

## 4 - Dispositivos de entrada/saída

### 4.1 - Introdução

Um sistema de medida existe para dar informação acerca do valor físico de uma grandeza. O conhecimento desse valor, o mais exacto possível, é componente essencial na qualidade do sistema de controlo de um processo industrial. A grandeza que se pretende medir é geralmente denominada variável do processo. Os diversos módulos que constituem uma implementação típica de um sistema de controlo são representada na Fig. 4.1.

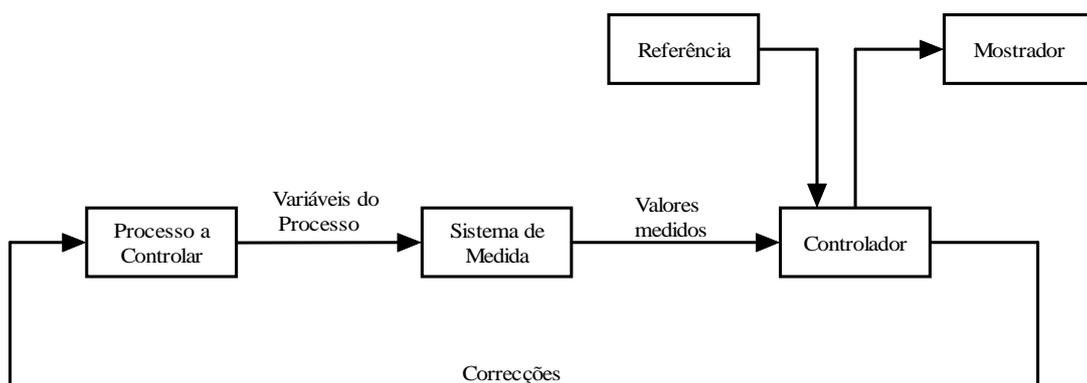


Fig. 4.1 – Sistema de controlo industrial típico.

Os sistemas de medida e de controlo tanto podem ser analógicos como digitais. Com a utilização crescente dos microprocessadores a utilização de sistemas digitais é cada vez maior.

Existem diversos tipos de sensores, desde químicos a mecânicos passando pelos eléctricos. É normal um sistema de automação industrial ter um grande número de sistemas de medição. Os mais comuns, por grau de utilização, estão representados na Fig. 4.2, e os menos comuns estão representados na Fig. 4.3.

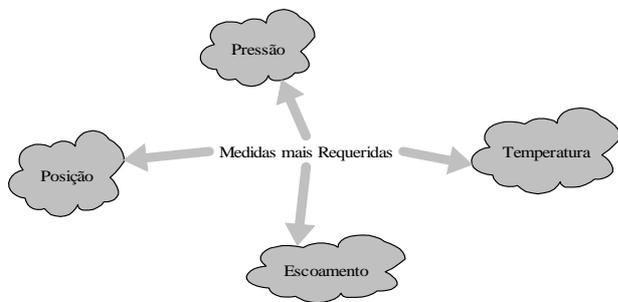


Fig. 4.2 – Grandezas mais requeridas.

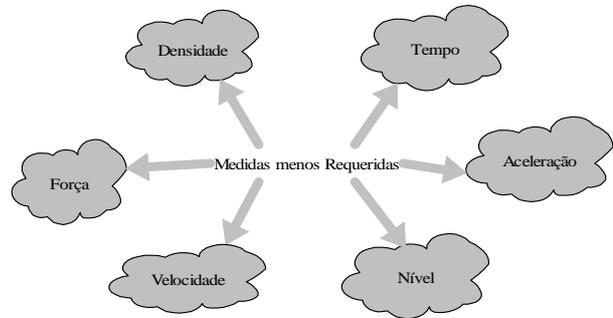


Fig. 4.3 – Grandezas menos requeridas.

Existe também um conjunto de grandezas, que pela sua natureza, exige um processamento analítico mais elaborado. A redução dos custos associados aos sistemas de processamento de sinal faz com que estas grandezas sejam cada vez mais utilizadas nos processos industriais. A Fig. 4.4 representa estas grandezas.

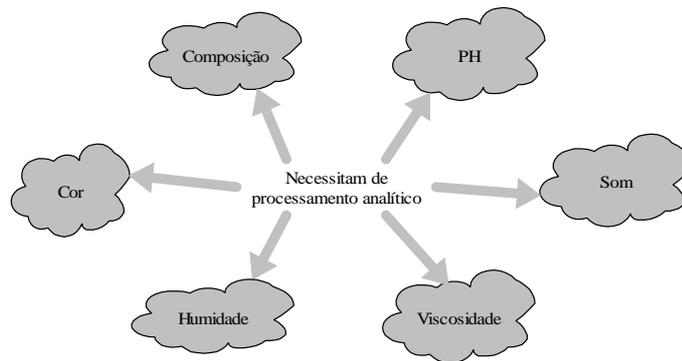


Fig. 4.4 – Grandezas que, regra geral, necessitam de processamento analítico.

### Terminologia

Os seguintes termos são definidos para ajudar o leitor a entender o presente capítulo.

*Analógico/contínuo* – Estes termos sinónimos são usados para descrever informação que é continua entre valores limites de um intervalo de tensões, correntes ou resistências. O valor é não inteiro (real) com uma resolução (número de dígitos significativos) limitado apenas pela tecnologia usada.

*Digital/discreto* Estes termos sinónimos são utilizados para descrever informação que tem um valor representativo de um qualquer estado. Valores típicos são: ‘on/off’, ‘Ok/Ko’, ‘1/0’, ‘alto/baixo’, etc.

|                   |   |
|-------------------|---|
| <i>Input</i>      | O termo <i>input</i> é usado para definir a entrada de fluxo de informação num sistema.   |
| <i>Output</i>     | O termo <i>output</i> é usado para definir a saída de fluxo de informação num sistema.  |
| <i>Sensor</i>     | É um dispositivo em contacto com uma grandeza sobre a qual se pretende conhecer o valor. Por exemplo, relaciona propriedades de um determinado meio com grandezas como tensão, corrente ou resistência. |
| <i>Transdutor</i> | É um dispositivo que aceita um valor numa determinada grandeza e transforma esse valor noutra grandeza. Por exemplo, tensão/corrente.   |

### **Características dos sensores**

Antes de escolher o sensor a instalar existem algumas questões que devemos ter em atenção. Assim, devemos conhecer o melhor possível a variável a medir, o ambiente onde o sensor vai ser instalado e o princípio de funcionamento do tipo de sensor a escolher. Em grande parte das aplicações as quantidades a medir ou são constantes ou variam muito lentamente. Assim sendo, não temos que nos preocupar com as características dinâmicas do sensor, mas apenas, com as características estáticas. São consideradas como características estáticas as seguintes propriedades:

|                       |  |
|-----------------------|--|
| <i>Repetitividade</i> | Quantidade de medições feitas pelo mesmo sensor nas mesmas condições de funcionamento.   |
| <i>Desvio</i>         | Variação na saída do sensor sem que exista qualquer variação na entrada do mesmo.  |
| <i>Erro</i>           | Diferença algébrica entre o valor medido e o valor real da grandeza. Pode ser expresso em unidades específicas da quantidade medida (erro absoluto), como uma percentagem de quantidade medida (erro relativo), ou como uma percentagem de algum valor específico. |
| <i>Incerteza</i>      | Parte da expressão do resultado da medida que estabelece o intervalo de valores dentro do qual se encontra o valor real.   |
| <i>Precisão</i>       | Termo qualitativo utilizado para relacionar a saída do instrumento com o valor real medido.  |
| <i>Resolução</i>      | É o menor incremento do mesurando que pode ser detectado pelo sensor.  |
| <i>Sensibilidade</i>  | Razão entre a variação da amplitude de saída do sensor e a correspondente variação de amplitude do mesurando.  |
| <i>Linearidade</i>    | Quando a sensibilidade se mantém constante para todos os valores do mesurando o sensor é dito linear.  |
| <i>Zona morta</i>     | A mais larga variação do mesurando à qual o sensor não responde.   |

*Estabilidade no zero* Medida da capacidade do instrumento para regressar à indicação de saída nula para entrada nula.

### Entradas digitais

Uma entrada digital consiste tipicamente numa fonte de potência (fonte de tensão), um interruptor e um sensor de tensão (conversor analógico/digital ADC). Dependendo do estado aberto/fechado, o sensor de tensão detecta um estado de voltagem ou não voltagem, gerando por sua vez um "1" ou um "0" lógicos.

O circuito Fig. 4.5 indica um exemplo de uma configuração típica para entradas digitais.

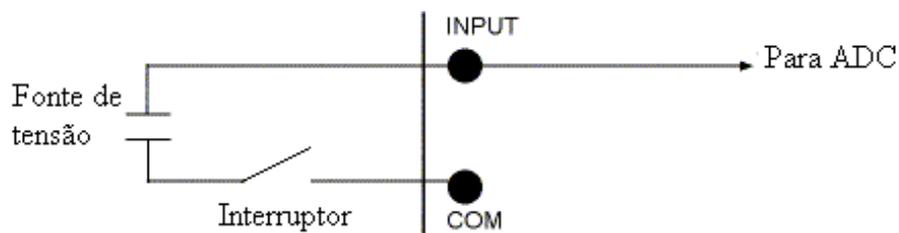


Fig. 4.5 – Entrada digital.

