

# Componentes de hardware para automação e controle de processos

## CONTEÚDO DO CAPÍTULO

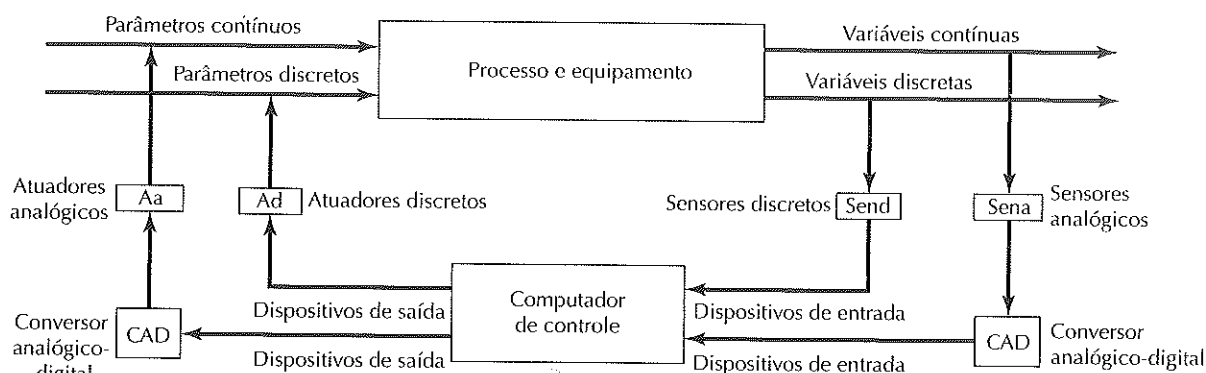
- 6.1 Sensores
- 6.2 Atuadores
  - 6.2.1 Motores elétricos
  - 6.2.2 Outros tipos de atuadores
- 6.3 Conversores analógico-digital
- 6.4 Conversores digital-analógico
- 6.5 Dispositivos de entrada/saída para dados discretos
  - 6.5.1 Interfaces de contato de entrada/saída
  - 6.5.2 Contadores e geradores de pulsos

Para implementar a automação e o controle de processos, o computador de controle deve coletar dados do processo de produção e transmitir sinais a ele. Na Seção 5.1.2, as variáveis e os parâmetros de processo foram classificados como contínuos ou discretos, com diversas subcategorias na classe discreta. O computador digital opera com dados digitais (binários), enquanto alguns dados do processo são contínuos ou analógicos. É preciso acomodar essa diferença na interface entre o processo e o computador. Os componentes necessários à implementação dessa interface são os seguintes:

1. Sensores para medir as variáveis contínuas e discretas do processo.
2. Atuadores que acionam os parâmetros contínuos e discretos do processo.
3. Dispositivos que convertem sinais analógicos contínuos em dados digitais.
4. Dispositivos que convertem dados digitais em sinais analógicos.
5. Dispositivos de entrada/saída para dados discretos.

A Figura 6.1 apresenta a configuração geral do sistema de controle de processos por computador e como essas cinco categorias de componentes são utilizadas na criação da interface do processo com o computador. Esse modelo representa o arranjo geral da maioria dos sistemas de manuseio de material e dos sistemas de manufatura descritos do Capítulo 10 ao Capítulo 19. O capítulo atual está organizado em torno dessas cinco categorias.

**Figura 6.1** O sistema de controle de processos por computador, mostrando os diversos tipos de componentes necessários na interface do processo com o computador



## 6.1 SENSORES

Uma enorme variedade de sensores está disponível para coleta de dados do processo de produção e utilização no controle por realimentação (*feedback*). Um sensor é um *transdutor*, um dispositivo que converte uma variável física de uma forma em outra mais útil para a aplicação em questão. Em particular, um sensor é um dispositivo que converte um estímulo físico ou uma variável de interesse (tal como temperatura, força, pressão ou deslocamento) em uma forma mais conveniente (em geral um sinal elétrico como a voltagem), cujo propósito é medir o estímulo. O processo de conversão quantifica a variável de modo que ela possa ser interpretada como um valor numérico.

Os sensores podem ser classificados de diferentes formas, sendo a mais relevante para nós a da categoria do estímulo ou da variável física a ser medida, conforme

apresentado na Tabela 6.1. Para cada categoria, podem existir múltiplas variáveis a ser medidas, conforme indicado na coluna da direita.

Além do tipo de estímulo, os sensores também são classificados como analógicos ou discretos, conforme as variáveis de processo apresentadas no Capítulo 5. Um dispositivo de medição *analógico* produz um sinal analógico contínuo como uma tensão elétrica, cujo valor varia de modo analógico com a variável sendo medida. Termopares, extensômetros e potenciômetros são alguns exemplos. O sinal de saída de um dispositivo de medição analógico deve ser convertido em dados digitais por um conversor analógico-digital (Seção 6.3) de modo a ser utilizado por um computador.

Um dispositivo de medição *discreto* produz uma saída que pode ter somente determinados valores. Dispositivos de sensoramento discretos costumam ser divididos em duas categorias: binários e digitais. Um dispositivo de

**Tabela 6.1** Categorias de estímulos e variáveis físicas associadas

| Categoria do estímulo | Exemplos de variáveis físicas  |
|-----------------------|--|
| Mecânico              | Posição (deslocamento, linear e angular), velocidade, aceleração, força, torque, pressão, desgaste, tensão, massa, densidade |
| Elétrico              | Voltagem, corrente, carga, resistência, condutividade, capacitância  |
| Térmico               | Temperatura, calor, fluxo de calor, condutividade térmica, calor específico  |
| Radiação              | Tipo de radiação (por exemplo, raios gama, raios X, luz visível), intensidade, comprimento da onda                           |
| Magnético             | Campo magnético, fluxo, condutividade, permeabilidade  |
| Químico               | Identidades de componentes, concentração, níveis de pH, presença de ingredientes tóxicos, poluentes                          |

Fontes: Tabelas semelhantes em [6] e [7].

medição *binário* produz um sinal ligado/desligado. Os dispositivos mais comuns operam fechando contato elétrico a partir de uma posição normalmente aberta. Interruptores de limite operam dessa maneira. Outros sensores binários incluem sensores fotoelétricos e interruptores de proximidade. Um dispositivo de medição *digital* produz um sinal de saída digital tanto na forma de um conjunto de bits paralelos (por exemplo, uma matriz de sensor fotoelétrico) como na de uma série de pulsos que podem ser contados (por exemplo, um codificador ótico). Seja qual for, o sinal digital representa a quantidade a ser medida. Transdutores digitais estão se tornando cada vez mais comuns porque são de fácil leitura quando utilizados como instrumentos isolados de medida e porque são compatíveis com sistemas computadorizados digitais. Muitos dos sensores e dispositivos de medição comuns utilizados no controle industrial estão listados em ordem alfabética na Tabela 6.2. Uma forte tendência na tecnologia de sensores foi o desenvolvimento de diversos sensores muito pequenos. O termo *microsensor* refere-se aos dispositivos de medição cujas características físicas possuem dimensões na escala do micron, em que 1 micron ( $1\ \mu\text{m}$ ) =  $10^{-6}$  m. Micros-

sensores costumam ser fabricados em silício por meio de técnicas de processamento associadas à fabricação de circuitos integrados.

Os sensores podem ser ativos ou passivos. O *sensor ativo* responde ao estímulo sem a necessidade de energia externa. Um exemplo é o termopar, que responde ao aumento de temperatura gerando uma pequena voltagem (na escala de milivolt) que está funcionalmente relacionada à temperatura (no funcionamento ideal, sua voltagem é diretamente proporcional à temperatura). O *sensor passivo* requer uma fonte externa de energia para operar, como é o caso do termistor. Ele também mede temperatura, mas sua operação requer que uma corrente elétrica passe por ele. À medida que a temperatura aumenta, a resistência elétrica do termistor se altera. A resistência pode ser medida e novamente relacionada à temperatura.

