

Capítulo I I

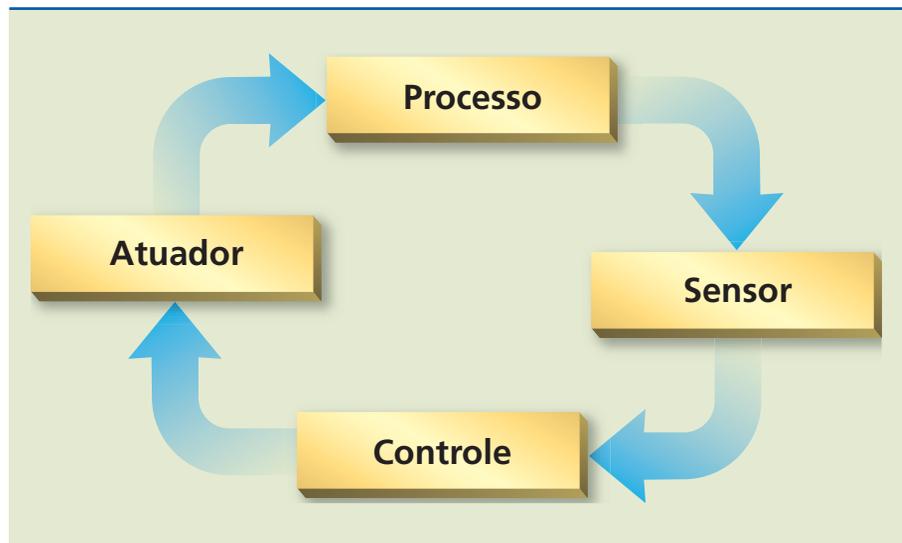
Sensores

A automação está diretamente ligada ao controle automático, ou seja, à execução de ações que não dependem da intervenção humana. Um dos objetivos principais da automação é obter a melhora da produtividade e da qualidade dos processos considerados repetitivos.

Os sistemas automatizados podem ser aplicados em um simples equipamento ou em toda uma indústria, como, por exemplo, um processo de manufatura ou um processo petroquímico. Simplificadamente, um processo sob controle possui um diagrama bem parecido com o que vemos na figura 11.1, em que temos, em lados opostos, os sensores e os atuadores.

Figura 11.1

Fluxograma simplificado de um sistema de controle.



Os sensores são os elementos que fornecem informações sobre o processo, correspondendo às entradas do sistema de controle. Eles podem indicar variáveis físicas, como pressão e temperatura, ou simples estados, como uma chave de fim de curso posicionada em um cilindro pneumático.

No processo, definimos como atuadores os dispositivos responsáveis pela realização de trabalho.

Há vários tipos de atuadores. Entre eles, podemos citar os magnéticos, os hidráulicos, os pneumáticos, os elétricos, ou aqueles com acionamento misto.

O sistema de controle é responsável pela comparação do valor da variável controlada e o valor desejado. O resultado dessa comparação é usado para calcular a ação corretiva necessária e emitir o sinal de correção para o atuador.

O sistema de controle tem uma tarefa especial, que é a medição das variáveis envolvidas no processo, etapa fundamental para o bom desempenho desse sistema. Medir uma variável equivale a adquirir dados e comparar as quantidades envolvidas na grandeza associada a essa variável com a quantidade padrão, estabelecida previamente.

Dá-se o nome de instrumentação às técnicas e dispositivos empregados na medição, tratamento e transmissão das variáveis do processo na área industrial.

Os instrumentos utilizados para realizar essas medições, denominados sensores, são classificados de acordo com a grandeza física que medem. A resposta de saída dos sensores pode ser da mesma espécie ou de outra diferente, reproduzindo certas características do sinal de entrada, com base em uma relação definida. A classificação dos sensores usados na maioria dos processos industriais divide-se em medidores de temperatura, de nível, de pressão e de vazão.

11.1 Medição de temperatura

O conceito de temperatura nos diz que ela indica indiretamente o grau de agitação molecular de um corpo, enquanto a energia térmica é o somatório de energia cinética das moléculas do corpo. O calor é definido como energia térmica em trânsito, que se transmite normalmente do corpo com maior energia (maior temperatura) para o corpo com menor energia (menor temperatura). Em linguagem menos precisa, como dito popularmente, do corpo mais “quente” para o corpo mais “frio”. Incitamos o leitor a utilizar a linguagem tecnicamente mais precisa.

Vamos conhecer os elementos de sensoreamento de temperatura mais importantes nos processos industriais.

11.1.1 Elemento bimetálico

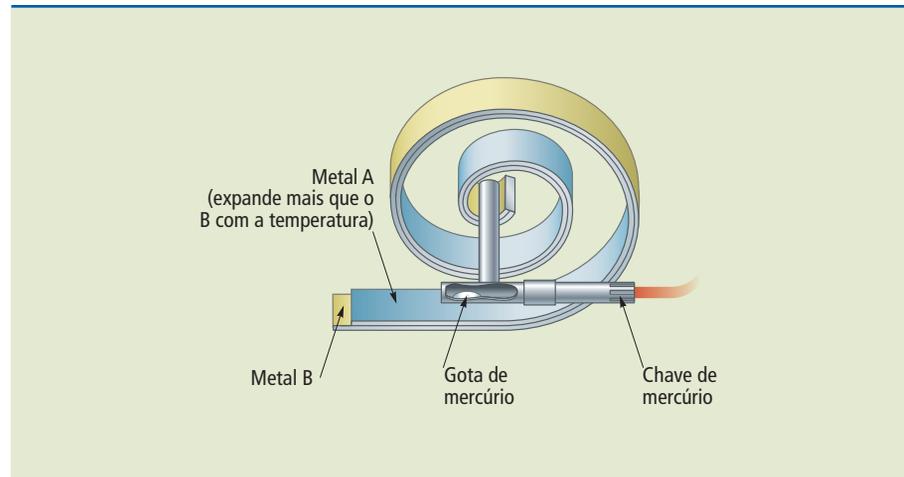
O termômetro bimetálico é um equipamento composto por duas lâminas sobrepostas e rigidamente solidárias (ligadas/soldadas). Os metais que compõem a lâmina possuem coeficientes de dilatação diferentes; com a mudança de temperatura do conjunto, observa-se um encurvamento, devido à dilatação diferente dos metais, proporcional à temperatura. Em um formato especial e sempre muito utilizado, a lâmina bimetálica é enrolada em forma de espiral ou hélice. Esses formatos possibilitam o aumento da sensibilidade.

Normalmente, utilizamos em uma parte uma liga ferro-níquel com baixo coeficiente de dilatação e, em outra o latão, como metal de alto coeficiente de dilatação. O par metálico tem grande eficiência na medição de temperatura. Em automação industrial, elementos bimetálicos são muito usados, e também são empregados na construção de termostatos e dispositivos de proteção. A figura 11.2

mostra o princípio de funcionamento de uma chave elétrica tipo ON-OFF (liga-desliga) com fechamento do contato com mercúrio.

Figura 11.2

Princípio de funcionamento.



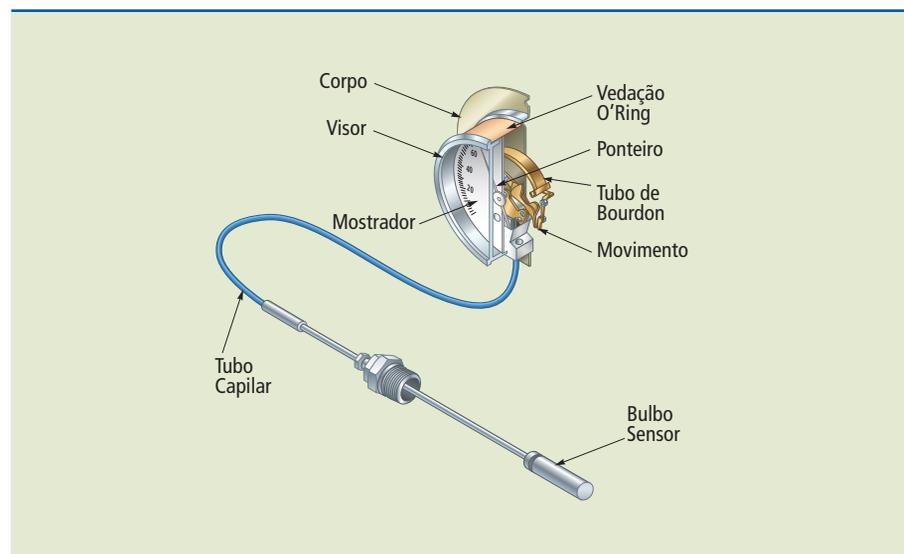
Esse tipo de sensor tem como características principais o baixo custo, a construção robusta, tempo de resposta elevado (o tempo de resposta é o tempo necessário para que o medidor faça a leitura correta após o início da medição) e aplicação nas faixas de temperatura entre $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

11.1.2 Elemento bulbo-capilar

Nesse elemento de medição, um fluido preenche todo o recipiente do bulbo sensor e se dilata devido ao efeito de aumento de temperatura, deformando um tubo de Bourdon (sensor volumétrico).

Figura 11.3

Exemplo de um termômetro bulbo-capilar.



Nesse tipo de sensor, o fluido pode ser um líquido volátil e o dispositivo poderá medir temperaturas entre $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Caso o fluido cuja temperatura se deseja medir esteja no estado de vapor, a faixa de temperatura poderá situar-se

entre $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se o fluido for um gás, a temperatura a ser medida deverá estar na faixa entre $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+760\text{ }^{\circ}\text{C}$ e, se for mercúrio, poderá estar entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $600\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Esse tipo de sensor tem como características principais o baixo custo, a robustez e a capacidade de ser acoplado a um transmissor ou a um termostato. A deflexão sofrida pelo tubo de Bourdon é proporcional à pressão, e a pressão é proporcional à temperatura, resultando em uma relação linear (na faixa de medições indicada pelo fabricante). As variações na temperatura ambiente podem afetar a leitura do instrumento e devem ser compensadas pelo uso de uma lâmina bimetálica.

11.1.3 Sensor por resistência elétrica

São sensores de temperatura que se baseiam no fato de que os metais aumentam sua resistência elétrica com o aumento de temperatura. Os exemplos mais comuns desses tipos de sensores são: o RTD, sensor por termorresistência ou Pt 100 e o termistor.

Sensor RTD

O nome RTD é a sigla, em inglês, de *resistance temperature detector*. Também conhecido como bulbo de resistência de fio metálico, pode ser constituído de platina, níquel, cobre ou liga de 70% Ni e 30% Fe. Ver figura 11.4.

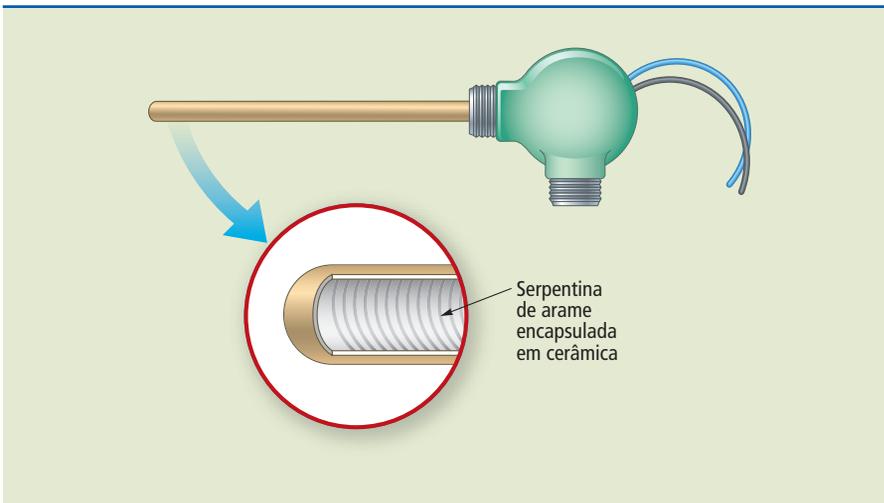


Figura 11.4

Medidor de temperatura por resistência RTD.

