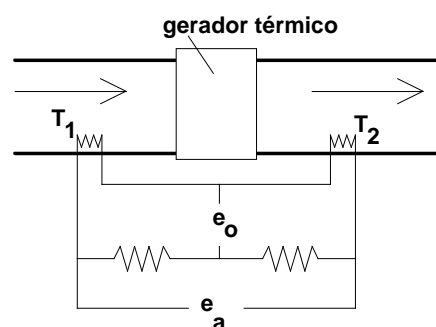
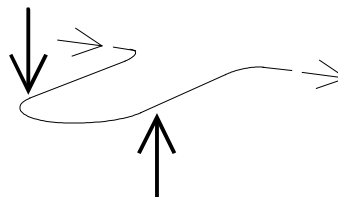


fig. caudal mássico por medição térmica

### 4.5.3. medição da força de Coriolis

Este sensor mede a deformação provocada num tubo em duplo U provocada pela força de Coriolis actuando sobre o fluido em movimento no tubo, proporcional ao caudal mássico e à direcção do escoamento.

A força de Coriolis actua dissimetricamente dos dois lados do tubo: medindo-se a deformação obtém-se uma medida do caudal mássico.



Dependendo dos modelos, medições são efectuadas em gamas que variam desde 3..54 até 34000..680000 kg/h, para pressões <43..180 bar e temperaturas -240..425 °C. As gamas relativas são de cerca de 1:20, valor extensíssimo.

## 5. TEMPERATURA

### 5.1. introdução

A temperatura é um dos parâmetros mais importantes mas também mais complexos da física. Se a noção quente/frio é comum, ela está relacionada sobretudo com transferências de calor, aquecimento ou arrefecimento, mais do que com um conceito de temperatura em si.

Distinguem-se três formas de transferir calor, que podemos rapidamente caracterizar da seguinte maneira:

- a **condução** desloca o calor dentro de um corpo ou por contacto e tende a uniformizar o campo de temperatura;
- a **convecção** é a transferência de calor numa interface com um fluido (sólido-líquido, sólido-gás, líquido-gás) ou no interior de um fluido, por movimentos das partículas do fluido levando consigo o calor;
- a **radiação** é a expulsão de energia calorífica sob forma radiactiva, isto é uma onda normalmente no domínio infravermelho.

A temperatura está no cruzamento de muitas propriedades mecânicas, físicas, termodinâmicas, que só recentemente (em 1948-1968) foi possível por de acordo, chegando-se a uma definição única e global.

#### unidades

As unidades de temperatura do Sistema Internacional são assim:

- o Kelvin (K), inicialmente relacionado com a termodinâmica, igualmente denominada temperatura absoluta, é a unidade SI de temperatura;
- o Celsius (°C) é a unidade prática SI, definido a partir dos pontos triplo e de evaporação da água à pressão standard, respectivamente a 0.01°C e a 100°C.

A relação entre as duas unidades do SI

$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273.15$$

atribui ao ponto triplo da água a temperatura absoluta  $T(0.01^{\circ}\text{C}) = 273.16\text{K}$ .

A unidade prática inglesa, o Fahrenheit (°F), está relacionada com a temperatura em Celsius pela fórmula linear

$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{5}{9}(T(^{\circ}\text{F}) - 32)$$

e associa aos dois pontos de equilíbrio da água as temperaturas de 32°F(=0°C) e 180°F(=100°C).

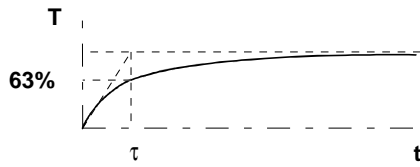
Ao Fahrenheit está igualmente associada uma unidade de temperatura absoluta, denominada Rankine:  $T(\text{K}) = \frac{5}{9}T(^{\circ}\text{R})$ .

Os instrumentos fundamentais (standard) de calibração em temperatura são:

- |                               |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|
| • resistências de platina     | de 13.81K até 630.74°C;       |
| • termopares de ródio-platina | de 630.74°C até 1064.43°C;    |
| • pirometria                  | para temperaturas superiores. |

tempo de resposta

Termómetros e instrumentos de medição de temperatura são essencialmente sistemas de primeira ordem, respondendo a um escalão de temperatura com uma indicação exponencial convergente, definindo-se com ( $\tau$ ) o tempo de resposta, ou seja o tempo necessário para atingir 63% do escalão final.



$$T = T_0 + \Delta T (1 - e^{-t/\tau})$$

fig. resposta do sensor a um escalão de temperatura

**5.2.termómetros de expansão**

**5.2.1.termómetro clássico**

A propriedade mecânica aqui utilizada é a expansão (ou contracção) de todo o corpo físico, sólido, líquido ou gasoso, quando a sua temperatura sobe (ou desce), alterando-lhe o volume –ou a pressão no caso de um gás a volume constante:

$$V = V_0(1 + \alpha(T - T_0))$$

O exemplo mais comum é o termómetro de mercúrio em tubo de vidro, onde o mercúrio se dilata dentro de um capilário de vidro, sendo a leitura da posição do menisco função linear da diferença de temperatura a partir de uma dada origem:

$$T = T_0 + Ax$$

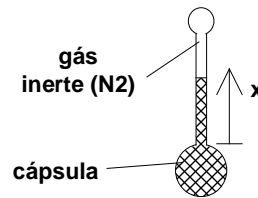


fig. termómetro de mercúrio

coeficiente de expansão:

- do mercúrio  $\alpha_{Hg} = 134 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ;
- de líquidos orgânicos  $\alpha \approx 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

A gama de utilização deste tipo de termómetros cobre quase toda a gama líquida do mercúrio (-39..600°C). Com outros líquidos desce-se até -200°C.

Sensibilidade e precisão dependem da geometria e da gama pretendida, da forma de utilização (imerso parcial ou totalmente no líquido), da forma de leitura... É dificilmente inferior a 0.01°C.

**5.2.2.elementos bimetálicos**

Neste caso, os corpos postos em tracção/contracção são duas tiras de dois metais de coeficientes de dilatação diferentes coladas uma à outra e que se deformam de acordo com as variações de temperatura.

Para aumentar a sensibilidade, várias configurações geométricas são possíveis: linear, espiral, helicoidal ...

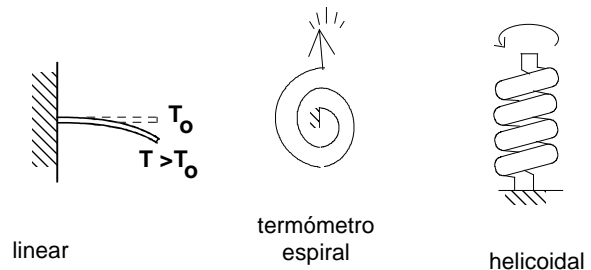


fig. sensores bi-metálicos

Para se obter maior sensibilidade, a forma mais usual para termómetros é a espiral, tendendo a endireitar-se com a subida da temperatura.

Precisões de até 0.2°C ou 1% são possíveis, para gamas de -200..500°C, com tempos de resposta de 10..20s.

### 5.3.termómetros resistivos

A resistência eléctrica de um condutor qualquer é função da temperatura. Este é o princípio utilizado por muitos sensores de temperatura, ditos resistivos.

#### 5.3.1.sensores metálicos de resistência variável

Geralmente, numa dada gama, a resistência de um condutor metálico pode expressar-se sob forma polinomial

$$R = R_0 \left[ 1 + \alpha t + \beta t^2 + \dots \right]$$

onde  $R_0$  é a resistência à temperatura de referência  $T_0$ ,  $t$  é a temperatura relativa ( $t = T - T_0$ ),  $\alpha$ ,  $\beta$ ... são os coeficientes do polinómio, cuja ordem depende da precisão pretendida.

Uma alternativa para se obter a resistência sob a forma de tabelas, interpolando-se a temperatura entre os valores fornecidos.

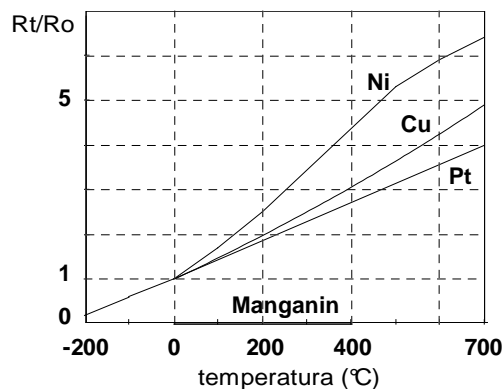


fig. resistência normalizada de sondas metálicas

#### platina

A platina é o metal de referência (standard) para medições numa gama de  $-200..600^{\circ}\text{C}$ . Além da sua curva resistência função da temperatura ser bem linear (na gama  $0..500^{\circ}\text{C}$   $\alpha_{\text{Pt}} \approx 0.00385\text{K}^{-1}$ ), ela é um metal nobre, não oxidável, apresentando uma boa resistência mecânica ( $E = 120 \text{ MPa}$ ) e elevada resistividade ( $\rho = 9.83 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ ).

Numa gama alargada, entre  $-220..650^{\circ}\text{C}$ , a relação temperatura-resistência pode ser obtida pela expressão quadrática

$$t^2 - \left( \frac{10^4}{\delta} + 10^2 \right) t = \frac{10^6}{\delta} \left( \frac{R_t - R_0}{R_{100} - R_0} \right)$$

onde  $t$  é a temperatura em Celsius,  $\delta$  é uma constante ( $\delta = 1.508$ ),  $R_t$ ,  $R_0$  e  $R_{100}$  são as resistências às temperaturas respectivas  $t$ ,  $0^{\circ}\text{C}$  e  $100^{\circ}\text{C}$ .

A qualidade da platina é tal que as imprecisões vêm mais da sua acomodação no instrumento ou da manufactura da sonda.

Sondas de temperatura de platina (platinum Resistance Temperature Detectors -RTD) estão disponíveis com várias resistências de referência ( $R_0$ ) e várias geometrias.

| sondas de temperatura de platina (RTD) |                         |              |          |
|--|-------------------------|--------------|----------|
|  |                         | valor típico |          |
| resistência $R_0$                      | 100                     | 25..1000     | $\Omega$ |
| resistência $R_{100}$                  | 138.5                   |              |          |
| dimensões (diam.x comp.)               | 2x19                    | 3..6         | mm       |
| gama linear relativa                   | 1:100                   |              |          |
| linearidade                            | 0.4                     |              | %        |
| precisão                               | 0.1..0.5                |              | %        |
| deriva no tempo                        | < 0.15 10 <sup>-4</sup> |              | °C/h     |
| repetibilidade                         | < 0.05                  |              | °C       |
| tempo de resposta                      | < 6                     |              | s        |

níquel, cobre

Outros metais são usados, de custo e de precisão inferiores, como:

- o níquel ( $E = 800 \text{ MPa}$ ,  $\rho = 6.38 \cdot 10^{-8} \text{ }\Omega\text{m}$ ,  $\alpha \approx 0.0066 \text{ K}^{-1}$ ) tem uma sensibilidade mais elevada mas é fortemente não linear e instável acima de 300°C; encontram-se resistências de 10..1000  $\Omega$  mas os problemas indicados limitam o seu uso;
- o cobre ( $E = 200 \text{ MPa}$ ,  $\rho = 1.56 \cdot 10^{-8} \text{ }\Omega\text{m}$ ,  $\alpha = 0.00425 \text{ K}^{-1}$ ) é razoavelmente linear mas tem fraca resistividade: mais barato e comparável com o platina quando usado numa gama reduzida, encontram-se resistências de 10..25  $\Omega$ , para uma gama de -50..150°C.

condicionamento de sinal

As configurações geométricas das sondas podem variar desde o enrolamento de platina, protegido num isolador e numa caixa de metal de aço inox ou Alumel até ao filme metálico no interior de um sensor de dimensões reduzidas (7x7x15 mm).

A configuração eléctrica é normalmente de uma ponte de dois, três ou quatro fios (ver figura), sendo estas últimas mais precisas e lineares.

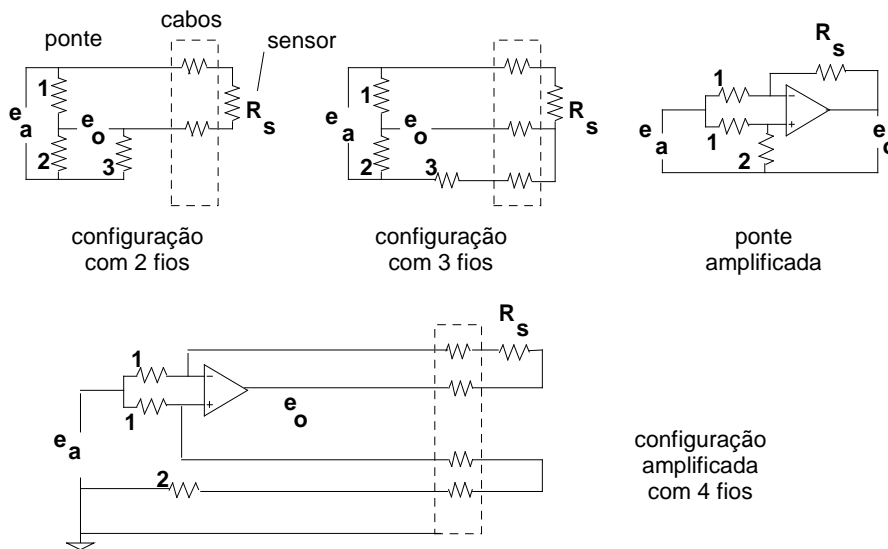


fig. CS de sensores metálicos de temperatura -RTD

Um problema específico dos sensores resistivos é o aquecimento interno (auto-aquecimento) devido à passagem de corrente na sonda ( $= Ri^2$ ), eventualmente falseando as medidas na ordem do décimo de grau.

### 5.3.2.termístores

Termístores são semicondutores cuja resistência varia fortemente com a temperatura. A variação da resistência pode empiricamente ser aproximada numa forma exponencial:

$$R_T = R_o \exp \left[ \beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_o} \right) \right]$$

correspondendo a um coeficiente linear de temperatura  $\alpha$  geralmente negativo (negative temperature coefficient –NTC)

$$\alpha \approx \frac{1}{R_o} \frac{dR_T}{dT} = -\frac{\beta}{T_o^2} \approx -0.02..-0.06 \text{ K}^{-1}$$

Existem, no entanto, alguns termístores com um coeficiente de temperatura positivo (positive temperature coefficient –PTC) e com uma curva de resistência variando ainda mais bruscamente com a temperatura (vide figura).

Uma característica importante dos termístores é a sua elevada sensibilidade e elevado sinal de saída. O que permite ao termístor detectar variações de temperatura dificilmente perceptíveis para um RTD ou um termopar.

Configurações geométricas variam em dimensões, desde o milímetro até alguns centímetros.

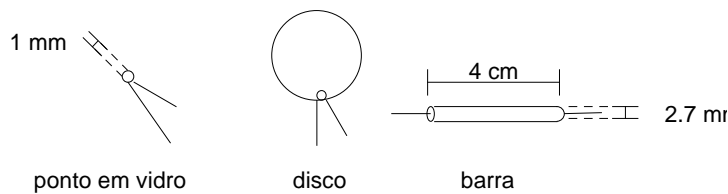


fig. exemplos de formas e dimensões de termístores

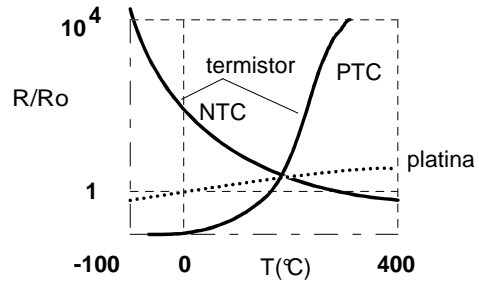


fig. resistências comparadas termistor e RTD de platina

| Alguns exemplos de características de termístores |       |       |      |          |
|---|-------|-------|------|----------|
|   | (a)   | (b)   | (c)  |          |
| $\alpha$  | -3.8  | -3.8  | -3.8 | %/°C     |
| $R_o$   | 58000 | 28500 | 283  | $\Omega$ |
| $R_{25^\circ C}$                                  | 2000  | 10000 | 100  | $\Omega$ |
| $\Delta R_{25^\circ C}$                           | 20    | 10    | 10   | %        |
| $R_{50^\circ C}$                                  | 810   | 4000  | 41   | $\Omega$ |
| $T_{max}$   | 300   | 150   | 125  | °C       |
| tempo de resposta                                 | 2     | 95    | 160  | s        |

A resistência à temperatura ambiente varia entre 1 e  $10^8 \Omega$ , com desvios de 10 a 30% do nominal, com consumos relativamente elevados (0.1..30 mW/K), com problemas de estabilidade, histerese, desvios no tempo (1%/ano).

Termístores são utilizados numa gama restrita de amplitude térmica, com precisões de até 0.1°C, numa gama de temperaturas de -100 a 400°C.

Recentemente têm-se concebido circuitos integrados incluindo conjuntamente o termistor e o seu condicionamento de sinal, operando numa gama de -50..150°C (por exemplo o AD22100).

### 5.4.circuitos integrados

A boa sensibilidade das características dos materiais semicondutores às variações de temperatura é utilizada para efeitos de termometria.

O exemplo mais simples é o díodo (junção np), cuja relação tensão-corrente depende da temperatura numa fórmula exponencial:

$$I(V, T) = I_s(T) \left[ e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right] \Rightarrow V = \frac{kT}{q} \text{Log} \left[ 1 + \frac{I}{I_s} \right] \approx C - D(I)T$$

onde q é a carga do electrão e k a constante de Boltzmann ( $k = 8.62 \cdot 10^{-5} \text{ eV / K}$ ).

Esta relação pode ser utilizada (para uma intensidade constante  $I \ll I_s$ ) para fornecer uma tensão variando linearmente com a temperatura, com sensibilidades da ordem dos mV/°C, com uma precisão de cerca do grau, numa gama de -40..150°C.