### Saídas digitais

Uma saída digital consiste tipicamente num interruptor (quer seja mecânico como num relé, quer seja electrónico como num transístor ou triac) que tanto abre como fecha o circuito entre dois terminais dependendo do estado binário da saída.

A Fig. 4.6 mostra uma saída digital implementada com um transístor, este transístor comanda o relé de funcionamento do motor que acciona a ventoinha.

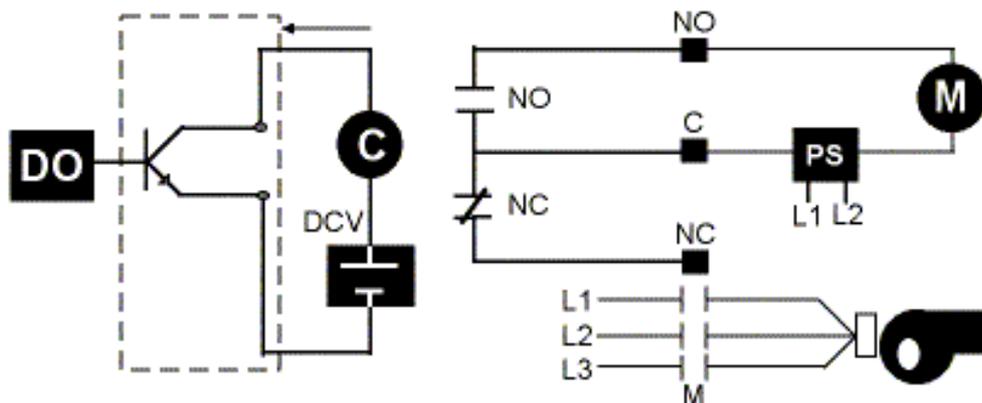


Fig. 4.6 – Saídas digitais.

### Entradas analógicas

Uma entrada analógica é um sinal eléctrico, mensurável, e definido numa gama de valores. Esta entrada é gerada por um sensor e recebida por um controlador. A entrada analógica varia continuamente de uma forma definida em relação à propriedade medida.

Os sinais analógicos gerados por alguns tipos de sensores devem ser acondicionados, são assim amplificados e filtrados de forma a permitirem o seu envio para um controlador que os recebe. Este transporte pode ser feito de diversas formas, sendo as mais comuns a utilização de condutores eléctricos, fibra óptica ou ondas de rádio.

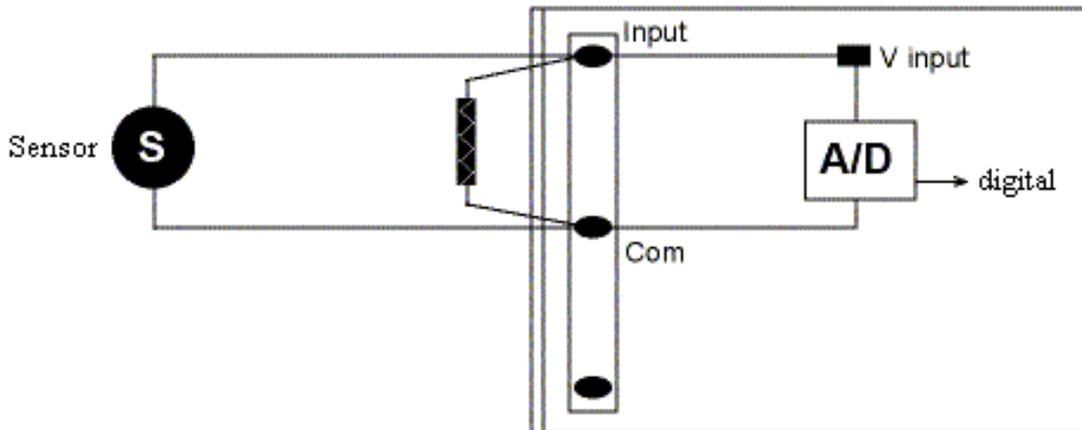


Fig. 4.7 – Saídas digitais.

No caso do controlador ser digital, as entradas analógicas devem ser convertidas para sinais digitais por um conversor analógico/digital, regra geral, localizados perto do controlador. Basicamente existem dois tipos de sinais analógicos: tensão e corrente. A Fig. 4.7 fornece um exemplo de uma entrada analógica para um controlador digital.

### Saídas analógicas

Um saída analógica é um sinal analógico mensurável e definido numa gama específica, é gerado pelo controlador e é enviado para um dispositivo ao seu cuidado, tais como variadores electrónicos de velocidade ou actuadores.

Variações nas saídas analógicas causam mudanças no dispositivo controlado que resultam em variações no processo controlado.

As saídas analógicas do controlador são normalmente limitadas a uma gama de tensões ou correntes, são necessários então transdutores que fornecem um sinal de saída compatível com o dispositivo a controlar.

### Entradas/Saídas especiais

Entradas e saídas podem também ser usadas em configurações especiais. Exemplos comuns são: contadores de impulsos, PWM (*Pulse Width Modulated*), PWM multiplexados e sinais com três estados.

#### Contadores de impulsos

São geralmente associadas com entradas especiais em que cada vez que o controlador efectua uma leitura dessa entrada ela é adicionada a um valor cumulativo. Estas entradas podem ser analógicas ou digitais.

Uma das mais comuns aplicações deste tipo de entradas é a sua utilização em contadores de caudal com turbina. O número de pulsos é proporcional à quantidade de caudal turbinado. O número de pulsos, por unidade de tempo, é proporcional à taxa de caudal durante esse intervalo de tempo. Esta metodologia de medição pode ser utilizada para medir outras grandezas.

#### *Pulse Width Modulated (PWM)*

Os sinais PWM são baseados na quantidade de tempo que a saída de um circuito digital está fechada numa base de tempo fixa. Esta quantidade de tempo pode ter um valor na gama dos 0% até aos 100% da base de tempo, fornecendo um valor analógico para cada período de tempo que representa a base de tempo do sinal.

#### *PWM multiplexado*

Um sinal PWM é por vezes utilizado para transmitir valores analógicos para dispositivos analógicos. Existem diversos processos possíveis. Uma solução é enviar um pulso de "aviso", pulso este com uma duração maior que a base de tempo. Este pulso faz com que todos os dispositivos procurem um sinal de selecção. Esse sinal é então transmitido com uma duração menor que a base de tempo. Cada dispositivo multiplexado procura um pulso de selecção único. O dispositivo que é assim seleccionado espera por outro pulso cujo comprimento corresponde ao seu novo valor analógico. Assim que este pulso é recebido o dispositivo actualiza a sua saída para o novo valor recebido. Este processo pode ser repetido vezes sem fim.

A base de tempo do sinal PWM e o número de dispositivos multiplexados limita o tempo de actualização das saídas multiplexadas. O que faz com que esta tecnologia não seja adequada a situações de controlo que requeiram uma resposta muito rápida.

### **Sinais com três estados**

Um sinal deste tipo consiste em dois sinais digitais usados conjuntamente de forma a fornecerem três comandos. Este tipo de sinal é geralmente usado para controlar os actuadores das válvulas de uma forma modelada, mas podem também ser usados com um transdutor para gerarem um sinal analógico.

Se ambas as saídas digitais estão *off*, o actuador não se move. A saída 1, quando *on*, irá provocar o movimento numa direcção. A saída 2, quando *on*, irá provocar o movimento em direcção oposta. A quarta possibilidade, quando ambos os sinais estão *on*, não é usada em operações com três estados. O conceito foi inicialmente desenvolvido para permitir o controlo eléctrico com apenas um contacto.

## **4.2 - Dispositivos digitais – Interruptores**

Existe um dispositivo básico usado na concretização das entradas dos circuitos digitais, designado por interruptor, que pode apresentar diversas formas.

## Introdução

Um interruptor é um dispositivo eléctrico que permite, ou não, o fluxo de corrente eléctrica num circuito. Podem ser usados de diversas formas, incluindo o movimento de dois materiais condutores num contacto directo (mecânico), ou alterando as propriedades semicondutoras de determinados materiais por aplicação de uma tensão (eléctrico).

Os interruptores são normalmente caracterizados em termos do nível de tensão de funcionamento, tipo de tensão (AC ou DC), máxima corrente que os pode percorrer, capacidade de interrupção de uma corrente máxima, e característica de carga (indutiva ou resistiva). Fazem também parte das características do dispositivo a informação do ambiente em que as propriedades anteriores se mantêm válidas. A Fig. 4.8 descreve as configurações mais comuns de contactos usadas pelas normas industriais, embora existam muitas outras configurações possíveis.

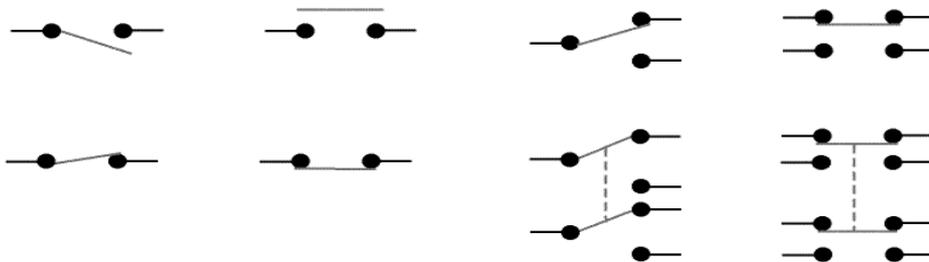


Fig. 4.8 – Configurações de interruptores usadas normalmente.