A platina é o material mais utilizado para os RTDs, pois apresenta comportamento muito linear na resistência *versus* temperatura e tem uma escala de operação relativamente ampla. A platina é um elemento muito estável, o que assegura a estabilidade em longo prazo. Os sensores de platina têm sido fabricados com elementos de resistência muito finos, que usam pouca platina, o que faz RTDs de platina competirem em preço com outros metais (a platina é um material muito caro). O sensor RTD apresenta boa precisão, superando os termopares.

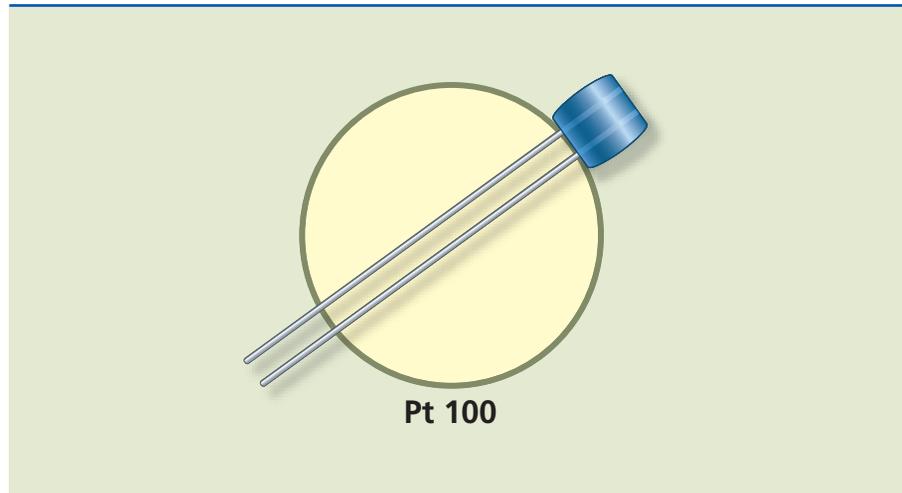
Sensor por termorresistência – PT 100

É constituído de platina e possui uma resistência padronizada de 100 ohms à temperatura de 0 °C e 138,4 ohms a 100 °C. Apresenta na medição de temperatura boas características de estabilidade, repetibilidade e resolução, além de ampla faixa de medição (–250 °C a +850 °C). É um componente muito preciso e estável, porém possui baixa sensibilidade e resposta lenta a variações bruscas de temperatura, além de apresentar alto custo. Os PT 100 são da classe dos *platinum resistance thermometers*, ou PRTs.

Existem diversas formas de apresentação dos elementos PT 100, mas normalmente se encontra o dispositivo na forma de serpentina ou de um fino filme de platina encapsulados em um sistema de proteção, por serem extremamente frágeis. Ver o elemento PT 100 (sem encapsulamento) na figura 11.5.

Figura 11.5

Elemento Pt 100 fabricado com filme de platina.



Os sensores Pt 100 fabricados na forma de filme fino de platina são manufaturados de forma similar àqueles fabricados como circuito integrado. Um filme fino de platina é depositado sobre um substrato cerâmico, que é então encapsulado, gerando um dispositivo pequeno, de resposta rápida e de sensoreamento muito bom.

Termistores

Os termistores, também conhecidos como resistores termicamente sensíveis, são dispositivos fabricados de materiais semicondutores, tais como: óxido de manganês, cobalto, ferro, níquel e titânio e apresentam grandes variações da resistência com a variação da temperatura. Essa variação da resistência com a temperatura pode resultar em um coeficiente negativo da resistência: NTC (*negative thermal coefficient*), onde a resistência diminui com um aumento na temperatura. Nos casos em que a resistência aumenta com um aumento na temperatura PTC (*positive thermal coefficient*), o resultado é um coeficiente positivo da temperatura. Em ambos os casos tem-se aplicação para temperaturas entre –100° C e 300° C.

Podem ser encontrados modelos de termistores tanto de baixa precisão (5 a 10%) quanto de alta precisão ($\pm 0,05^\circ \text{C}$), sendo os primeiros utilizados como proteção e os mais precisos para medição.

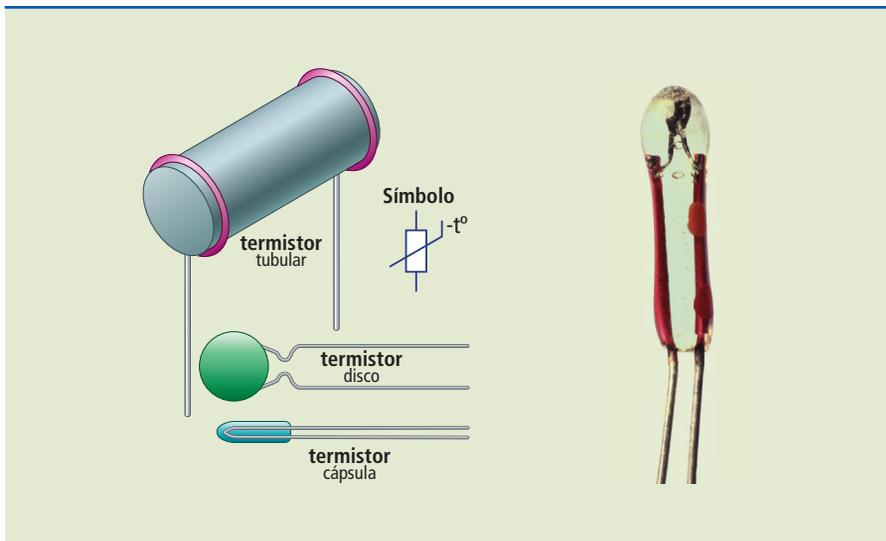


Figura 11.6

a) Diferentes tipos de termistores;
b) termistores de alta precisão encapsulados com resina epóxi.

A grande vantagem dos termistores em relação a outros sensores de temperatura reside em seu tamanho reduzido, facilitando o posicionamento na região em que se deseja efetuar a medida.

11.1.4 Termopar

O termopar é um elemento constituído de um par de condutores metálicos diferentes, unidos em uma extremidade formando uma ligação denominada junção quente ou de detecção. A outra extremidade, a chamada junção fria ou ponto de referência, é conectada a um instrumento de medição elétrica, por exemplo, um milivoltímetro ou um circuito (ver montagem na figura 11.7).

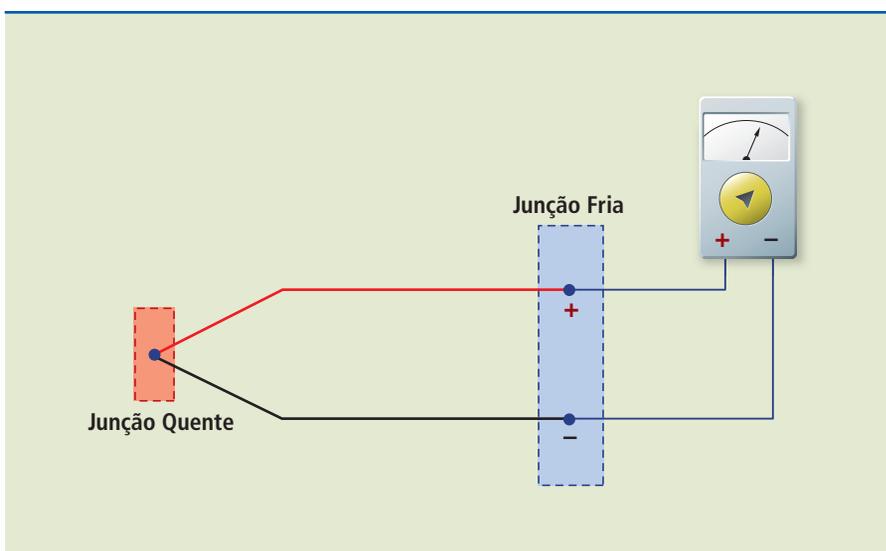


Figura 11.7

Funcionamento de um termopar:

Esses elementos são muito utilizados na área industrial pela capacidade que possuem de medir uma grande faixa de temperatura, geralmente variando entre $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $1\ 800\text{ }^{\circ}\text{C}$, com respostas muito rápidas.

Ao subir a temperatura da junção quente do termopar, há uma diferença de temperatura entre as junções, o que provoca um fluxo de corrente no circuito, devido às duas forças eletromotrizes geradas nas junções.

A diferença de potencial resultante é medida em um milivoltímetro, ou em um potenciômetro, e convertida em graus de temperatura.

Os termopares dividem-se em três categorias: padronizados de metal nobre (R, S, B); padronizados de metal base (K, J, N, E, T); e não definidos por letras. Na prática, a distinção entre “base” e “nobre” é o fato de que metais nobres contêm platina, e metais base contêm níquel.

Termopar tipo T (cobre/cobre-níquel, $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $370\text{ }^{\circ}\text{C}$): sua principal característica é a excelente resistência à corrosão, sendo bastante utilizado em temperaturas negativas.

Termopar tipo J (ferro/constantan, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $800\text{ }^{\circ}\text{C}$): é indicado para aplicações no vácuo e em atmosferas oxidantes. É contraindicado para locais que contenham enxofre, por causa de interações químicas.

Termopar tipo E (níquel-cromo/cobre-níquel, $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $870\text{ }^{\circ}\text{C}$): é indicado para as atmosferas oxidantes e inertes; em ambientes redutores ou no vácuo, as características de dilatação se alteram e, nesses casos, não é indicado.

Termopar tipo K (cromel/alumel, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1\ 200\text{ }^{\circ}\text{C}$): é o mais utilizado na indústria em geral, pois tem excelente resistência à oxidação em alta temperatura e à corrosão em baixas temperaturas.

Termopar tipo N (níquel-cromo-silício/níquel-silício, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1\ 260\text{ }^{\circ}\text{C}$): apresenta excelente resistência a oxidação até $1\ 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, curva força eletromotriz *versus* temperatura, similar ao tipo K, maior estabilidade e menor histerese, porém menor potência termoelétrica.

Termopar tipo S (platina 90%-ródio/platina, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1\ 500\text{ }^{\circ}\text{C}$): é o mais utilizado entre os termopares nobres e tem como características a precisão altíssima, a ampla faixa de utilização, a alta repetibilidade de leitura e baixa potência termoelétrica; permite que o termopar seja usado em laboratórios de calibração como termopar padrão. Sua liga é de 90% platina e 10% ródio. Em locais oxidantes, em sua faixa de trabalho é recomendado para uso em montagem de tubos de proteção cerâmica.

Termopar tipo R (platina 13%-ródio/platina, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1\ 500\text{ }^{\circ}\text{C}$): possui os mesmos componentes do termopar S. As quantidades envolvidas na liga variam para 87% de platina e 13% de ródio. Esse termopar tem alta utilização e é também empregado em laboratórios como padrão.



Termopar tipo B (platina 30%-ródio/platina 6%-ródio, 870 °C a 1 800 °C): possui características de uso idênticas às do tipo S e R. Recomenda-se o tubo de proteção como os S e R em locais onde existam vapores de metais. Esse tipo de termopar possui uma resistência mecânica dos fios maior que os S e R e gera um sinal termoeletrônico muito baixo. Sua utilização é recomendada para temperaturas altas, e a composição de sua liga é de 70% platina e 30% ródio.

11.2 Medição de nível

A medição de nível pode ser realizada em líquidos ou sólidos, de forma contínua ou de forma discreta, fornecendo valores para tratamento e adequação do sinal para o controle de um processo.

Existem diversos tipos de medidores para o controle de nível e eles utilizam os mais variados meios para realizar seu trabalho, destacando-se os medidores por flutuadores, os baseados na pressão, os baseados nas propriedades elétricas e alguns que utilizam outros tipos de propriedades.

11.2.1 Medição por flutuadores

Baseia-se no princípio do empuxo e pode ser utilizado mesmo em locais onde ocorrem grandes variações de nível, sofrendo pouca influência da variação de densidade do fluido. Pode ser usado de forma contínua ou discreta. Ver construção mecânica típica na figura 11.8.