O mesmo princípio é utilizado com transístores:  $V_{BE} = C - D T$ .

Integrados recorrendo a vários díodos (dois díodos Zener para o LM135) ou transístores (no LX5700 ou no AD590), de forma diferencial para anularem a constante C, fornecem uma tensão directamente proporcional à temperatura absoluta.

$$\frac{I_{C1}}{I_{C2}} = \frac{\exp[qV_{BE1} / kT]}{\exp[qV_{BE2} / kT]}$$

$$\Rightarrow V_o \approx V_{BE1} - V_{BE2} = \frac{kT}{q} \text{Log} \left( \frac{I_{C1}}{I_{C2}} \right)$$

$$\Rightarrow V_o \propto T$$

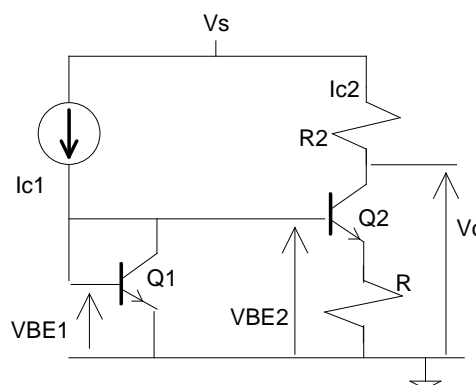


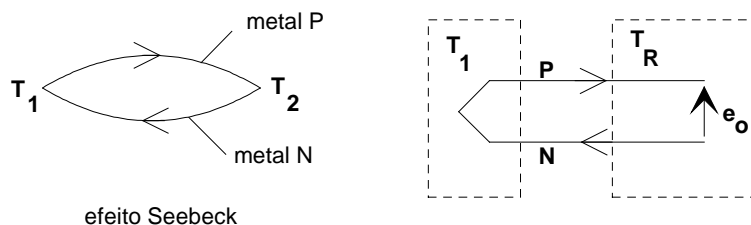
fig. exemplo de circuito sensor com dois transístores

| Exemplos de características de integrados sensores de temperatura |          |          |          |           |    |
|---|----------|----------|----------|-----------|----|
|   | LX5700   | LM135    | AD590J   | LM134-3   |    |
| elementos sensores  | 2T       | 2Z       | 4T       |           |    |
| sensibilidade   | 10mV/K   | 10mV/K   | 1µA/K    | 227µV/Ω/K |    |
| precisão  | 3.8      | 1.5      | 0.3      | 3         | K  |
| linearidade   | ±1       | -        | -        | -         | K  |
| gama de medida  | -55..125 | -55..150 | -55..150 | -55..125  | °C |
| alimentação   |          | 0.4..5mA | 4..30V   | 1..40V    |    |
| tempo de resposta (ambiente)                                      | 50       | 45       | 60       |           | s  |
| " (com convecção forçada)   | 1        | 1        | 1.4      |           | s  |



### 5.5. termopares

O efeito Seebeck, a circulação de corrente entre duas junções de metais diferentes a temperaturas diferentes



efeito Seebeck

fig. princípio do termopar

é o princípio de funcionamento de um dos sensores mais usuais em aplicações industriais, o termopar (thermocouple).

Na prática, os metais ou ligas metálicas P e N são associados numa sonda, à temperatura  $T_1$ , e no outro extremo, à temperatura  $T_R$  de referência, a força electro-motriz (fem) gerada  $e_o$  é função das temperaturas  $T_1$  e  $T_R$

$$e_o = e_{PN}(T_1) + \int_{T_R}^{T_1} \sigma_P dT + \int_{T_1}^{T_R} \sigma_N dT = \int_{T_R}^{T_1} (e_P - e_N) dT$$

São definidos vários tipos standard de ligas utilizadas, para o lado positivo, P, e para o lado negativo, N.

| tabela dos vários tipos de termopares |                                 |              |          |
|---------------------------------------|---------------------------------|--------------|----------|
|                                       | gama de temp. (°C)              | precisão (%) | fem (mV) |
| E (o mais sensível)                   | -270..1000                      | 0.5          | 56       |
| J (o mais barato)                     | -210..1200                      | 0.75         | 42       |
| K (o mais linear)                     | -270..1372                      | 0.75         | 30       |
| R (o mais estável)                    | -50..1767                       | 0.3          | 7        |
| S (o menos sensível)                  | -50..1767                       | 0.3          | 6.6      |
| T (oxidável)                          | -270..400                       | 0.75         | 20       |
| EN (TN)                               | Constantan 95% Cu-45% Ni        |              |          |
| EP (KP)                               | Chromel 90% Ni-10% Cr           |              |          |
| JN                                    | Cu-Ni (SAMA constantan)         |              |          |
| JP                                    | Fe 99.5%                        |              |          |
| KN                                    | Alumel 95% Ni-2% Al-2% Mn-1% Si |              |          |
| RP                                    | 87% Pt-13% Rh                   |              |          |
| SP                                    | 90% Pt-10% Rh                   |              |          |
| RN (SN)                               | 100% Pt                         |              |          |
| TP                                    | 100% Cu                         |              |          |

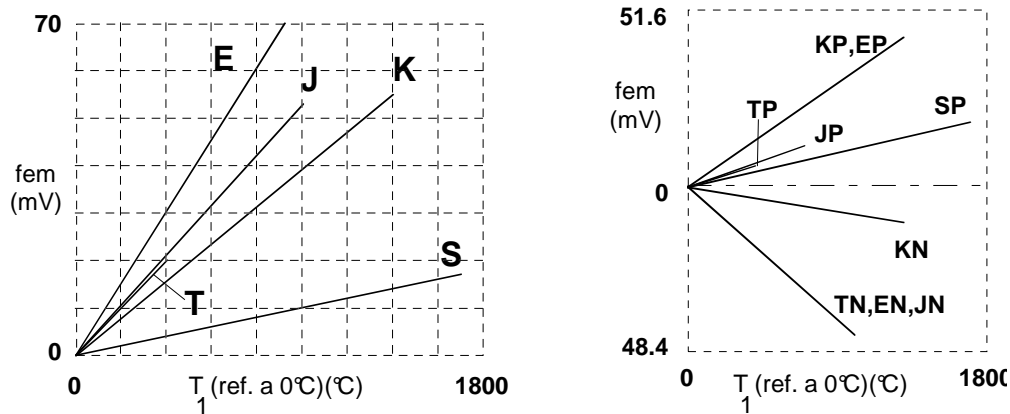


fig. curvas temperatura-fem de termopares

Existem tabelas fornecidas pelos fabricantes ou disponíveis na literatura, bem como aproximações polinomiais para a determinação das fem dos tipos clássicos de termopares, com precisões melhores que 2%.

Configurações mecânicas vão desde o termopar (junção) isolado e protegido num envelope rígido (Alumel, aço inox, ferro, cerâmica...) até ao termopar simplesmente exposto ao meio a medir.

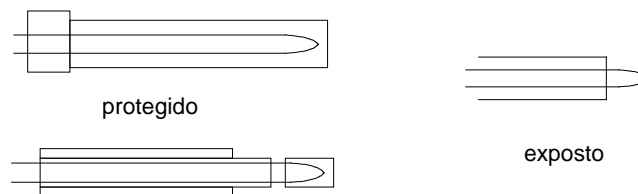


fig. termopares

A precisão conseguida globalmente ronda os 0.75%.

O tempo de vida é normalmente de cerca de meio ano, mais para o caso de metais nobres.

Fontes de erros possíveis são:

- gradientes de temperatura não homogêneos ou desequilibrados no circuito dos termopares;
- perdas de sinal por fugas –o sinal é tão fraco que as perdas são possíveis;
- aparecimento de fem resultando de esforços nos materiais do circuito –sobretudo para K;
- electrolise dos isolamentos se eles estiverem molhados –sobretudo para J;
- ligações intermediárias por "connectors".

### 5.5.1.ligações

Quando termopar e CS estão afastados, para reduzir os custos, é frequente utilizar ligações de extensão dos termopares em ligas diferentes mas compatíveis com os metais da junção. As ligas correspondendo aos vários tipos recebem a designação do tipo acrescentada do sufixo X.

Tais ligações reduzem a gama de utilização do termopar e limitam a precisão conseguida.

### 5.5.2.temperatura de referência

A temperatura de referência  $T_R$ , da segunda junção ou do seu equivalente, é suposta conhecida. As possibilidades para manter/conhecer essa temperatura são:

- um banho de gelo, permitindo manter  $T_R$  a  $0^\circ\text{C}$  (a referência normalizada);

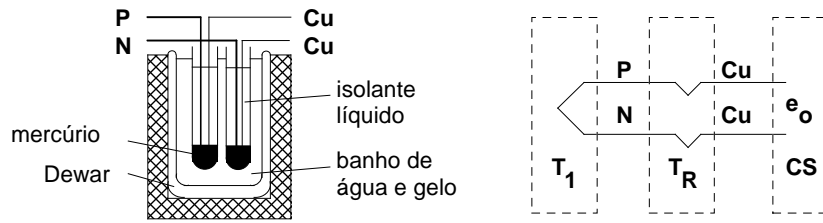


fig. temperatura de referência com banho de gelo

- um forno com temperatura regulada ( $T_R \neq 0^\circ\text{C}$ ) devendo-se então corrigir a tabela fem-temperatura;

- uma zona isotérmica de temperatura  $T_R$  não regulada medida por outro sensor (por uma resistência de platina por exemplo);

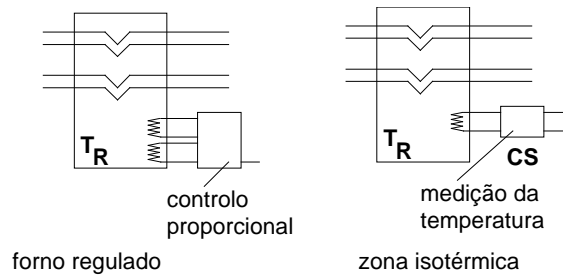


fig. temperatura de referência não nula

- um compensador de junção de referência: disponíveis no mercado, estes compensadores usam uma ponte alimentada para simular a referência.

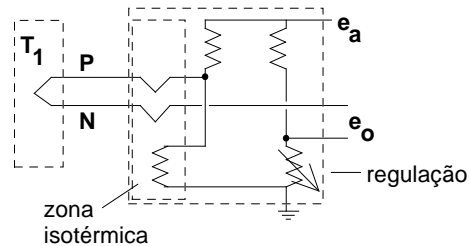


fig. temperatura de referência por compensador

| exemplo de dados de um compensador para termopares |                               |                  |  |
|--|-------------------------------|------------------|--|
| $T_R$  | $0^\circ\text{C}$             |                  |  |
| precisão   | 0.25                          | $^\circ\text{C}$ | para $T_{\text{amb}} \approx 25^\circ\text{C}$ |
| "  | 0.50                          | $^\circ\text{C}$ | para $T_{\text{amb.}} 15..35^\circ\text{C}$    |
| "  | 0.75                          | $^\circ\text{C}$ | para $T_{\text{amb.}} 0..50^\circ\text{C}$     |
| impedância de saída $Z_o$                          | < 250                         | $\Omega$         |  |
| tempo de vida                                      | 1500 h contínuo, 2 anos disc. |                  |  |
| dimensões (diam-comp.)                             | 2x3                           | cm               |  |

## 5.6. pirometria

### 5.6.1. introdução

Todo o corpo a uma temperatura qualquer ( $T > 0\text{ K}$ ) troca energia radiactiva com o meio no seio do qual está inserido.

A lei do corpo negro de Planck estipula a potência máxima  $n_\lambda$  emitida por um corpo à temperatura  $T$  como função do comprimento de onda ( $\lambda$ )

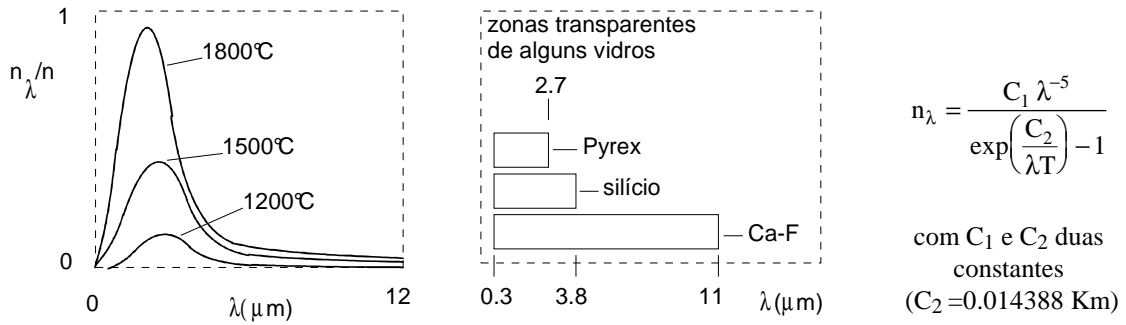


fig. lei de Planck (e transparência de alguns vidros)

O máximo da curva é obtido para  $\lambda_m T = 2897 \text{ K}\mu\text{m}$ .

A integração para todos os comprimentos de onda resulta na lei de Stefan-Boltzmann, expressando a potência máxima ( $n$ ) emitida por unidade de superfície por um corpo à temperatura  $T$

$$n = \sigma T^4 \quad \text{com } \sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W / m}^2\text{K}^4.$$

Corpos reais, não negros, emitem somente uma fracção das potências espectral ( $n_\lambda$ ) e total ( $n$ ), definindo-se a emissividade espectral ( $\epsilon_\lambda$ ) e a emissividade total ( $\epsilon$ ):

$$w_\lambda = \epsilon_\lambda n_\lambda \quad w = \epsilon n.$$

Baseados nestas leis, existem vários tipos de sensores de temperatura chamados **pirómetros**:

- pirómetros de radiação total, absorvem a energia radiactiva incidente e produzem um sinal que lhe é proporcional;
- pirómetros monocromáticos, medem a energia radiactiva num comprimento de onda dado;
- pirómetros bicromáticos ou de razão, comparam a energia emitida em dois comprimentos de onda.

### 5.6.2.pirómetros de radiação total

Neste caso, o sensor tenta ser uma aproximação do corpo negro, absorvendo a energia incidente (emitida pelo corpo cuja temperatura se pretende medir) e convertendo-a:

- em calor (detectores térmicos): estabelece-se um equilíbrio térmico no detector e deduz-se da temperatura  $T_d$  do detector a energia absorvida;
- em energia eléctrica (detectores semi-condutores), por absorção de fotões.

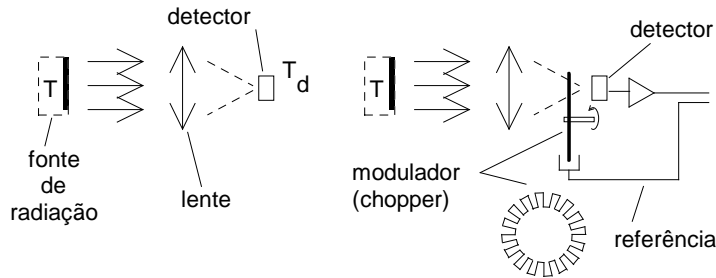


fig. configurações ópticas -em dc e em ac

Para ambos os casos, a radiação emitida pelo corpo de temperatura desconhecida é focalizada opticamente sobre o detector. A lei de Stefan-Boltzmann permite deduzir da energia absorvida a temperatura do corpo emissor.

A medição pode ser efectuada

- em contínuo (dc), medindo a temperatura  $T_d$  do detector: é a solução mais simples mas apresenta problemas de deriva no tempo e de ruído;
- em alternado (ac), modulando-se o feixe de luz com um disco ranhurado (chopper) em rotação, fazendo então a medida em ac: é uma solução mais imune ao ruído mas reclama um tempo de resposta do sensor suficientemente breve.

Detectores térmicos são normalmente cobertos com um fino filme de carbono, de emissividade constante e próxima da unidade no infravermelho.

Entre os sensores de temperatura citemos:

- termopares em série, com a junção quente no ponto de focalização e a junção fria ao ambiente ou arrefecida por ar ou água; fem e tempo de resposta são função de geometria e dos materiais;
- termistores têm maior sensibilidade e tempo de resposta reduzido: a configuração óptica é normalmente alterna, com chopper; electricamente utiliza-se uma ponte com dois termistores, um ao ambiente e o outro como sensor.

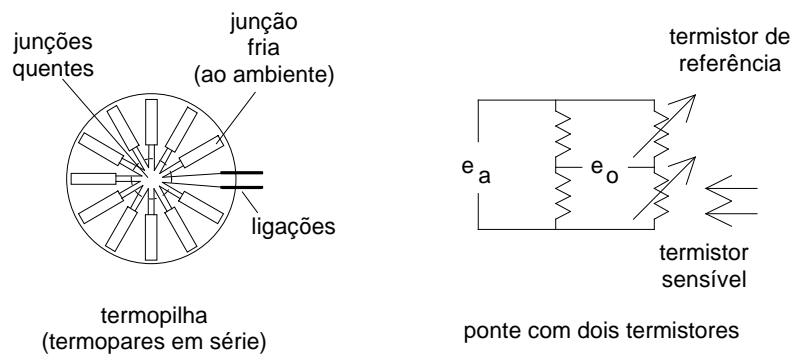


fig. detectores térmicos

Detectores foto-sensíveis semicondutores podem ser:

- foto-resistivos, foto-condutivos;
- foto-voltaicos (ou foto-díodos, foto-transístores);
- foto-electromagnéticos: sensores In-Sb (índio-antimónio) são usados no infravermelho, com apreciável sensibilidade e boa estabilidade no tempo; apresentam a vantagem de serem sensíveis a baixas temperaturas.