Para cada sensor, existe uma *função de transferência*, que é a relação entre o valor do estímulo físico e o valor do sinal produzido pelo sensor em resposta ao estímulo. A função de transferência é relação entrada/saída. O estímulo é a entrada, e o sinal gerado pelo dispositivo

Tabela 6.2 Dispositivos de medição comumente utilizados na automação

| Dispositivo de medição                    | Descrição  |
|---|--|
| Acelerômetro                              | Dispositivo analógico utilizado para medir vibração e choque. Pode basear-se em diversos fenômenos físicos (capacitivos, piezoresistivos, piezoelétricos).   |
| Amperímetro                               | Dispositivo analógico que mede a força de uma corrente elétrica.   |
| Interruptor bimetalico                    | Interruptor binário que utiliza lâmina bimetalica para abrir e fechar um contato elétrico como resultado da alteração de temperatura. A <i>lâmina bimetalica</i> é formada pela união de duas tiras de metal com coeficientes de expansão térmica diferentes.  |
| Termômetro bimetalico                     | Dispositivo analógico de medição de temperatura formado por lâmina metálica (ver definição na descrição anterior) que muda de forma em resposta à mudança de temperatura. A mudança de forma da lâmina pode ser calibrada de modo a indicar a temperatura.   |
| Dinamômetro                               | Dispositivo analógico utilizado para medir força, potência ou torque. Pode basear-se em diferentes fenômenos físicos (por exemplo, extensômetro elétrico, efeito piezoelétrico).   |
| Transdutor flutuador                      | Flutuador anexado a um braço de alavanca. O movimento giratório do braço pode ser utilizado para medir o nível de líquido em um navio (dispositivo analógico) ou ativar o interruptor por contato (dispositivo binário).   |
| Sensor de vazão                           | Medição analógica da vazão de líquido, normalmente baseada na diferença de pressão entre o fluxo de duas tubulações de diâmetros diferentes.   |
| Pressostato                               | Interruptor binário semelhante ao interruptor de fim-de-curso, mas ativado pelo aumento de pressão do fluido, não por um objeto com o qual entrou em contato.  |
| Transformador diferencial linear variável | Sensor analógico de posição que consiste em uma bobina primária separada por um núcleo magnético de duas bobinas secundárias conectadas em oposição. Quando a bobina primária é energizada, induz uma tensão nas bobinas secundárias em função da posição do núcleo. Também pode ser adaptada para medir força ou pressão. |
| Interruptor de fim-de-curso (mecânico)    | Sensor binário de contato no qual o braço da alavanca ou o botão de pressão fecha (ou abre) um contato elétrico.   |
| Manômetro                                 | Dispositivo analógico utilizado para medir a pressão de gás ou líquido com base na comparação de uma força de pressão conhecida ou não. <i>Barômetro</i> é um tipo específico de manômetro usado na medição da pressão atmosférica.  |

(continua)

(continuação)

| Dispositivo de medição        | Descrição  |
|-------------------------------|--|
| Ohmímetro                     | Dispositivo analógico que mede a resistência elétrica.   |
| Codificador ótico             | Dispositivo digital utilizado para medir posição e/ou velocidade, formado por um disco ranhurado que separa uma fonte de luz de uma fotocélula. À medida que o disco gira, a fotocélula percebe a luz através dos orifícios como uma série de pulsos. A quantidade e a frequência dos pulsos são proporcionais (respectivamente) à posição e à velocidade do eixo conectado ao disco. Pode ser adaptado tanto para medições lineares como para medições rotacionais. (O codificador ótico é descrito de forma mais detalhada na Seção 7.5.2, sobre sistemas de posicionamento de controle numérico.) |
| Matriz de sensor fotoelétrico | Sensor digital composto por séries lineares de interruptores fotoelétricos. A matriz é criada para indicar a altura ou o tamanho do objeto que interrompe alguns dos feixes de luz.  |
| Interruptor fotoelétrico      | Sensor binário sem contato (interruptor) formado por um emissor (fonte de luz) e um receptor (fotocélula) disparados pela interrupção do feixe de luz. Dois tipos comuns: (1) <i>tipo transmitido</i> , no qual o objeto bloqueia o feixe de luz entre o emissor e o receptor, e (2) <i>tipo retroreflexivo</i> , no qual emissor e receptor estão localizados em um dispositivo e o feixe de luz é emitido por um refletor remoto, exceto quando o objeto interrompe o feixe refletido.   |
| Fotômetro                     | Dispositivo analógico que mede a iluminação e a intensidade da luz. Pode basear-se em diferentes dispositivos fotodetectores, incluindo fotodiodos, fototransistores e fotoresistores.   |
| Transdutor piezoelétrico      | Dispositivo analógico baseado no efeito piezoelétrico de determinados materiais (por exemplo, o quartzo), no qual uma carga elétrica é produzida quando o material é deformado. Pode ser utilizado para medir força, pressão e aceleração.   |
| Potenciômetro                 | Sensor analógico de posição formado por um resistor e um contato deslizante. A posição do contato sobre o resistor determina a resistência medida. Disponível tanto para medições lineares como para medições rotacionais (angulares).   |
| Interruptor de proximidade    | O sensor binário sem contato que dispara quando um objeto próximo causa alterações no campo eletromagnético. Pode basear-se em diversos princípios físicos, incluindo indutância, capacitância, ultrassom e ótica.   |
| Pirômetro de radiação         | Dispositivo analógico de medição de temperatura que percebe a radiação eletromagnética na área do espectro infravermelho visível.  |
| Termistor resistivo           | Dispositivo analógico de medição de temperatura baseado no aumento da resistência elétrica de um material metálico à medida que a temperatura aumenta.   |
| Extensômetro                  | Sensor analógico largamente utilizado para medir força, torque ou pressão. Baseia-se na alteração da resistência elétrica resultante da tensão de um material condutor.  |
| Tacômetro                     | Dispositivo analógico formado por um gerador CC (corrente contínua) que produz uma voltagem elétrica proporcional à velocidade de rotação.   |
| Sensor tátil                  | Dispositivo de medição que indica contato físico entre dois objetos. Pode basear-se em qualquer um dos diversos dispositivos físicos, como o contato elétrico (para materiais condutores) e o efeito piezoelétrico.  |
| Termistor semiconductor       | Contração de <i>térmico</i> e <i>resistor</i> . Dispositivo analógico de medição de temperatura baseado na mudança na resistência elétrica de um material semiconductor à medida que a temperatura aumenta.  |
| Termopar                      | Dispositivo analógico de medição de temperatura baseado no efeito termoelétrico, no qual a junção de duas tiras de materiais distintos emite uma pequena voltagem que é uma função da temperatura da junção. Termopares comuns incluem: Tipo K (chromel-alumel), Tipo J (ferro-constantan) e Tipo E (chromel-constantan).  |
| Sensor ultrassônico           | Lapso de tempo a partir do qual se mede a emissão e a reflexão (a partir de um objeto) de pulsos de som de alta frequência. Pode ser utilizado para medir a distância ou simplesmente para indicar a presença de um objeto.  |

é a saída. A função de transferência pode ser demonstrada da seguinte maneira:

$$S = f(s) \quad (6.1)$$

em que  $S$  é o sinal de saída (normalmente uma voltagem),  $s$  é o estímulo e  $f(s)$  é a relação funcional entre eles.

Interruptores de fim-de-curso e outros sensores binários têm relações funcionais binárias definidas pelas seguintes expressões:

$$S = 1, \text{ se } s > 0, \text{ e } S = 0, \text{ se } s \leq 0 \quad (6.2)$$

A forma funcional ideal para um dispositivo analógico de medição é uma relação proporcional simples, tal como:

$$S = C + ms \quad (6.3)$$

em que  $C$  é o valor de saída quando o valor do estímulo é igual a zero, e  $m$  é a constante de proporcionalidade entre  $s$  e  $S$ . A constante  $m$  pode ser definida como a *sensibilidade* do sensor. É uma medida de quanto a saída (ou resposta) do sensor é afetada pelo estímulo. Por exemplo, a sensibilidade de um termopar chromel/alumel padrão gera

40,6 microvolts ( $\mu\text{V}$ ) por grau Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ). Outras funções de transferência apresentam formas matemáticas mais complexas, incluindo equações diferenciais que englobam dinâmica do tempo, que significa que existe uma diferença de tempo entre o momento de ocorrência do estímulo e aquele no qual o sinal de saída indica com exatidão o valor do estímulo.

Antes de utilizar qualquer dispositivo de medição, o operador deve *calibrar* o dispositivo para que ele determine a função transferência, ou seu inverso, que converte a

saída  $S$  no valor do estímulo ou da variável  $s$  medida. A facilidade com a qual se pode realizar o procedimento de calibragem é um dos critérios pelos quais um dispositivo de medição é avaliado. Uma lista das características desejáveis nos dispositivos de medição é apresentada na Tabela 6.3. Poucos dispositivos de medição alcançam a pontuação máxima em todos esses critérios, e o engenheiro do sistema de controle deve decidir quais características são mais importantes quando da escolha de um dos sensores ou transdutores disponíveis para determinada aplicação.