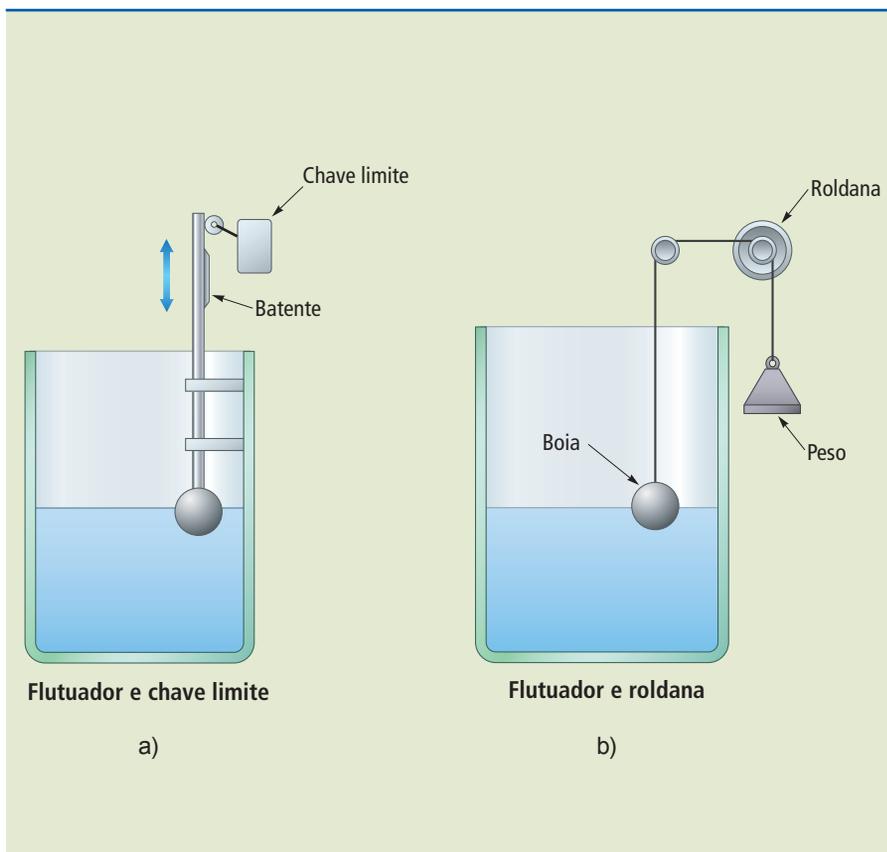


Figura 11.8

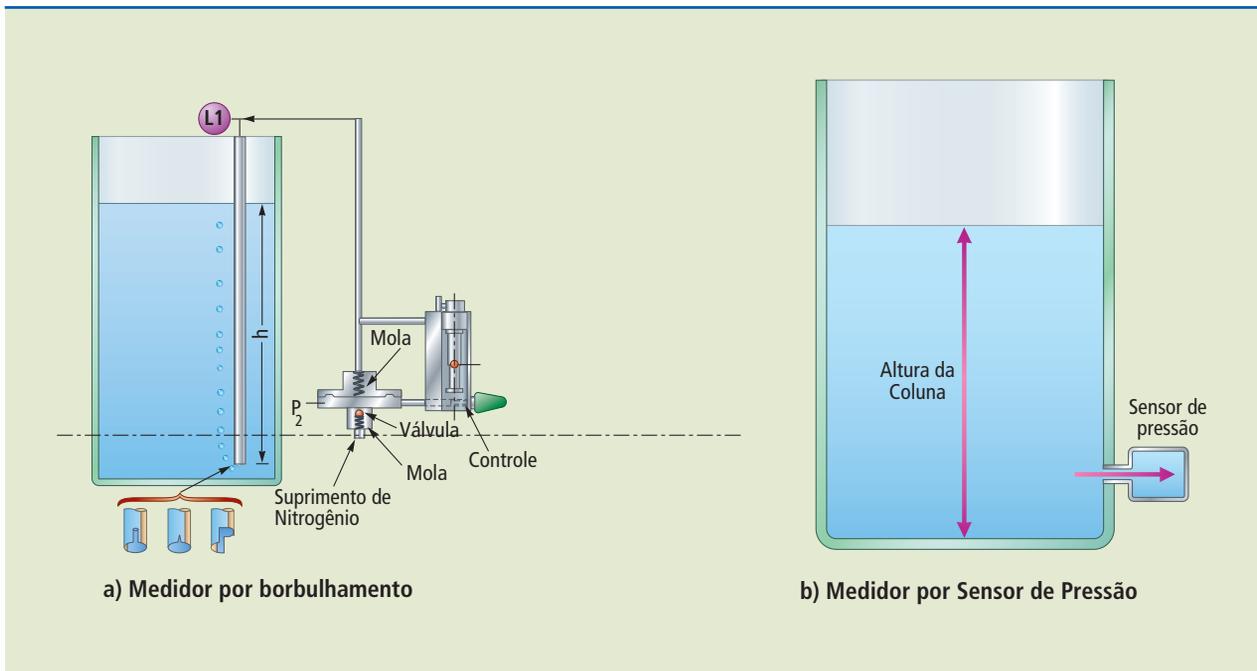
- a) medidor discreto;
b) medidor contínuo.

O sinal de saída de qualquer um dos dois tipos de medidores pode ser usado para atuação como controle. A saída do sinal no medidor contínuo pode ser utilizada, por exemplo, em um transmissor pneumático ou em um transmissor eletrônico. Esses tipos de medidores não são apropriados para sistemas com nível de fluido sujeito a grande agitação.

11.2.2 Medição por pressão

Figura 11.9
a) Medição por borbulhamento de gás;
b) medição por pressão de coluna.

Nesse tipo de sensor, a medida de pressão no fundo do tanque é proporcional ao nível (lembre-se do teorema de Stevin). Esse sistema é recomendado para líquidos limpos, pouco viscosos e pouco corrosivos. Ver construção mecânica de dois tipos de medidores por pressão na figura 11.9.



A medição de nível mostrada na figura 11.9a é determinada em função da pressão necessária para provocar borbulhamento do líquido. É utilizada em tanques abertos e também fechados, para líquidos que mantenham densidade constante.

A medição por borbulhamento de gás apresenta como desvantagens a necessidade de assegurar uma pressão de gás constante e um fluxo de gás pequeno, além da possibilidade de os sólidos obstruírem os tubos de ligação e haver contaminação do líquido. Também fica inviabilizado o uso em tanques fechados que trabalhem pressurizados.

O tipo de medidor mostrado na figura 11.9b tem como característica a possibilidade de o sinal poder ser transmitido, pneumática ou eletronicamente, para indicação, registro ou controle remoto, além de existir disponibilidade de grande variedade de materiais de cápsulas, para uso em aplicações corrosivas.

As desvantagens dos medidores por sensor de pressão são a impossibilidade de utilização em líquidos voláteis e também em situações em que há variação da densidade do líquido do tanque, pois causam erros na medição.

11.2.3 Medição por variação de propriedades elétricas

Um dos tipos de sensores que usam esse princípio é o de medição por variação da capacitância de eletrodos mergulhados dentro do nível de líquido que se pretende medir.



Figura 11.10

a) Esquema de montagem dos sensores tipo capacitivo;
b) sensor tipo capacitivo.

Trabalhando com o sistema de medição por variação da capacitância, parte-se do princípio de que três elementos são necessários para constituir um capacitor: duas placas condutoras e um meio dielétrico. Um eletrodo capacitivo é a primeira placa condutora, a parede metálica do reservatório constitui-se na segunda placa e o produto interno é o dielétrico. Caso a parede do reservatório seja confeccionada em concreto, fibra de vidro, acrílico etc., que são materiais isolantes, um tubo metálico denominado camisa deverá ser colocado ao redor da haste da sonda, de modo a produzir a segunda placa que atua como referência.

O sensor de nível capacitivo mede o nível por meio da aplicação de um sinal de radiofrequência (RF), entre a haste capacitiva e a parede do tanque. As ondas de RF induzem uma pequena quantidade de corrente de deslocamento, que flui através do meio interno, denominado dielétrico, desde a sonda até a parede. Quando o nível sofre alguma variação, a dielétrica do conjunto, que é propor-

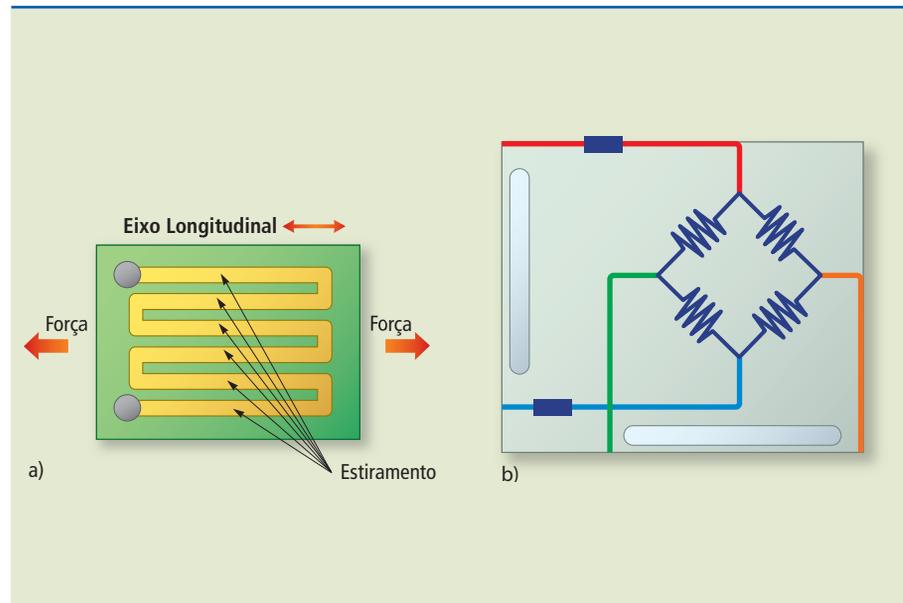
cional à leitura da capacitância, sofre também variação. Em outras palavras, a mudança de nível do produto resulta em uma variação de parâmetro capacitivo constituído pelo sistema.

A capacitância do equipamento é alterada quando o produto toca na ponta da haste, indicando presença de nível. Quando a medição necessita de nível contínuo, a sonda converte o sinal de RF em um sinal de saída na faixa de mA, proporcional à mudança de nível.

Outra forma de medição de nível por variação de propriedades elétricas é a utilização de células de carga. O funcionamento das células de carga baseia-se na variação da resistência ôhmica do extensômetro (*strain gauge*) quando submetido a alguma deformação.

Na figura 11.11 é possível ver a indicação esquemática de um extensômetro e o modo como é ligado em um circuito elétrico conhecido como ponte de Wheatstone.

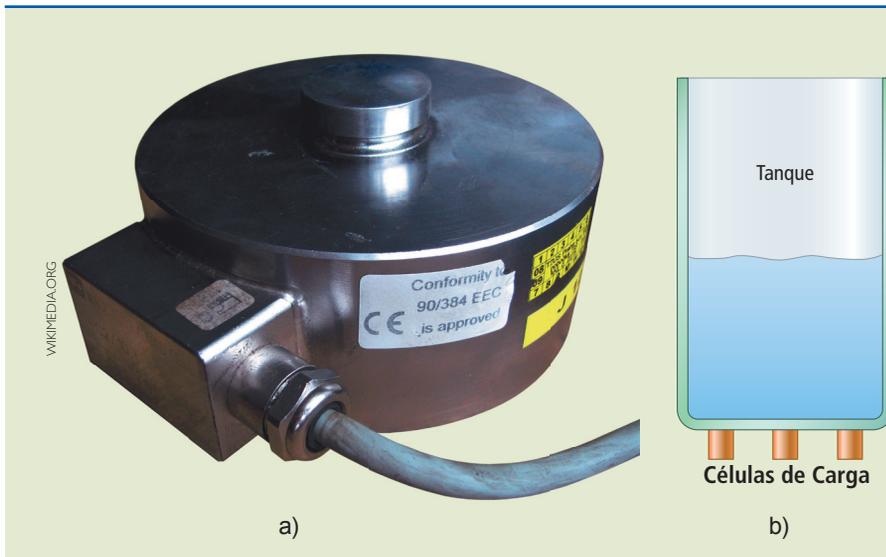
Figura 11.11
a) Extensômetro;
b) ponte de Wheatstone.