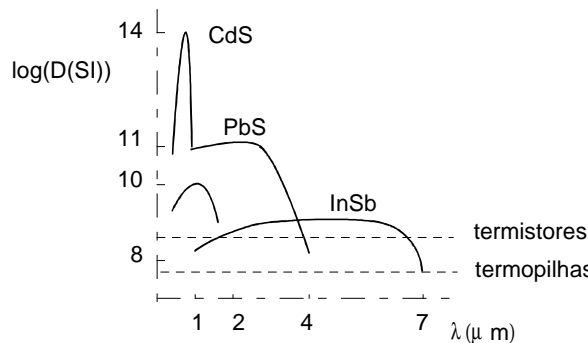


fig. sensibilidade comparada em função do comprimento de onda

Medições são efectuadas em alternado, o detector é mantido a temperatura constante, ao ambiente ou no azoto líquido.

| <b>comparação de pirómetros de radiação total</b> |                  |                   |                  |      |
|---|------------------|-------------------|------------------|------|
|   | termopares       | termistores       | InSb             |      |
| configuração eléctrica                            | dc               | ac                | ac               |      |
| gama radiactiva                                   | -                | -                 | 3..6             | µm   |
| detectividade D*                                  | >10 <sup>9</sup> | >10 <sup>10</sup> | 10 <sup>11</sup> | SI   |
| sens. à temperatura                               | 0.005            | -                 | 0.1..2           | %/°C |
| precisão  | 0.5              | 0.5               | 0.5              | %    |
| repetibilidade                                    | -                | -                 | 0.25             | %    |
| tempo de resposta                                 | 1000             | 1                 | 1                | ms   |
| custo   | barato           | médio             | caro             |      |

### 5.6.3.problemas específicos

Os problemas específicos da pirometria são de duas ordens: as medições são influenciadas pelas emissividades dos corpos emissores e os vidros das ópticas devem ser adequados às radiações infravermelhas em causa.

A radiação incidente depende da emissividade do corpo observado e deve ser corrigido. A emissividade depende do material, do aspecto da sua superfície, da sua temperatura –e do comprimento de onda no caso de  $\epsilon_{\lambda}$ .

| <b>exemplos de emissividades</b> |                               |            |
|----------------------------------|-------------------------------|------------|
|                                  | $\epsilon_{\lambda}$ (0.65µm) | $\epsilon$ |
| cobre                            | 0.11                          | 0.2        |
| cobre (oxidado)                  | 0.6..0.8                      | 0.7        |
| alumínio (oxidado)               | 0.15                          | 0.19       |
| ferro                            | 0.36..0.39                    |            |
| ferro (oxidado)                  | 0.92..0.98                    | 0.63..0.98 |
| latão (oxidado)                  |                               | 0.6        |
| aço (oxidado)                    |                               | 0.8        |
| aço inoxidável                   |                               | 0.85       |

### 5.7.sensor digital de temperatura

Um cristal de quartzo utilizado como oscilador vibra com uma frequência (de ressonância) que varia de acordo com a temperatura.

Para cristais cuidados, a dependência é perfeitamente linear numa gama de -40..200°C:

$$f = f_0 (1 + \alpha (T - T_0))$$

com um coeficiente  $\alpha$  da ordem de  $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

Sondas de temperatura equipadas com tais cristais fornecem um sinal em frequência preferencialmente tratado em digital –por contagem de impulsos.

Conseguem-se precisões de  $10^{-2}..10^{-4}^{\circ}\text{C}$ , em gamas de -80..250°C, com tempos de resposta de cerca de 1 s.

## 6.A CADEIA DE ACTUAÇÃO

### 6.1.introdução

A medição pode ser uma tarefa distinta e isolada, sendo a instrumentação o meio para acompanhar e visualizar, em tempo real ou diferido, o decorrer de um processo. Eventualmente, esta tarefa pode não ser totalmente passiva: a observação dos dados apresentados levará a uma correcção, a um controlo manual.

A actuação pode do mesmo modo ser considerada isolada, alteração manual de um parâmetro do processo físico.

Progressivamente, no entanto, o actuador deixa de ser um extremo cego e, à imagem dos dedos humanos talvez, duplica a sua função, juntando actuação e medição (feedback).

O controlo automatizado consiste em relacionar as duas tarefas, estabelecendo regras automáticas para a gestão da actuação em função das medidas efectuadas.

Uma definição lata do actuador seria nesta óptica um órgão apto a alterar um qualquer parâmetro físico do processo em causa, de acordo com uma ordem recebida.

Praticamente todas as grandezas físicas anteriormente apresentadas são alvos de actuação:

- temperatura;
- nível de líquido, caudais e pressão;
- posição, velocidade e aceleração, lineares ou angulares;
- força e binário.

Os actuadores que vamos apresentar correspondem essencialmente à cadeia de controlo do movimento, através das grandezas de posição e velocidade, de forças e binários.

Estes actuadores convertem um sinal de comando eléctrico numa acção mecânica:

- seja directamente, com actuadores electro-mecânicos como motores eléctricos ou solenóides;
- seja através de um fluido sob pressão, com actuadores electro-hidráulicos ou electro-pneumáticos como cilindros ou motores.

### 6.2.uma cadeia de actuação genérica

A cadeia de actuação (ou de controlo) estabelece a ligação entre o computador (ou microprocessador...) e a variável física actuada.

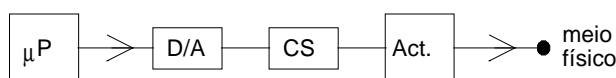


fig. cadeia de actuação genérica

Genericamente, a sequência é a seguinte:

- o microprocessador envia um sinal digital de comando;
- este sinal é convertido num sinal analógico;
- o nível e a forma do sinal são em seguida condicionados;
- finalmente, o actuador efectua a *conversão* para a grandeza mecânica de controlo.

Na busca de um controlo mais preciso, mais rápido e optimizado, uma tendência actual associa ao actuador um sensor dedicado, verificando e orientando a sua acção.

O caso extremo, curto-circuitando as cadeias e descentralizando o controlo, é o caso do servo-actuador comandado directamente por um sinal digital série (de posicionamento por exemplo) e equipado com um sensor (de posição) para o guiar.

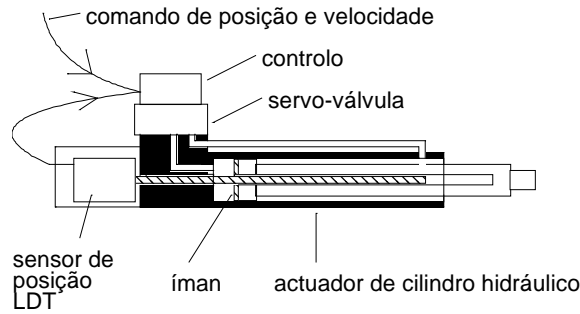


fig. servo-actuador electro-hidráulico

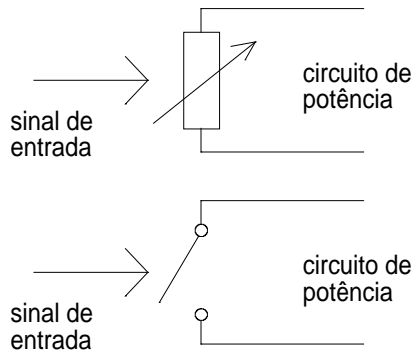
**6.3.conversão de potência**

A conversão de potência, permitindo o *condicionamento de sinal* por exemplo do nível lógico (1..20 V, 10..40 mA) para níveis mais elevados (>2 W) é efectuada pelo intermédio de componentes semicondutores que podem ser agrupados em transístores e tirístores.

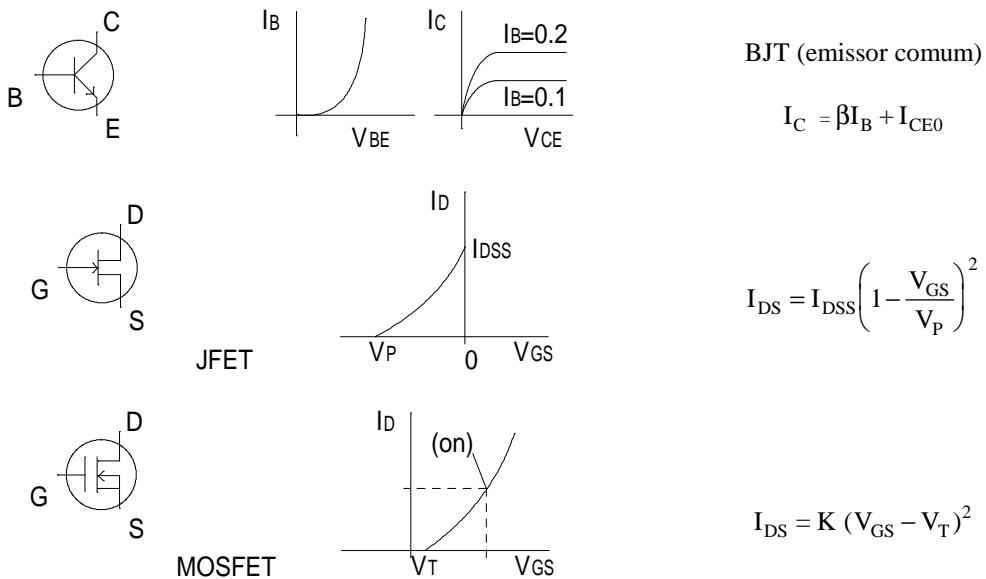
**6.3.1.transístores**

Transístores de potência são utilizados para dois fins diferentes:

- para amplificar o sinal de entrada, servindo este para o controlo do circuito de potência, um pouco como uma válvula regulando um caudal;
- como interruptor, para abrir/fechar o circuito de potência.



Entre os vários tipos de transístores distinguem-se os transístores bipolares (bipolar junction transistors –BJT) e os transístores de efeito de campo (field effect transistors –FET), estes próprios divididos em transístores de junção (JFET) e de óxido metálico (MOSFET).





Pelo desenho e concepção:

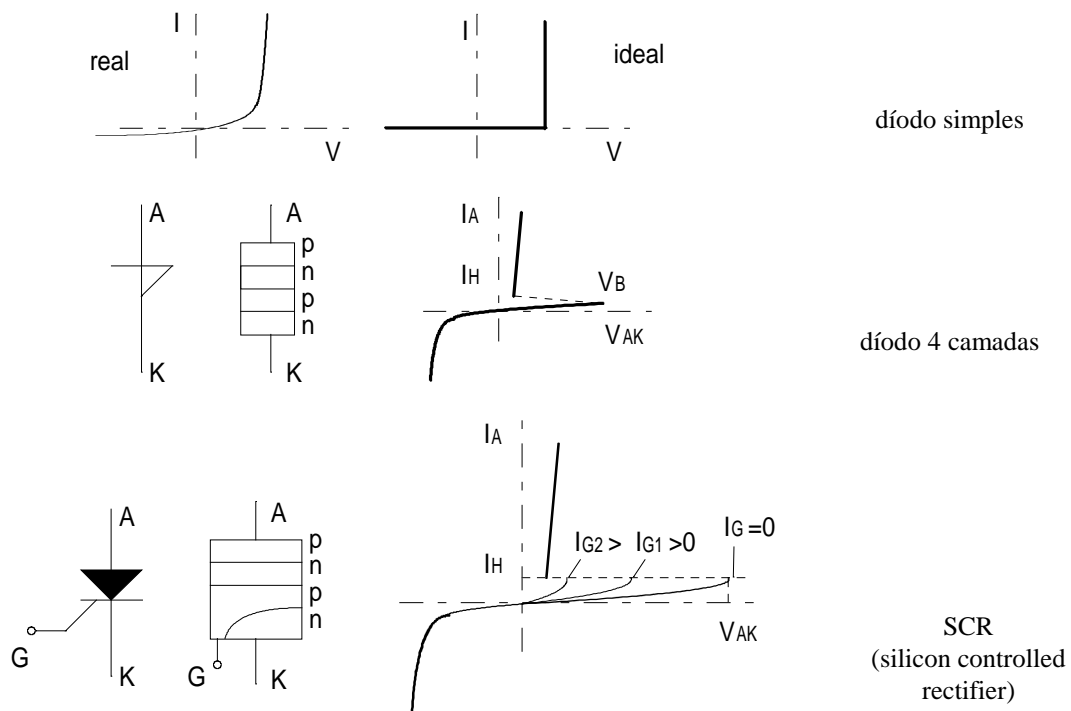
- os transístores bipolares são sensíveis à intensidade na base e reclamam um consumo mínimo à entrada; em contraste os FET são sensíveis à tensão e apresentam uma resistência de entrada elevada ( $R_i > 10^9 \Omega$ ) que lhes proporciona um consumo de entrada muito reduzido;
- na função de interruptores, as resistências no estado ligado ( $R_{on}$ ) são comparáveis até níveis de tensão da ordem da centena de Volts; para tensões superiores, os transístores bipolares têm resistência inferior;
- para sinais de baixa frequência (<10 kHz) os transístores bipolares apresentam perdas inferiores; para as frequências mais altas a situação inverte-se e os MOSFET são melhores.

O desenvolvimento dos MOSFET em particular permite obter transístores operando até o MHz, com tensões da ordem de 500 V, permitindo utilizá-los em aplicações como o controlo de motores eléctricos em PWM.

Uns novos transístores, bipolares com a entrada isolada (insulated gate bipolar transistors –IGBT) combinam as vantagens dos dois tipos, bipolares e FET's. Permitem fracos consumos de entrada e permitem operar com grandes potências à saída (50 A, 1000 V).

### 6.3.2.tirístores

Tirístores (thyristors) são componentes semicondutores de camadas múltiplas com capacidades apropriadas para operarem em particular como interruptores.



O díodo de quatro camadas acrescenta à curva característica do díodo uma barreira que a tensão entre ânodo e cátodo tem de vencer antes de obter a condução; uma vez ligado o díodo conduz enquanto a intensidade for superior a um valor mínimo ( $V_A > V_{Hold}$ ).

SCR's (silicon controlled rectifiers) são díodos de quatro camadas com três ligações, quando a corrente de controlo ( $I_G$ ) é positiva, a tensão da barreira  $V_B$  é função decrescente de  $I_G$ : obtém-se assim um diodo controlado.

Existem SCR's controlando tensões de até 2 kV e correntes de 600 A. O consumo dos sinais de controlo é reduzido: um sinal de entrada  $I_G=50 \text{ mA}$ ,  $V_G=1 \text{ V}$  permite controlar uma corrente de cerca de 100 A. Os tempos de transição são da ordem de 1  $\mu\text{s}$  ao ligar e de 10  $\mu\text{s}$  ao desligar.

Com características similares, os triacs (triode ac switch) são equivalentes a dois SCR's, conduzindo nos dois sentidos, e são destinados ao controlo de circuitos de potência ac.

Recentemente uma nova tecnologia, tirístores MCT (MOS controlled thyristors) oferecem as mesmas prestações que os SCR's mas com menos consumo: controlam potências de até 100 A, 1000 V, com tempos de transição de 0.2  $\mu$ s ao ligar e 2  $\mu$ s ao desligar.

Funcionando como interruptores, estes tirístores:

- ao ligarem instantaneamente potências elevadas introduzem nos circuitos transientes que é necessário filtrar;
- quando são controlados de forma a só serem disparados à tensão nula, não se geram transientes e podem dispensar-se os filtros.

### 6.3.3.amplificadores operacionais de potência

AmpOp's de potência (power OpAmp –POP) admitem alimentações com tensões superiores a 44 V ( $>\pm 22$  V) e fornecem saídas com intensidades  $I_o >\pm 50$  mA.

Existem amplificadores operando com potências de 2 kW, intensidades de  $\pm 30$  V. O seu consumo atinge o kW. A banda de frequência de operação é normalmente limitada ( $<1$  kHz).

Uma noção importante é a zona de operação segura (safe operating area –SOA) de um transístor, devendo-se em particular ter cuidado com as tensões e correntes de pico, por exemplo quando se pára ou inverte um motor.

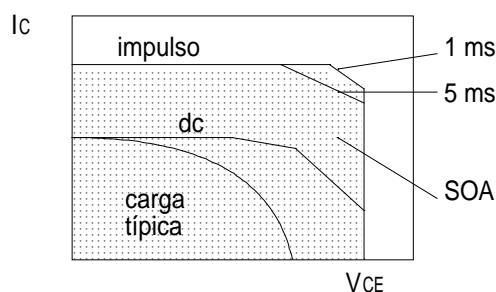


fig. SOA

### 6.3.4.integrados lineares de potência

Existem circuitos integrados de potência (power integrated circuits –PIC) juntando interruptores de potência (como transístores, SCR's ou triacs) e a sua electrónica de controlo. Permitem o controlo preciso de circuitos de até 20 A, 400 V.

A título de exemplo, um circuito integrado (o L298) permite, com 8 POP's, controlar duas saídas de 2 A contínuos e 3 A de pico com sinais de entrada de níveis TTL: este integrado destina-se a alimentar motores dc ou steppers.

## 6.4.relés

Um relé é um interruptor controlado que liga/desliga um circuito de potência. Existem relés electro-mecânicos e relés integrados. Estes interruptores são componentes intermédios que permitem controlar semicondutores de potência com SCR's, triacs ou transístores.

### 6.4.1.relés monolíticos

Relés integrados monolíticos (solid state relays –SSR):

- têm dimensões inferiores,
- são mais rápidos ( $<2$  ms),
- têm consumo reduzido,
- têm maior vida útil,
- têm um melhor comportamento ao serem ligados.

Existem módulos integrados para, a partir de tensões de nível lógico (TTL ou CMOS), controlar circuitos de potência ac (com triacs) ou dc (com POP's).