## Interruptores manuais



Fig. 4.9 – Interruptores manuais.

Os interruptores manuais são usados normalmente como dispositivos de entrada digital e possuem diversas formas, tamanhos e configurações. Existem interruptores de rotação, de selecção, de enclavamento, de pressão, etc. Os três primeiros permitem manter o contacto mesmo depois de deixarem de ser actuados. O último, dependendo da configuração, pode ou não manter o contacto. Existem alguns tipos de interruptores que possuem uma chave, evitando

assim utilizações por pessoal não autorizado. A Fig. 4.9 permite observar alguns tipos de interruptores manuais.

### Interruptores de fim de curso

Estes interruptores convertem movimento mecânico, ou proximidade, em acções de comutação. São normalmente usados nos sistemas automáticos para fornecerem informação ao sistema de controlo de componentes com partes móveis (por exemplo válvulas). Existe uma grande variedade de configurações possíveis. Os interruptores mais comuns são os: fim de curso industriais (Fig. 4.10), interruptores de mercúrio (Fig. 4.11), interruptores de proximidade (Fig. 4.12).



Fig. 4.10 – Interruptores de fim de curso.



Fig. 4.11 – Interruptor de mercúrio.



Fig. 4.12 – Interruptor de proximidade.

### Interruptores de temperatura

Os interruptores de temperatura, também chamados de termostatos, fornecerem informação digital ao controlador do sistema de que a temperatura ultrapassou o limite fixado.

Na construção deste tipo de interruptores são utilizados diferentes princípios básicos, recorrendo-se principalmente aos contactos bimetálicos, à expansão térmica de fluidos, ao estado de congelação e a princípios electrónicos.

Os interruptores bimetálicos usam uma união metálica entre dois metais dissimilares com diferentes coeficientes térmicos de expansão. Quando a temperatura varia, os metais expandem, ou contraem-se, a taxas diferentes o que faz com que exista uma flexão da união.

Os interruptores de temperatura de expansão térmica de um fluido baseiam-se no princípio de que a expansão térmica desse fluido provoca o deslocamento de um fole, diafragma, ou pistão

de forma a abrir ou fechar um contacto. Estes interruptores podem estar ligados, por um tubo capilar, a um controlo remoto. Permitindo assim efectuar remotamente o controlo do interruptor. Um exemplo deste tipo de interruptor pode ser observado na Fig. 4.13.



Fig. 4.13 – Interruptor de expansão térmica do fluido.

Os interruptores de estado de congelação são normalmente usados para prevenir que a água ou vapor de água congelem. Utiliza para isso um fluido na forma de vapor saturado. Este fluido está contido num longo tubo capilar. O tubo, na forma de uma serpentina, é instalado no meio que se pretende monitorar, se o tubo ficar a uma temperatura abaixo da temperatura de saturação, o vapor começa rapidamente a condensar provocando uma rápida mudança na pressão levando a uma actuação do mecanismo de comutação (Fig. 4.14).



Fig. 4.14 – Interruptores de estado de congelação.

### Interruptores de humidade

Este tipo de interruptor é usado para informar o sistema de controlo de que a humidade ultrapassou um determinado limite predefinido. São usados normalmente como indicadores de limites, alarmes, ou simplesmente como controladores *on/off* de humidificadores.

Normalmente são usados materiais higroscópios tais como pêlos de animais, nylon, ou outros materiais plásticos que sofrem variações volumétricas com variações da humidade. A variação volumétrica é amplificada mecanicamente provocando a comutação do interruptor. Esta tecnologia está rapidamente a ser substituída por dispositivos electrónicos.

### Interruptores de caudal

Este tipo de interruptor é usado para informar o sistema de controlo de que o caudal ultrapassou um determinado limite predefinido. Aplicações comuns incluem encravamentos de segurança para caudais de água e ar, pertencentes a aquecedores e a humidificadores eléctricos, a encravamentos de segurança de *chiller's* e a queimadores. Existem numerosas tecnologias disponíveis, mas as mais comuns utilizam tecnologias mecânicas e de pressões diferenciais.

Os interruptores de caudal mecânicos operam sobre o princípio de que a energia cinética de um fluido cria uma força num objecto suspenso nesse caudal. A magnitude da força varia com o quadrado da velocidade do fluido. Várias configurações são usadas para transferir esta força para a operação de um interruptor. As mais comuns incluem turbinas ou pistões.

Os interruptores de caudal do tipo pressão diferencial operam sobre o princípio de que uma diferença na pressão está associada sempre com o caudal do fluido, ou o princípio de que a pressão total de um líquido dinâmico é sempre maior do que a pressão de um fluido estático. Estas diferenças na pressão podem exactamente ser conhecidas para uma dada situação e ser relacionadas com a taxa de caudal.

Podem ser vistos exemplos destas tecnologias na Fig. 4.15.



Fig. 4.15 – Interruptores de caudal.

### **Interruptores de nível**

Estes tipos de interruptores são usados nos sistemas de controlo para obter informação de quando o fluido contido num tanque, ou conduta, atinge uma determinada altura.

As aplicações mais comuns incluem controlo e monitorização do nível em torres de arrefecimento, do nível em tanques de condensação, e do nível em tanques de armazenamento térmico.

São utilizadas diversas tecnologias na construção deste tipo de equipamento. Algumas tecnologias analógicas incluem dispositivos baseados em tecnologias com a utilização de por exemplo: condensadores, ultrassons, indutâncias. Existem também dispositivos deste tipo associados a componentes electrónicos, o que proporciona elevadas acções de controlo. Na Fig. 4.16 pode ser observado um exemplo.



Fig. 4.16 - Interruptor de nível.

### **Interruptores de pressão**

Os interruptores de pressão são utilizados nos automatismos para fornecerem indicação do estado de funcionamento de ventoinhas, filtros e bombas. Além disso podem fornecer informação sobre o caudal e o nível de um determinado fluido em virtude da relação existente entre a pressão e estas grandezas.

Os interruptores de pressão tanto podem ser mecânicos como electrónicos. Os dispositivos mecânicos usam pistões, hélices ou diafragmas e uma ligação quer magnética quer mecânica para converter a força resultante da pressão medida num movimento capaz de accionar um ou mais comutadores.

Os interruptores para baixas pressões, normalmente usados para medir pressões de ar numa gama de 0.05 a 1 psig, usam regra geral um diafragma flexível. Quando se pretende operar a pressões mais elevadas, na gama 1 até 100 psig, usam-se as restantes tecnologias referidas. Na Fig. 4.17 podem ser observados dois exemplos.



Fig. 4.17 – Interruptor de pressão.

### Interruptores de vibração

Estes interruptores são usados para fornecerem um sinal quando os níveis de vibração em maquinaria rotativa, como por exemplo ventoinhas, atingem limites indesejáveis. Ao serem accionados informam o sistema de controlo de que algo está errado, será tarefa do controlador responder com uma acção correctiva. Um exemplo pode ser observado na Fig. 4.18.



Fig. 4.18 – Interruptor de vibração.



Fig. 4.19 – Interruptor de corrente.

### Interruptores de corrente

Estes dispositivos são usados normalmente para monitorar o estado dos equipamentos eléctricos. Regra geral possuem um ou mais pontos de ajuste de funcionamento. Exemplos de aplicações típicas são: conhecimento do estado *on* ou *off* de uma ventoinha ou bomba. Podem também ser usados para protecção eléctrica dos equipamentos, como, por exemplo, evitar sobrecargas em motores eléctricos. Um exemplo pode ser observado na Fig. 4.19.

## 4.3 - Dispositivos analógicos

Existem diversos dispositivos analógicos utilizados no controlo de sistemas automáticos. As categorias principais destes dispositivos incluem (mas não ficam limitadas) a medição de temperatura, da humidade, do ponto de condensação, da pressão, do caudal (líquido, ar, etc), do nível de um líquido, do nível de iluminação, de grandezas eléctricas (corrente, tensão, factor de potência, potência), de energia, de ocupação, de posição, da análise de gases, etc.

### Medição de temperatura

A temperatura foi uma das primeiras grandezas a ser medida, sendo das mais importantes nos processos de controlo e automação industrial. Como se trata de uma grandeza que, regra geral, varia lentamente, permitindo a utilização de técnicas de aquisição de dados relativamente simples. Existem três classes de sensores de temperatura: eléctricos, mecânicos e químicos.

#### Termómetros termoeléctricos

Seebeck descobriu o efeito termoeléctrico em 1821. A física termoeléctrica envolve os efeitos de Seebeck, Peltier, Thomson, Joule e Fourier. Mas de uma forma geral podemos afirmar que quando dois materiais dissimilares se juntam, num dos seus extremos, estabelece-se uma diferença de potencial nas extremidades abertas, se essas extremidades, as abertas e as fechadas, estiverem a diferentes temperaturas. Esta diferença de potencial é o resultado da diferença entre as funções de trabalho de cada um dos materiais.

As seguintes leis empíricas explicam o acoplamento térmico.