A ponte de Wheatstone mostrada na figura 11.11 é composta de quatro extensômetros ligados entre si, formando uma célula de carga. O desbalanceamento dessa célula, em razão da deformação dos extensômetros, é proporcional à força aplicada.

O corpo da célula de carga é uma peça metálica (alumínio, aço ou liga cobre-berílio), na qual os extensômetros são colados ficando inteiramente solidários a sua deformação. A atuação da força sobre o corpo da célula de carga provoca deformação na mesma e essa deformação é transmitida aos extensômetros que são os responsáveis em medir sua intensidade.

Veja montagem típica das células de carga para medição de nível do tanque na figura 11.12b.

**Figura 11.12**

a) Célula de carga;
b) montagem das células de carga para medição de líquido.

11.2.4 Medição de nível com utilização de diferentes propriedades

Esse tipo de medição é utilizado quando o fluido a ser medido apresenta alguma característica que impõe dificuldades para aplicação de um dos métodos anteriormente citados, em geral relacionadas à viscosidade, à corrosividade, às temperaturas altas, contaminação etc. Entre os sistemas mais comuns destacam-se os que utilizam o ultrassom e os que usam a radiação emitida por um elemento radioativo.

O sistema de medição por ultrassom emprega o princípio de emissão de uma onda sonora e o tempo que ela leva para retornar até um receptor, após ter atingido a superfície cujo nível se quer medir. O sensor utilizado é constituído por um cristal piezoelétrico, que vibra em uma faixa entre 20 e 50 kHz e envia um sinal em direção ao nível a ser medido; ao incidir sobre a superfície, parte do sinal é refletido, sendo então enviado de volta a um detector de ultrassom. A medição é feita tomando como base o tempo transcorrido entre os impulsos emitidos e os recebidos de volta. Ver figura 11.13.

**Figura 11.13**

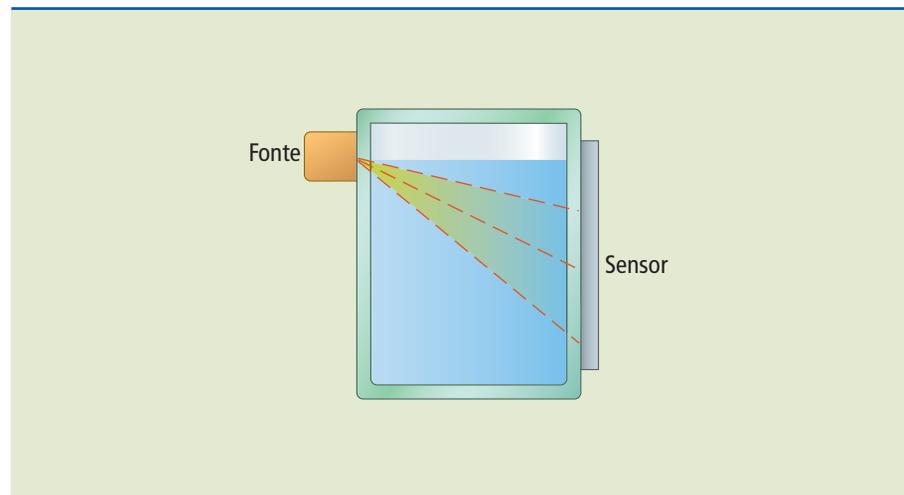
Montagem de um sensor ultrassônico para medição de nível.

A medição com sensor ultrassônico apresenta alguns problemas. Entre eles, o fato de que a reflexão da superfície de nível é baixa, a superfície pode conter espuma, dificultando a leitura do sensor, bem como a formação de gases entre a superfície livre do líquido e o sensor que absorve o feixe ultrassônico, o que modifica sua velocidade de propagação.

Esse problema pode ser corrigido parcialmente com a instalação de sensor no fundo do equipamento. Esse sensor envia um sinal através do líquido, de baixo para cima. Nesse caso, o sensor tem de possuir excelente estanqueidade e resistir ao ataque químico do líquido com o qual está em contato, resultando em um tipo de instalação mais cara.

Quando a medição de nível é realizada em produtos muito viscosos ou corrosivos, ou sujeita à alta pressão e alta temperatura, por vezes se utiliza o senso-reamento radioativo; nesse sistema é usada uma fonte externa de raios gama de um lado do reservatório e, no lado oposto dele, um conjunto de células de medição, conhecido como sensor radioativo ou contador de cintilação (ver figura 11.14).

Figura 11.14
Montagem de um
medidor radioativo.



A quantidade de radiação recebida pelo sensor é inversamente proporcional ao nível do líquido.

Na maioria dos sensores, é utilizado o céσιο como fonte radioativa, podendo também ser usado o cobalto ou ainda o amerício.

A medição realizada dessa forma pode ser contínua ou discreta em sólidos ou líquidos, não existe contato entre o emissor, o receptor e o produto a ser medido, bem como independe da pressão, temperatura, viscosidade ou corrosividade do meio.

Em virtude do custo elevado do sistema, da radiação emitida no local e dos cuidados com a fonte radioativa, o uso desse tipo de medição fica restrito à impossibilidade de utilizar outro método de medição.

11.3 Medição de pressão

Nos processos industriais, a medição de pressão é essencial para o controle do sistema, já que sua variação implica também a variação do volume e da temperatura.

11.3.1 Medidores de pressão mecânicos

Essa medição é realizada em um fluido que pode ser líquido, vapor ou gás; quando só é necessária uma indicação do valor, é mais prático e barato utilizar um dispositivo denominado manômetro.

Esse tipo de instrumento indica o valor da pressão do sistema, e é referida como pressão manométrica; suas unidades mais usuais são kgf/cm^2 , psig ou lbf/in^2 e também o bar. Lembramos que a unidade para medição de pressão dentro do SI é o pascal (Pa).

O princípio de funcionamento do manômetro baseia-se na deformação sofrida por um tubo de parede fina, denominado tubo de Bourdon, quando submetido à pressão. Essa deformação induz a um movimento que é aproveitado por um conjunto mecânico devidamente ajustado para indicar a pressão.

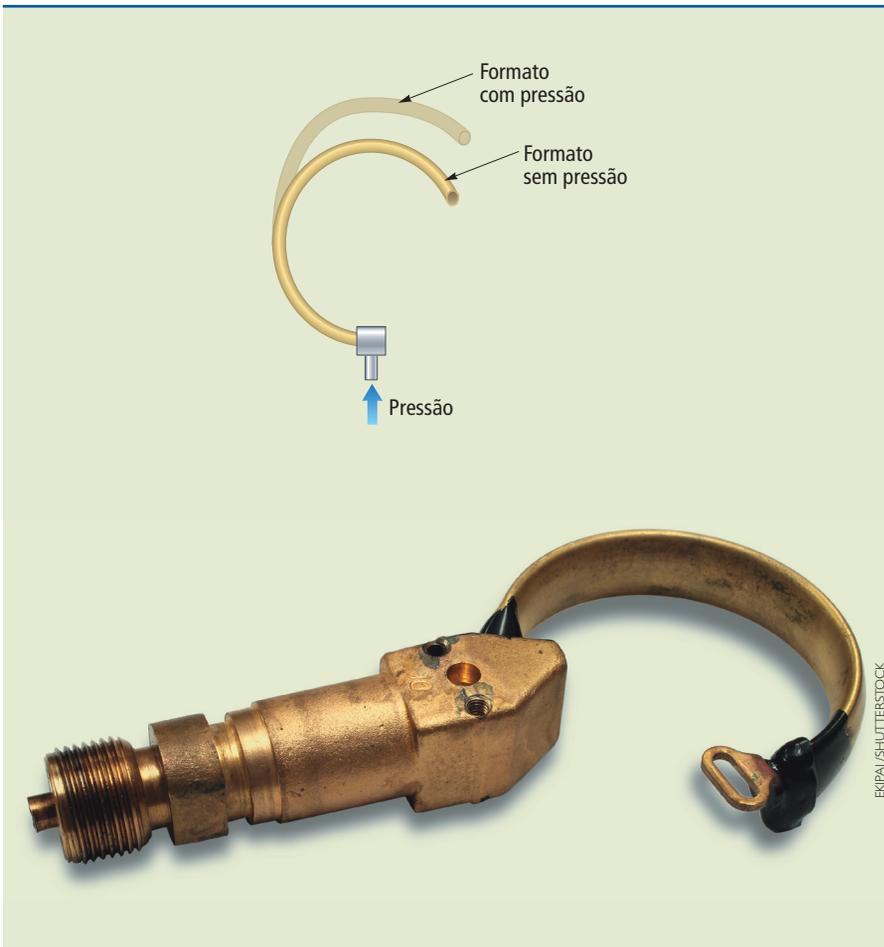


Figura 11.15

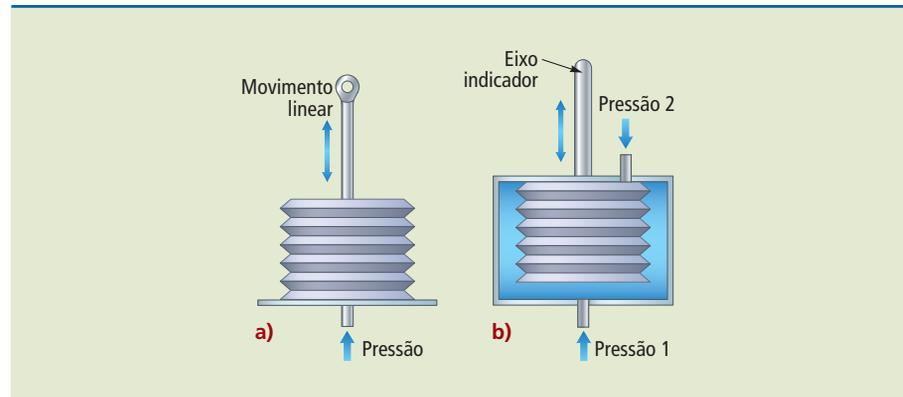
Deformação de um tubo Bourdon.

Se ligarmos a ponta do tubo de Bourdon a um controlador pneumático, este será um sensor mecânico; se a ligarmos a um sensor de posição, este emitirá um sinal elétrico proporcional à pressão do sistema e, nesse caso, será classificado como sensor de pressão elétrico.

O mesmo princípio de deformação é aplicado aos medidores que trabalham com a transformação da pressão em um movimento linear, denominados foles (ver figura 11.16).

Figura 11.16

- a) Medidor de pressão de fole simples;
b) medidor de pressão diferencial.



Na figura 11.16a, um medidor de pressão por deformação de um fole simples; na figura 11.16b, vemos um medidor da diferença de pressão entre dois sistemas, com o fole montado dentro de um dispositivo conhecido como canister.

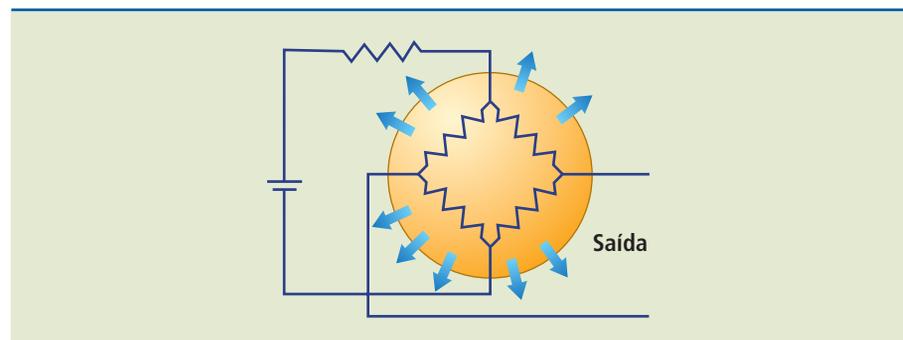
O movimento linear dos foles pode estar ligado a um sistema mecânico ou a um sistema elétrico, permitindo a indicação ou o controle de um atuador pneumático, hidráulico, elétrico ou misto.