### 6.4.2. relés electro-mecânicos

Entre as características dos relés electro-mecânicos citemos:

- apresentam uma boa isolação entrada-saída,
- têm vários contactos bem isolados entre si,
- têm resistências de contacto inferiores àquelas dos integrados,
- têm capacidades inferiores,
- resistem melhor a transientes e a picos de corrente,
- autorizam normalmente um funcionamento entre 75% e 125% do seu nominal;
- têm enrolamentos e logo características indutivas enquanto os integrados são essencialmente resistivos,
- têm tempos de transição superiores,
- geram altas tensões ao desligar, com possibilidade de arco eléctrico entre os contactos.

Existem relés electro-mecânicos:

- com contactos a base de prata ou ouro, em função das tensões de operação;
- com contacto de mercúrio líquido;
- relés de armadura.

**Relés reed** (reed relays) são relés de contactos acionados por campo magnético (de um solenoide), protegidos numa cápsula estanque que lhes faculta uma vida superior a  $10^{10}$  ciclos.

De concepção muito próxima, os **relés de mercúrio** oferecem uma resistência de contacto muito reduzida ( $1\text{ m}\Omega$ ), tempos de transição de  $0.75..6\text{ ms}$  ao ligar e de  $2..3\text{ ms}$  ao desligar, podendo aceitar correntes de até  $100\text{ A}$ . Podem trabalhar a frequências superiores a  $300\text{ Hz}$ . Têm uma vida útil superior a  $10^9$  ciclos.

**Relés de armadura** (contactors), equipados com contactos de cobre ou prateados, destinam-se a circuitos de potência como fornos, lâmpadas, transformadores, fornecendo até  $600\text{ V}$ , ac ou dc.

### 6.4.3. relés comandados pelo computador

Existem circuitos integrados com uma ligação óptica (opto-isolador, opto-coupler) pilotando um triac. Estes relés permitem aos níveis TTL de um computador ligar ou desligar um circuito ac ligado à rede por exemplo.

Do lado do computador, a porta i/o é simplesmente ligada pelo intermédio de um 7400. Do lado rede, se a carga for indutiva (como no caso de um motor) é preferível filtrar a ligação.

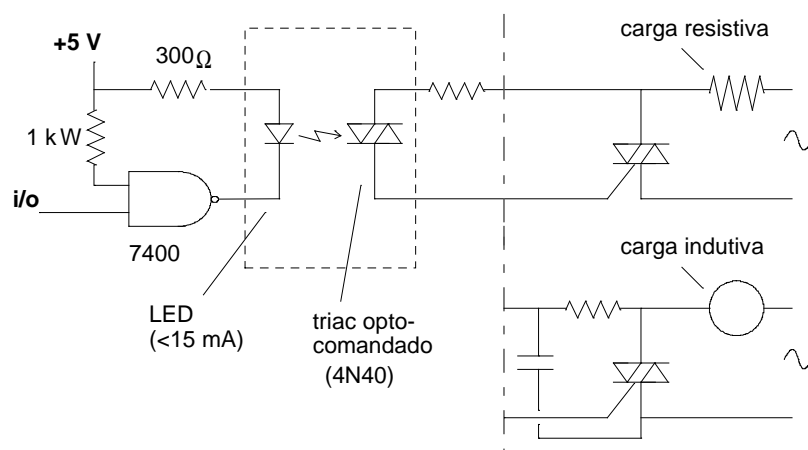


fig. relé comandado por computador

## **6.5.interruptores**

Este tipo particular de sensores de saída discreta do tipo liga/desliga (tudo/nada, on/off) pode em muitos casos servir em conjunto com o actuador:

- para assegurar que uma posição (por exemplo) permanece no domínio pretendido –é o caso dos chamados fim-de-curso;
- para identificar uma posição particular, que serve de referência;
- para praticamente efectuar o controlo de uma variável, como é o caso dos interruptores termostatos.

Os interruptores mecânicos são equipados de contactos:

- de prata, para tensões  $>6V$  e potências  $>3VA$ ;
- de ouro ou outro metal nobre, para cargas  $<6V$ ,  $1VA$ .

Podem ser do tipo normalmente ligado, normalmente desligado, de duas posições (1-2), de três posições (1-neutro-2)...

A acção pode ser por pressão, força mecânica directa ou centrífuga.

Dois versões de interruptores magnéticos são:

- interruptores reed, accionados pelo campo magnético de um íman;
- interruptores de efeito Hall, componentes electrónicos com a vantagem de não terem parte mecânica e, logo, de serem mais fiáveis.

Quanto aos termostatos, vários princípios são utilizados:

- expansão líquida e interruptor mecânico;
- expansão e contacto de mercúrio;
- deformação de bimetal;
- interruptor reed com material ferromagnético em volta do ponto de Curie.

## 7. ACTUADORES ELÉCTRO-MECÂNICOS

### 7.1. introdução

#### 7.1.1. posicionamento electro-mecânico

O controlo do movimento ou da posição em rotação ou translação é possível por conversão electro-mecânica em malha-fechada para potências inferiores a uma centena de kiloWatts. Para potências elevadas, recorre-se preferencialmente a conversões electro-pneumática ou electro-hidráulica.

O movimento pode ser gerado por:

- motores dc;
- motores passo-a-passo (steppers), com binário limitado e potências inferiores a 3 kW;
- motores ac de indução, para potências inferiores a 10 kW.

Os sensores de posição mais variados são utilizados: potenciométricos, codificadores, *resolvers*, magnéticos, lasers. Sensores de velocidade podem ser taquímetros ou de efeito Hall.

A conversão do movimento rotativo para linear efectua-se via engrenagens, circulação de esferas (ball-screws), correntes, correias...

Existem motores (gearmotors) já fornecidos com um conjunto de engrenagens reduzindo a velocidade (e aumentando o binário), o que evita ter de fazê-lo *a posteriori*. A configuração mecânica das engrenagens responde às várias possibilidades encontradas separadamente: em paralelo, ângulo recto, helicoidal, parafuso sem fim... É necessário ter cuidado com as características resultantes e em particular saber se as engrenagens aguentam as sobrecargas eventuais, previsíveis ou previstas.

#### 7.1.2. definições

Um motor eléctrico é genericamente um aparelho que converte energia eléctrica em energia mecânica. Na maioria dos casos o movimento gerado é de rotação mas existem igualmente motores lineares.

Existem motores eléctricos para os mais variados fins, com características diferenciadas em função não só da potência, mas também do binário, da velocidade, da aceleração, das dimensões e do tipo de utilização pretendido.

A curva binário-velocidade ( $B-\omega$ ) é um factor importante na avaliação de um motor, havendo, em particular, motores com binários de arranque ( $\omega = 0$ ) inferiores ao nominal e outros com binários de arranque superiores. A relação entre binário e aceleração ( $B = I\dot{\omega}$ ), através da inércia do rotor e da carga do motor, determina a aceleração conseguida e o tempo para se alcançar a velocidade nominal.

A definição da potência necessária depende fundamentalmente do tipo de utilização, contínua, cíclica ou ocasional. Em operação contínua a aceleração não é muito importante, contrariamente aos dois outros casos, para os quais é necessário considerar o binário de arranque e a curva de aceleração que faculta. A potência necessária pode ser inferior à potência de pico: pode ser igual à potência rms do ciclo de utilização. Em contrapartida, é bom verificar que as sobrecargas permitidas pelo motor (frequentemente +25% do nominal) são suficientes:

- para aguentar as sobrecargas de pico previstas;
- para dar uma margem de segurança;
- para diminuir a temperatura de funcionamento do motor e assim lhe prolongar a vida útil.

O rendimento dos motores eléctricos varia de cerca de 30% para um pequeno motor universal a mais de 95% para alguns motores trifásicos. O rendimento é normalmente máximo no seu funcionamento nominal.

Os vários tipos de motores diferenciam-se em função:

- da corrente de alimentação (ac ou dc);
- da interacção em jogo (ímã permanente ou campo gerado);
- do tipo de configuração eléctrica (paralela, série, monofásica, trifásica...);
- da alimentação dos enrolamentos...

De uma forma geral, motores eléctricos funcionam através da interacção de dois campos magnéticos solidários um do estator (fixo) e o outro do rotor (em rotação).

## 7.2.motores dc

Motores alimentados com corrente contínua:

- têm uma relação binário-velocidade muito versátil;
- permitem uma operação contínua em gamas relativas de velocidade de 1:8;
- autorizam um ajuste da velocidade de forma progressiva até anular ou inverter velocidade e binário;
- aceitam sobrecargas pontuais de até 500%;
- são utilizáveis como travão, dissipando ou gerando energia eléctrica;
- têm uma elevada razão binário/inércia, permitindo uma resposta rápida ao controlo.

Existem dois tipos de configuração magnética:

- motores de campo gerado (wound field),
- motores de magnetos ou ímãs permanentes (permanent magnet -PM).

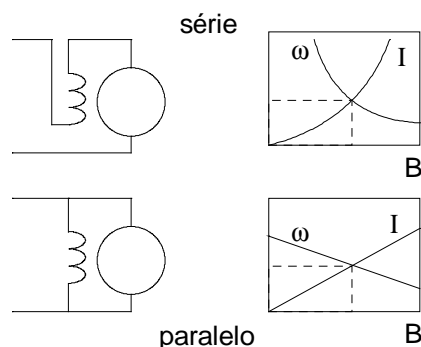
A utilização não é normalmente em serviço contínuo mas sim em ciclos, sendo efectuado o dimensionamento pelo binário máximo ou pela temperatura.

### 7.2.1.motores de campo gerado

A configuração eléctrica dos dois enrolamentos (do estator e do rotor) pode ser em paralelo (derivação), em série ou composta.

O controlo da velocidade efectua-se:

- no caso paralelo, variando o campo magnético, diminuindo a intensidade do campo, diminui-se o binário e aumenta-se a velocidade –este controlo, efectuado a potência constante, permite aumentar a velocidade, numa gama relativa de 1:3;
- para ambos os casos, variando a tensão e logo a velocidade, mantendo-se o binário constante.



### 7.2.2.motores sem núcleo

Motores sem núcleo (coreless) têm menor inércia, menor tempo de resposta e maior rendimento.

Existem versões com campo externo, possibilitando uma maior aceleração e um tempo de resposta de cerca de 1 ms: motores com magneto de Samarium-Cobalt (terra rara) atingem acelerações de 150  $\text{krad/s}^2$  até 1  $\text{Mrad/s}^2$ , a comparar com acelerações de 30..50  $\text{krad/s}^2$  para servo-motores de núcleo.

Existem motores com campo interno, sem escovas, mais pequenos, mais caros, com melhor dissipação térmica e mais rendimento. A comutação electrónica efectua-se com 3 ou 4 fases, eventualmente com 2 fases, para velocidades constantes. A alimentação pode ser trapezoidal ou sinusoidal.

### 7.2.3.variantes

Motores com outras configurações oferecem características específicas:

- aumentando a inércia do rotor obtém-se uma velocidade mais constante;
- multiplicando o número de polos (ring motors) até valores como 64, consegue-se um binário disponível mais constante;
- motores sem magneto, de relutância variável ou comutada, oferecem uma relação binário/inércia elevada, a custos inferiores aos motores de magneto...

### 7.2.4.motores lineares

Motores dc lineares, de uma forma idêntica aos seus homólogos em rotação, fornecem um movimento e uma força lineares pela interacção de condutores e campo magnético.

Conseguem-se precisões de posicionamento da ordem de 0.1  $\mu$ m, forças de 10..1000 N, para movimentos de 10..1000 mm.

### 7.2.5.motores passo-a-passo

De uma forma geral, motores passo-a-passo (stepper motors):

- têm aceleração e binário elevados, velocidade reduzida;
- não carecem de travões –motores de magneto até desligados ficam fixos;
- apresentam pouca inércia;
- oferecem um rendimento fraco.

Motores de magneto permanente têm um passo de 45° ou 90° $\pm$ 10%. Estão limitados a frequências de 300 Hz. Apresentam inércias de 5..75 g.cm<sup>2</sup>.

Motores sem magneto, de relutância variável (VR), têm passos de 5..15°, com pouca inércia, trabalhando a mais alta velocidade, em frequências de 300..1000 Hz. A carga deve ser menor que 2/3 da inércia do rotor.

Motores híbridos têm um bom comportamento em malha aberta. Aceitam frequências de até 10 kHz, com passos de 0.5..1.5° $\pm$ 3% e inércia de 30..40000 g.cm<sup>2</sup>.

Motores com magneto permanente de disco (<1 mm de espessura) oferecem prestações comparáveis aos motores híbridos, com dimensões e peso menores, para potências de até 250 W. Têm uma inércia reduzida, binário e velocidade elevados, passos de até 0.9° $\pm$ 3%. O binário é quase constante em toda a gama de velocidades. Conseguem-se tempos de resposta de 1 ms, com acelerações de 0 a 3000 rpm em 60°. Vêm frequentemente acompanhados por um resolver como sensor de posição.

### 7.2.6.servo-motores

Competindo para muitas aplicações com os motores passo a passo, os servo-motores dc são disponíveis essencialmente em três tecnologias: de magneto permanente (permanent magnet –PM), de circuito impresso (CI) e de bobina móvel (BM).

Motores de magneto permanente são:

- de alimentação mais simples;
- mais fiáveis;
- mais eficientes;
- de maior binário de arranque;
- de menor velocidade;
- com curvas B- $\omega$  e B-I mais lineares.

As versões com magnetos de terras raras são mais leves e mais pequenas, a potências comparáveis.

| servo-motores dc        | BM         | CI         | PM        |             |
|-------------------------|------------|------------|-----------|-------------|
| potência máxima         | <1         | 5          | 7..10     | kW          |
| velocidade máxima       | 4500..5500 | 3000..4000 | 850..3000 | rpm         |
| relação binário/inércia | 200..250   | 130..220   | 15..30    | un.relativa |

### 7.2.7.alimentação

Para a alimentação de motores dc, a corrente contínua pode ser fornecida por baterias ou, a partir da corrente alterna, por rectificadores de meia onda (half wave rectifier) ou de onda completa (full wave rectifier).

## 7.3.motores ac

Os dois tipos de motores de corrente alterna são os motores síncrono e assíncrono. O motor de indução é uma forma de motor assíncrono funcionando essencialmente como um transformador, sendo o enrolamento primário o estator e o secundário o rotor.

### 7.3.1.motores de indução

Os motores de indução são os motores ac mais simples e robustos.

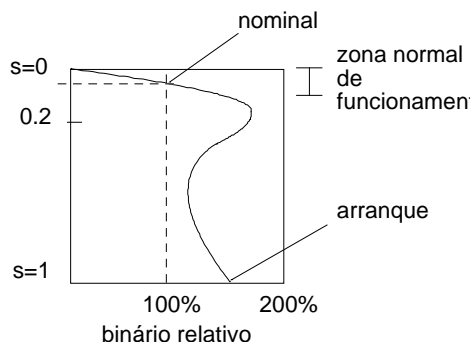
A configuração mais comum é de rotor cilíndrico com condutores longitudinais (squirrel cage). O binário produzido resulta da interação entre os campos gerado no enrolamento do estator e no rotor: o campo do estator roda de forma síncrona à velocidade síncrona (dada em rpm por  $n_s = 120.f/p$ , para uma frequência de rede  $f$  e um número de polos  $p$ ); a velocidade de rotação do rotor ( $n_r$ ) é sempre inferior a  $n_s$ . O binário resulta do escorregamento (slip) do rotor, definido de forma relativa por

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

O escorregamento típico para a carga nominal varia numa gama de 2..5%.

A curva binário-velocidade apresenta vários trechos:

- perto do sincronismo, na zona normal de operação, para  $s \approx 0$ , o binário é proporcional ao escorregamento;
- ao arranque, para  $s \approx 1$ , o binário é superior ao nominal (tipicamente 150%), grosso-modo crescendo até o ponto de ruptura onde atinge o quasi-sincronismo, com binários de cerca de 200% do nominal.



Motores polifásicos funcionam essencialmente a velocidade constante, com uma margem reduzida de controlo.

Motores com rotor bobinado (wound rotors) permitem obter uma resistência do rotor variável, conseguindo assim:

- um maior binário de arranque;
- uma regulação mais fácil da velocidade.

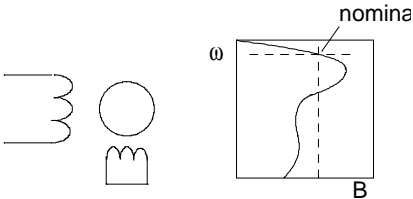
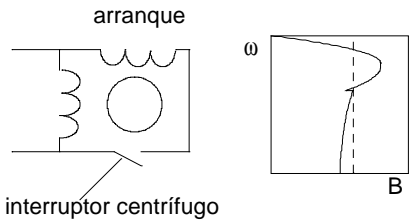
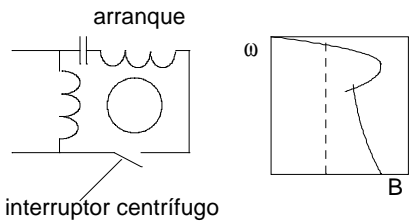
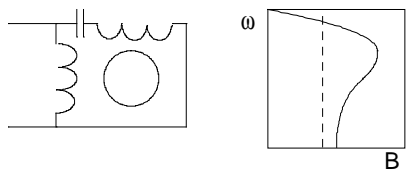
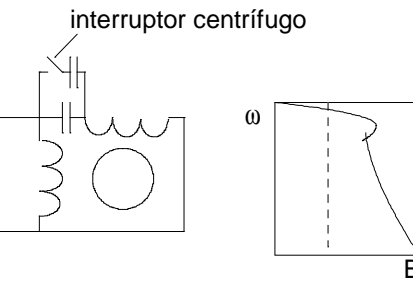
Existem motores para velocidades proporcionais à frequência da rede ( $x1$ ,  $x1/2$ ,  $x1/4$ ,  $x1/6$ ), fornecendo um binário constante ou variável (por exemplo com binário proporcional a **Error! No bookmark name given.**<sup>2</sup>, o que é adaptado ao caso de ventiladores), ou fornecendo uma potência constante.