- *Lei dos materiais homogéneos* – Uma corrente termoeléctrica não pode ser mantida num circuito constituído por um único material homogéneo apenas pela aplicação de calor. Esta lei indica que são necessários materiais diferentes para a construção de um termopar.
- *Lei dos materiais intermédios* – Esta lei diz que a soma algébrica das forças termoelectromotrizes num circuito composto por um qualquer número de materiais dissimilares é zero, se a temperatura for zero.
- *Lei das temperaturas sucessivas* – Se dois materiais homogéneos dissimilares produzirem uma força electromagnética (f.e.m.)  $E_1$  quando os extremos estão a uma temperatura  $T_1$  e  $T_2$  e uma f.e.m.  $E_2$  quando os seus extremos estão à temperatura  $T_2$  e  $T_3$ , então a f.e.m. gerada quando os extremos estiverem ambos a uma temperatura igual a  $T_3$  será  $E_1 + E_2$ .

Existe um número limitado de combinações metálicas dissimilares. Na Tab. 4.1 é indicada a f.e.m. para algumas associações de materiais.

Como podemos observar o sinal de saída de um termopar é de baixo nível, é por isso normal recorrer a sistemas de amplificação e filtragem antes de utilizar o sinal propriamente dito. Outros factores que influenciam na escolha de um termopar são por exemplo: a precisão, a durabilidade e o meio ambiente onde vão ser instalados.

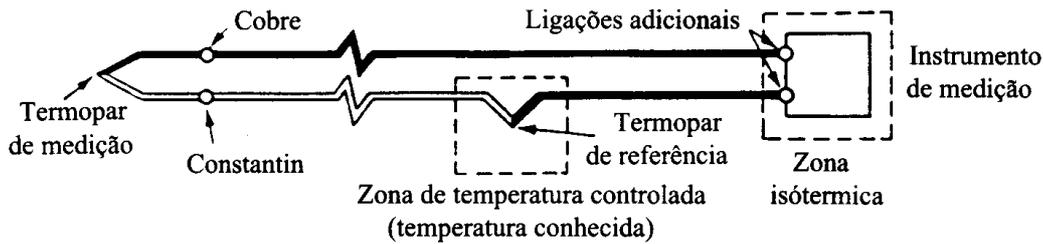


Fig. 4.20 – Esquematização de um termopar.

Na Fig. 4.20 é apresentado esquematicamente um termopar. O termopar de referência deve ser mantido a uma temperatura constante e conhecida.

|   |                            |               |                       |  |
|---|----------------------------|---------------|-----------------------|--|
| E | Crómio/Constantin          | -200 até 850  | ±1.5 °C<br>ou<br>0.5% | alta f.e.m.<br>(56 mV a 750 °C)                    |
| J | Ferro/Constantin           | -200 até 850  | ±3 °C<br>ou<br>0.75%  | Barato<br>média f.e.m.                             |
| K | Crómio/Alumínio            | -200 até 1100 | ±3 °C<br>ou<br>0.75%  | Estável, muito linear<br>(30 mV a 750 °C)          |
| R | Platina 13% Ródio/ Platina | 0 até 1400    | ±2 °C<br>ou<br>0.3%   | muito estável<br>baixa f.e.m.<br>(7 mV a 750 °C)   |
| S | Platina 10% Ródio/Platina  | 0 a 1400      | ±2 °C<br>ou<br>0.3%   | muito estável<br>baixa f.e.m.<br>(6,6 mV a 750 °C) |
| T | Cobre/Constantin           | -250 até 400  | ±2 °C<br>ou<br>0.75%  | Oxida a altas temperaturas<br>(20 mV a 400 °C)     |

Tab. 4.1 – F.E.M. para algumas associações de materiais.

### Termómetros de resistência

A utilização desta técnica requer a utilização de uma montagem que permita a determinação do valor da resistência do sensor. Este tipo de sensor baseia-se principalmente em termistores ou em resistências de metais puros resistivos.

### **Termistores**

As substâncias que são sensíveis à temperatura são, usualmente, denominadas termistores. São produzidas com base em misturas sintetizadas de óxidos metálicos com propriedades semicondutoras. Os termistores, como propriedade básica, apresentam um elevado coeficiente de resistência a temperaturas negativas. Para cada valor de temperatura o termistor apresenta um determinado valor de resistência, variando entre valores típicos de 5000 Ω a 0 °C e os 100 Ω a 150 °C. A sua resistência está relacionada com a temperatura pela relação.

$$R_T = R_0 e^{-\frac{b}{T}} \quad \text{Eq. 4.1}$$

Sendo  $T$  a temperatura expressa em graus Kelvins,  $R_0$  a resistência a  $0\text{ }^\circ\text{C}$  e  $b$  uma constante específica de cada termistor particular. Na Fig. 4.21 podemos observar a curva característica dos termómetros de resistência comparativamente com a de um termistor.

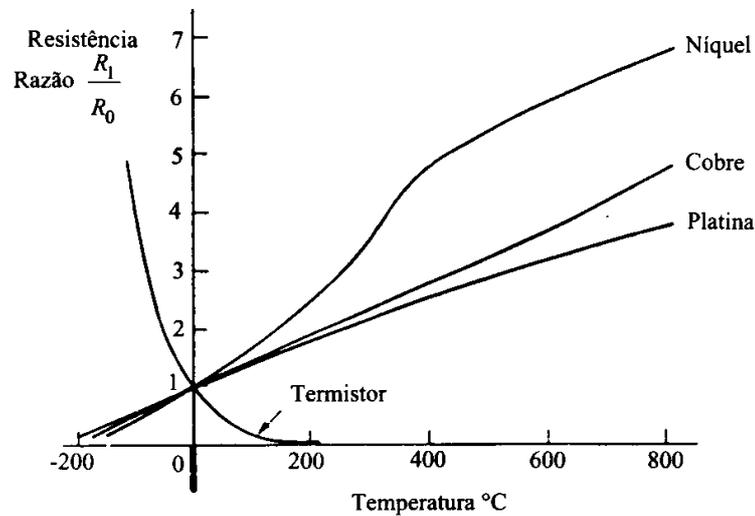


Fig. 4.21 – Curva característica dos termómetros de resistência comparativamente com a de um termistor.

Como podemos facilmente observar a característica do termistor é extremamente não linear, esta particularidade dificulta a sua utilização a nível industrial. De realçar o facto de os termistores serem muito mais sensíveis a pequenas variações na temperatura do que os termopares. Devido à suas reduzidas dimensões apresentam um tempo de resposta rápida às variações da temperatura. Os termistores são principalmente utilizados na gama de temperaturas entre os  $-100\text{ }^\circ\text{C}$  e os  $400\text{ }^\circ\text{C}$ .

### Detectores de temperatura resistivos

Os detectores de temperatura resistivos ou “RTD” (*Resistive Temperature Detectors*) tiveram a sua origem com a descoberta por David, em 1821, de uma relação bem determinada entre a condutibilidade e a temperatura em alguns metais. Este tipo de sensor é de simples utilização, não requer instalação especial, são altamente estáveis e sensíveis. Os RTD’s mais comuns são feitos de Platina, Níquel ou Cobre, apesar do Ferro, Tungsténio e outra ligas poderem também ser utilizadas. Os primeiros materiais têm a particularidade de poderem ser obtidos com elevado grau de pureza. Na Tab. 4.2 podemos caracterizar cada um dos sensores um pouco mais pormenorizadamente.

|         |                          |   |                                 |                                    |
|---------|--------------------------|---|---------------------------------|------------------------------------|
| Cobre   | Linear                   | Pouco precisos devido a pormenores construtivos | Até $100\text{ }^\circ\text{C}$ | Problemas de corrosão e oxidação   |
| Níquel  | Menos linear que o Cobre | Podem ser construídos com reduzidas dimensões   | Até $300\text{ }^\circ\text{C}$ | Problemas de corrosão e oxidação   |
| Platina | muito linear             | Custos de produção elevados                     | Até $850\text{ }^\circ\text{C}$ | Difícilmente é corroído ou oxidado |

Tab. 4.2 – Caracterização de sensores de temperatura resistivos.

Pontes de medida

O método mais utilizado para a medição do valor de uma resistência é a utilização da ponte de Wheatstone. Este método devolve valores bastante satisfatórios. A ponte de Wheatstone é constituída por quatro braços resistivos, uma fonte de tensão contínua e um detector de zero, normalmente um galvanómetro ou outro instrumento sensível à corrente.

A corrente que atravessa o galvanómetro G depende da diferença de potencial entre os pontos C e D (Fig. 4.22).