**Tabela 6.3 Características desejáveis na seleção de dispositivos de medição utilizados em sistemas automatizados**

| Característica desejável    | Definição e comentários   |
|-----------------------------|---|
| Alta exatidão               | A medição contém erros sistemáticos pequenos em comparação ao valor real.   |
| Alta precisão               | A variabilidade randômica ou o ruído no valor medido é baixo.   |
| Ampla área de operação      | O dispositivo de medição apresenta exatidão e precisão altas ao longo de uma ampla faixa de valores das variáveis físicas medidas.  |
| Alta velocidade de resposta | O dispositivo responde rapidamente às mudanças nas variáveis físicas medidas. Idealmente, o tempo de espera seria igual a zero.   |
| Facilidade de calibragem    | A calibragem do dispositivo de medição é rápida e fácil.  |
| Desvio mínimo               | O desvio se refere à perda gradual da exatidão ao longo do tempo. Desvios altos demandam calibragem frequente do dispositivo de medição.  |
| Alta confiabilidade         | O dispositivo não está sujeito a situações de mau funcionamento e falhas durante o serviço. Ele é capaz de operar em ambientes potencialmente adversos do processo de manufatura em que é aplicado. |
| Baixo custo                 | O custo de aquisição (ou fabricação) e instalação do dispositivo de medição é baixo se comparado ao valor do dado fornecido pelo sensor.  |

## 6.2 ATUADORES

Nos sistemas de controle industrial, um atuador é um dispositivo de hardware que converte um sinal de comando do controlador em uma mudança em um parâmetro físico. Essa mudança normalmente é mecânica, tal como uma alteração de posição ou velocidade. Um atuador é um transdutor, visto que transforma um tipo de quantidade física, como uma corrente elétrica, em outro tipo de quantidade física, como uma velocidade de rotação de um motor elétrico. O sinal de comando do controlador costuma ser de baixo nível e, portanto, um atuador pode demandar também um *amplificador* que aumente o sinal até que ele seja capaz de acionar o atuador.

A maioria dos atuadores pode ser classificada em três categorias, segundo o tipo de amplificador utilizado: (1) elétrico, (2) hidráulico e (3) pneumático. Os *atuadores elétricos* são os mais comuns. Eles incluem motores elétricos de diversos tipos, motores de passo e solenoides. Os atuadores elétricos podem ser tanto lineares (a saída é

um deslocamento linear) como rotacionais (a saída é um deslocamento angular). Os *atuadores hidráulicos* utilizam fluido hidráulico para amplificar o sinal de comando do controlador. Os dispositivos disponíveis oferecem movimento linear ou rotativo. Os atuadores hidráulicos normalmente são recomendados quando grandes forças são necessárias. Os *atuadores pneumáticos* utilizam ar comprimido como energia propulsora. Mais uma vez, há atuadores pneumáticos que oferecem movimento linear ou rotativo. Se comparados aos atuadores hidráulicos, costumam estar limitados a aplicações de força relativamente baixa devido a baixas pressões de ar.

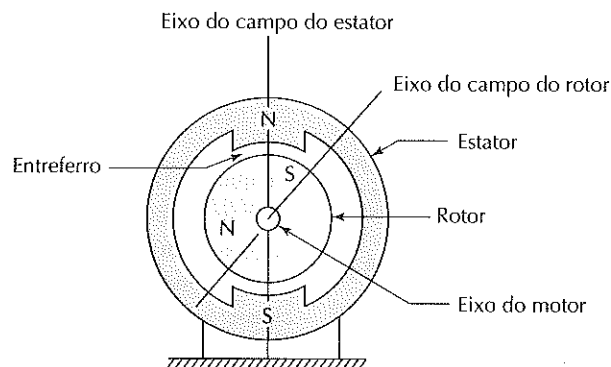
Esta seção está organizada em dois tópicos: (1) motores elétricos e (2) outros tipos de atuadores, inclusive alguns movidos a eletricidade. Nossa abordagem não é completa, e o objetivo é oferecer uma introdução dos diferentes tipos de atuadores disponíveis para a implementação da automação e do controle de processos. Uma visão mais completa pode ser encontrada em algumas das referências, incluindo [2], [3] e [11].

### 6.2.1 Motores elétricos

Um motor elétrico converte energia elétrica em energia mecânica. A maioria deles é do tipo rotativo, e sua operação pode ser explicada com base na Figura 6.2. O motor é composto por dois componentes básicos: um estator e um rotor. O *estator* é o componente fixo em forma de anel, e o *rotor* é a parte cilíndrica que gira dentro do estator. O rotor é montado sobre um eixo sustentado por rolamentos e pode ser acoplado a outros elementos de máquina, como engrenagens, polias, parafusos de ligação ou eixos. A corrente elétrica que alimenta o motor gera um campo magnético em deslocamento constante que faz com que o rotor

gire na tentativa de sempre alinhar seus polos aos polos opostos do estator. Detalhes relacionados ao tipo de corrente (alternada ou contínua), à criação do campo magnético em deslocamento constante e a outros aspectos da construção do motor abrem espaço para diferentes tipos de motores elétricos. A classificação mais simples e mais comumente utilizada é a que distingue motores de corrente contínua (do inglês, *direct current* — DC) de motores de corrente alternada (do inglês, *alternate current* — AC). Dentro de cada categoria, existem diversas subcategorias. Discutimos aqui três tipos que são largamente utilizados na automação e no controle industrial: (1) motores CC, (2) motores CA e (3) motores de passo.

Figura 6.2 Um motor elétrico rotativo



**Motores CC.** Esses motores são alimentados por corrente e tensão constantes. O campo magnético em deslocamento constante é criado por meio de um dispositivo de movimento rotativo chamado *comutador*, que gira com o rotor e toma corrente de uma série de escovas de carbono componentes na montagem do estator. Sua função é alterar continuamente a polaridade relativa entre o rotor e o estator, de modo que o campo magnético produza um torque que gire o motor de forma ininterrupta. O uso de comutadores representa a montagem típica de motores CC. Essa construção é desvantajosa, pois resulta em centelhamento, desgaste das escovas e problemas de manutenção. Há um tipo especial de motor CC que evita o uso do comutador e das escovas. Denominado 'motor CC sem escovas', utiliza circuitos de estado sólido para substituir as escovas e o comutador. A eliminação dessas peças trouxe o benefício de diminuição da inércia da montagem do rotor, permitindo maior velocidade de operação.

Os motores CC são largamente utilizados por duas razões. A primeira é a conveniência da utilização de corrente contínua como fonte de energia. Os pequenos motores elétricos dos automóveis, por exemplo, são CC porque a bateria do carro oferece corrente contínua. A segunda razão para a popularidade dos motores CC é que sua rela-

ção torque/velocidade é atraente para muitas aplicações, se comparada aos motores CA.

Um tipo comum de motor de corrente contínua são os servomotores CC utilizados em sistemas mecanizados e automatizados — vamos utilizá-los para representar essa classe de motores elétricos. O termo *servomotor* significa, simplesmente, que uma malha (*loop*) de realimentação é usada no alcance da velocidade de controle. Em um servomotor CC, um estator típico consiste em dois ímãs permanentes em lados opostos do rotor. O rotor, chamado de *armadura* em um motor CC, é formado por três conjuntos de fios de cobre enrolados em torno de núcleo de metal ferroso. A corrente de entrada chega ao enrolamento por um comutador e interage com o campo magnético do estator, de modo a produzir o torque que aciona o rotor. A magnitude do torque do rotor é uma função da corrente que passa através do enrolamento, e a relação pode ser modelada pela seguinte equação:

$$T = K_t I_a \quad (6.4)$$

em que  $T$  é o torque do motor, N.m;  $I_a$  é a somatória da corrente de armadura, A; e  $K_t$  é o torque constante do motor, N.m/A. A razão para definir  $I_a$  como somatória da corrente será explicada em seguida.

A rotação da armadura no campo magnético do estator produz uma voltagem nos terminais da armadura denominada força contraeletromotriz. Na verdade, o motor age como gerador e essa força atimenta com a velocidade de rotação da seguinte maneira:

$$E_b = K_v \omega \quad (6.5)$$

em que  $E_b$  é igual à força contraeletromotriz, V;  $\omega$  é a velocidade angular, rad/s; e  $K_v$  é a voltagem constante do motor, V/(rad/s). A intenção da força contraeletromotriz é reduzir a corrente que flui no enrolamento da armadura. A velocidade angular em rad/s pode ser convertida para uma velocidade de rotação mais familiar da seguinte maneira:

$$N = \frac{60\omega}{2\pi} \quad (6.6)$$

em que  $N$  é igual à velocidade de rotação, rev/min (rpm).