### 7.3.2.motores monofásicos

A alimentação dos motores de indução polifásicos produz o campo giratório que os põe em rotação. No caso da alimentação monofásica, o campo exerce um binário oscilante que tende a fazer rodar o rotor a uma velocidade síncrona. Sendo o efeito simétrico, o motor pode *a priori* rodar em



ambas as direcções. A configuração eléctrica permite normalmente simular o campo giratório e movimentar o rotor no sentido desejado.

|   |   |
|---|---|
| <p>fase única (shaded pole)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- &lt;100 W</li> <li>- ventoinhas, ventiladores...</li> </ul>                              |   |
| <p>arranque indutivo de fase separada</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- &lt;200 W</li> <li>- ventoinhas, ventiladores...</li> </ul>                    | <p>arranque</p>  <p>interruptor centrífugo</p>  |
| <p>arranque capacitivo</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- mais binário</li> <li>- até 7 kW, 900..3600 rpm</li> <li>- compressores, bombas...</li> </ul> | <p>arranque</p>  <p>interruptor centrífugo</p> |
| <p>com capacidade permanente</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- binário menor e variável</li> <li>- ventoinhas...</li> </ul>                            |   |
| <p>com dupla capacidade</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- binário de arranque elevado</li> <li>- 1..15 kW</li> </ul>                                   | <p>interruptor centrífugo</p>                 |

Motores universais são motores bobinados em série, com escovas: a comutação mecânica assegura o sentido da rotação. A eficiência destes motores é idêntica quando alimentados em dc ou em ac. A sua regulação em velocidade é bastante simples.

### 7.3.3. motores síncronos

Estes motores rodam a velocidade sensivelmente constante, em sincronismo com a frequência da rede ( $f$ ) e em função do número de pólos ( $p$ ): em rpm obtém-se  $n_s = 120 f/p$ .

Potências possíveis para este tipo de motores cobrem uma gama desde a dezena de Watts até vários kiloWatt:

- para pequenas potências, fornecem uma velocidade constante precisa;
- para potências elevadas, são motores de alto rendimento.

O binário fornecido por um motor síncrono é proporcional ao ângulo  $\delta$  entre fem e tensão aplicada ( $B_d = K \sin(\delta)$ ), resultando num efeito de mola com um comportamento mecânico não amortecido, respondendo a um escalão em tensão com uma oscilação em velocidade. Enrolamentos associados aos polos e postos em curto-circuito permitem amortecer este efeito.

O binário de arranque dos motores síncronos deve frequentemente lhes ser fornecido ou pelo exterior ou por circuitos de arranque do tipo daqueles vistos com os motores de indução.

O campo constante, normalmente ligado ao rotor, é gerado:

- por alimentação dc externa
- ou por auto-excitação, com magneto permanente ou por histerese.

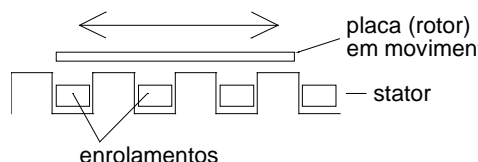
Motores auto-excitados têm um binário de arranque mais elevado, são mais baratos mas a sua eficiência é inferior.

Motores de magnetos permanentes são mais rapidamente síncronos (a uma velocidade função do número de polos), mais precisos, mais eficientes, têm um binário de arranque que ronda os 50% do nominal.

Servomotores ac são essencialmente motores síncronos de magneto permanente com a alimentação controlada em frequência: a sua inércia reduzida facultam um rápido arranque; a resistência elevada do enrolamento permite que tenham uma curva  $B-\omega$  muito linear. Existem versões para potências atingindo o kiloWatt.

### 7.3.4. motores ac lineares

A concepção dos motores ac lineares pode imaginar-se como cortando e desenrolando um motor de indução de rotação. Os polos do estator sucedem-se em linha. O rotor transforma-se numa placa condutiva em movimento linear. Existem igualmente motores com duplo estator (duplicando a superfície de contacto e a força produzida) ou com forma tubular, sendo neste caso o "rotor" uma haste em movimento longitudinal no eixo do motor.

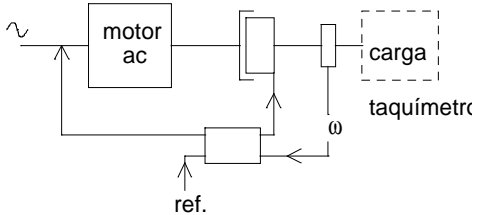
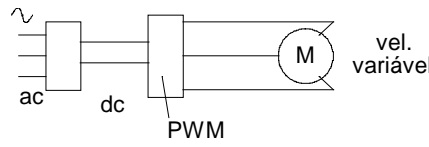


Motores com potências alcançando o kN conseguem uma precisão de deslocamento inferior ao  $\mu\text{m}$  para velocidades de alguns m/s.

Para servos, o sensor de posição é normalmente um codificador linear.

### 7.3.5. controlo da velocidade

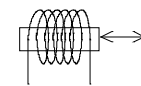
Com motores de corrente alterna, o controlo da velocidade efectua-se com conversão/regulação em frequência (método *six-steps* ou PWM) ou por controlo da embraiagem (por correntes magnéticas por exemplo –eddy current drive).

|  |  |
|--|--|
| <p style="text-align: center;">embraiagem<br/>(eddy current)</p>  | <p>embraiagem magnética:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• controlo da velocidade 1:30 com binário constante;</li> <li>• binários de pico de 200% do nominal;</li> <li>• precisão de 0.5% na velocidade.</li> </ul>                         |
|   | <p>PWM</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• menos perdas</li> <li>• binário cste</li> <li>• binário quando bloqueado</li> </ul> <p>6 steps</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• frequência mais alta</li> <li>• menos ruído</li> </ul> |

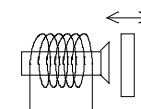
### 7.4. solenóides

Um solenoide é uma bobina no eixo da qual se move um núcleo ferro-magnético. Um electro-ímã é uma bobina equipada com um núcleo fixo servindo para atrair um alvo ferro-magnético.

Em ambos os casos a passagem de corrente no enrolamento gera um campo magnético que exerce uma força ( $\propto I^2$ ) sobre o núcleo ou o alvo e provoca o seu deslocamento. O movimento obtido tem obrigatoriamente uma amplitude reduzida, devido ao fraco alcance do campo magnético gerado.



solenóide



electro-ímã

Solenóides/electro-ímãs são utilizados em embraiagens, travões, relés, válvulas. A operação mais frequente é em modo dual, ligado/desligado (on/off), mas algumas aplicações, em modo proporcional, utilizam uma deslocação função da corrente aplicada ao enrolamento.

Solenóides funcionam normalmente com movimento linear (fornecendo forças <1 kN), mas existem versões com movimento rotativo.

Tempos de resposta da ordem de 1 ms são usuais.

## 8. ACTUADORES ELÉCTRO-FLUIDOS

Comparado com o seu equivalente eléctrico-mecânico, o actuador de fluido tem uma maior habilidade para fornecer e controlar potências elevadas. Esta é uma das razões que levam geralmente a escolher esta solução. Outras podem se lhe acrescentar como, em particular, a sua maior tolerância aos picos de potência.

A introdução da micro-electrónica no comando dos servo-actuadores facilita a sua integração nos sistemas modernos controlados em digital.

No entanto, a opção eléctrico-fluido implica a definição de um circuito completo de fluido sob pressão, desde o gerador de energia até ao actuador em si.

A actuação pneumática tem um custo inferior, é mais leve e limpa mas está limitada a pressões inferiores a 10 bar. A actuação hidráulica permite operar com energias muito mais elevadas mas as suas fugas eventuais são poluidoras, corrosivas e perigosas obrigando a cuidados suplementares.

A primeira é utilizada preferencialmente para posicionamento; a segunda para o controlo de forças.

### 8.1. energia pneumática e hidráulica

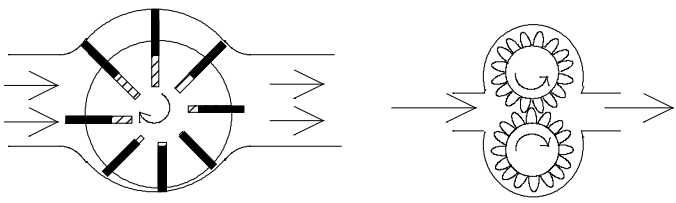
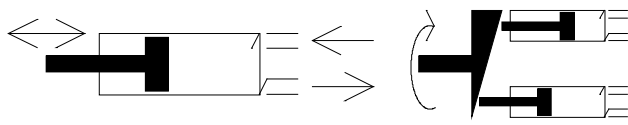
Aos actuadores pneumáticos ou hidráulicos a energia é fornecida sob forma fluídica, seja por um compressor, no caso pneumático, seja por uma bomba, no caso hidráulico. O gerador em si pode ser um motor eléctrico ou de combustão interna.

Normalmente, para economizar a bomba e para regular a pressão, introduz-se no circuito um reservatório de energia ou acumulador.

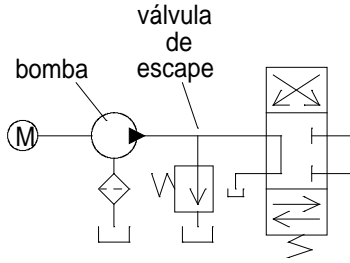
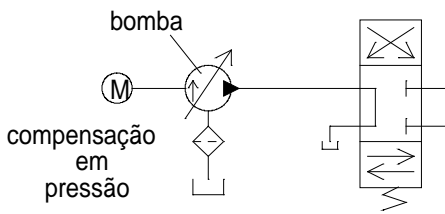
#### 8.1.1. bombas

Bombas hidráulicas fornecem caudais ( $Q$ ) de até 2000 l/min, a pressões máximas ( $P_{max}$ ) de 35..1000 bar:

- bombas de palhetas (vane)  $P_{max} < 150..300$  bar;
- bombas de engrenagem (gear)  $P_{max} < 100..150$  bar;
- bombas de pistão ou êmbolo (radial ou axial)  $P_{max} < 250$  bar;
- bombas de parafuso  $P_{max} < 140$  bar;
- bombas centrífugas, baixa pressão, para  $Q < 400$  l/min.

|   |  |
|---|--|
| <p>Bombas de palhetas e de engrenagens são as mais baratas, utilizadas para baixas e médias pressões.</p>   |  <p><b>bomba de palhetas</b>      <b>bomba de engrenagem</b></p> |
| <p>A partir do princípio do pistão alternativo, existem vários tipos de bombas, axiais, radiais, oblíquas.</p> <p>Na bomba de barrilete um disco inclinado actua os pistões em sequência.</p> |  <p><b>bombas de pistão</b></p>                                  |

As bombas habituais têm um *volume* varrido *fixo*. Existem no entanto bombas de *volume variável* (fazendo variar o ângulo da base de uma bomba de barrilete por exemplo), adaptadas a utilizações não constantes.

|  |   |
|--|---|
| <p>Bombas de <i>volume fixo</i> fornecem potências máximas inferiores a 10..15 kW, têm uma operação dual (ligada/desligada), debitam um caudal Q geralmente ao nível do seu nominal.</p> |  <p style="text-align: center;"><b>caudal constante</b></p>                                 |
| <p>Bombas de <i>volume variável</i> permitem potências superiores, debitam um caudal variável, têm movimentos rápidos e precisos: aceitam cargas variáveis.</p>                          |  <p style="text-align: center;"><b>caudal de acordo com as necessidades do actuator</b></p> |

As bombas de volume variável são controladas por solenóides ou controladores de pressão proporcionais (PPC), adaptando a posição do anel (bomba de palhetas) ou da base (bomba de barrilete). Têm uma repetibilidade de 1%, com linearidades de cerca de 3% em caudal e 4% em pressão. Bombas servo-controladas, com taquímetros e feedback, têm características melhores.

A utilização de bombas de volume variável permite economizar de 40 a 50% na energia, assim como economizam as válvulas.

### 8.1.2.compressores

Aos compressores de concepção idêntica às bombas hidráulicas (palhetas, pistão) há que acrescentar compressores de anel líquido, de lóbulos (Roots), centrífugos e compressores rotativos com vários níveis de compressão em série.

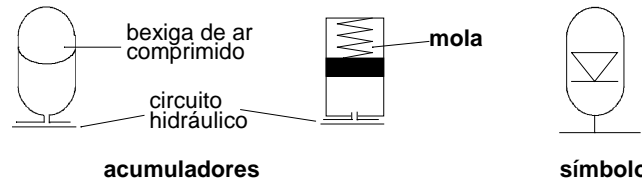
Entre os vários tipos citemos:

- de foles
  - de palhetas (vane)
  - de pistão (êmbolo)
  - de lóbulos (roots)
  - de pistão líquido
  - centrífugos, baixa pressão, para  $Q < 100 \text{ m}^3/\text{min}$ .
- |                                      |                  |
|--------------------------------------|------------------|
| $P_{\text{max}} < 1 \text{ bar}$     |                  |
| $P_{\text{max}} < 10 \text{ bar}$ ,  | Pot. 10..500 kW; |
|                                      | Pot. 1..5000 kW; |
| $P_{\text{max}} < 15 \text{ bar}$ ,  | Pot. 5..3000 kW; |
| $P_{\text{max}} < 100 \text{ bar}$ , | Pot. 10..500 kW; |

### 8.1.3.acumuladores

Para circuitos hidráulicos, existem acumuladores de gás estanques (com vesícula ou diafragma) ou não estanques, de mola ou gravíticos (ver figura). Eles permitem manter num reservatório uma quantidade de fluido razoável a uma pressão sensivelmente constante.

A utilização de acumuladores permite reduzir as dimensões do motor e da bomba, no caso de não se requerer o caudal constantemente ao seu nível máximo. Introduzem inércia no sistema e, conseqüentemente, um efeito de filtro.



Para circuitos pneumáticos, tarefa similar é exercida pelo reservatório de ar comprimido.

### 8.2. controlo: os vários tipos de válvulas

O controlo do circuito de fluido sob pressão é efectuado por válvulas:

- de pressão;
- de fluxo ou caudal.

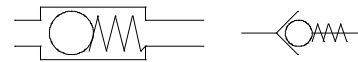
Válvulas reguladoras de pressão existem essencialmente sob duas formas:

- válvulas de escape (relief valves), libertando o excesso de fluido quando a pressão exceda um valor pré-definido;
- válvulas de controlo de pressão, fornecendo uma pressão utilizável estabilizada: a regulação da pressão pode ser manual (com mola), com controlo pneumático ou motorizada (com motor ac síncrono, dc ou stepper).

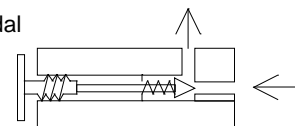
Válvulas de caudal são:

- de bloqueio;
- de regulação de caudal;
- direccionais.

válvula de bloqueio



válvula reguladora de caudal



As válvulas direccionais orientam o fluido na direcção desejada (circuito A, B ou bloqueio, por exemplo) e comandam o actuador. O seu funcionamento é normalmente dual (liga/desliga), eventualmente com posição de descanso. As válvulas mais correntes são de corredeira longitudinal (spool valves).

O comando pode ser manual, mecânico, com "piloto" hidráulico ou pneumático, eléctrico (solenóide) ou combinado.

|  |   |
|--|---|
|  | <p>válvula direccional de corredeira longitudinal 5/2 (5 orifícios, 2 posições)</p> |
|  | <p>válvulas de 2 posições e com 2 e 3 orifícios ou vias</p>                         |
|  | <p>válvulas de 4 orifícios e com 2 e 3 posições</p>                                 |

Válvulas proporcionais, normalmente comandadas por solenóides, têm um funcionamento não dual mas sim analógico, abrindo passagem a um caudal regulado função da intensidade de corrente aplicada:

$$Q = f(I).$$

O funcionamento destas válvulas é não linear e elas vêm normalmente acompanhadas pelas suas cartas de caudal (I-Q), de queda de pressão (I,  $\Delta p$ ) e de  $I(Q=0)$ , todos dados obtidos na calibração.

A adjução de um sensor de posição transforma estas válvulas em servo-válvulas e definem um instrumento essencial para um posicionamento preciso, controlável em velocidade e aceleração.

### 8.3.actuadores de fluido

Actuadores hidráulicos ou pneumáticos convertem a energia do fluido em trabalho mecânico, movimento e/ou força.

Existem três tipos de actuadores:

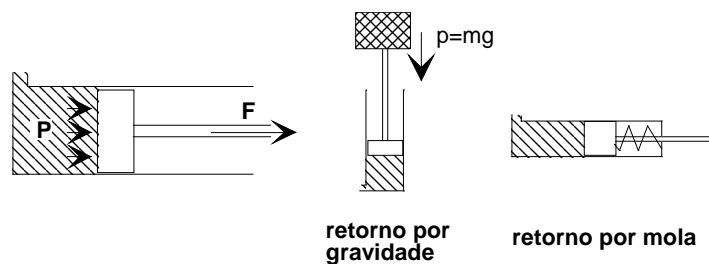
- cilindros, para movimentos lineares;
- cilindros rotativos, para movimentos de rotação num arco finito;
- motores, para movimentos de rotação contínua, não limitada.

#### 8.3.1.cilindros

O fluido forçado para dentro do cilindro exerce uma pressão contra o êmbolo, obrigando-o a deslocar-se e a transmitir uma força  $F = PA$ .

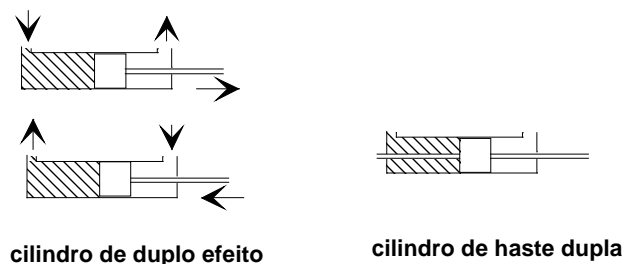
No cilindro de simples efeito a operação é unidireccional, efectuando-se o regresso por acção de alguma força exterior –a gravidade por exemplo. Alternativas para o regresso do êmbolo podem ser por acção:

- de uma mola;
- de fluido no outro sentido.