11.3.2 Medidores de pressão elétricos

Alguns medidores de pressão operam de acordo com uma mudança na resistência, capacitância ou indutância. Um dos mais utilizados é o sensor tipo extensômetro ou *strain-gauge*. Um sensor desse tipo (figura 11.17) une esse elemento a uma membrana que é esticada à medida que a pressão é aplicada a ela. Se uma corrente constante for aplicada ao *strain-gauge*, sua tensão de saída varia de forma correspondente à mudança na pressão.

Figura 11.17

- Representação de um sistema de medição por *strain-gauge*.



Outro tipo de medidor de pressão utiliza a característica de semicondutividade de alguns materiais, e especificamente a piezoresistividade. Alguns materiais cerâmicos apresentam variação de voltagem ao serem comprimidos, e esse comportamento pode ser aproveitado nos transdutores de pressão piezoelétricos.

A figura 11.18 mostra a montagem de um sensor piezoelétrico dentro de uma célula de medição de pressão. Ao ser comprimido em função da pressão aplicada, o sensor apresenta uma variação de resistência elétrica, correspondendo a uma variação de pressão.

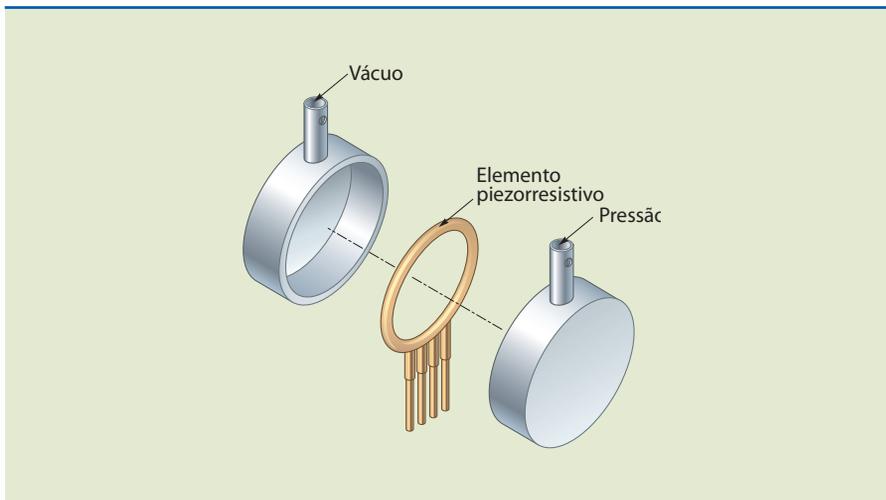


Figura 11.18

Montagem de um sensor piezoelétrico.

Esses tipos de sensores aproveitam as propriedades piezoelétricas do silício e de alguns outros materiais cerâmicos. Podem ser usados para medição de pressão de líquidos e gases.

11.4 Medidores de vazão

A medição de vazão é extremamente importante na maioria dos processos industriais; o conceito de vazão ou fluxo significa a quantidade de um fluido deslocado em determinado intervalo de tempo. Utiliza-se a vazão volumétrica ($m^3/h, L/min, GPM$), ou a vazão mássica (também conhecida como gravimétrica, que no Sistema Internacional tem unidade de m^3/s), quantidade em termos de massa ($kg/h, lb/min$ – no Sistema Internacional, kg/s).

Entre os medidores de vazão, temos os medidores baseados em pressão diferencial, os medidores volumétricos, os medidores elétricos e os medidores ultrassônicos.

11.4.1 Medidores por pressão diferencial

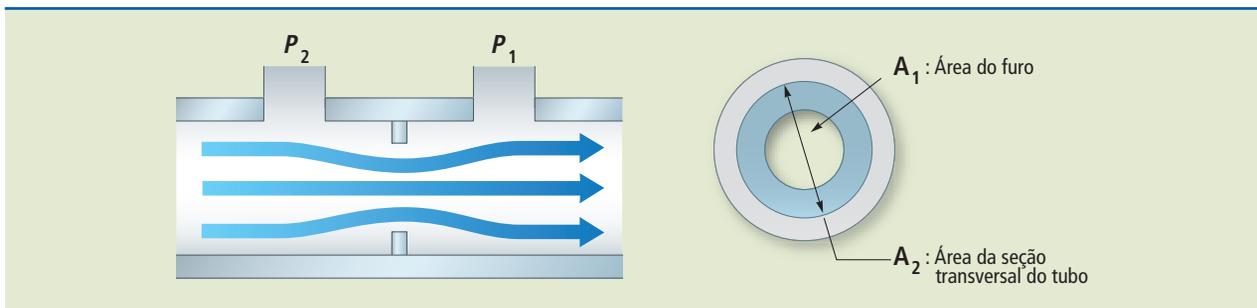
Os medidores por pressão diferencial possuem uma restrição na linha de fluxo, a qual gera um aumento da velocidade do fluido no local e, conseqüentemente, uma queda de pressão, que varia com a quantidade de fluido escoando pelo tubo e é proporcional à raiz quadrada da diferença de pressão medida.

São necessárias duas tomadas de pressão: uma antes, e uma depois da restrição. Os valores coletados precisam ser tratados, antes de serem enviados para controlar algum dispositivo ou processo; para isso podem ser utilizados transmissores, que podem ser pneumáticos ou eletrônicos. Os medidores de vazão aqui referenciados são específicos para trabalhar com líquidos, gases ou vapores.

Entre os medidores mais comuns, encontramos a placa de orifício, o tubo Venturi e o tubo Pitot.

A placa de orifício (figura 11.19) é o dispositivo mais comum na medição de vazão, em função de sua simplicidade, baixo custo de fabricação e instalação. Esse tipo de componente produz grande perda de carga, mas na maioria das medições essa perda não tem grande relevância.

Figura 11.19
Indicação esquemática de uma placa de orifício.

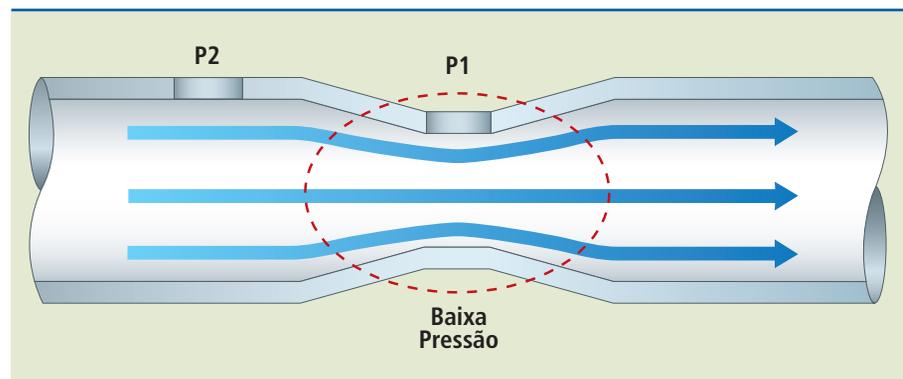


Na prática, uma placa de orifício precisa ser instalada entre um par de flanges parafusados, para permitir sua manutenção preventiva, já que a alta velocidade do fluido em contato com sua seção furada provoca erosão ao longo do tempo, resultando em leituras falsas. As placas de orifício são normalmente fabricadas em aço inoxidável, para aumento do tempo de vida.

Outro dispositivo bastante empregado como medidor de vazão é o tubo Venturi, que utiliza o mesmo princípio da placa de orifício, restringindo a passagem e aumentando a velocidade no local da tomada de pressão.

A diferença básica entre o tubo Venturi e a placa de orifício é o fato de que o tubo de Venturi (ver figura 11.20), se bem projetado, tende a perturbar menos o escoamento.

Figura 11.20
Tubo de Venturi.



O terceiro tipo de medidor de vazão que se baseia na utilização da pressão diferencial é o tubo Pitot. Usa como tomada de pressão um tubo de pequeno diâmetro colocado antagonicamente ao fluxo que está sob medição.

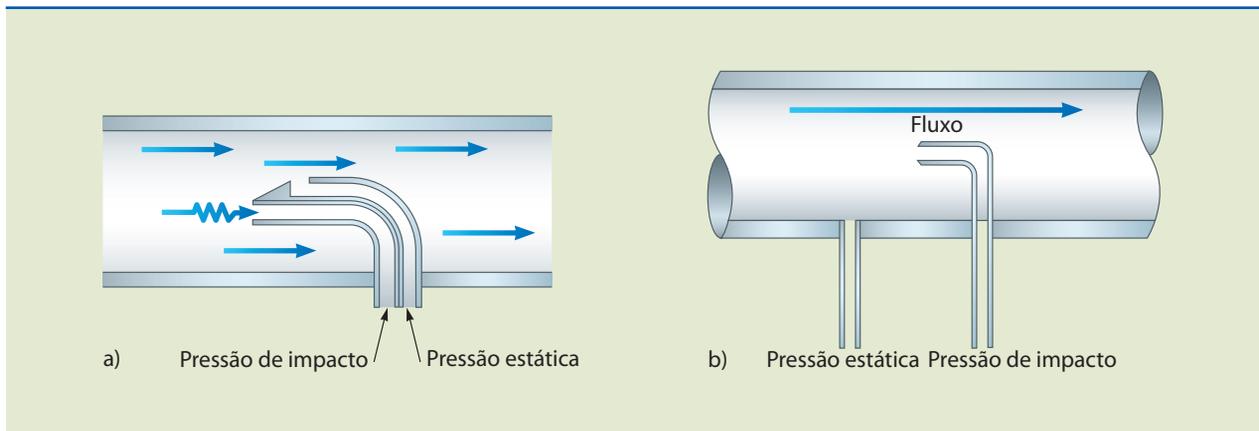


Figura 11.21

a) Montagem das tomadas no centro do tubo;
b) montagem com a tomada de pressão estática fora de centro.

Como vemos na figura 11.21a, são utilizadas a tomada de pressão estática e a tomada de pressão de estagnação (pressão de impacto). A tomada de pressão de estagnação obriga o fluido a atingir velocidade zero e a transformar toda a energia cinética do escoamento em energia de pressão. A tomada de pressão estática é feita na perpendicular à direção do escoamento.

Na figura 11.21b, indica-se a montagem alternativa àquela apresentada pela figura 11.21a, situação em que o tubo principal situa-se isoladamente no centro do tubo, medindo a pressão de impacto, enquanto o outro tubo mede lateralmente a pressão estática. Nas duas montagens, o princípio de funcionamento é o mesmo.

A pressão de estagnação (ou de impacto) será sempre maior que a pressão estática, se houver fluxo, e as pressões serão iguais quando não houver fluxo. Então, a diferença entre elas é proporcional à velocidade, conseqüentemente, à vazão. O tubo Pitot é utilizado em aeronaves e em indicadores de velocidade marítima por seu princípio de funcionamento.

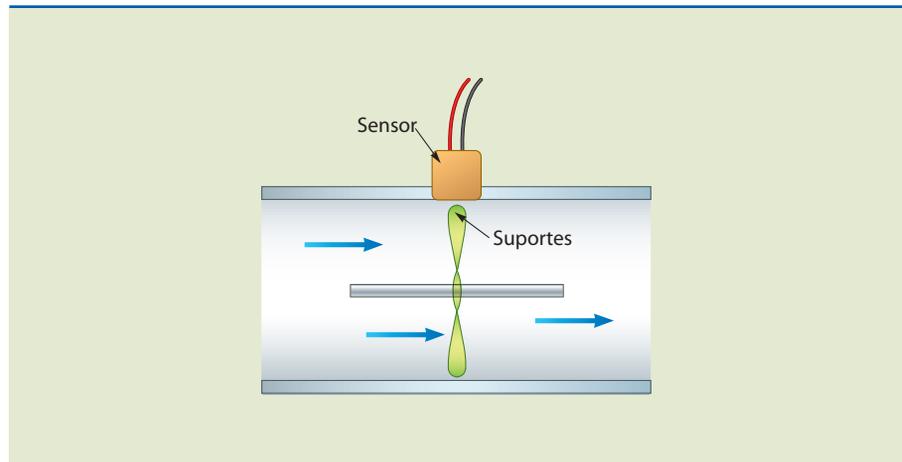
11.4.2 Medidores volumétricos

Esses tipos de medidores utilizam o princípio de medição do volume do fluido que passa por eles em um intervalo de tempo. Os medidores volumétricos mais importantes são os medidores do tipo turbina e os medidores de engrenagens.