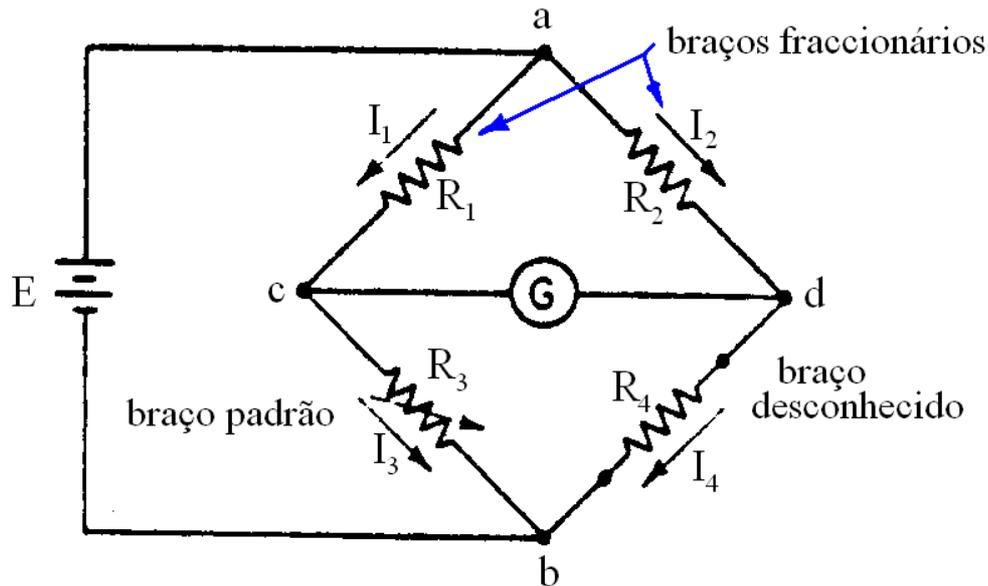


Fig. 4.22 – Ponte de Wheatstone.

Diz-se que a ponte está em equilíbrio se o galvanómetro G indicar zero. Esta situação verifica-se quando a tensão entre os pontos A e C é a mesma que entre os pontos A e D, ou ainda quando a tensão entre os pontos C e B é a mesma que entre os pontos D e B.

A expressão Eq. 4.2 indica condição de equilíbrio da ponte de Wheatstone.

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 \quad \text{Eq. 4.2}$$

Se três das suas resistências têm um valor conhecido, pode-se obter o valor da outra resistência. Por exemplo, se  $R_4$  for desconhecida, teremos

$$R_4 = \frac{R_2}{R_1} \cdot R_3 \quad \text{Eq. 4.3}$$

Nestas condições, a  $R_3$  dá-se o nome de braço padrão, enquanto que  $R_1$  e  $R_2$  são os braços fraccionários que permitem o ajuste da ponte.

As fontes de erro desta ponte podem estar relacionados com factores como: sensibilidade insuficiente do detector de zero; variação dos valores das resistências nos braços da ponte, devido ao aquecimento provocado pela passagem da corrente; e finalmente erros devido à resistência dos contactos e condutores utilizados na construção da ponte.

### Instalação

RTD, termistores, termopares, e sensores encapsulados são dispositivos pequenos e com técnicas de montagem similares para todos os tipos. Sensores para montagem em tubagens e condutas são normalmente instalados em compartimentos apropriados. As ligações podem estar fechadas ou exposta ao ar livre. Sensores para instalação em sistemas de tubagens podem ser montados com imersão directa no fluido ou instalados dentro de capsulas que permitam o acesso aos sensores sem que tenha que se drenar o sistema. Sensores instalados em compartimentos protectores devem ser montados com um permutador de calor a preencher o espaço entre o sensor e o compartimento de forma a garantir um bom contacto entre o fluido a medir e o sensor.

Na medição da temperatura do ar, nomeadamente em condutas grandes, é por vezes desejável uma medida do valor da temperatura do ar, já que esta pode variar significativamente ao longo da secção da conduta. Sensores RTD e termistores foram desenvolvidos de forma a satisfazerem esta exigência usando diversos sensores instalados num elemento tubular flexível. O elemento é tipicamente disposto em forma de serpentina possibilitando assim obter medidas representativas ao longo das secção da conduta.

Sensores para aplicação ao ar livre devem ser localizados em áreas de sombras de forma a prevenir o efeitos de aquecimento da radiação solar. Estes sensores são normalmente fornecidos com uma protecção que reduz os efeitos à exposição directa da luz solar, fornecendo ainda uma protecção extra aos restantes elementos. Em ambiente agressivos, é por vezes desejável que o sensor seja instalado em compartimentos com aspiração para aumentar a sua vida útil e reduzir as necessidades de manutenção. Estes compartimentos incluem tomadas de ar filtrado e ventoinhas de exaustão para manterem um caudal de ar regular no compartimento.

### **Medição de humidade**

Humidade é a presença de vapor de água no ar. A quantidade de vapor de água presente no ar pode afectar o conforto humano e as propriedades de diversos materiais. É um parâmetro que deve ser levado em linha de conta no dimensionamento de sistemas HVAC e pode, portanto, ser necessário efectuar a sua medição para utilização em sistemas de controlo. A quantidade de vapor de água no ar pode ser definida por um de diversos quocientes, que incluem humidade relativa, quociente de humidade, humidade específica, e humidade absoluta. Mas a grandezas mais comuns medida em sistemas HVAC industriais é a humidade relativa.

A humidade relativa é dada pela relação existente entre o número de moléculas de água por unidade de volume da mistura e o número de moléculas de água que devem existir numa mistura saturada à mesma temperatura.

#### Tipos de sensores de humidade relativa

Os sensores de humidade relativa são usados nos sistemas de controlo de HVAC para medirem a humidade relativa em espaços controlados e condutas. Os sensores mais usados incluem película capacitiva, polímeros de carga resistiva e circuitos integrados. Os circuitos

integrados combinam um sensor (normalmente do tipo capacitivo) com circuitos para acondicionarem o sinal.

#### *Película capacitiva*

O sensor de película capacitiva opera segundo o princípio de que variações na humidade relativa provocam uma variação repetitiva e perceptível da capacidade. Devido à natureza da medida, os sensores de humidade capacitivos são combinados com dispositivos que produzem sinais de tensão ou corrente com amplitudes mais elevadas. Os sensores de humidade capacitivos são capazes de efectuar medições numa gama compreendida entre 0 e 100%, em ambientes com variações de temperatura entre os  $-40$  e os  $200^{\circ}$  F. Estes sistemas são construídos com diversas tolerâncias, com os mais vulgares a terem precisão de  $\pm 1\%$ ,  $\pm 2\%$ , e  $\pm 3\%$ . Estes sensores são afectados pela temperatura perdendo assim precisão à medida que a temperatura de funcionamento se afasta da temperatura de calibração.

#### *Polímeros de carga resistiva*

Estes sensores usam o princípio de que a resistência varia ao longo de um polímero com as variações da humidade relativa, sendo repetitiva e mensurável.

Como no caso dos sensores anteriores, estes são também associados a dispositivos que amplificam o sinal de saída, quer seja um sinal de corrente quer seja um sinal de tensão.

Estes sensores são capazes de efectuar medições de humidades relativas entre os 0 e os 100% em ambientes com temperatura a variar entre os  $-20$  e os  $140^{\circ}$  F. Estes sistemas são disponibilizados com diversas tolerâncias, sendo as mais comuns  $\pm 2\%$ ,  $\pm 3\%$ , e  $\pm 5\%$ .

Também neste caso o desempenho do sensor é afectado pela temperatura, ou seja, à medida que a temperatura de funcionamento se afasta da temperatura de calibração a precisão vai piorando.

### **Medida de condensação**

O ponto de condensação é a temperatura a que o ar deve ser arrefecido com pressão constante para que ocorra condensação. Pode ser um parâmetro importante a considerar em algumas aplicações HVAC (*Heating, Ventilation, Air-Conditioning*) onde seja possível que aconteça condensação indesejada, devendo por isso ser medida e controlada.

#### *Métodos para medir a condensação*

A medição do ponto de condensação no controlo de sistemas HVAC é principalmente feita por medição indirecta. Medindo a temperatura e a humidade relativa pode-se determinar o ponto de condensação utilizando fórmulas empíricas.

#### *Cálculo utilizando a temperatura e a humidade relativa*

É prática comum quando se mede a humidade relativa, associar um sensor de temperatura ao mesmo dispositivo que efectua a medida da humidade relativa. Usando um microprocessador é

então possível determinar o ponto de condensação. A precisão está limitada pela combinação da precisão dos sensores e da electrónica utilizada, sendo tipicamente de  $\pm 1.8$  °F. Normalmente, estes dispositivos podem ser configurados para fornecerem a humidade, a temperatura, a humidade absoluta e o ponto de condensação.

### Medição de pressão

A medição desta grandeza é de grande importância nos ambientes industriais, mas é difícil obter o seu valor de uma forma directa. O processo normalmente utilizado consiste em traduzir o valor da pressão num deslocamento, e com base neste deslocamento obter um sinal eléctrico fornecido por um sensor de deslocamento. É importante referir que a pressão é uma força por unidade de área, de modo que todos os sensores utilizados para a medição de forças podem ser utilizados para a medição de pressões.