No último caso (cilindro de duplo efeito), o fluido é utilizado para a extensão e o regresso do êmbolo – embora as duas forças não sejam idênticas, sendo a força de retracção menor, devido à diferença de áreas efectivas.

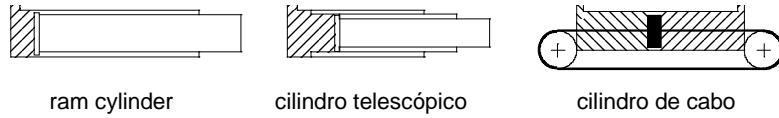
Nos cilindros de haste dupla as forças exercidas nos dois sentidos são iguais.



Outras variantes são:

- os "ram cylinders", onde a haste é mais larga e ocupa o cilindro todo, permitindo assim transmitir forças maiores;
- cilindros telescópicos, que autorizam maiores movimentos para um comprimento de cilindro idêntico –a força exercida não é neste caso constante;

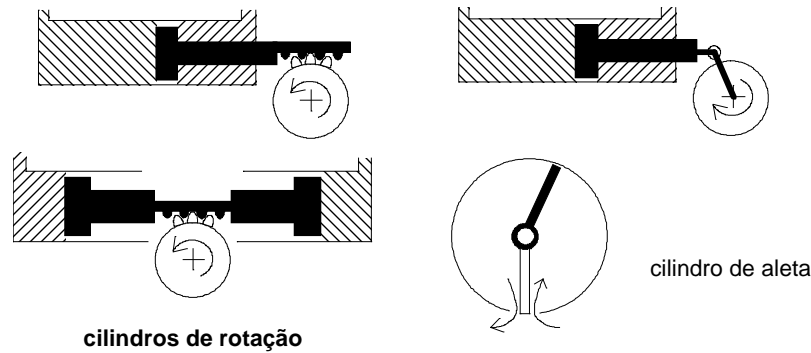
- cilindros de diafragma, onde se garante que o cilindro é estanque graças a um diafragma isolando a parte sob pressão;
- cilindros de tracção de cabos ou de banda, cilindros de duplo efeito onde a haste é substituída por um cabo ou uma banda.



### 8.3.2.cilindros de rotação

Estes actuadores geram um movimento circular num arco de dimensões reduzidas (até algumas voltas). Funcionam geralmente segundo o mesmo princípio que os cilindros lineares, um dispositivo mecânico convertendo o movimento linear em rotação: via engrenagem (rack and pinion) ou bielãs, por exemplo.

De funcionamento parecido com o motor de palhetas, o cilindro de aleta giratória permite uma rotação de até 300°, com binários reduzidos.



### 8.3.3.motores

Os motores são no essencial do seu desenho o equivalente invertido das bombas, tanto no hidráulico como no pneumático, convertem energia fluídica em energia mecânica. Como para as bombas, existem motores de volume varrido fixo ou variável.

Para algumas aplicações, o motor a ar (pneumático) pode estar em concorrência com o motor eléctrico: mais barato e mais tolerante pode ser uma boa alternativa.

| motor eléctrico  | motor a ar  |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• regulação em velocidade <math>\pm 10\%</math> ou complexa;</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• pela válvula utilizada, a regulação em velocidade efectua-se facilmente numa gama relativa de 1:30;</li> </ul> |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• sobrecargas ou bloqueio põem em perigo o motor;</li> </ul>            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• auto-arrefecido, o motor a ar aceita bem a variação de binário;</li> </ul>                                     |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• em inversão do motor eléctrico é complexa e dissipa calor;</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• a inversão não levanta problemas;</li> </ul>   |
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• relação peso/potência melhor –a potência igual, é cerca de 3 vezes mais leve;</li> </ul>                       |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• sensível à temperatura ambiente;</li> </ul>                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• pouco sensível à temperatura ambiente;</li> </ul>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• sensível às condições ambientais;</li> </ul>                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• pode trabalhar em ambiente perigoso sem ocorrência de arcos eléctricos;</li> </ul>                             |
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• usa-se de forma contínua, sem situações de excepção;</li> </ul>  |



|   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• rendimento global elevado, de 45 a 70%.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• rendimento global baixo, de cerca de 20%.</li></ul> |
|---|---|

A maior parte destas características aplicam-se para os motores hidráulicos. O controlo efectua-se de forma contínua, desde a velocidade nula até à nominal. Outra vantagem é de não se necessitar de redutor, fornecendo binários elevados com baixa rotação.

Existem igualmente conjuntos integrados motor eléctrico, bomba de volume variável, motor e taquímetro, com circuito hidráulico fechado.

## APÊNDICE

### A. sinais

#### 1. introdução

*."Um sinal é algo que transmite uma ideia a alguém".*

Fisicamente um sinal é assim uma entidade veiculando informação:

- um semáforo é um sinal luminoso indicando se a via está aberta ou fechada;
- um sinal sonoro corresponde a flutuações de pressão que o ouvido interpreta como voz, música ou ruído;
- uma imagem é um sinal visual, captado pela retina e ao qual o cérebro dá sentido.

A medição é a detecção de um sinal físico, como os exemplos apresentados ou de algum modo menos apreensível. O sensor –ou transdutor, sinónimo frequente de sensor– é um conversor que transforma um sinal de uma forma ou grandeza para outra, que seja mais prática e mais facilmente utilizável.

É assim imprescindível definir a noção de sinal, o seu significado e o seu tratamento matemático, para se poder proceder à sua visualização, à sua quantificação, ao seu condicionamento, para conseguir utilizar o seu conteúdo informativo.

#### 2. definição de um sinal analógico

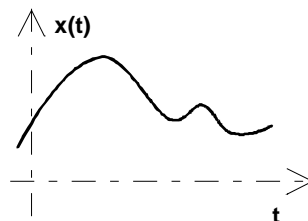
Matematicamente, um sinal será uma função de uma ou mais variáveis, caracterizando quantitativamente uma realidade física interessante para o observador.

Uma imagem é um sinal com duas variáveis (espaciais): as coordenadas. Na maioria dos casos, no entanto, a variável única é o tempo.

- Um sinal é dito causal se nulo para tempos negativos.
- Um sinal representado por uma função (contínua normalmente) da variável real será dito analógico. Um sinal digital toma valores discretos para uma variável discreta, por exemplo, definida num intervalo inteiro.
- Existem sinais determinísticos descritos por funções analíticas conhecíveis. Existem sinais aleatórios só analisáveis estatisticamente.
- Um sinal é dito periódico se repete a mesma estrutura com intervalos de "tempo" fixos. Um sinal é dito finito se for nulo fora de um intervalo de comprimento finito.

#### exemplos de sinais analógicos básicos

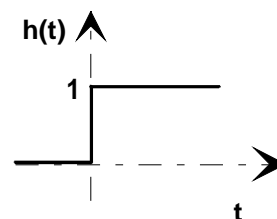
Genericamente, um sinal analógico será representado por uma função real da variável real  $x(t)$  e será utilmente representado sob forma gráfica.



Alguns sinais elementares são de particular relevância na modelação de sinais físicos:

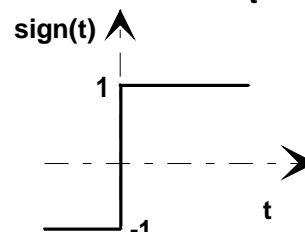
i) O degrau unitário ou função de Heaviside

$$\begin{aligned} h(t) &= 0 & t < 0 \\ h(t) &= 1 & t \geq 0 \end{aligned}$$



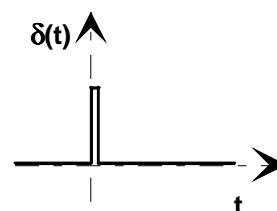
ii) A função "sinal" (algébrico -sign)

$$\begin{aligned} \text{sign}(t) &= -1 & t < 0 \\ \text{sign}(t) &= +1 & t > 0 \end{aligned}$$



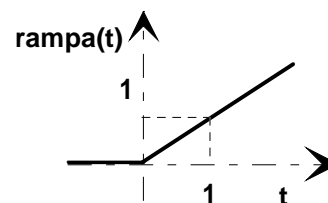
iii) O impulso unitário ou função de Dirac

$$\begin{cases} \delta(t) = 0 & t \neq 0 \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1 \end{cases}$$



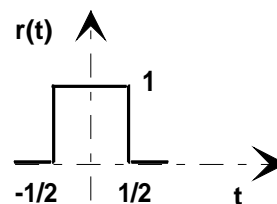
iv) a função rampa

$$\begin{aligned} \text{rampa}(t) &= 0 & t < 0 \\ \text{rampa}(t) &= t & t \geq 0 \end{aligned}$$



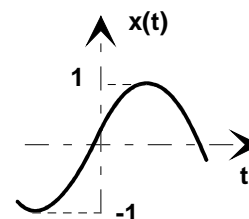
v) o rectângulo unitário

$$\begin{aligned} r(t) &= 0 & |t| > 1/2 \\ r(t) &= 1 & |t| \leq 1/2 \end{aligned}$$



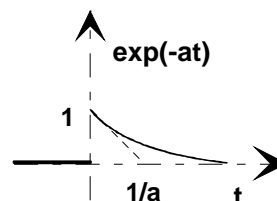
vi) o sinal sinusoidal, de frequência f e fase na origem φ

$$x(t) = \sin(2\pi ft + \varphi)$$



vii) a exponencial decrescente causal

$$\begin{aligned} x(t) &= 0 & t < 0 \\ x(t) &= e^{-at} & t > 0 \quad (a > 0) \end{aligned}$$



Por vezes é cómodo considerar sinais complexos como a exponencial de argumento complexo de frequência  $f$

$$x(t) = e^{j2\pi ft}$$

onde  $j = \sqrt{-1}$  é o imaginário puro.

Entre os sinais elementares apresentados existem relações simples:

- $\text{sign}(t) = -1 + 2 h(t)$
- $\int_{-\infty}^t \delta(\tau) d\tau = h(t)$
- $\int_{-\infty}^t h(\tau) d\tau = \text{rampa}(t)$
- $r(t) = h(t + 0.5) - h(t - 0.5)$
- $e^{j2\pi ft} = \cos(2\pi ft) + j\sin(2\pi ft)$

### caracterização de sinais aleatórios

A média de um sinal aleatório sobre um intervalo  $[t_1 - T/2; t_1 + T/2]$  é função de  $t_1$  e de  $T$

$$m_x(t_1, T) = \int_{t_1 - T/2}^{t_1 + T/2} x(t) dt$$

Para um sinal estacionário a média é independente de  $t_1$  e é então definida por

$$\langle x \rangle = \bar{x} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt$$

e a variância por

$$\sigma^2 = \langle (x - \bar{x})^2 \rangle = \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2$$

Para um sinal aleatório de distribuição normal ou Gaussiana, a probabilidade de obter um valor  $x$  do sinal é dado por

$$p_d(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \langle x \rangle)^2}{2\sigma^2}\right)$$

Um sinal de distribuição uniforme tem uma probabilidade constante –um sinal aleatório de distribuição uniforme no intervalo  $[0,1]$  por exemplo tem probabilidade igual a 1.

### energia e potência de sinais analógicos

Para um sinal analógico qualquer definem-se

a potência  $p(x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |x|^2 dt$

e a energia  $w(x) = \int_{-\infty}^{\infty} |x|^2 dt$

Os sinais físicos e a maioria dos sinais úteis têm energia finita. Por vezes é necessário considerar sinais de potência finita mas de energia divergente.

Note-se que:

i) a potência é o valor quadrático médio do sinal: para um sinal de média não nula esta é normalmente retirada:

$$(x_{\text{rms}})^2 = \langle |x - \bar{x}|^2 \rangle = p(x - \bar{x})$$

ii) é fácil verificar que um sinal de energia finita tem média nula;

iii)um caso importante de sinal com energia infinita é o sinal sinusoidal: por exemplo, para um sinal de amplitude A e frequência f constantes

$$p = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} A^2 \sin^2(2\pi ft) dt = \frac{A^2}{2}.$$

### 3. transformada de Fourier de um sinal analógico

#### definição

A transformada de Fourier (TF) de um sinal  $x(t)$  é definida por

$$X(f) = F[x(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt$$

cuja inversão é fornecida pela transformada de Fourier inversa

$$x(t) = F^{-1}[X(f)] = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f)e^{+j2\pi ft} df$$

que pode ser expressa como a conjugada da transformada directa:

$$F^{-1}[X(f)] = F^*[X^*(f)]$$

A variável real  $f$  tem a dimensão inversa da variável inicial  $t$  –tipicamente, se  $t$  for o tempo, expresso em segundos (s),  $f$  será a frequência expressa em Hertz ( $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$ ). Por vezes, no lugar da frequência  $f$  utiliza-se a frequência radial  $\omega = 2\pi f$  (expressa em  $\text{rad s}^{-1}$ ).

Por norma, notar-se-á o sinal analógico com a letra minúscula e a sua TF com a maiúscula correspondente.

#### espectros

A TF de um sinal é uma função complexa.

Em coordenadas cartesianas ela é representada por duas curvas,

a parte real  $\text{Re}[X(f)]$

e a parte imaginária  $\text{Im}[X(f)]$ .

Em coordenadas polares, as componentes da TF recebem o nome de espectros:

o espectro de amplitude  $|X(f)|$

e o espectro de fase  $\theta_x(f) = \text{Arg}[X(f)]$ .

O espectro de energia, ou densidade espectral de energia, define-se por

$$\Phi_x^o(f) = |X(f)|^2$$

e representa a forma como está distribuída em frequência a energia do sinal.

#### propriedades

linearidade  $F[ax(t) + by(t)] = aX(f) + bY(f)$

mudança de escala  $F[x(at)] = \frac{1}{|a|} X\left(\frac{f}{a}\right)$

translação  $F[x(t - \tau)] = X(f)e^{-j2\pi f\tau}$

modulação  $F[x(t)e^{j2\pi vt}] = X(f - v)$

derivacão  $F[x^{(n)}(t)] = (j2\pi f)^n X(f)$

integração  $F[\int_0^t x(\tau) d\tau] = \frac{X(f)}{j2\pi f}$

função real par  $X(f)$  real par

função real ímpar  $X(f)$  imaginária ímpar

função periódica  $x(t + nT) = x(t)$

$$\Rightarrow X(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \delta(f - f_n)$$

com  $f_n = \frac{n}{T}$  as frequências discretas e

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-j2\pi n t/T} dt$$

os coeficientes da série de Fourier complexa.

Uma função com média não nula  $x(t) = x_o(t) + \langle x \rangle$  tem uma TF dada por

$$X(f) = X_o(f) + \langle x \rangle \delta(f)$$

exemplos

|                 |  |
|-----------------|--|
| $x(t)$          | $X(f)$   |
| 1               | $\delta(f)$                                    |
| $\delta(t)$     | 1  |
| sign(t)         | $\frac{1}{j2\pi f}$                            |
| $e^{j2\pi at}$  | $\delta(f - a)$                                |
| $\cos(2\pi at)$ | $\frac{1}{2} [\delta(f + a) + \delta(f - a)]$  |
| $\sin(2\pi at)$ | $\frac{1}{2j} [\delta(f + a) - \delta(f - a)]$ |
| $r(t)$          | $\frac{\sin(\pi f)}{\pi f}$                    |

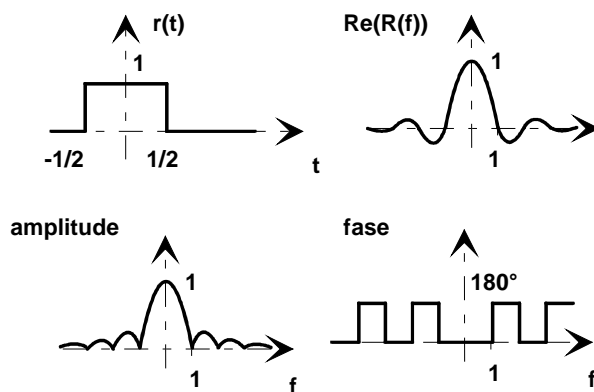


fig. o rectângulo e a sua TF

**4. operações sobre sinais**

Entre sinais, além das operações elementares  $(x + y, x - y, xy, x / y)$  definem-se duas operações: a correlação e a convolução.

### correlação de sinais de energia finita

A correlação entre dois sinais de energia finita  $x(t)$  e  $y(t)$  é dada pelo integral

$$\varphi_{xy}^o(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x^*(\tau) y(t + \tau) d\tau$$

onde  $x^*$  é o conjugado de  $x$  (para englobar o caso de sinais complexos).