Os medidores que usam as turbinas são constituídos por um rotor de palhetas que possui eixo de rotação paralelo à direção do fluxo. O rotor é acionado pelo fluido em movimento sobre as palhetas e sua velocidade de giro é proporcional à do fluido, que por sua vez, é proporcional à vazão. Um sensor na parte externa do corpo do medidor detecta o giro do rotor da turbina cujas pás são de material magnético.

Figura 11.22

Medidor com acionamento por turbina.



Os medidores acionados por turbina são muito usados na medição de vazão de líquidos limpos, em tubulações de pequeno diâmetro. Um dos problemas desse tipo de medidor são suas peças móveis e com folgas restritas, necessitando de manutenção constante. Também é fator limitante a escolha de materiais adequados para as palhetas, restringindo sua resistência à corrosão e limitação quanto à temperatura e pressão elevadas.

Outro tipo de medidor de vazão bastante utilizado é o medidor acionado por engrenagens. São giradas pelo fluxo que passa por elas e transmitem o movimento a um sistema de contagem ou de transmissão a dispositivos eletrônicos. Esses medidores são mais adequados para fluidos viscosos como óleos, mel, resinas, chocolates, vernizes etc.

Um par de engrenagens recebe o fluxo que, ao ser direcionado sobre elas, provocará sua rotação, sendo então transportado ao interior do medidor, ocupando as câmaras que se formam entre os dentes das engrenagens e o corpo do medidor. O fluxo se dirige à saída da câmara e a velocidade com que as engrenagens giram é proporcional à vazão. Assim, como a cada volta corresponde determinado volume, um sistema gerador de pulsos é acoplado ao corpo do medidor permitindo a medição.

Esse tipo de medidor apresenta como vantagem o custo relativamente baixo, e algumas desvantagens como, por exemplo, o fato de o dispositivo não ser apropriado para medição de pequenas vazões. O processo de transformação/movimentação das engrenagens gera grande perda de carga. Destaca-se o alto custo de manutenção, pois a presença de partículas em suspensão ou de bolhas de gás pode afetar muito a precisão do equipamento.

11.4.3 Medidores eletromagnéticos

Esses tipos de medidores são dos poucos que não impõem obstruções de qualquer espécie ao escoamento do fluido. O medidor de vazão magnético é um dos mais utilizados para a medição de vazão pelo motivo de sua perda de carga ser equivalente a de um trecho reto de tubulação.

É praticamente insensível à densidade e à viscosidade do fluido a ser medido. Portanto, representa baixa interferência na medição. Por seu princípio de funcionamento, os medidores magnéticos são indicados para medir produtos químicos corrosivos, fluidos com partículas sólidas em suspensão, lama, água e polpa de papel. Por essas aplicações, é muito utilizado em empresas de saneamento, até indústrias químicas, papel e celulose, mineração e indústrias que manipulam líquidos como, por exemplo, as alimentícias. A restrição se deve ao fato de que o fluido tem de ser eletricamente condutivo para que a vazão gere o campo magnético.

A lei de Faraday de indução magnética estabelece que, se uma tensão é induzida em um condutor que se move em um campo magnético, então uma tensão proporcional à velocidade do fluido pode ser detectada por eletrodos colocados aos lados do tubo. Como a área da seção do duto é conhecida, o volume do fluido no tubo pode ser calculado. Ver esquema indicado na figura 11.23.

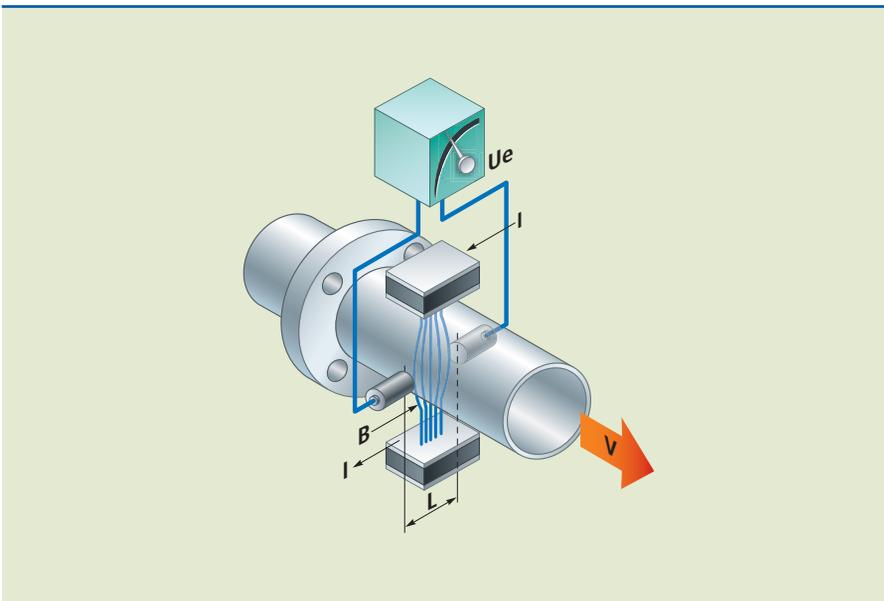


Figura 11.23

Esquema de funcionamento de um medidor magnético.

A tensão pode ser determinada pela equação 11.1:

$$U_e = B \cdot L \cdot V \quad (11.1)$$

em que:

U_e = tensão (V)

B = campo magnético (tesla)

L = distância entre os eletrodos (m)

V = velocidade do fluido (m/s)

O tubo de passagem do fluido é normalmente fabricado em aço inoxidável austenítico, não magnético. Os materiais do revestimento interior do tubo e os eletrodos são escolhidos em função do fluido a medir.

11.4.4 Medidores ultrassônicos

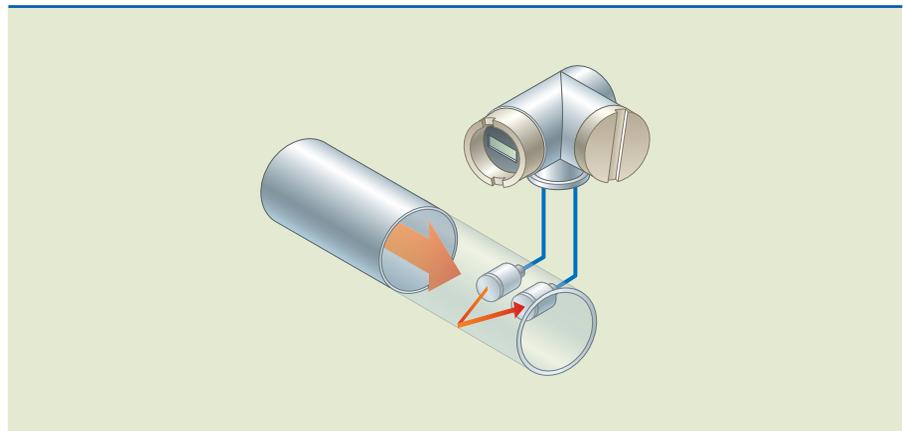
Composto de um emissor e um receptor de ultrassom, esse método de medição se baseia na velocidade do som como meio auxiliar de medição, utilizando cristais piezoelétricos como transdutores-emissores de ultrassom, para enviar sinais acústicos (ondas mecânicas) que passam de molécula em molécula do fluido antes de atingir os sensores receptores correspondentes.

Em alguns medidores ultrassônicos, os transdutores são presos à superfície externa da tubulação, não tendo contato com o fluido, de maneira a não interferir no fluxo. Em outros, os transdutores estão em contato direto com o fluido.

No tipo de construção mais simples (figura 11.24), o conjunto é formado por um transdutor de ultrassom e um receptor que também é um transdutor. A onda ultrassônica que é enviada através de pulsos atravessa o fluido duas vezes, uma na ida e outra na volta, após ter refletido na parede oposta. A onda é arrastada pelo líquido em movimento e o percurso total e a atenuação da onda dependem da velocidade do movimento.

Figura 11.24

Montagem dos transdutores ultrassônicos.



Esse tipo de medidor tem resolução melhor que a da placa de orifício e não introduz qualquer obstrução, da mesma forma que o medidor eletromagnético. É bastante utilizado para líquidos viscosos e pastosos ou perigosos (alta pressão, corrosivos, radioativos), empregando a técnica de medição por efeito Doppler, na qual a frequência do sinal emitido é alterada pela reflexão do feixe nas partículas do fluido. Também é usado para líquidos limpos e gases e, nesse caso, utiliza a técnica de tempo de trânsito, na qual o tempo de trânsito do sinal é medido. Esse tipo de medição requer correção automática em função da alteração de temperatura através de um termistor pois a velocidade do som no fluido é alterada em função da temperatura.

11.5 Controladores PID

O mercado globalizado tem exigido das empresas melhores produtos com custos reduzidos. Para conseguirem esses objetivos, as indústrias têm procurado substituir a manufatura tradicional por sistemas altamente automatizados.

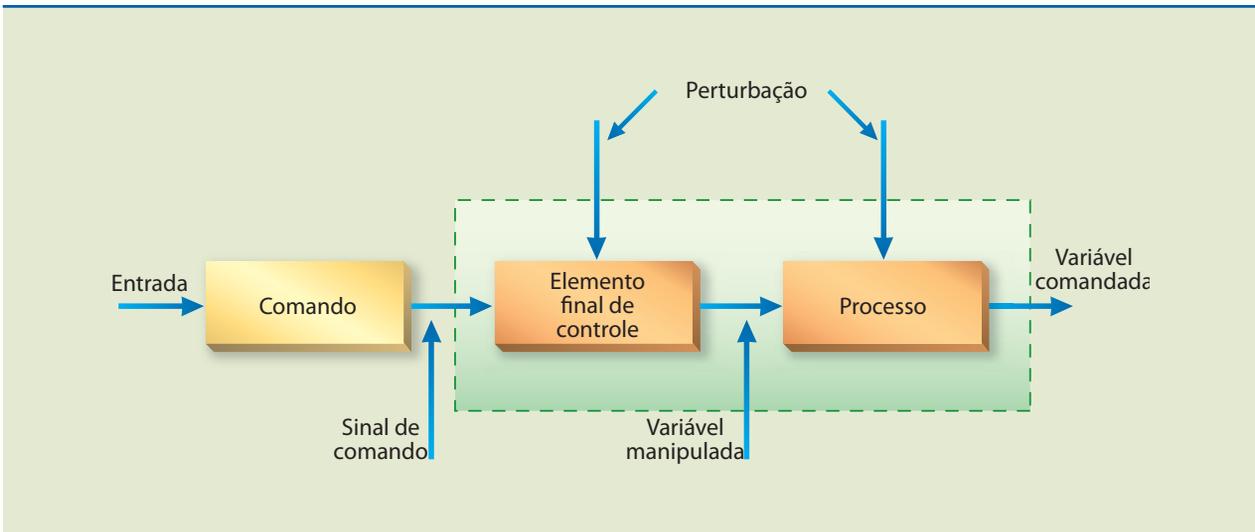
Nos processos industriais, a automação faz uso de dois tipos de sistemas: o sistema de comando e o sistema de controle.

11.5.1 Sistema de comando

Nesse tipo de sistema, temos uma sequência de componentes interligados, processando as informações da entrada para a saída, sem retorno de como o processo está se comportando; temos então a definição de malha aberta (figura 11.25).

Figura 11.25

Estrutura de um sistema de comando em malha aberta.



A seguir, definiremos algumas das informações mostradas na figura 11.25.

Comando – Dispositivo ou sistema que dirige o posicionamento do elemento final de controle para que atue sobre a variável manipulada, que pode ser, por exemplo, a pressão de ar (o objetivo é que a variável comandada fique dentro do valor desejado).