#### *Transdutores capacitivos de pressão*

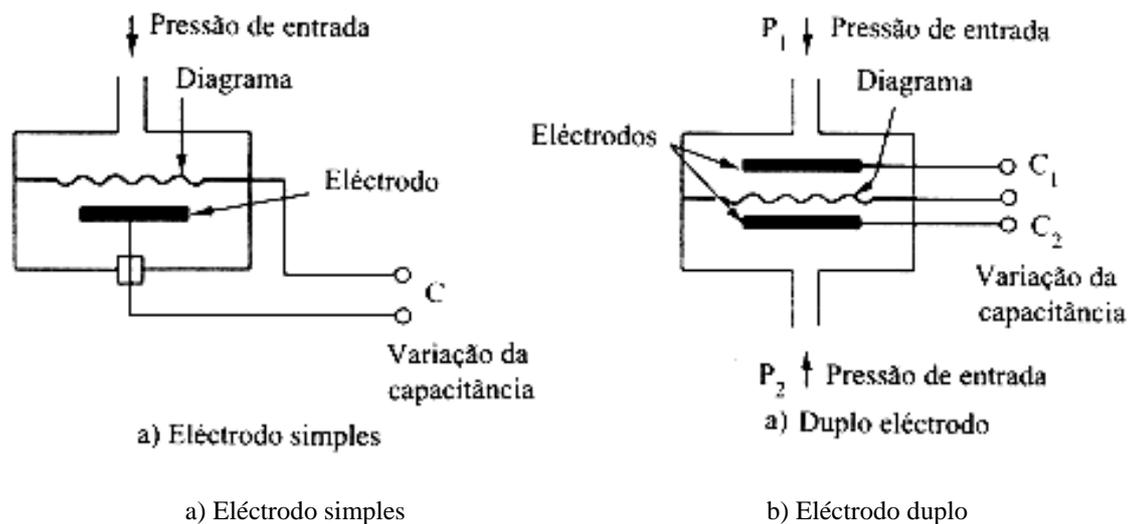


Fig. 4.23 – Transdutores capacitivos de pressão.

Estes transdutores utilizam a alteração da capacidade, que ocorre quando um diafragma se desloca relativamente a um dos eléctrodos. Estes sensores existem em duas configurações possíveis. A Fig. 4.23 ilustra dois casos da primeira configuração, em que se usa um eléctrodo simples e um eléctrodo duplo. Em ambos os casos a alteração da capacidade resulta da deformação, pela pressão a medir, do diafragma.

A segunda configuração, apresentada na Fig. 4.24, baseia-se na utilização de um diafragma móvel situado entre dois eléctrodos fixos. A alteração da capacidade é obtida utilizando 4 células de extensómetros.

O intervalo de pressões possível de medir com este sistema é limitado, condicionado pela espessura do diafragma a variações de 0.1 mm sem que se originem grandes tensões induzidas. As gamas típicas de medida são apresentadas na Tab. 4.3.

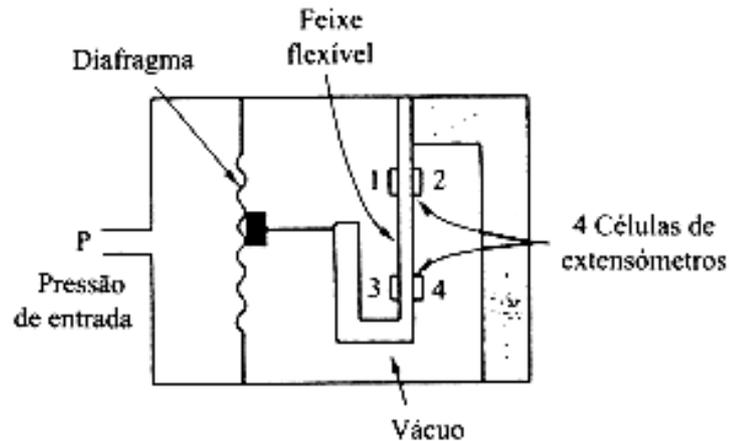


Fig. 4.24 – Transdutores capacitivos de pressão.

| Configuração de medida | Gamas de pressão | Tempo        |
|------------------------|------------------|--------------|
| Diferencial            | 1 Pa – 1.2 kPa   | 0.15 – 2.0 s |
| Extensómetro           | 1 Pa – 200 kPa   | 0.2 s        |
| Absoluta               | 0.01 Pa – 150 Pa | 10 ms        |

Tab. 4.3 – Gama de tensão possíveis de medir com transdutores de pressão capacitivos.

A alteração da capacidade com a pressão é bastante linear ( $\pm 0.5\%$ ) e pode ser medida através de circuitos electrónicos de modo a se obter uma precisão de  $\pm 0.2\%$ . A sensibilidade à temperatura é cerca de  $20 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ .

### Sistema de equilíbrio de forças

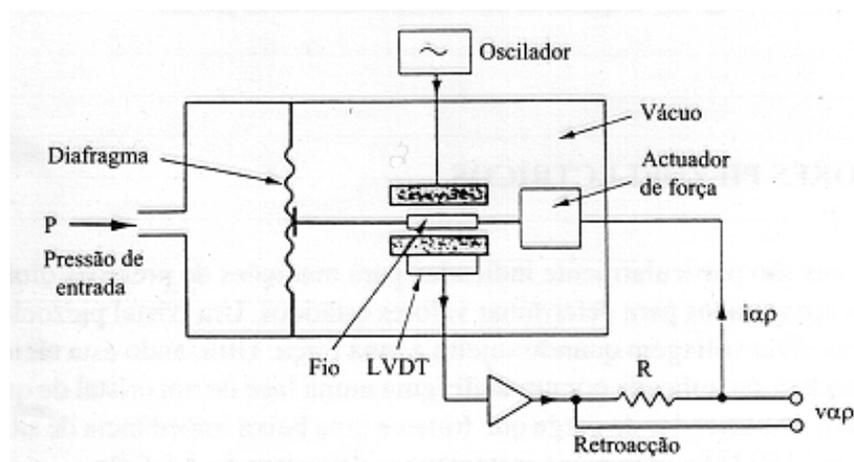


Fig. 4.25 – Transdutor de pressão de balanço de forças.

Como o nome indica, este método utiliza a realimentação ("feedback"). Sempre que se dá a aplicação da pressão esta causa um deslocamento, o qual é detectado e reduzido a zero. A força necessária para obter o deslocamento nulo é a medida da pressão aplicada. A Fig. 4.25 ilustra os princípios operativos desta técnica utilizando um LVDT como transdutor de deslocamento. Como se pode verificar, gera-se uma voltagem proporcional à pressão aplicada. Os transdutores de pressão utilizados na gama de 0 a 500 kPa têm precisões de  $\pm 0.2\%$  e tempos de resposta de 0.5 seg a 5.0 seg.

## Medição de caudal

### Anemómetro de fio quente

Este método, para medição de caudais, baseia-se no efeito de arrefecimento de um elemento resistivo através de um caudal de fluido.

O efeito arrefecedor ou perda de calor, de um elemento resistivo, depende da velocidade mássica do fluido, do calor específico do fluido, do coeficiente de transmissão de calor do elemento resistivo e da temperatura e pressão do fluido.

Existem duas técnicas de medição: com corrente constante e temperatura constante (ou voltagem) com duas possíveis configurações físicas: fio e filme. Ambas as técnicas utilizam o mesmo princípio físico para determinar a resistência do sensor.

O elemento sensor é aquecido até uma temperatura acima da do fluido. Através de perdas por convecção à superfície do elemento, é obtido um equilíbrio entre o calor gerado e o calor perdido. Tal efeito é conseguido quer mantendo constante a corrente e medindo a resistência, quer mantendo constante a tensão e medindo a corrente.

A técnica da temperatura constante é preferível, em alternativa à técnica de corrente constante, pelo facto de o filamento poder arder se a velocidade do fluido cair bruscamente. O fio condutor utilizado é muito frágil, tendo cerca de 3 mm de comprimento e 5 a 9 microns de espessura. Na Fig. 4.26 é possível observar esquematicamente um sensor deste tipo com os respectivos detalhes de instalação.

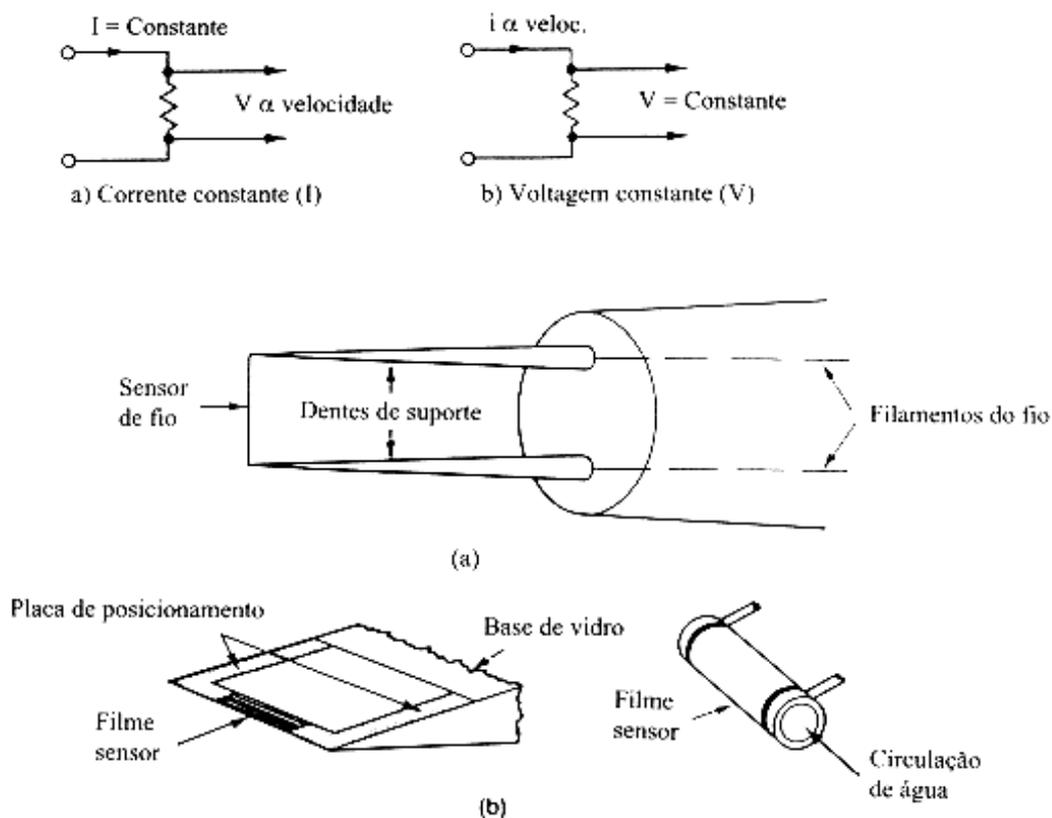


Fig. 4.26 – Anemómetro de fio quente.