No caso de os dois operandos serem uma única função, define-se a autocorrelação

$$\varphi_x^o(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x^*(\tau) x(t + \tau) d\tau .$$

Verifica-se facilmente que a TF transforma a operação de correlação num produto simples entre uma transformada e a conjugada da outra

$$\Phi_{xy}^o(f) = X^*(f)Y(f) .$$

Em particular, a TF da autocorrelação é o espectro de energia do sinal

$$\Phi_x^o(f) = X^*(f)X(f) = |X(f)|^2 .$$

### correlação – caso de sinais aleatórios

A correlação entre dois sinais de energia não finita  $x(t)$  e  $y(t)$  é dada pela média

$$\varphi_{xy}(t) = \langle x^*(\tau) y(t + \tau) \rangle$$

e a autocorrelação por

$$\varphi_x(t) = \langle x^*(\tau) x(t + \tau) \rangle$$

O espectro de potência do sinal é dado por

$$\Phi_x(f) = F[\varphi_x(t)]$$

e o espectro de correlação de potência é dado por

$$\Phi_{xy}(f) = F[\varphi_{xy}(t)]$$

O caso do ruído branco corresponde a um ruído sem auto-correlação, i.e. de auto-correlação nula excepto na origem

$$\varphi_x(t) = \sigma^2 \delta(t)$$

ou seja de espectro uniforme, igual à sua variância

$$\Phi_x(f) = \sigma^2 = \text{cste} .$$

### convolução de sinais de energia finita

A convolução de dois sinais de energia finita é dada pelo integral

$$x*y = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) y(t - \tau) d\tau .$$

A TF dum produto de convolução é o produto simples das transformadas

$$F[x*y] = X(f) Y(f) .$$

Identicamente, a TF dum produto directo de dois sinais é o produto de convolução entre as transformadas

$$F[x(t)y(t)] = X(f)*Y(f) .$$

Note-se que o impulso  $\delta(t)$  é o elemento neutro para a convolução: para um sinal qualquer  $x(t)$  tem-se

$$x(t)*\delta(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \delta(t-\tau) d\tau = x(t).$$

### 5. sistemas analógicos

A actuação de um sistema tratando um sinal de entrada (solicitação)  $x(t)$  e fornecendo um sinal de saída (resposta)  $y(t)$

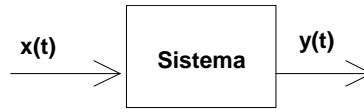


fig. sistema analógico

representa-se matematicamente por uma convolução, entre o sinal de entrada  $x(t)$  e um sinal característico do sistema, a sua *resposta impulsiva*  $g(t)$ , resposta obtida quando se lhe fornece um impulso ( $x = \delta(t)$ ):

$$y(t) = x(t)*g(t).$$

#### transformada de Laplace

No estudo de sistemas analógicos causais (únicos realizáveis na prática), substitui-se a TF pela Transformada de Laplace unilateral (TL) definida pela relação

$$X(s) = L[x(t)] = \int_0^{\infty} e^{-st} x(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-st} x(t) dt$$

onde a variável  $s$  descreve o plano complexo.

A relação entre as duas transformadas concretiza-se na decomposição da variável  $s$  em coordenadas cartesianas:

$$s = \sigma + j2\pi f$$

conduzindo a

$$F[h(t)x(t)](f) = L[x(t)](j2\pi f).$$

Traduzindo: matematicamente a TF de um sinal causal é a sua TL no eixo imaginário, fisicamente é um caso particular da TL para sinais sinusoidais.

#### propriedades

As propriedades da TL correspondem às propriedades da TF:

|                   |  |
|-------------------|--|
| linearidade       | $L[ax(t) + by(t)] = aX(s) + bY(s)$                     |
| mudança de escala | $L[x(at)] = \frac{1}{ a } X\left(\frac{f}{a}\right)$   |
| translação        | $L[x(t - \tau)] = X(s)e^{-s\tau}$                      |
| modulação         | $L[x(t)e^{at}] = X(s - a)$                             |
| derivação         | $L[x^{(n)}(t)] = s^n X(s) - x(0)$                      |
| integração        | $L\left[\int_0^t x(\tau)d\tau\right] = \frac{X(s)}{s}$ |
| correlação        | $L[\phi_{xy}^o(t)] = X^*(s)Y(s)$                       |



convolução

$$L[x*y] = X(s)Y(s)$$

função de transferência

Escrita em termos de TL e de acordo com a última propriedade, a actuação do sistema sobre o sinal de entrada expressa-se como o produto simples do sinal de entrada e a transformada da resposta impulsiva:

$$Y(s) = G(s)X(s)$$

A transformada  $G(s)$  é denominada a Função de Transferência (FT) do sistema.

Para obter a resposta em frequência do sistema, correspondendo ao caso de sinais sinusoidais estacionários ( $\sigma = 0$ ), utiliza-se a FT harmónica  $G(j2\pi f)$  ou  $G(j\omega)$ .

**6. sinais digitais**

definições

Matematicamente um sinal digital é uma sucessão de números reais ou complexos

$$x_k, \quad k \in \mathbb{Z}$$

Um sinal causal tem valores nulos para índices negativos. Um sinal periódico de período  $K$  verifica  $x_{k+K} = x_k$  para todos os valores do índice  $k$ .

Sinais digitais podem ser obtidos por amostragem de sinais analógicos

$$x_k = x(kT)$$

onde  $x(t)$  é um sinal analógico qualquer e  $T$  é o período de amostragem.

Sinais digitais podem ser construídos por fórmulas indutivas, por exemplo para a definição de sinais pseudo-aleatórios: um exemplo de sinal pseudo-aleatório é dado pela fórmula

$$x_{k+1} = (x_k + x_{k-i}) \text{ mod } 1$$

que a partir das  $i$  primeiras amostras gera um sinal aleatório com distribuição uniforme no intervalo  $[0,1]$ .

exemplos de sinais digitais

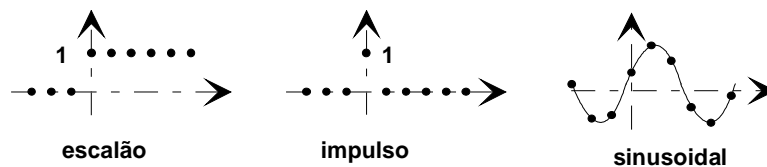


fig. exemplos de sinais digitais

i) degrau unitário

$$\begin{aligned} h_k &= 0 & k < 0 \\ h_k &= 1 & k \geq 0 \end{aligned}$$

ii) impulso  $d_k = h_k - h_{k-1}$

$$\begin{aligned} d_k &= 0 & k \neq 0 \\ d_0 &= 1 \end{aligned}$$

iii) sinal sinusoidal complexo

$$x_k = \exp(\sigma + j2\pi\nu k) \quad (\nu \text{ é uma frequência numérica: } \nu = fT)$$

### transformada de Fourier dum sinal digital

Para um sinal digital define-se a TF por uma série exponencial

$$X(\nu) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x_k e^{-j2\pi\nu k}$$

Teorema: a TF de um sinal digital é periódica de período 1:

$$X(\nu+1) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x_k e^{-j2\pi(\nu+1)k} = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x_k e^{-j2\pi\nu k} e^{-j2\pi k} = X(\nu)$$

Sendo a TF periódica, a sua inversão é dada pelos coeficientes da série de Fourier complexa

$$x_k = \int_{-1/2}^{1/2} X(\nu) e^{j2\pi\nu k} d\nu .$$

Para um sinal periódico de período N (ou finito de comprimento N) a TF limita-se a uma soma finita:

$$X(\nu) = \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{-j2\pi\nu k} .$$

Como para sinais analógicos, definem-se espectros de amplitude, de fase e de energia.

## **7. amostragem e restituição de sinais analógicos**

Todo o sinal digital pode ser considerado como um sinal analógico amostrado

$$x_k = x(kT)$$

numa operação que podemos idealizar como o produto do sinal  $x(t)$  por um trem de impulsos de amostragem

$$a(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta(t - kT)$$

obtendo-se o sinal amostrado

$$x_a(t) = x(t) a(t)$$

O teorema do produto dá-nos

$$X_a(f) = X(f) * A(f)$$

onde a transformada do sinal amostrador verifica

$$A(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{T} \delta\left(f - \frac{n}{T}\right)$$

De onde se conclui que a TF do sinal amostrado

$$X_a(f) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} X\left(f - \frac{n}{T}\right)$$

repete a TF do sinal analógico original com um período  $\frac{1}{T}$ .

**Teorema da amostragem:** um sinal analógico com frequência máxima  $F$  só pode ser reconstituído se for amostrado com uma frequência superior a  $2F$  ( $2F$  é chamada frequência de Nyquist), ou seja com um período de amostragem  $T < \frac{1}{2F}$ .

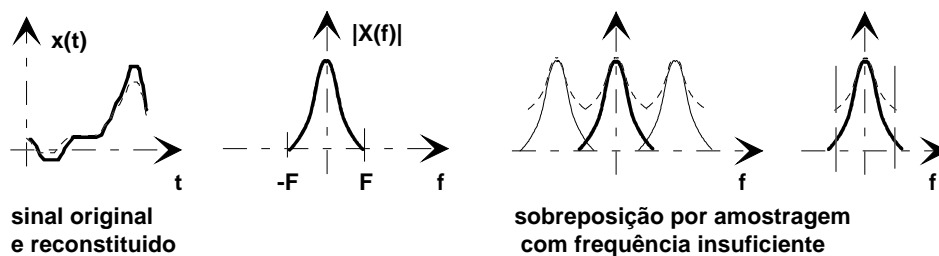


fig. teorema da amostragem -visualização no domínio das TF

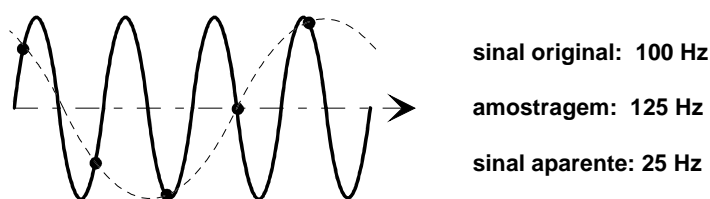


fig. teorema da amostragem -visualização no tempo

### 8. TFD

Para transportar a TF no domínio discreto e poder aplicá-la a casos práticos, define-se a transformada de Fourier discreta (TFD) discretizando o intervalo das frequências  $\left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right]$ :

$$v_n = \frac{n}{N} \quad -\frac{N}{2} \leq n < \frac{N}{2}$$

$$X_o = X(v_n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} e^{-j2\pi nk/N}$$

Fisicamente, a TFD corresponde a uma amostragem no domínio das frequências, efectuada com período igual a  $\frac{1}{N}$ :

$$X_n = X(v) \delta\left(v - \frac{n}{N}\right).$$

O sinal amostrado e a sua TFD são ambos periódicos, mesmo se o sinal analógico o não for.

Para um número  $N$  de amostras com um período de amostragem  $T$ , obtém-se uma resolução frequencial  $\Delta f = \frac{1}{NT}$  e as aproximações da TF do sinal original e da sua inversão são dadas por:

$$X(n\Delta f) = \sum_0^{N-1} T x(kT) e^{-j2\pi nk/N}$$

$$e x(kT) = \sum_{-N/2}^{N/2-1} \Delta f X(n\Delta f) e^{j2\pi nk/N}.$$

Um sinal finito não periódico não pode ser restituído pela TFD. Escolher um número finito de amostras  $N$ , significa multiplicar por uma janela rectangular. A este produto corresponde uma convolução das transformadas

$$X_n(v) = \int_{-1/2}^{1/2} X(f) J_r(v-f) df$$

sendo a TF do rectângulo dada pela função sinc

$$J_r(v) = \frac{\sin(\pi v N)}{\sin(\pi v)}$$

cujas ondulações são a manifestação do *abuso* cometido com a janela rectangular.

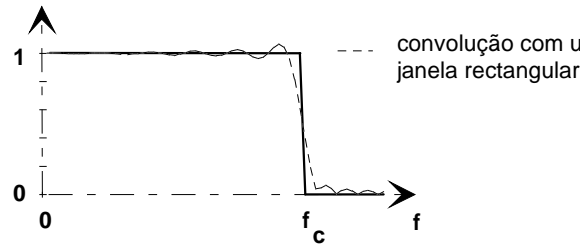


fig. efeito de uma janela rectangular sobre um filtro passa-baixo ideal

Outras janelas existem, permitindo reduzir o efeito do corte operado com a selecção dum número finito de amostras.

### 9. sistemas digitais

De forma similar ao sistema analógico, um sistema digital linear trata um sinal de entrada  $x_k$  através de uma convolução com a sua resposta impulsiva  $g_k$ :

$$y_k = x_k * g_k$$

ou seja através de um produto directo das TF

$$Y(f) = X(f)G(f).$$

A transposição da TL para o caso digital passa pela definição da transformada em z:

$$X(z) = Z[x_k] = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x_k z^{-k}$$

onde z é a variável complexa –que para um sinal amostrado com período T está associada à variável s de Laplace pela relação  $z = e^{sT}$  ou ainda, substituindo a variável de Laplace em termos de

$$z \text{ (1ª ordem): } s = \frac{1 - e^{-sT}}{T} = \frac{1 - z^{-1}}{T}.$$

A função de transferência G(z) de um sistema digital será definida pela relação entre as transformadas em z:  $Y[x_k * y_k] = X(z) G(z).$

**B. sistema internacional**

| <b>Unidades do Sistema Internacional</b> |                |                |                   |
|--|----------------|----------------|-------------------|
| <b>grandeza</b>                          | <b>símbolo</b> | <b>unidade</b> | <b>abreviação</b> |
| comprimento                              | $l$            | metro          | m                 |
| peso                                     | $m$            | kilograma      | kg                |
| tempo                                    | $t$            | segundo        | s                 |
| temperatura                              | $T$            | Kelvin         | K                 |
| corrente eléctrica                       | $i$            | Ampère         | A                 |
| intensidade luminosa                     | $I$            | candela        | Cd                |
| quantidade de matéria                    | $n$            | mole           | mol               |

| <b>múltiplos e submúltiplos decimais</b> |       |            |
|--|-------|------------|
| Tera                                     | T     | $10^{12}$  |
| Giga                                     | G     | $10^9$     |
| Mega                                     | M     | $10^6$     |
| Kilo                                     | k     | $10^3$     |
| Hecto                                    | h     | 100        |
| Deca                                     | da    | 10         |
| Deci                                     | d     | $10^{-1}$  |
| Centi                                    | c     | $10^{-2}$  |
| Milli                                    | m     | $10^{-3}$  |
| Micro                                    | $\mu$ | $10^{-6}$  |
| Nano                                     | n     | $10^{-9}$  |
| Pico                                     | p     | $10^{-12}$ |
| Femto                                    | f     | $10^{-15}$ |

**C. conversões**

| <b>Homogeneidade entre unidades do Sist. Internacional e suas derivadas</b> |                  |            |          |                   |
|---|------------------|------------|----------|-------------------|
| ângulo plano  | $\alpha, \theta$ | radiano    | rad      | 1                 |
| ângulo sólido   | $\Omega$         | steradiano | sr       | $\text{rad}^2$    |
| força   | $f, F$           | Newton     | N        | $\text{m kg/s}^2$ |
| pressão   | $P, p$           | Pascal     | Pa       | $\text{N/m}^2$    |
| energia   | $w$              | Joule      | J        | Nm                |
| potência  | $p$              | Watt       | W        | J/s               |
| carga eléctrica   | $q$              | Coulomb    | C        | As                |
| tensão eléctrica  | $v, V, e$        | Volt       | V        | W/A               |
| resistência eléctrica   | $R$              | Ohm        | $\Omega$ | V/A               |
| condutância eléctrica   | $G$              | Siemens    | S        | A/V               |
| capacidade eléctrica  | $C$              | Farad      | F        | C/V               |
| fluxo magnético   | $\phi$           | Weber      | Wb       | Vs                |
| indutância  | $L$              | Henry      | H        | $\Omega\text{s}$  |
| densidade de fluxo magnético  | $B$              | Tesla      | T        | $\text{Wb/m}^2$   |
| fluxo luminoso  | $I$              | lumen      | lm       | Cd sr             |
| iluminação  | $E$              | lux        | lx       | $\text{lm/m}^2$   |
| frequência  | $f, \nu$         | Hertz      | Hz       | $\text{s}^{-1}$   |

| <b>Unidades</b>      | <b>abreviação</b> | <b>equivalente SI</b>               |
|----------------------|-------------------|-------------------------------------|
| <b>comprimento</b>   |                   | <b>metro (m)</b>                    |
| polegada (inch)      | in (")            | 0.0254 m                            |
| pé (foot)            | ft (')            | 0.3048 m                            |
| milha                | mi                | 1 609 m                             |
| milha náutica        | nm                | 1 852 m                             |
| <b>volume</b>        |                   | <b>metro cúbico (m<sup>3</sup>)</b> |
| litro                | l                 | 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>     |
| cubic foot           | cf                | 0.028 m <sup>3</sup>                |
| galão (US gallon)    | gal               | 3.79 l                              |
| pint                 | pt                | 0.473 l                             |
| onça líquida         | fl oz             | 0.0296 l                            |
| <b>velocidade</b>    |                   | <b>m/s</b>                          |
| quilómetro horário   | km/h              | 0.278 m/s                           |
| nó (knot)            | kt                | =1nm/h = 0.514 m/s                  |
| <b>aceleração</b>    |                   | <b>m/s<sup>2</sup></b>              |
| gravidade            | "g"               | 9.806 m/s <sup>2</sup>              |
| <b>massa</b>         |                   | <b>kilograma (kg)</b>               |
| libra (pound)        | lb                | 0.454 kg                            |
| tonelada             | t                 | 1000 kg                             |
| slug                 | slg               | 14.6 kg                             |
| onça                 | oz                | 28.35 10 <sup>-3</sup> kg           |
| <b>força</b>         |                   | <b>Newton</b>                       |
| libra força          | lbf               | 4.448 N                             |
| quilograma força     | kgf               | 9.806 N                             |
| dyne                 | dyn               | 10 <sup>-5</sup> N                  |
| <b>pressão</b>       |                   | <b>Pascal</b>                       |
| bar                  | bar               | 10 <sup>5</sup> Pa                  |
| atmosfera            | atm               | 1.01325 10 <sup>5</sup> Pa          |
| mm de mercúrio       | mmHg              | 0.13322 10 <sup>3</sup> Pa          |
| Torricelli           | Torr              | 1 mmHg = 0.13322 10 <sup>3</sup> Pa |
| polegada de merc.    | inHg              | 3.38639 10 <sup>3</sup> Pa          |
| libra por pol.quad.  | psi               | 6895 Pa                             |
| <b>energia</b>       |                   | <b>Joule</b>                        |
| caloria              | cal               | 4.187 J                             |
| erg                  | erg               | 10 <sup>-7</sup> J                  |
| BTU                  | BTU               | 1.055 10 <sup>3</sup> J             |
| <b>potência</b>      |                   | <b>Watt</b>                         |
| cavalo vapor         | hp (cv)           | 746 W                               |
| <b>temperatura</b>   |                   | <b>K</b>                            |
| Celsius              | °C                | T(K)=T(°C) +273.15 K                |
| Rankine              | °R                | 5/9 K                               |
| Fahrenheit           | °F                | T(K)=5/9 (T(°F) -32) +273.15 K      |
| <b>electricidade</b> |                   |                                     |
| mho                  | mho               | 1/Ω                                 |
| <b>magnetismo</b>    |                   |                                     |
| Gauss                | G                 | 10 <sup>-4</sup> T                  |