Dadas a resistência da armadura,  $R_a$ , e a voltagem de entrada,  $V_{in}$ , fornecidas pelos terminais do motor, a corrente resultante na armadura é  $I_a = V_{in}/R_a$ . Essa é a corrente inicial que produz um torque inicial conforme dado pela Equação (6.4). Entretanto, à medida que a armadura começa a girar, ela gera a força contraeletromotriz  $E_b$ , que reduz a voltagem disponível. Assim, a corrente real na armadura depende da velocidade de rotação do rotor,

$$I_a = \frac{V_{in} - E_b}{R_a} = \frac{V_{in} - K_v \omega}{R_a} \quad (6.7)$$

em que todos os termos já foram definidos anteriormente. Combinando as equações (6.4) e (6.7), o torque produzido pelo servomotor CC a uma velocidade  $\omega$  é:

$$T = K_t \left[ \frac{V_{in} - K_v \omega}{R_a} \right] \quad (6.8)$$

A força mecânica produzida pelo motor é o produto do torque e da velocidade, conforme definida na equação a seguir:

$$P = T\omega \quad (6.9)$$

em que  $P$  é potência em N.m/s (Watts);  $T$  é o torque do motor, N.m; e  $\omega$  é a velocidade angular, rad/s. A potência correspondente é dada por:

$$HP = \frac{T\omega}{745.7} \quad (6.10)$$

em que a constante 745,7 é o fator de conversão  $745,7 \text{ W} = 1 \text{ hp}$ .

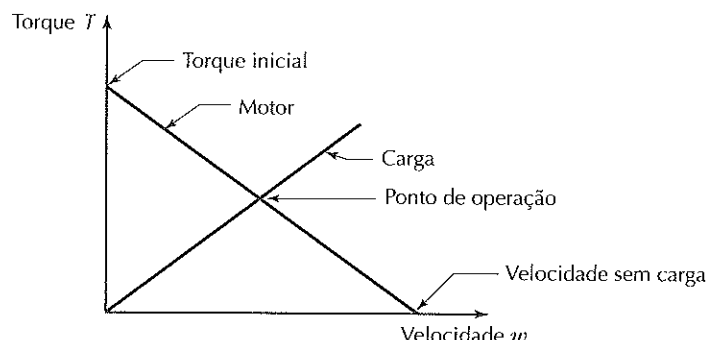
O servomotor pode estar conectado tanto diretamente como por meio de uma engrenagem de redução a um equipamento, que, por sua vez, pode ser um ventilador, uma bomba, um eixo, um fuso de mesa ou qualquer outro aparelho mecânico semelhante. O aparelho representa a carga acionada pelo motor e requer um determinado torque para operar. O torque normalmente está relacionado de alguma maneira à velocidade de rotação. Em geral, o torque aumenta com a velocidade. No caso mais simples, a relação é proporcional:

$$T_L = K_L \omega \quad (6.11)$$

em que  $T_L$  é o torque de carregamento, N.m; e  $K_L$  é a constante de proporcionalidade entre o torque e a velocidade angular, N.m/(rad/s). A relação entre  $K_L$  e  $T_L$  pode não ser proporcional, de modo que o próprio  $K_L$  dependa da velocidade angular. Por exemplo, o torque necessário para acionar um ventilador aumenta aproximadamente com o quadrado da velocidade de rotação,  $T_L \propto \omega^2$ .

O torque desenvolvido pelo motor e o demandado pela carga devem ser balanceados. Ou seja,  $T = T_L$  em operações de estado estacionárias, e esse montante de torque é denominado *ponto de operação*. A relação do torque do motor com a velocidade angular pode ser demonstrada conforme se vê na Figura 6.3 e denominada *curva torque-velocidade*. Também na Figura 6.3 se vê a relação carga-torque. A interseção dos dois traços é o ponto de operação, definido pelos valores do torque e da velocidade angular.

Figura 6.3 Curva torque-velocidade de um servomotor CC (idealizado) e típica relação carga/torque. A interseção dos dois traços é o ponto de operação



**EXEMPLO 6.1****Operação de um servomotor CC**

Um servomotor DC possui uma constante de torque,  $K_t = 0,095 \text{ N.m/A}$ , e uma constante de voltagem,  $K_v = 0,11 \text{ V/(rad/s)}$ . A resistência da armadura é  $R_a = 1,6 \text{ ohms}$ . Uma tensão de  $24 \text{ V}$  é usada na operação do motor. Determine (a) o torque inicial gerado pelo motor assim que a tensão é aplicada (denominado torque estacionário — *stall torque*), (b) a velocidade máxima quando o torque é igual a zero e (c) o ponto de operação do motor quando ele está conectado a uma carga cuja característica de torque é dada por  $T_L = K_L \omega$  e  $K_L = 0,007 \text{ N.m/(rad/s)}$ . Dê a velocidade de rotação em rev/min.

**Solução:** (a) Em  $\omega = 0$ , a corrente da armadura é  $I_a = V_m / R_a = 24/1,6 = 15 \text{ A}$ .

O torque correspondente é, então,  $T = K_t I_a = 0,095(15) = 1,425 \text{ N.m}$ .

(b) A velocidade máxima é alcançada quando a força contraeletromotriz  $E_b$  é igual à tensão terminal  $V_m$ .

$$E_b = K_v \omega = 0,11 \omega = 24 \text{ V} \\ \omega = 24/0,11 = 218,2 \text{ rad/s}$$

(c) O torque de carga é dado pela equação  $T_L = 0,007 \omega$ . A equação do torque do motor é dada pela Equação (6.8). Utilizando os dados do problema,

$$T = 0,095 (24 - 0,11 \omega)/1,6 = 1,425 - 0,00653 \omega.$$

Fazendo  $T = T_L$  e resolvendo  $\omega$ , temos que  $\omega = 105,3 \text{ rad/s}$ . Convertendo esse valor na velocidade de rotação,  $N = 60(105,3)/2\pi = 1.006 \text{ rev/min}$ .

**EXEMPLO 6.2****Potência do servomotor CC**

No exemplo anterior, qual a potência distribuída pelo motor no ponto de operação? Dê a resposta em (a) Watts e em (b) cavalo-vapor (horsepower — hp).

**Solução:** (a) Em  $\omega = 105,3 \text{ rad/s}$  e utilizando a equação do torque de carga,

$$T_L = 0,007 (105,3) = 0,737 \text{ N.m} \\ \text{Potência } P = T\omega = 0,737 (105,3) = 77,6 \text{ W.}$$

(b) Potência em hp =  $77,6/745,7 = 0,104 \text{ hp}$ .

Nosso modelo de operação de servomotor CC ignora certas perdas e ineficiências que ocorrem nesses motores (perdas semelhantes acontecem em todos os motores elétricos). Essas perdas incluem a perda de contato entre as escovas no comutador, perdas na armadura, atritos com o ar (perda pelo arraste do ar em velocidades de rotação muito altas do rotor) e perda por atrito mecânico nos rolamentos. Nosso modelo também ignora a dinâmica da operação do motor. Na verdade, a característica de inércia do próprio motor e a carga por ele impulsionada, bem como quaisquer mecanismos de transmissão (por exemplo, uma

caixa de marchas), teria papel importante na determinação de como o motor opera como função do tempo. Apesar das limitações, as equações conseguem ilustrar uma das vantagens significativas do servomotor CC, que é sua habilidade de distribuir um torque bastante alto em velocidade inicial igual a zero. Além disso, é um motor de velocidade variável e sua direção de rotação pode ser prontamente alterada. Essas são considerações importantes em muitas aplicações de automação, nas quais frequentemente é necessário iniciar e parar a rotação do motor ou reverter sua direção.

**Motores CA.** Embora os motores CC apresentem inúmeras características interessantes, também possuem duas fortes desvantagens: (1) o comutador e as escovas utilizadas na condução da corrente da montagem do estator para o rotor causam problemas de manutenção nesses motores e (2) a fonte de energia mais comum no setor é a corrente alternada, não a contínua. Para utilizar corrente alternada no acionamento de um motor CC, é preciso acrescentar um retificador que converta a corrente alternada em contínua. Por essas razões, os motores CA são largamente utilizados em muitas aplicações industriais. Eles não usam escovas e são compatíveis com o tipo anterior de energia elétrica.