Elemento final de controle – Elemento que atua na variável manipulada, com base no sinal de comando recebido.

Processo – Processo industrial ou equipamento de comportamento dinâmico, sobre o qual se atua para obtenção do controle de determinado produto ou uma variável do processo.

Perturbação – É um sinal anormal, que tende a alterar o processo e, consequentemente, a variável manipulada.

11.5.2 Sistema de controle

Nesse tipo de sistema (figura 11.26), temos uma sequência de componentes interligados em malha fechada, com um fluxo de informações no sentido da entrada para a saída, e outro fluxo no sentido inverso, da saída para a entrada; esse último fluxo é denominado realimentação (*feedback*, em inglês).

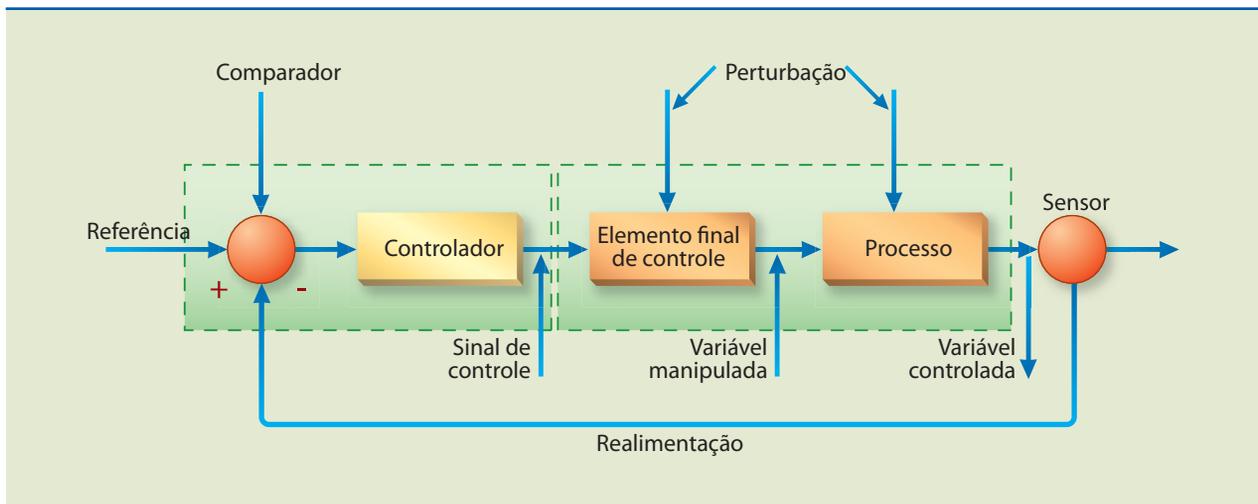


Figura 11.26

Estrutura de um sistema de controle em malha fechada.

A seguir, definiremos algumas das informações mostradas na figura 11.26.

Controlador – Sua função é introduzir um sinal de controle que vai posicionar o elemento final de controle (por exemplo, uma válvula pneumática). A variação desse sinal é proporcional ao sinal de erro enviado pelo elemento comparador.

Comparador – Elemento que gera um sinal de erro proporcional à diferença que existe entre o sinal de realimentação e o sinal de referência.

Sensor – Elemento que sente as alterações da variável controlada e envia um sinal equivalente ao comparador.

Elemento final de controle – Possui a mesma função que a exercida no sistema de comando.

Processo – Possui a mesma função que a exercida no sistema de comando.

Perturbação – Possui a mesma função que a exercida no sistema de comando.

11.5.3 Sistemas de controle automáticos contínuos

Os sistemas de controle automáticos em malha fechada utilizam um controlador. Eles possuem uma saída que varia de modo contínuo e podem assumir qualquer valor compreendido entre os limites alto e baixo.

A classificação desse tipo de controle varia dependendo de como a informação de erro é processada e do tipo de sistema de controle, que pode ser estático, dinâmico ou combinado.

Na forma estática, o controle é executado de forma proporcional e, por causa disso, costuma-se trabalhar com a indicação de controle tipo P. Na forma dinâmica, o controle pode ser dito integral, recebendo o nome de controle I ou, ainda, pode ser executado de forma derivativa, recebendo o nome de D.

O controle combinado trabalha de forma estática e dinâmica e pode ser executado de forma P + I ou P + D ou ainda P + I + D, conhecido como PID. A técnica de controle PID se resume em calcular um valor sobre o processo comparando-se o valor desejado com o valor atual da variável.

O valor de atuação sobre o processo é transformado em sinal apropriado ao tipo de atuador utilizado (que pode ser uma válvula, um motor ou um relé) e deve garantir um controle estável e de precisão.

O PID pode ser entendido como a composição de três ações básicas. Para o P, a correção é proporcional ao erro, isto é, a correção a ser aplicada ao processo deve crescer na proporção que cresce o erro entre o valor real e o desejado.

A segunda ação, I, possui a correção proporcional ao produto erro *versus* tempo, em que pequenos erros que persistem há algum tempo requerem correção mais intensa. A terceira ação, D, tem a correção proporcional à taxa de variação do erro, isto é, se o erro está variando muito rápido, essa taxa de variação tem de ser reduzida, para evitar oscilações.

Para poder trabalhar com os diferentes tipos de controle, temos de definir alguns termos utilizados nas operações envolvendo PID:

SV ou SP – Valor desejado para a variável de processo, conhecido como *setpoint*, em inglês.

PV – Variável de processo ou *process variable*, em inglês. É a variável controlada no processo, como pressão, temperatura, vazão, umidade etc.

MV – Variável manipulada. É a variável sobre a qual o controlador atua a fim de controlar o processo. Ela pode ser a tensão aplicada a uma resistência de aquecimento, a posição de comutação de uma válvula etc.

Desvio ou erro – Diferença entre SV e PV, PV-SV para ação direta e SV-PV para ação reversa.

Ação de controle – A ação de controle pode ser direta ou reversa e define a atuação aplicada à MV na ocorrência de variações da PV.

Ação reversa – Se PV aumenta, Mv diminui. Esse tipo de controle é muito utilizado em relação ao aquecimento.

Ação direta – Se PV aumenta, MV aumenta. Tipo de controle bastante utilizado em controle de refrigeração.

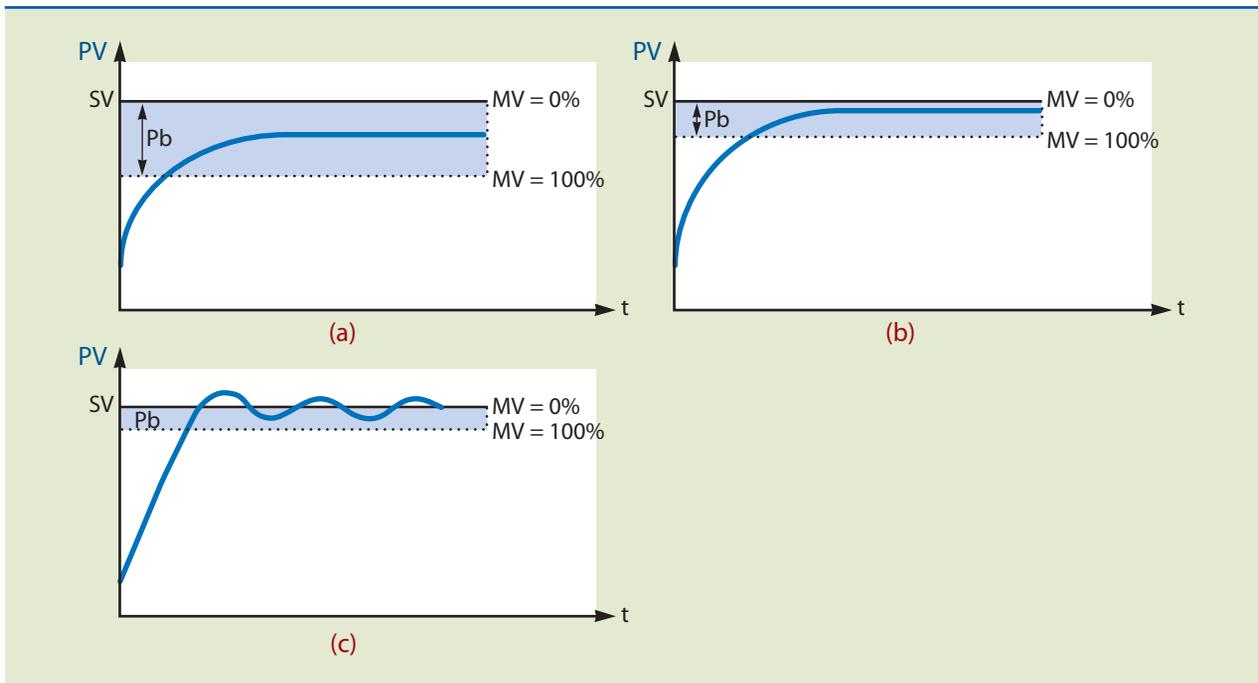
Controle proporcional

O controle proporcional apresenta uma relação matemática proporcional entre o sinal de saída do controlador e o erro. Para cada valor de erro, existe um único valor de saída correspondente, desde que o erro esteja dentro de uma

faixa determinada, conhecida como banda proporcional (*proportional band*, em inglês).

No controle tipo proporcional, MV é proporcional ao valor de desvio (SV-PV, para ação reserva de controle). Para desvio zero (SV = PV), MV = 0; à medida que o desvio cresce, MV aumenta até o máximo de 100%. A banda proporcional (Pb) é definida quando o valor de desvio provoca MV = 100%. Com PB alta, a saída MV só irá alta se o desvio for alto. Com Pb baixa, a saída MV assume valores altos de correção mesmo para pequenos desvios. Portanto, quanto menor o valor de PB, maior é a ação proporcional de controle. A figura 11.27 indica o efeito da variação da banda proporcional no controle de um processo.

Figura 11.27
Efeito da variação da banda proporcional no controle de um processo.



Podemos observar que, quando a banda proporcional é grande, ocorre a estabilidade do processo, porém essa estabilidade será em um ponto distante do *setpoint* (desejado), o que mostra a figura 11.27a. Quando essa banda proporcional é reduzida para valores pequenos próximos ao *setpoint*, teremos uma instabilidade também próxima ao *setpoint*, conforme figura 11.27b. Sempre devemos tomar o cuidado de não reduzir demais a banda proporcional, pois isso gera instabilidade e provoca uma oscilação que pode ou não divergir, se afastando do *setpoint*.

O ajuste da banda proporcional é uma etapa importante do processo de controle, sendo conhecido como sintonia do controle.