As sondas de filme são mais robustas e podem ser arrefecidas a água para medições de altas temperaturas. Devem ser tomadas as seguintes precauções no uso de anemómetros de sonda quente:

- ❑ a sonda tem que estar alinhada com o escoamento;
- ❑ o fluido deve estar limpo afim de evitar possíveis danos no elemento resistivo;
- ❑ os líquidos condutores podem dar origem à electrólise, devendo o sensor ser isolado ou excitado com corrente alternada;
- ❑ podem ocorrer vibrações a altas velocidades, danificando assim o sensor.

Estes sensores são utilizados para medir velocidades de gases de 0.1 m/seg até 500 m/seg a temperaturas até 750 °C. As velocidades dos líquidos vão deste os 0.01 m/seg até aos 5 m/seg, isto no caso de se utilizar sensores de fio, ou dos 0.01 m/seg até aos 25 m/seg se forem utilizados sensores de filme.

### **Medição do nível de um líquido**

A medição do nível de um líquido é usado em muitos sistema de controlo HVAC. Servem para monitorizar e controlar o nível em tanques de armazenamento térmico, torres de arrefecimento, sistemas de tanques de água, tanques pressurizados, etc.

#### Tipos de sensores de nível líquidos

São utilizadas diversas tecnologias, as mais comuns são baseadas na medida de pressões hidroestáticas, de ultrassons, da capacidade eléctricas, ou dos efeitos magnéticos.

#### Pressões hidroestáticas

A medição do nível de um líquido utilizando a pressão hidroestática é baseada no princípio físico de que a diferença entre a pressão hidroestática, existente entre o topo e o fundo de uma coluna de líquido, está relacionada com a densidade do líquido e a altura da coluna. Para tanques abertos apenas é necessário medir a pressão no nível mais baixo. Para tanques pressurizados é necessário obter a pressão de referência acima do nível mais alto monitorizado.

#### Ultrassons

Os sensores de nível por ultrassons emitem ondas sonoras e operam no principio de que o líquidos reflectem as ondas sonoras de retorno à origem, e que o tempo decorrido entre o envio e a recepção da onda é proporcional à distância entre a superfície do líquido e o sensor. Uma vantagem da tecnologia ultrassonora é que não necessita de estar em contacto com o líquido. Existem disponíveis sensores com capacidade de detectar níveis até 200 pés. A precisão vai dos 1% até aos 0.25% com uma resolução de cerca de 1/8".

### Capacitivos

Estes sensores operam segundo o princípio de que um circuito capacitivo pode ser constituído entre um ponta de prova e uma das paredes do tanque. A capacidade do circuito irá mudar com a variação do nível dado que os líquidos comuns possuem constantes dieléctricas maiores do que o ar. Esta variação é proporcional à variação do nível.

### **Medição do nível de iluminação**

Os sensores de nível de iluminação são normalmente usados para ligar ou desligar os sistemas de iluminação, de forma a manter os níveis de conforto dentro dos padrões estabelecidos. A precisão deste tipo de sensores é normalmente de  $\pm 1\%$ . Na Fig. 4.27 pode ser observado um exemplo.



Fig. 4.27 – Sensor de iluminação.

### **Medição de grandezas eléctricas**

A monitorização dos sistemas eléctricos é efectuada pelos controladores de sistemas afim de proteger os componentes do sistema, determinar a potência e o consumo energéticos dos vários componentes, e implementar estratégias de controlo dos consumos energéticos. Existe uma grande variedade de equipamentos e respectivas técnicas associadas para concretizar estes objectivos.

#### Dispositivos para medição de grandezas eléctricas

Existem diversos aparelhos no mercado que permitem medir grandezas eléctricas. Os mais comuns nos sistemas de controlo são os sensores de corrente eléctrica e a aparelhagem para medida de consumos eléctricos de energia.

#### Sensores de corrente

Estes sensores são usados nos sistemas de controlo para monitorizar a corrente fornecida ao motores, aquecedores, etc. As suas entradas podem ser utilizadas para efeitos de limitação dos requisitos energéticos. O elemento sensor de um transdutor de corrente é normalmente um transformador de corrente. Transforma a corrente a ser monitorizada, normalmente de elevado valor, numa corrente proporcional mais baixa. Os transformadores de corrente possuem terminais de carga e terminais de medida, ou podem ter um arranjo que possibilite a passagem do

circuito que se pretende monitorizar pelo interior de um circuito magnético, induzindo assim uma corrente no transformador. Para permitir a medição de correntes, sem que para isso tenha que se abrir o circuito, utilizam-se transformadores de corrente em que é possível abrir o núcleo ferromagnético. A ordem de precisão ronda os  $\pm 0.5\%$ . Na Fig. 4.28 é possível visualizar um exemplo deste tipo de sensor.



Fig. 4.28 – Transformador de corrente.

#### Aparelhagem de monitorização

Tipicamente este tipo de aparelhagem permite monitorizar as seguintes grandezas eléctricas, tais como: potência activa (kW); potência reactiva (kVAR); energia activa (kW/h); energia reactiva (kVARh); tensão (V); corrente (A); frequência (Hz); factor de potência.

Alguns tipos de equipamentos permitem, para além da leitura local, comunicar com sistemas informáticos, possibilitando assim a utilização destes dados na implementação de sistemas de controlo digitais. Outro tipo de aparelhagem de medição de consumos eléctricos disponibiliza uma saída de impulsos. Sendo o número de impulsos nesta saída proporcional à quantidade de energia consumida.

#### **Medição de ocupação**

Os sensores de ocupação são normalmente usados nos sistemas de controlo de edifícios para comandar sistemas de iluminação e de ar condicionado. Estes sensores permitem desligar os sistemas de iluminação quando ninguém é detectado. Possibilitando uma grande poupança de energia. Os principais sensores de ocupação usam princípios de detecção de movimento ou alterações de fundo na radiação infravermelha emitida por um ser humano. Estes sensores de ocupação incorporam por vezes sensores de iluminação para reduzirem a iluminação artificial quando a iluminação natural é suficiente.

#### **Medição de posição**

Os sensores e transdutores de posição fornecem, com elevada precisão, a posição dos componentes móveis do sistema, por exemplo válvulas, amortecedores, etc. Os métodos mais vulgarizam utilizam potenciômetros ou LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*).

Nas figuras Fig. 4.29, Fig. 4.30, Fig. 4.31 e Fig. 4.32 podemos observar o esquema e os diagramas do circuito constituído por um transformador diferencial linear variável. Este tipo de sensor é usado para medir deslocamentos de translação, sendo excitados por uma fonte de tensão com um valor eficaz entre os 3V e os 5V, e uma frequência de 50Hz a 20kHz.

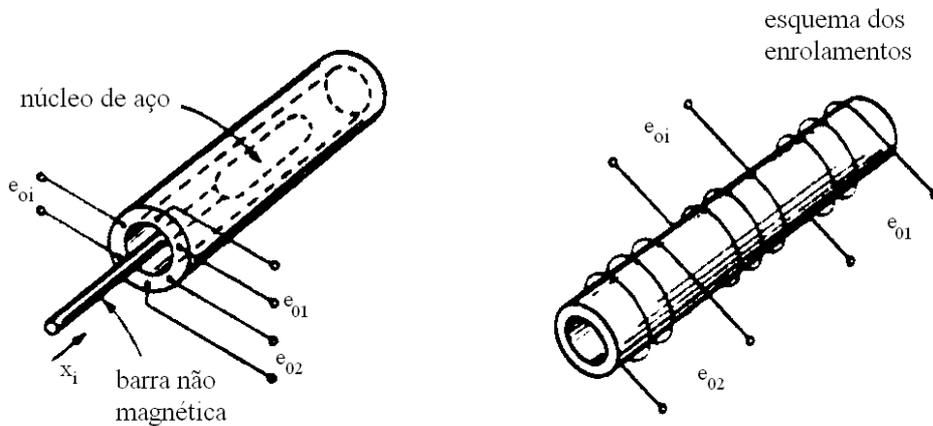


Fig. 4.29 – Transformador diferencial linear variável. Esquema dos enrolamentos.