Motores de corrente alternada operam por meio da geração de um campo magnético rotativo no estator, em que a velocidade de rotação depende da frequência da potência elétrica de entrada. O rotor é forçado a girar na mesma velocidade do campo magnético. Os motores CA podem ser classificados em duas grandes categorias: motores de indução e motores síncronos. Os *motores CA de indução* são, provavelmente, os mais amplamente utilizados no mundo devido à construção relativamente simples e ao baixo custo de manufatura. Na operação desse tipo de motor, a rotação do rotor através do campo magnético do estator induz a formação de outro campo magnético. Devido a essa característica, o rotor, na maioria dos motores de indução, não precisa de uma fonte externa de energia elétrica. Os *motores CA síncronos* operam por meio da energização do rotor com corrente alterada, o que gera um campo magnético no espaço que separa o rotor do estator. Esse campo magnético cria um torque que gira o rotor na mesma velocidade de rotação das forças magnéticas no estator. Motores síncronos são mais complexos porque requerem um dispositivo denominado *excitador* para iniciar a rotação do rotor quando a energia chega ao motor. O excitador aumenta a velocidade de rotação do rotor para sincronizá-la com a do campo magnético rotativo do estator, o que é condição necessária para que um motor CA síncrono funcione.



Tanto os motores por indução como os síncronos operam a uma velocidade constante que depende da frequência da potência elétrica de entrada. Suas aplicações costumam ser aquelas nas quais existe necessidade de funcionamento em uma velocidade constante. Essa é uma desvantagem em muitas aplicações de automação, pois alterações frequentes de velocidade costumam ser necessárias com tantos inícios e paradas. A questão da velocidade algumas vezes é tratada por meio de acionadores de frequência ajustável (denominados *inversores*) que controlam a frequência de corrente alternada para o motor. A velocidade do motor é proporcional à frequência e, portanto, alterá-la significa alterar a velocidade do motor. Os avanços na eletrônica do estado sólido ajudaram a melhorar o controle da velocidade nos motores CA e os tornaram competitivos em algumas aplicações tradicionalmente reservadas aos motores CC.

**Motores de passo.** Essa classe de motor fornece rotação na forma de deslocamentos angulares discretos, chamados de passos. Cada passo angular é atuado por um pulso elétrico discreto. A rotação angular total é controlada pelo número de pulsos recebidos pelo motor, e a velocidade de rotação é controlada pela frequência dos pulsos. O ângulo do passo está relacionado ao número de passos para o motor conforme a relação:

$$\alpha = \frac{360}{n_s} \quad (6.12)$$

em que  $\alpha$  é igual ao ângulo do passo, graus ( $^\circ$ ); e  $n_s$  é igual ao número de passos para o motor de passo, que deve ser um valor inteiro. Valores comuns para o ângulo do passo nos motores de passo comercialmente disponíveis são  $7,5^\circ$ ,  $3,6^\circ$  e  $1,8^\circ$ , correspondendo a 48, 100 e 200 passos (pulsos) por volta do motor. O ângulo total,  $A_m$ , por meio do qual o ângulo gira é dado por:

$$A_m = n_p \alpha \quad (6.13)$$

em que  $A_m$  é medido em graus ( $^\circ$ );  $n_p$  é o número de pulsos recebido pelo motor e  $\alpha$  é o ângulo do passo. A velocidade angular  $\omega$  e a velocidade de rotação  $N$  são dadas pelas expressões:

$$\omega = \frac{2\pi f_p}{n_s} \quad (6.14)$$

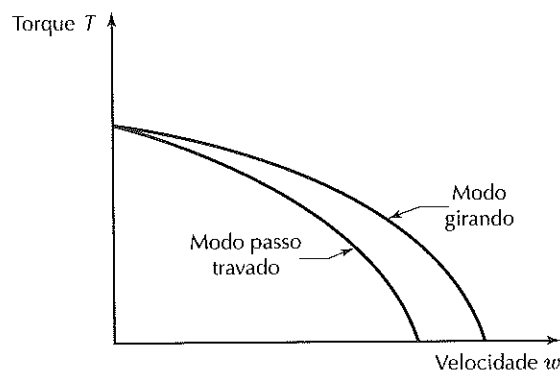
$$N = \frac{60 f_p}{n_s} \quad (6.15)$$

em que  $\omega$  é igual à velocidade angular, rad/s;  $N$  é a velocidade de rotação, rev/min;  $f_p$  é a frequência de pulsos, pulsos/s; e  $n_p$  é o número de passos no motor, passos/rev ou pulsos/rev.

As relações torque-velocidade típicas nos motores de passo são apresentadas na Figura 6.4. Assim como no servomotor CC, o torque diminui quando a velocidade de rotação aumenta. Como a velocidade de rotação está relacionada à frequência do pulso no motor de passo, o torque é mais baixo em taxas de pulso mais altas. Conforme indicado na figura, existem dois modos de operação, travado e girando. No *modo travado*, cada pulso recebido pelo motor faz com que se dê um passo angular discreto; o motor inicia e para (ao menos aproximadamente) com cada pulso. Nesse modo, o motor pode ser parado e iniciado e sua direção pode ser revertida. No *modo girando*, normalmente associado a altas velocidades, a rotação do motor é mais ou menos contínua e não permite paradas ou reversão de direção a cada passo subsequente. Ainda assim, o rotor continua respondendo aos pulsos individuais; ou seja, a relação entre a velocidade de rotação e a frequência dos pulsos é mantida nesse modo.

Os motores de passo são utilizados em sistemas de controle de malha aberta para aplicações nas quais o torque e os requisitos de energia são modestos. Eles são largamente

Figura 6.4 Curva torque-velocidade típica de um motor de passo



utilizados em máquinas-ferramenta e em outras máquinas de produção, robôs industriais, plotadores x-y, instrumentos médicos e científicos e em periféricos para computadores. É provável que a aplicação mais comum seja mover os ponteiros de relógios de quartzo analógicos.

### 6.2.2 Outros tipos de atuadores

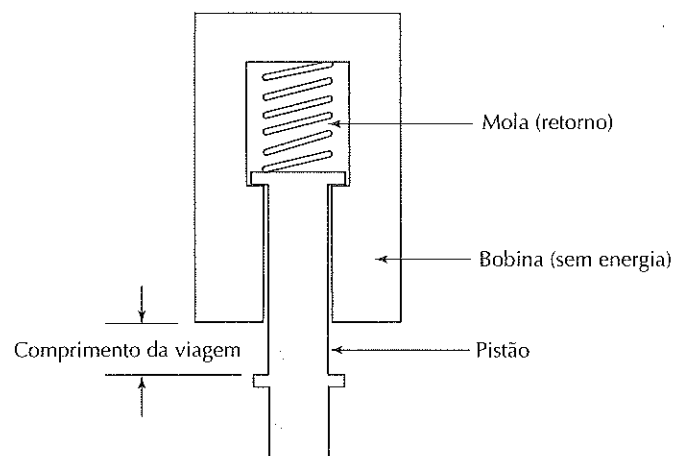
Existem outros tipos de atuadores elétricos além dos motores. Eles incluem solenoides e relés, que são dispositivos eletromagnéticos como motores elétricos, mas que operam de maneira diferente. Existem também atuadores que operam utilizando força hidráulica e pneumática.

**Atuadores elétricos diferentes dos motores.** Os dois atuadores descritos aqui são os solenoides e os relés eletromecânicos. Um *solenóide* é formado por um pistão móvel dentro de uma bobina de fios estacionária, conforme mostra a Figura 6.5. Quando uma corrente é aplicada à bobina, ela age como um ímã, atraindo o pistão para os fios. Quando a corrente é desligada, uma mola retorna o

pistão para sua posição anterior. Solenoides lineares do tipo descrito aqui costumam ser utilizados para abrir ou fechar válvulas em sistemas de fluxo de fluido, tais como equipamentos de processamento químico. Nessas aplicações, o solenoide age puxando ou empurrando (linearmente). Solenoides rotativos também estão disponíveis para oferecer movimento rotativo, em geral sobre uma faixa angular limitada (por exemplo, de uma posição neutra até um ângulo entre 25° e 90°).

Um *relé eletromecânico* é um interruptor elétrico liga/desliga formado por dois componentes principais: uma bobina estacionária e um braço móvel que pode ser feito para abrir ou fechar um contato elétrico através de um campo magnético gerado quando a corrente passa pela bobina. A razão para utilização de um relé é que ele pode ser operado com níveis relativamente baixos de corrente, mas ele abre e fecha circuitos que operam correntes e/ou voltagens altas. Assim, os relés representam um modo seguro de ligar e desligar remotamente um equipamento que requer altos valores de energia elétrica.