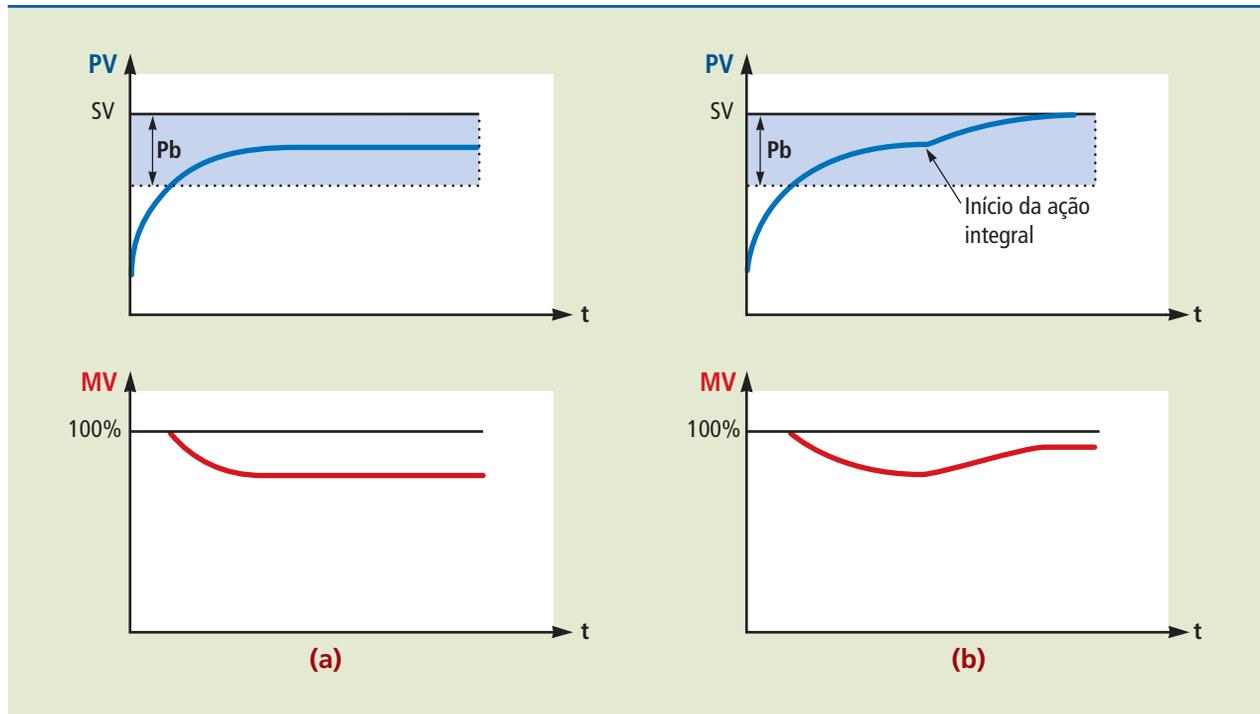
Quando a condição de controle desejada é atingida, $PV = SV$, o termo proporcional resulta em $MV = 0$, ou seja, nenhum ajuste será necessário ao processo, o que faz com que volte a surgir desvio em função da dinâmica do processo. Por essa razão, um controle proporcional puro não consegue estabilizar com $PV = SV$.

Controle integral

O controle integral isoladamente não é uma técnica de controle. Ele deve ser empregado juntamente com uma ação proporcional. A ação integral é uma resposta na saída do controlador (MV) proporcional à amplitude e duração do desvio. A ação integral elimina o desvio característico de um controle puramente proporcional; para melhor entendimento, vamos supor um processo estabilizado com controle P, conforme apresentado na figura 11.28.

Figura 11.28

Exemplo de aplicação de controle integral.



Na figura 11.28a, PV e MV estão em condição de equilíbrio, em que a quantidade de controle entregue ao sistema (MV) é a necessária para manter estável o valor de PV, porém, abaixo do *setpoint*. Nesse caso, está ocorrendo o denominado erro em regime permanente.

Na figura 11.28b, no instante assinalado, foi iniciada a ação integral. Ocorre uma constante elevação do valor de MV e a subsequente eliminação do erro em regime permanente. Incluindo-se a ação integral, MV tem seu valor alterado sequencialmente com a intenção de eliminar o erro de PV, e o processo continua até que PV e MV alcancem um novo equilíbrio, mas com $PV = SV$.

O processo de controle integral baseia-se na correção do valor de MV adicionando o valor do desvio $SV - PV$ em intervalos regulares de tempo. Esses intervalos de tempo de atuação do processo são denominados tempo integral, que tem associado o seu inverso, denominado taxa integral (I_r). Uma variação positiva no valor da I_r implica um aumento na atuação do controle integral no processo, e uma diminuição na I_r indica que está diminuindo a atuação do controle.

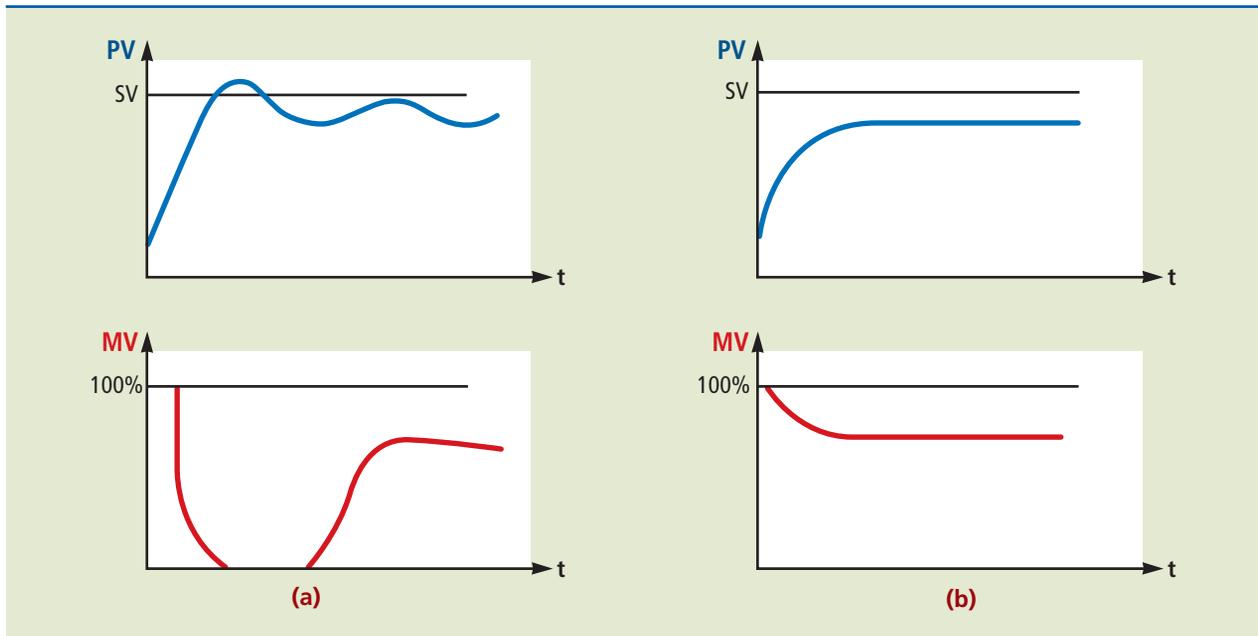
A ação integral tem como objetivo eliminar o erro em regime permanente. Ao adotar um termo integral excessivamente atuante, o processo pode ser levado à instabilidade. E, nesse caso, a adoção de um integral de pouca atuação atrasa a estabilização $PV = SV$.

Controle derivativo

Assim como o controle integral, o controle derivativo necessita de uma ação proporcional para que seja considerado técnica de controle. As ações derivativa e proporcional são combinadas de forma que a atuação do controle tenha um desempenho desejado. Dessa forma, a ação derivativa é uma resposta na saída do controlador (MV) que deve ser um valor em função da velocidade de variação do desvio. A atuação derivativa diminui a velocidade das variações de PV, repercutindo em subidas e descidas suaves e evitando as oscilações de controle.

Figura 11.29
Comparação de um controle proporcional com um derivativo.

O derivativo só trabalha quando há variação no erro; se o processo está estabilizado, sua atuação é nula. Durante perturbações (variações bruscas) ou na partida do processo, o erro tem valor significativo; conseqüentemente, o controle derivativo sempre tem atuação forte para minimizar as variações. Sua principal indicação é para melhorar o desempenho do processo durante essas transições.



No controle P indicado na figura 11.29a, se a banda proporcional é pequena, é bem provável que ocorra a ultrapassagem do alvo, conhecida como *overshoot* (em inglês), na qual PV ultrapassa SV antes de estabilizar. Esse fato acontece pelo motivo de MV ter permanecido no seu máximo valor por longo tempo e por ter sua redução iniciada quando já estava muito próxima de SV, ou seja, quando é tarde para impedir o *overshoot*. Uma proposta seria aumentar a banda proporcional; entretanto, seria ampliado o erro em regime permanente. Outra solução

seria a inclusão de controle derivativo indicado na figura 11.29b, o que reduziria o valor de MV se PV estivesse crescendo muito rápido. Quando se antecipa a variação de PV, a ação derivativa diminui ou elimina o *overshoot* e diminui também as oscilações no período de transição do processo.

O controle derivativo é calculado matematicamente, ou seja, em intervalos regulares, o controlador calcula quanto o processo desviou e soma à MV o valor desta variação. Se PV aumenta, o desvio reduz, gerando uma variação negativa que diminui o valor de MV e, portanto, atrasa a elevação de PV. A amplitude da ação derivativa é regulada pela variação do intervalo de cálculo da diferença, e esse parâmetro é conhecido como tempo derivativo (Dt). Com o aumento de Dt, aumenta-se a ação derivativa e diminui-se a velocidade de variação de PV.

Controle proporcional + integral + derivativo

O controle PID consiste na combinação das características das três ações de controles: proporcional, integral e derivativa. Ao unirmos as três técnicas, conseguimos associar o controle básico do proporcional (P) à eliminação do erro do integral (I) e à redução de oscilações do derivativo (D) e enfrentamos a dificuldade de ajustar a amplitude de cada um dos tipos de controle. A esse processo chamamos de sintonia do PID.

A sintonia do PID possui diversas técnicas de controle, para operações do processo em malha aberta, caso do controle manual, e para operações em malha fechada, no controle automático. A maior parte dos controladores PID industriais possui recursos capazes de aplicar um ensaio ao processo e obtém o conjunto de parâmetros do PID (PB, Ir e Dt) de retorno.

Para a maioria dos processos, esse cálculo satisfaz, mas, em muitos casos, se faz necessária a correção manual para alcançar um desempenho de controle mais eficaz (estabilização mais rápida e menos *overshoot*).

O ajuste manual é feito por tentativa e erro, até que se acertem os parâmetros em relação aos do PID, verificando o desempenho do processo até que se atinja a performance desejada.

Para isso, é preciso conhecer o efeito de cada parâmetro do PID sobre a *performance* do controle, além de experiência em diferentes processos.

Na avaliação do desempenho do controlador, é necessário analisar o comportamento da PV e MV e observar se o controlador está atuando adequadamente sobre MV. À medida que o operador adquire experiência, esse tipo de observação passa a ser eficiente.

Podemos resumir o efeito da atuação manual sobre cada um dos seguintes parâmetros:

Banda proporcional (Pb) – Quando a banda proporcional é aumentada, o processo torna-se mais lento, mais estável, com menores oscilações; e o *overshoot*



diminui. Quando se diminui a banda proporcional, o processo fica mais rápido, mais instável, com maiores oscilações; e o *overshoot* aumenta.

Taxa integral (Ir) – Quando a taxa integral é aumentada, o processo torna-se mais rápido e o *setpoint* é alcançado mais rapidamente. Há mais instabilidade no processo e aparecem mais *overshoots*. Quando se diminui a taxa integral, o processo torna-se mais lento, demorando para atingir o *setpoint*, que fica mais estável, com menores oscilações, e diminui o *overshoot*.

Tempo derivativo (Dt) – Quando o tempo derivativo é aumentado, o processo torna-se mais lento, com menores *overshoots*; quando o tempo derivativo é diminuído, aparecem maiores *overshoots*.

Exemplos práticos de aplicações para o controle manual

1. O que podemos alterar para a melhoria do sistema, se a *performance* do processo está quase boa, mas não se tem *overshoot* e há demora para atingir o *setpoint*?

Solução:

As opções possíveis de alteração poderiam ser a diminuição da P_b em 20% ou o aumento da I_r em 20% ou, ainda, a redução de D_t em 50%.

2. O que podemos fazer de alteração para a melhoria do sistema, se a *performance* do processo está quase boa, mas o *overshoot* está um pouco alto?

Solução:

As opções possíveis de alteração poderiam ser o aumento da P_b em 20%, a redução da I_r em 20%, ou o aumento do D_t em 50%.

3. O que podemos alterar para a melhoria do sistema, se a *performance* do processo está boa, mas MV está sempre variando entre 0% e 100% ou está variando demais?

Solução:

As opções possíveis de alteração poderiam ser a redução de D_t em 50% ou o aumento de P_b em 20%.

4. O que podemos alterar para a melhoria do sistema, se a *performance* do processo está ruim? Após a partida, avança lentamente em direção ao *setpoint*, sem *overshoot*; e apesar de ainda estar longe do *setpoint*, MV já é menor que 100%.

Solução:

As opções possíveis de alteração poderiam ser a redução da P_b em 50%, o aumento da I_r em 50% ou, ainda, a redução da D_t em 70%.