**BIBLIOGRAFIA:**

*Intelligent Instrumentation*, BARNEY G.C., Prentice Hall International Ltd, 1985

*Interfacing sensors to the IBM PC*, WILLIS J.TOMPKINS, JOHN G.WEBSTER, editors, Prentice-Hall, Inc  
NJ-USA, 1988

*Instrumentation Systems*, TASUKU SENBON, FUTOSHI HANABUCHI , Springer Verlag, 1991

*Process Instruments and Controls Handbook*, CONSIDINE D.M., McGraw Hill, 2nd ed., 1974

*Circuits, Devices and Systems*, SMITH R.J., Wiley and Sons, 4th ed., 1983

*Analogue Signal Conditioning for Flight Test Instrumentation*, VEATCH D.W. & BOGUE R.K.,  
AGARDOGRAPH 160-17, Paris, 1986

*Power and Motion Control Volume*, MACHINE DESIGN Reference Volume, Vol 61 #12, Penton  
Publishing, Cleveland Ohio, jun 1989

## ÍNDICE

|   |    |
|---|----|
| 1. a cadeia de medida.....                              | 2  |
| 1.1. instrumentação.....                                | 2  |
| 1.1.1. definições .....                                 | 2  |
| 1.1.2. a cadeia de medida ideal.....                    | 3  |
| 1.1.3. a cadeia de medida real .....                    | 4  |
| 1.1.4. erros e calibração.....                          | 5  |
| erros aleatórios e sistemáticos .....                   | 5  |
| erros estáticos ou dinâmicos .....                      | 6  |
| a cadeia de erros .....                                 | 6  |
| calibração .....  | 7  |
| 1.1.5. protecção do ruído.....                          | 8  |
| 1.2. condicionamento do sinal analógico.....            | 9  |
| 1.2.1. introdução.....                                  | 9  |
| 1.2.2. amplificador operacional.....                    | 9  |
| tratamento do sinal analógico.....                      | 9  |
| configuração diferencial .....                          | 11 |
| resposta em frequência .....                            | 11 |
| valores típicos.....                                    | 12 |
| outros amplificadores .....                             | 12 |
| 1.2.3. filtros .....                                    | 13 |
| 1.3. aquisição e sinal digital.....                     | 16 |
| 1.3.1. aquisição de dados.....                          | 16 |
| sample-and-hold .....                                   | 16 |
| multiplexagem analógica.....                            | 16 |
| conversão analógico-digital.....                        | 17 |
| conversão digital-analógico.....                        | 19 |
| 1.3.2. sinal digital .....                              | 20 |
| sinal digital paralelo .....                            | 20 |
| sinal digital série.....                                | 20 |
| trem de impulsos .....                                  | 21 |
| 1.4. conclusão .....                                    | 22 |
| 2. sensores do movimento.....                           | 23 |
| 2.1. posição, deslocação linear .....                   | 23 |
| 2.1.1. sensor potenciométrico.....                      | 23 |
| 2.1.2. sensores LVDT.....                               | 25 |
| 2.1.3. sensores indutivos.....                          | 26 |
| 2.1.4. sensores capacitivos .....                       | 26 |
| 2.1.5. extensómetros.....                               | 27 |
| 2.1.6. sensores ópticos.....                            | 30 |
| 2.1.7. outros sensores/meios de medição da posição..... | 32 |
| 2.2. proximidade.....                                   | 33 |
| 2.2.1. sensor indutivo .....                            | 33 |
| 2.2.2. sensor de efeito Hall .....                      | 34 |
| 2.2.3. sensor capacitivo .....                          | 34 |
| 2.2.4. sensor ultra-sónico.....                         | 34 |
| 2.2.5. sensor óptico.....                               | 35 |
| 2.3. posição, deslocação angular .....                  | 36 |
| 2.3.1. sensores analógicos .....                        | 36 |
| potenciómetros .....                                    | 36 |
| resolvers .....   | 36 |
| synchros.....   | 37 |
| transformadores lineares.....                           | 37 |
| 2.3.2. sensores digitais.....                           | 38 |
| codificadores ópticos incrementais.....                 | 38 |



|  |    |
|--|----|
| codificadores digitais absolutos.....                      | 39 |
| 2.3.3. sensores específicos.....                           | 40 |
| inclinómetros.....   | 40 |
| bússolas.....  | 40 |
| 2.4. velocidade.....                                       | 41 |
| 2.4.1. velocidades lineares.....                           | 41 |
| 2.4.2. velocidades angulares –taquímetros.....             | 41 |
| taquímetro dc.....   | 42 |
| medição da frequência.....                                 | 42 |
| 2.4.3. velocidades angulares –geradores de impulsos.....   | 42 |
| 2.4.4. velocidades angulares por arrasto.....              | 43 |
| arrasto magnético.....                                     | 43 |
| arrasto alimentado em ac.....                              | 43 |
| 2.4.5. velocidades angulares inerciais –giroscópios.....   | 43 |
| 2.5. aceleração.....                                       | 46 |
| 2.5.1. acelerómetros lineares potenciométricos.....        | 46 |
| 2.5.2. acelerómetros servo-controlados.....                | 46 |
| 2.5.3. acelerómetros piezoelétricos.....                   | 47 |
| 2.5.4. acelerómetros piezo-resistivos.....                 | 49 |
| 3. grandezas mecânicas.....                                | 50 |
| 3.1. forças.....   | 50 |
| 3.1.1. balanças.....                                       | 50 |
| 3.1.2. dinamómetros de mola.....                           | 51 |
| 3.1.3. deformação elástica.....                            | 51 |
| 3.1.4. conversão para pressão.....                         | 53 |
| 3.1.5. equilíbrio por servo-actuator.....                  | 53 |
| 3.1.6. outros métodos.....                                 | 53 |
| 3.2. binários.....   | 54 |
| 3.2.1. medição de potência.....                            | 54 |
| 3.2.2. medição de torção.....                              | 54 |
| 3.3. pressão.....  | 56 |
| 3.3.1. medição directa por coluna de líquido.....          | 56 |
| 3.3.2. unidades.....                                       | 57 |
| 3.3.3. medição por deformação elástica.....                | 57 |
| diafragmas.....  | 57 |
| foles.....   | 58 |
| tubos Bourdon.....   | 59 |
| 3.3.4. conversão eléctrica.....                            | 59 |
| sensor capacitivo.....                                     | 59 |
| sensor resistivo.....                                      | 61 |
| sensor indutivo.....                                       | 62 |
| 3.4. nível de líquido.....                                 | 63 |
| 3.4.1. posição da superfície.....                          | 63 |
| 3.4.2. conversão mecânica.....                             | 63 |
| conversão em força.....                                    | 63 |
| conversão em pressão.....                                  | 64 |
| conversão em peso.....                                     | 64 |
| 3.4.3. leitura directa da altura por sonda capacitiva..... | 65 |
| 3.4.4. determinação discreta.....                          | 65 |
| 3.4.5. caso do reservatório não fixo.....                  | 66 |
| 4. medidas em escoamentos.....                             | 67 |
| 4.1. definições.....                                       | 67 |
| geometria aberta ou fechada.....                           | 67 |
| fluido incompressível ou compressível.....                 | 67 |
| viscosidade.....   | 68 |
| equações.....  | 69 |
| 4.2. medições locais.....                                  | 69 |
| 4.2.1. tubo de pitot.....                                  | 70 |
| 4.2.2. anemometria de fio quente.....                      | 71 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.2.3. anemometria laser Doppler (LDA).....                | 72  |
| 4.3. medição de caudais volumétricos .....                 | 73  |
| 4.3.1. pressão diferencial .....                           | 73  |
| 4.3.2. pressão diferencial em laminar .....                | 74  |
| 4.3.3. rotâmetros.....                                     | 75  |
| 4.3.4. sensor magnético .....                              | 76  |
| 4.3.5. medição por arrasto .....                           | 77  |
| 4.3.6. medição por ultra-sons .....                        | 77  |
| 4.3.7. velocidade por turbina .....                        | 78  |
| 4.3.8. velocidade por detecção de vórtices .....           | 78  |
| 4.3.9. medições em geometria aberta.....                   | 79  |
| 4.4. medições de volume transferido .....                  | 79  |
| 4.5. caudais mássicos.....                                 | 80  |
| 4.5.1. medição volumétrica e de densidade em paralelo..... | 80  |
| 4.5.2. medição térmica .....                               | 81  |
| 4.5.3. medição da força de Coriolis.....                   | 81  |
| 5. temperatura.....  | 82  |
| 5.1. introdução.....                                       | 82  |
| unidades.....  | 82  |
| tempo de resposta .....                                    | 83  |
| 5.2. termómetros de expansão .....                         | 83  |
| 5.2.1. termómetro clássico.....                            | 83  |
| 5.2.2. elementos bimetálicos.....                          | 83  |
| 5.3. termómetros resistivos .....                          | 84  |
| 5.3.1. sensores metálicos de resistência variável .....    | 84  |
| platina.....   | 84  |
| níquel, cobre .....  | 85  |
| condicionamento de sinal .....                             | 85  |
| 5.3.2. termístores .....                                   | 86  |
| 5.4. circuitos integrados.....                             | 87  |
| 5.5. termopares .....                                      | 88  |
| 5.5.1. ligações.....                                       | 89  |
| 5.5.2. temperatura de referência .....                     | 89  |
| 5.6. pirometria .....                                      | 90  |
| 5.6.1. introdução.....                                     | 90  |
| 5.6.2. pirómetros de radiação total .....                  | 91  |
| 5.6.3. problemas específicos.....                          | 93  |
| 5.7. sensor digital de temperatura.....                    | 93  |
| 6. a cadeia de actuação .....                              | 94  |
| 6.1. introdução.....                                       | 94  |
| 6.2. uma cadeia de actuação genérica.....                  | 94  |
| 6.3. conversão de potência.....                            | 95  |
| 6.3.1. transístores.....                                   | 95  |
| 6.3.2. tirístores.....                                     | 96  |
| 6.3.3. amplificadores operacionais de potência .....       | 97  |
| 6.3.4. integrados lineares de potência.....                | 97  |
| 6.4. relés .....   | 97  |
| 6.4.1. relés monolíticos.....                              | 97  |
| 6.4.2. relés electro-mecânicos .....                       | 98  |
| 6.4.3. relés comandados pelo computador.....               | 98  |
| 6.5. interruptores.....                                    | 99  |
| 7. actuadores eléctrico-mecânicos .....                    | 100 |
| 7.1. introdução .....                                      | 100 |
| 7.1.1. posicionamento electro-mecânico .....               | 100 |
| 7.1.2. definições .....                                    | 100 |
| 7.2. motores dc .....                                      | 101 |
| 7.2.1. motores de campo gerado.....                        | 101 |
| 7.2.2. motores sem núcleo .....                            | 101 |
| 7.2.3. variantes .....                                     | 102 |

|   |     |
|---|-----|
| 7.2.4. motores lineares.....                          | 102 |
| 7.2.5. motores passo-a-passo.....                     | 102 |
| 7.2.6. servo-motores.....                             | 102 |
| 7.2.7. alimentação.....                               | 103 |
| 7.3. motores ac.....                                  | 103 |
| 7.3.1. motores de indução.....                        | 103 |
| 7.3.2. motores monofásicos.....                       | 103 |
| 7.3.3. motores síncronos.....                         | 105 |
| 7.3.4. motores ac lineares.....                       | 105 |
| 7.3.5. controlo da velocidade.....                    | 106 |
| 7.4. solenóides.....                                  | 106 |
| 8. actuadores eléctro-fluidos.....                    | 107 |
| 8.1. energia pneumática e hidráulica.....             | 107 |
| 8.1.1. bombas.....                                    | 107 |
| 8.1.2. compressores.....                              | 108 |
| 8.1.3. acumuladores.....                              | 108 |
| 8.2. controlo: os vários tipos de válvulas.....       | 109 |
| 8.3. actuadores de fluido.....                        | 110 |
| 8.3.1. cilindros.....                                 | 110 |
| 8.3.2. cilindros de rotação.....                      | 111 |
| 8.3.3. motores.....                                   | 111 |
| apêndice.....   | 1   |
| A. sinais 1.....                                      |     |
| 1. introdução.....                                    | 1   |
| 2. definição de um sinal analógico.....               | 1   |
| exemplos de sinais analógicos básicos.....            | 1   |
| caracterização de sinais aleatórios.....              | 3   |
| energia e potência de sinais analógicos.....          | 3   |
| 3. transformada de Fourier de um sinal analógico..... | 4   |
| definição.....  | 4   |
| espectros.....  | 4   |
| propriedades.....                                     | 4   |
| exemplos.....   | 5   |
| 4. operações sobre sinais.....                        | 5   |
| correlação de sinais de energia finita.....           | 6   |
| correlação –caso de sinais aleatórios.....            | 6   |
| convolução de sinais de energia finita.....           | 6   |
| 5. sistemas analógicos.....                           | 7   |
| transformada de Laplace.....                          | 7   |
| propriedades.....                                     | 7   |
| função de transferência.....                          | 8   |
| 6. sinais digitais.....                               | 8   |
| definições.....                                       | 8   |
| exemplos de sinais digitais.....                      | 8   |
| transformada de Fourier dum sinal digital.....        | 9   |
| 7. amostragem e restituição de sinais analógicos..... | 9   |
| 8. TFD.....   | 10  |
| 9. sistemas digitais.....                             | 11  |
| B. sistema internacional.....                         | 12  |
| C. conversões.....                                    | 12  |
| bibliografia:.....                                    | 1   |
| Índice.....   | 2   |

- aceleração, 47  
 actuadores hidráulicos, 108  
 actuadores pneumáticos, 108  
 acumuladores, 110  
 amplificador de carga, 49  
 anemometria fio quente, 72  
 anemometria laser, 73  
 arrasto, 78  
  
 bimetálico, 100  
 bimetal, 100  
 binário, 55  
 bombas, 108  
 bombas de volume variável, 109  
  
 cadeia de actuação, 95  
 cadeia de medida, 3  
calibração, 3  
 calibração, 7  
 caudal, 68  
 caudal mássico, 81  
 células de carga, 53  
 cilindros, 111  
 compressores, 109  
condicionamento de sinal, 5  
**condução**, 83  
 controlo, 95, 107, 110  
**convecção**, 83  
 conversão de potência, 96  
 conversor analógico-digital (A/D), 5, 18  
 conversor digital-analógico (D/A), 20  
 conversor frequência-tensão, 43  
 Coriolis, 82  
  
 dinamómetro, 52  
 dinamómetro, 55  
  
 efeito Hall, 35, 100  
 encoders, 39  
 erro absoluto, 2  
 erro fim-de-escala, 2  
 erro relativo, 2  
 extensómetros, 28, 52  
 extensómetros, 62  
  
 Fahrenheit, 83  
 forças, 51  
  
 geometria aberta, 80  
 gerador de impulsos, 43  
 giroscópios, 44  
  
*histerese*, 6  
  
 inclinómetros, 41  
 interruptores, 100  
  
 laminar, 69  
 linearidade, 6  
 LVDT, 26  
  
 Mach, 68  
 magnetómetros, 41  
*manómetro*, 57  
 mercúrio, 99, 100  
 motores, 111  
 motores, 101, 112  
 motores ac, 104  
 motores dc, 102  
 motores lineares, 103, 106  
 motores passo-a-passo, 103  
 motores síncronos, 106  
 multiplexagem, 7, 17  
  
 nível, 64  
  
 PCM, 22  
 piezoeléctrico, 48  
 piezoeléctrico, 45  
 pirometria, 91  
 pitot, 71  
 platina, 85  
 ponte, 29, 50  
 posição, 24  
 posição angular, 37  
 posicionamento electro-mecânico, 101  
 potenciómetros, 24, 37, 47  
 precisão, 2  
 pressão, 70  
 pressão, 57  
 pressão absoluta, 57  
 pressão diferencial, 57, 74  
 proximidade, 24  
 psi, 58  
  
**radiação**, 83  
 relé, 98  
 resolução, 3  
 resolvers, synchros, 37  
 Reynolds, 69  
 rotâmetros, 76  
 RS232, 21  
 RTD, 85  
  
 sample and hold, 7, 17  
 SCR, 97  
 sensibilidade, 3  
 sensor capacitivo, 60  
 sensor indutivo, 63  
 sensor magnético, 77  
 sensor óptico, 36  
 sensores capacitivos, 27, 35  
  
 sensores indutivos, 27, 34  
 sensores indutivos, 38  
 sensores ópticos, 31  
 sensores ultrasónicos, 35  
 servo-actuador, 95  
 servo-motores, 103  
 shaft encoders, 40  
 sinal digital série, 21  
 solenóides, 107  
  
 taquímetro, 42  
 temperatura, 83  
 tempo de resposta, 84  
 termistores, 87  
 termopares, 89  
 tirístores, 97  
 torque, 55  
 torsão, 55  
 transístores, 96  
 triac, 98  
 turbina, 79  
 turbulento, 69  
  
 válvulas, 110  
 velocidade, 42, 68  
 velocidades angulares, 42  
 velocidades lineares, 42  
 venturi, 75  
 viscosidade, 69  
 vórtices, 79