Figura 6.5 Solenoide



**Atuadores hidráulicos e pneumáticos.** Essas duas categorias de atuadores são energizadas por fluxos pressurizados. Óleo é utilizado nos sistemas hidráulicos e ar comprimido é utilizado nos sistemas pneumáticos. Em ambas as categorias, os dispositivos são semelhantes no funcionamento, mas distintos na construção devido às diferenças nas propriedades do óleo e do ar. Algumas dessas diferenças e seus efeitos sobre características e aplicações dos dois tipos de atuadores, são mostradas na Tabela 6.4.

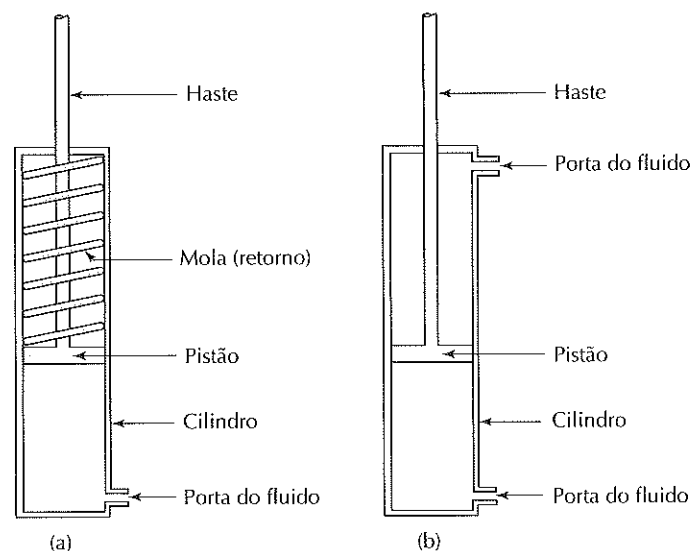
Atuadores hidráulicos e pneumáticos estão disponíveis tanto para movimentação linear como para a movimentação rotativa. O cilindro, ilustrado na Figura 6.6,

é um dispositivo de movimento linear comum. É basicamente um tubo, e um pistão é forçado a deslizar em seu interior devido à pressão do fluido. Dois tipos são mostrados na figura: (a) ação simples com retorno por mola e (b) dupla ação. Embora esses cilindros operem de modo semelhante para ambos os tipos de fluido, é mais difícil prever as características de velocidade e força nos cilindros pneumáticos por causa da compressibilidade do ar nesses dispositivos. Nos cilindros hidráulicos, o fluido não é comprimido, e a velocidade e a força do pistão dependem da vazão do fluido e da pressão no interior do cilindro, respectivamente, conforme dado pela relações:

Tabela 6.4 Comparação dos sistemas hidráulicos e pneumáticos

| Característica do sistema               | Sistema hidráulico   | Sistema pneumático   |
|---|--|--|
| Fluido pressurizado                     | Óleo (ou emulsão água-óleo)  | Ar comprimido  |
| Compressibilidade                       | Incompressível   | Compressível   |
| Nível típico de pressão do fluido       | 20 MPa (3.000 lb/pol <sup>2</sup> )  | 0,7 MPa (100 lb/pol <sup>2</sup> )   |
| Forças aplicadas pelos dispositivos     | Altas  | Baixas   |
| Velocidades de atuação dos dispositivos | Baixas   | Altas  |
| Controle de velocidade                  | Controle de velocidade preciso   | Difícil de controlar com precisão  |
| Problemas com vazamento de fluidos      | Sim, danos potenciais na segurança   | Sem problemas quando o ar vaza   |
| Custos relativos dos dispositivos       | Altos (fator de cinco a dez vezes)   | Baixo  |
| Construção e manufatura de dispositivos | Necessários bons acabamentos de superfície e tolerâncias restritas nos componentes | Em vez de componentes de alta precisão, anéis de vedação são utilizados na prevenção de vazamentos |
| Aplicações de automação                 | Preferíveis quando forças intensas e controle preciso são necessários              | Preferíveis quando o custo baixo e a alta velocidade de atuação são necessários                    |

Figura 6.6 Cilindro e pistão: (a) ação simples com mola de retorno e (b) ação dupla



$$v = \frac{Q}{A} \quad (6.16)$$

$$F = pA \quad (6.17)$$

em que  $v$  é a velocidade do pistão, m/s (pol/s);  $Q$  é a taxa de fluxo volumétrico, m<sup>3</sup>/s (pol<sup>3</sup>/s);  $A$  é a área da

seção transversal do cilindro, m<sup>2</sup> (pol<sup>2</sup>);  $F$  é a força aplicada, N (lbf); e  $p$  é a pressão do fluido, N/m<sup>2</sup> ou Pa (lb/pol<sup>2</sup>). Vale ressaltar que, em um cilindro de ação dupla, a área é diferente nas duas direções devido à presença da haste. Quando o pistão está retraído no cilindro, a área da seção transversal da haste deve ser subtraída da

área do cilindro. Isso significa que a velocidade do pistão será um pouco maior e a força aplicada será um pouco menor quando o pistão estiver recuando (curso reverso) se comparado a quando ele estiver avançando (curso adiante).

Motores rotativos acionados por fluidos também estão disponíveis para o fornecimento de movimento rotativo contínuo. Os motores hidráulicos são bons no desenvolvimento de torques altos, enquanto os motores pneumáticos podem ser utilizados para aplicações de alta velocidade. Existem inúmeros mecanismos diferentes por meio dos quais esses motores podem operar, incluindo o uso de pistões, palhetas e turbina. As características de desempenho dos motores rotativos acionados por ar são mais difíceis de ser analisadas, conforme já observado para o funcionamento dos cilindros pneumáticos. De outro lado, motores hidráulicos apresentam bom comportamento. Em geral, a velocidade de rotação de um motor hidráulico é diretamente proporcional à vazão de fluido, conforme definido na equação:

$$\omega = KQ \quad (6.18)$$

em que  $\omega$  é a velocidade angular, rad/s;  $Q$  é a vazão de fluido volumétrica, m<sup>3</sup>/s (pol<sup>3</sup>/s); e  $K$  é uma constante de proporcionalidade com unidade de rad/m<sup>3</sup> (rad/pol<sup>3</sup>). A velocidade angular (rad/s) pode ser convertida em revoluções por minutos (rev/min) multiplicando-a por  $60/2\pi$ .

### 6.3 CONVERSORES ANALÓGICO-DIGITAL

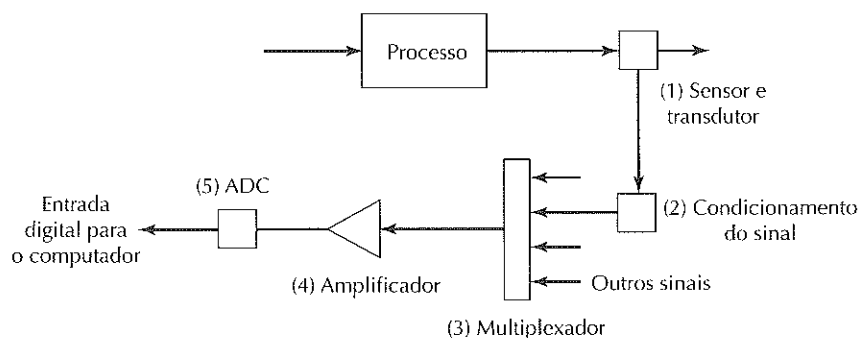
Para ser utilizados pelo computador, os sinais analógicos contínuos do processo devem ser convertidos em valores digitais, e os dados digitais gerados pelo computador devem ser convertidos em sinais analógicos a ser usados pelos atuadores analógicos. Nesta seção, discutimos a conversão analógico-digital; a conversão digital-analógico é abordada na próxima seção.

O procedimento para conversão de um sinal analógico do processo em forma digital normalmente é composto pelas etapas e os dispositivos de hardware descritos a seguir e ilustrados na Figura 6.7:

1. *Sensor e transdutor*: São os dispositivos de medição que geram o sinal analógico (Seção 6.1).
2. *Condicionamento do sinal*. O sinal analógico contínuo do transdutor pode demandar condicionamento de maneira a assumir uma forma mais apropriada. O condicionamento típico de sinais inclui (1) filtragem para remoção de ruídos e (2) conversão de uma forma de sinal para outra, por exemplo, conversão de corrente para voltagem.
3. *Multiplexador*. É um dispositivo de interrupção conectado em série a cada um dos canais de entrada do processo; é utilizado para compartilhar o tempo do conversor analógico-digital (do inglês, *analog-to-digital converter* — ADC) entre os canais de entrada. A alternativa é ter um ADC separado para cada canal, o que aumentaria o custo para uma grande aplicação com muitos canais de entrada. Como as variáveis do processo precisam ser tomadas somente periodicamente, a utilização de um multiplexador oferece uma alternativa viável em termos de custo se comparada aos ADCs dedicados aos canais individuais.
4. *Amplificador*. É utilizado para escalar o sinal de entrada para mais ou para menos de forma a torná-lo compatível com a faixa do conversor analógico-digital.
5. *Conversor analógico-digital*. Como o nome indica, a função do ADC é converter o sinal analógico de entrada em sinal digital.