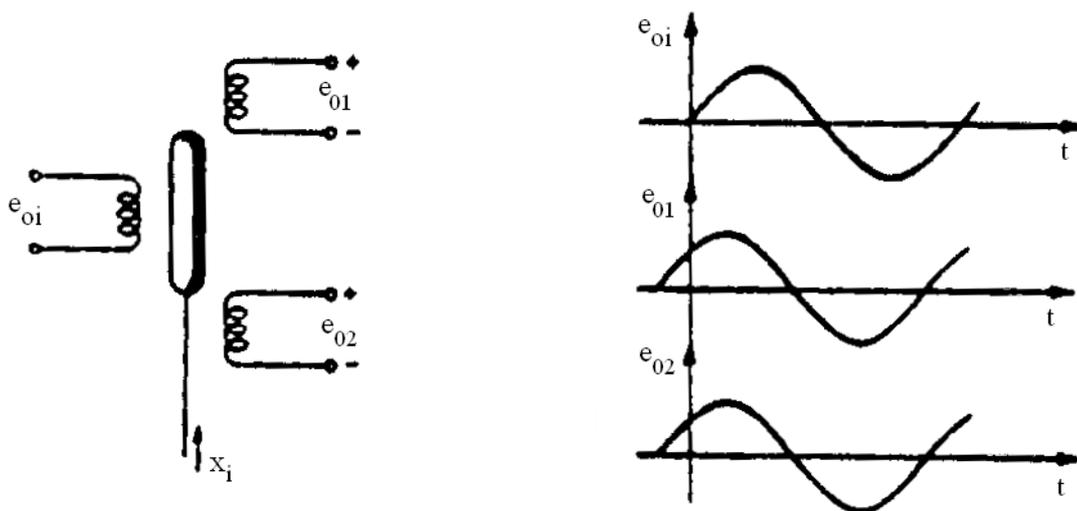


Fig. 4.30 – Transformador diferencial linear variável. Núcleo na posição central (nulo).

Nos dois enrolamentos secundários são induzidas tensões  $e_{01}$  e  $e_{02}$  com a mesma frequência da excitação do enrolamento primário. No entanto, as amplitudes das tensões induzidas variam com a posição do núcleo de ferro. Quando se utiliza uma ligação em série dos secundários em oposição, existe uma posição central do núcleo para o qual a tensão de saída resultante é nula. Com uma variação da posição do núcleo dá-se uma variação da relutância do circuito, variando assim o valor da tensão de saída  $e_0$ . Na passagem pelo ponto de deslocamento nulo dá-se uma inversão de fase do sinal de saída  $e_0$ .

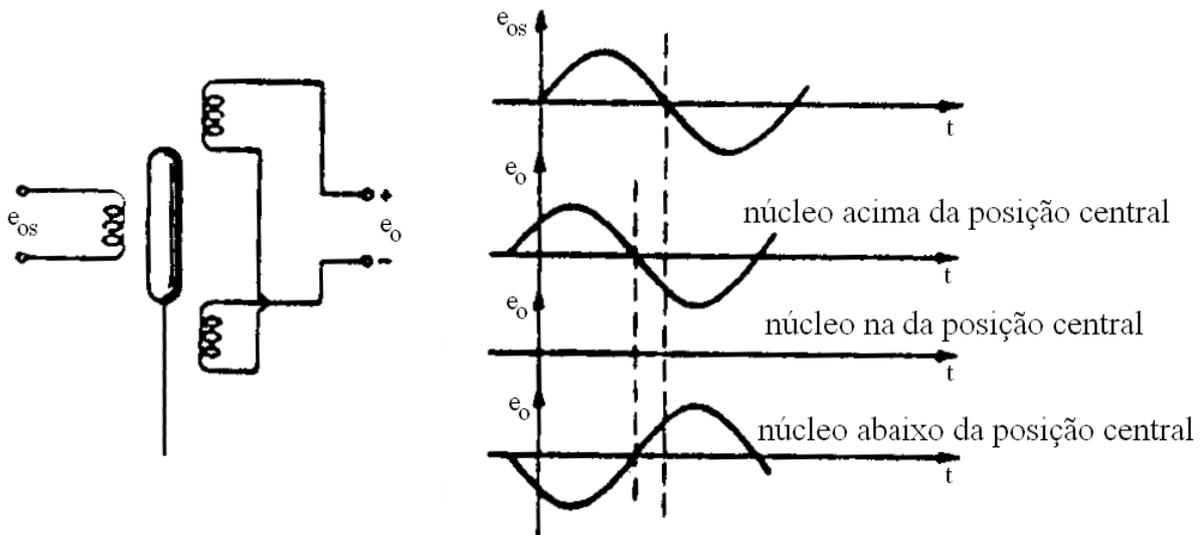


Fig. 4.31 – Transformador diferencial linear variável. Secundários ligados em série, em oposição de fase.

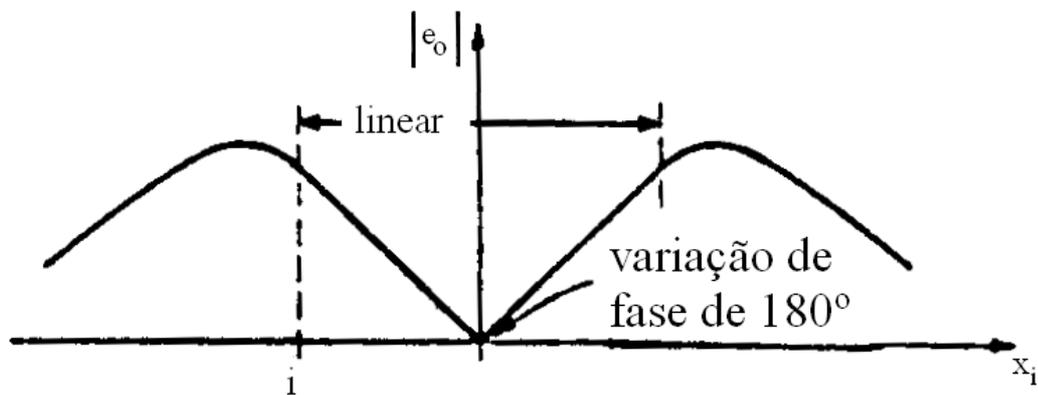


Fig. 4.32 – Transformador diferencial linear variável.

Com uma construção cuidadosa  $e_o$  pode ser uma função praticamente linear. Quando se realiza a medição da força, o LVDT pode atingir precisões da ordem de  $\pm 0.1\%$  numa gama de temperaturas entre  $-500^\circ\text{C}$  e  $100^\circ\text{C}$ . Os erros de escala completa são usualmente de  $\pm 5\text{ mm}$ , e o sinal de saída de  $40\text{ mV/V}$ .

### Medição da concentração de gases

A qualidade do ar respirado no interior dos edifícios é cada vez mais um factor a ter em conta. Também a existência potencial de gases perigosos tem fomentado a inclusão de sensores para a medição da concentração de gases nomeadamente em sistemas de controlo HVAC. Existem diversos dispositivos no mercado, na Fig 4.33 vemos um exemplo.



Fig. 4.33 – Sensores de concentração de gases.

### Dispositivos para medida da concentração de gases

Os gases mais normalmente medidos em sistemas de controlo HVAC são: monóxido de carbono, dióxido de carbono, gases refrigerantes.

#### Monóxido de carbono

Este gás, extremamente venenoso, é gerado pela combustão incompleta de combustíveis fósseis. Podendo ser gerado por qualquer equipamento que queime fuel, incluindo os motores de combustão interna. Estes sensores são usados para operarem equipamentos de ventilação para prevenir que os níveis de monóxido de carbono se tornem demasiado perigosos em compartimentos com pouca ventilação. Por exemplo, garagens, túneis, etc.

Estes sensores existem em versões que fornecem sinais discretos correspondentes a níveis específicos de concentração, ou existe em versões que fornecem uma saída em tensão proporcional à concentração do gás.

#### Dioxido de carbono

Este gás, não tóxico, é produzido pela respiração de organismos vivos, pela combustão completa de carvão, e pela fotossíntese nas plantas, existindo no ar livre numa concentração perto das 320/350 ppm. É monitorizado pelos sistemas de controlo HVAC para garantir uma qualidade do ar aceitável dentro dos edifícios.

A tecnologia mais usada normalmente é denominada por NDIR (*Non-Dispersive Infra-Red*). Baseando-se no princípio de que o dióxido de carbono absorve a radiação infravermelha num determinado comprimento de onda. A atenuação de uma fonte de infravermelhos pode ser relacionada com a concentração de gás numa gama de 0 a 5000 ppm com uma precisão de  $\pm 150$  ppm.

### Gases de refrigeração

Os sensores destes gases são normalmente usados desde que entrou em vigor regulamentação que exige o seu uso em sistemas de ventilação de emergência. São aplicados em sistemas de evacuação de gases de refrigeração de máquina situadas em salas fechadas.

Existem no mercado diversos sensores para as famílias de gases CFC (*Chlorofluorocarbon*), HFC (*hydrofluorocarbon*) e HCFC (*Chlorodifluoromethane*). Existindo, no entanto, sensores com a capacidade de detectar gases específicos. Os mais comuns baseiam-se em infravermelhos, ou efeitos foto-acústicos.