Consideremos a operação do ADC, que é o coração do processo de conversão. A conversão analógico-digital ocorre em três fases: (1) amostragem, (2) quantização e

Figura 6.7 Etapas da conversão analógico-digital de sinais analógicos contínuos do processo



(3) codificação. A amostragem consiste na conversão do sinal contínuo em uma série de sinais analógicos discretos em intervalos periódicos, conforme mostra a Figura 6.8. Na quantização, cada sinal analógico discreto é atribuído a um dos números finitos dos níveis de amplitude previamente definidos. Esses níveis são valores discretos de voltagem que variam conforme a faixa de trabalho do ADC. Na fase de codificação, os níveis de amplitude discretos obtidos durante a quantização são convertidos em código digital, representando os níveis de amplitude discretos por meio de uma sequência de dígitos binários.

Na escolha de um conversor analógico-digital para uma aplicação, os seguintes fatores são relevantes: (1) taxa de amostragem, (2) tempo de conversão, (3) resolução e (4) método de conversão.

A taxa de amostragem é aquela na qual os sinais analógicos contínuos são tomados ou pesquisados. Uma alta taxa de amostragem significa que se pode chegar mais perto da forma de onda contínua do sinal analógico. Quando os sinais de entrada são multiplexados, a taxa de amostragem mais alta possível para cada sinal é a taxa máxima de amostragem do ADC dividida pelo número de canais processados pelo multiplexador. Por exemplo, se a taxa máxima de amostragem do ADC é 1.000 amostras/s e existem dez canais de entrada no multiplexador, então a taxa máxima de amostragem para cada linha de entrada é  $1.000/10 = 100$  amostras/s. (Esse procedimento ignora perdas de tempo causadas pela interrupção do multiplexador.)

A taxa de amostragem mais alta possível de um ADC é limitada pelo tempo de conversão do ADC. O tempo de conversão de um ADC é o intervalo de tempo decorrido entre a aplicação de um sinal de entrada e a determinação do valor digital pelas fases de quantização e codificação do procedimento de conversão. Esse tempo depende (1) do tipo de procedimento de conversão utilizado pelo ADC e (2) do número de bits  $n$  utilizados para definir o valor digital convertido. Conforme  $n$  aumenta, o tempo de conversão diminui (o que é ruim), mas a resolução do ADC aumenta (o que é bom).

A resolução de um ADC é a precisão com a qual o sinal analógico é avaliado. Como o sinal é representado na forma binária, a precisão é determinada pelo número de níveis de quantização, o que, em contrapartida, é determinado pela capacidade de bits do ADC e do computador. O número de níveis de quantização é definido por:

$$N_q = 2^n \quad (6.19)$$

em que  $N_q$  é o número de níveis de quantização e  $n$  é o número de bits. A resolução pode ser definida na forma de equação como:

$$R_{ADC} = \frac{L}{N_q - 1} = \frac{L}{2^n - 1} \quad (6.20)$$

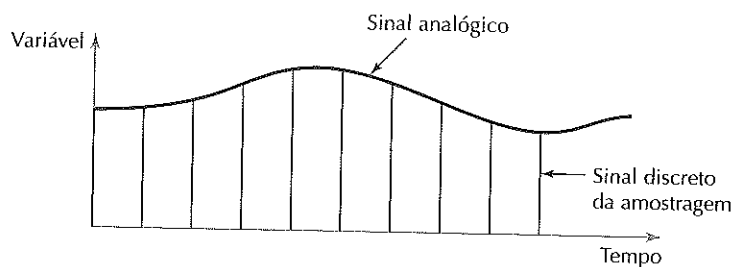
em que  $R_{ADC}$  é a resolução do ADC, também denominada *espaço entre níveis de quantização*, que é o comprimento de cada nível de quantização;  $L$  é o limite da faixa de trabalho do ADC, normalmente entre 0-10 V (o sinal de entrada normalmente precisa ser amplificado, para mais ou para menos, até essa faixa); e  $N_q$  é o número de níveis de quantização, definido na Equação (6.19).

A quantização gera um erro, visto que o valor digital quantizado pode ser diferente do valor real do sinal analógico. O maior erro possível ocorre quando o valor verdadeiro do sinal analógico está na fronteira entre dois níveis de quantização adjacentes. Nesse caso, o erro é a metade do espaçamento entre os níveis de quantização. Assim sendo, o erro de quantização é definido como:

$$\text{Erro de quantização} = \pm \frac{1}{2} R_{ADC} \quad (6.21)$$

Diversos métodos de conversão estão disponíveis para uso na codificação de um sinal analógico em seu valor digital equivalente. Vamos discutir a técnica mais comumente empregada, denominada *método de aproximação sucessiva*. Nesse método, uma série de tensões de referência é sucessivamente comparada ao sinal de entrada cujo valor é desconhecido. O número de tensões de referência corresponde ao número de bits usados na codificação do sinal. A primeira

Figura 6.8 Sinal analógico convertido em uma série de dados discretos de amostragem por meio do conversor analógico-digital



tensão de referência é metade da faixa de trabalho do ADC, e cada tensão de referência subsequente é metade do valor anterior. A comparação do restante da voltagem de entrada com cada tensão de referência retorna um bit no valor 1, se a entrada exceder o valor de referência, e 0, se a entrada for menor do que o valor de referência. Os valores de bits seguintes, multiplicados por suas tensões de referência correspondentes, formam o valor codificado do sinal de entrada. Vamos ilustrar esse procedimento com um exemplo.

#### EXEMPLO 6.3

##### Método de aproximação sucessiva na conversão analógico-digital

Suponha que o sinal de entrada é 6,8 V. Utilizado o método de aproximação sucessiva, codifique o sinal para um registro de seis bits para um ADC com limite de escala de 10 V.

**Solução:** o procedimento de codificação para a entrada de 6,8 V é ilustrado na Figura 6.9. Na primeira tentativa, 6,8 V é comparado a 5 V. Como  $6,8 > 5$ , o valor do primeiro bit é 1. Comparando o valor restante  $(6,8 - 5) = 1,8$  V com a segunda tensão de ensaio de 2,5 V, temos zero para o valor do bit, já que  $1,8 < 2,5$ . A terceira tensão de ensaio é igual a 1,25 V. Como  $1,8 > 1,25$ , o valor do terceiro bit é 1. O resto dos seis bits são avaliados na figura para resultarem no valor codificado igual a 6,718 V.

## 6.4 CONVERSORES DIGITAL-ANALÓGICO

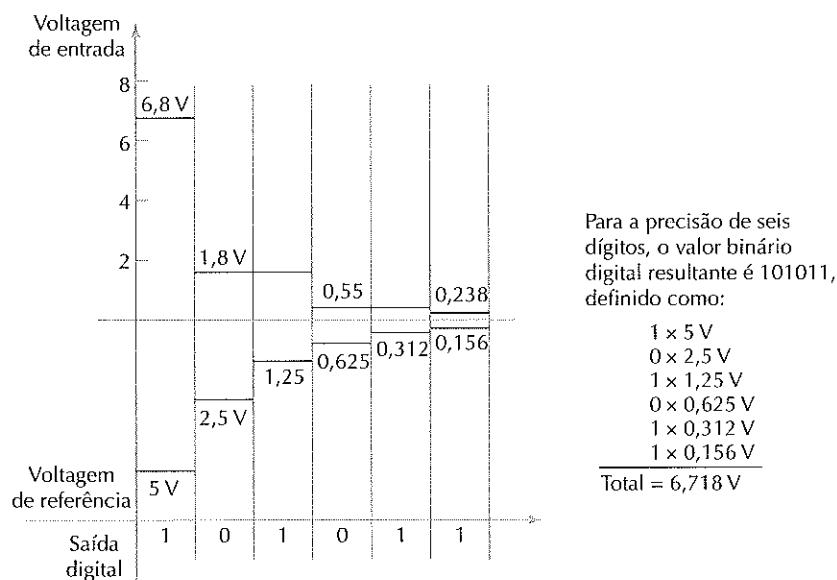
O processo executado por um conversor digital-analógico (DAC) é o contrário do processo ADC. O DAC transforma a saída digital do computador em um sinal contínuo que aciona um atuador ou outro dispositivo analógico. A conversão digital-analógico é composta de duas etapas: (1) *decodificação*, na qual a saída digital é convertida em uma série de valores analógicos em momentos discretos de tempo, e (2) *exploração de dados* (do inglês, *data holding*), na qual cada valor sucessivo é transformado em um sinal contínuo (normalmente voltagem elétrica) usado para acionar o atuador analógico durante o intervalo de amostragem.

A decodificação é alcançada por meio da transferência do valor digital do computador para um registro binário que controla uma fonte de voltagem de referência. Cada bit sucessivo no registro controla metade da voltagem do bit precedente, de modo que o nível da voltagem de saída é determinado pelo estado dos bits no registro. Assim, a voltagem de saída é dada por:

$$E_o = E_{ref} \{ 0,5B_1 + 0,25B_2 + 0,125B_3 + \dots + (2^n)^{-1}B_n \} \quad (6.22)$$

em que  $E_o$  é a voltagem de saída da etapa de decodificação, V;  $E_{ref}$  é a voltagem de referência V; e  $B_1, B_2, \dots, B_n$  são os estados dos bits sucessivos no registro, zero ou um; e  $n$  é o número de bits no registro binário.

Figura 6.9 Método de aproximação sucessiva aplicado ao Exemplo 3



O objetivo da etapa de exploração de dados é aproximar o conjunto formado pela série de dados, conforme ilustra a Figura 6.10. Os dispositivos de exploração de dados são classificados conforme a ordem do cálculo de extrapolação utilizado para determinar a voltagem de saída durante os intervalos de amostragem. O extrapolador mais comum é o *retentor de ordem zero*, no qual a voltagem de saída entre os instantes da amostragem é uma sequência de sinais de passo, como mostra a Figura 6.10(a). A função de voltagem é constante durante o intervalo da amostragem e pode ser expressa de modo simples como:

$$E(t) = E_0 \quad (6.23)$$

em que  $E(t)$  é a voltagem como função do tempo  $t$  durante o intervalo de amostragem,  $V$ , e  $E_0$  é a voltagem de saída da etapa de codificação, conforme Equação (6.22).

O retentor de dados de primeira ordem é menos comum do que o de ordem zero, mas ele costuma aproximar com maior precisão o conjunto de dados da amostragem. Com o *retentor de primeira ordem*, a função voltagem  $E(t)$  se altera durante o intervalo de amostragem com uma inclinação constante determinada pelos dois valores anteriores de  $E_0$ . Expressando matematicamente, temos que:

$$E(t) = E_0 + \alpha t \quad (6.24)$$

em que  $\alpha$  é a taxa de alteração de  $E(t)$ ;  $E_0$  é a voltagem de saída da Equação (6.22) no início do intervalo de amostragem,  $V$ ; e  $t$  é o tempo,  $s$ . O valor de  $\alpha$  é calculado a cada intervalo de amostragem como:

$$\alpha = \frac{E_0 - E_0(-\tau)}{\tau} \quad (6.25)$$

em que  $E_0$  é a voltagem de saída da Equação (6.22) no início do intervalo de amostragem,  $V$ ;  $\tau$  é o intervalo de tempo entre os instantes de amostragem,  $s$ ; e  $E_0(-\tau)$  é o valor de  $E_0$  da Equação (6.22) do instante de amostra-

gem anterior, que retrocede conforme  $\tau$ ,  $V$ . O resultado do retentor de primeira ordem é apresentado na Figura 6.10(b).

#### EXEMPLO 6.4

##### Retentores de ordem zero e de primeira ordem para conversores digital-analógico

Um conversor digital-analógico utiliza uma voltagem de referência de 100 V e possui uma precisão de 6 bits. Em três instantes de amostragem sucessivos, com diferença de 0,5 segundo entre cada um, os dados armazenados no registro binário são os seguintes:

| Instante | Dado binário |
|----------|--------------|
| 1        | 101000       |
| 2        | 101010       |
| 3        | 101101       |

Determine (a) os valores de saída do decodificador para os três instantes de amostragem, (b) os sinais de voltagem entre os instantes 2 e 3 para um retentor de ordem zero, e (c) os sinais de voltagem entre os instantes 2 e 3 para um retentor de primeira ordem.

**Solução:** (a) Os valores de saída do decodificador para os três instantes de amostragem são calculados conforme a Equação (6.22):

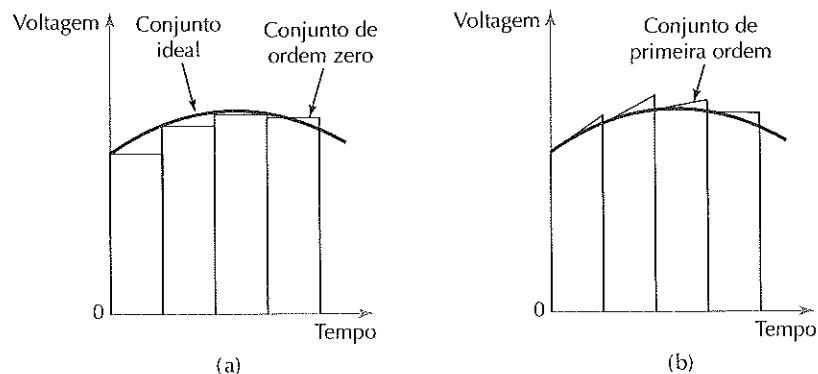
Instante 1,  $E_0 = 100\{0,5(1) + 0,25(0) + 0,125(1) + 0,0625(0) + 0,03125(0) + 0,015625(0)\} = 62,50 \text{ V}$

Instante 2,  $E_0 = 100\{0,5(1) + 0,25(0) + 0,125(1) + 0,0625(0) + 0,03125(1) + 0,015625(0)\} = 65,63 \text{ V}$

Instante 3,  $E_0 = 100\{0,5(1) + 0,25(0) + 0,125(1) + 0,0625(1) + 0,03125(0) + 0,015625(1)\} = 70,31 \text{ V}$

(b) O retentor de ordem zero entre os instantes 2 e 3 resulta em uma voltagem constante  $E(t) = 65,63 \text{ V}$ , conforme Equação (6.23).

Figura 6.10 Etapa de exploração de dados utilizando (a) retentor de ordem zero e (b) retentor de primeira ordem



(c) O retentor de primeira ordem resulta em uma voltagem crescente. A inclinação  $\alpha$  é dada pela Equação (6.25):

$$\alpha = \frac{65,63 - 62,5}{0,5} = 6,25$$

e, pela Equação (6.24), a função voltagem entre os instantes 2 e 3 é:

$$E(t) = 65,63 + 6,25t$$

Esses valores e essas funções são representados na Figura 6.11. Observe que, comparado ao retentor de ordem zero, o retentor de primeira ordem antecipa com maior precisão o valor de  $E_0$  no instante de amostragem 3.

## 6.5 DISPOSITIVOS DE ENTRADA/SAÍDA PARA DADOS DISCRETOS

Dados discretos podem ser processados por um computador digital sem os tipos de procedimentos de conversão necessários para os sinais analógicos contínuos. Conforme vimos anteriormente, os dados discretos se dividem em três categorias: (a) dados binários, (b) dados discretos que não são binários e (c) dados de pulso. A Tabela 6.5 resume as interfaces de entrada/saída para as três categorias de dados discretos.

### 6.5.1 Interfaces de contato de entrada/saída

As interfaces de contato podem ser de dois tipos: entrada ou saída. Essas interfaces trazem os dados binários do processo para o computador e transmitem sinais binários do computador para o processo, respectivamente. Os termos 'entrada' e 'saída' fazem referência ao computador.

Uma *interface de contato de entrada* é um dispositivo por meio do qual os dados binários são lidos pelo computador a partir de alguma fonte externa (por exemplo, o processo). Ela é formada por uma série de contatos simples que podem estar fechados ou abertos (ligados ou desligados) para indicar o estado de um dispositivo binário conectado ao processo, como uma chave fim-de-curso (conectada ou desconectada), válvulas (abertas ou fechadas) ou botoeiras de acionamento de motor (ligado ou desligado). O computador verifica periodicamente o estado atual dos contatos para atualizar os valores armazenados em memória.

A interface de contato de entrada também pode ser usada na entrada de dados discretos que não sejam binários. Esse tipo de dado é gerado por dispositivos como uma matriz de sensor fotoelétrico e pode ser armazenado em um registro binário composto por múltiplos bits. Os valores individuais dos bits (0 ou 1) podem ser fornecidos pela interface de contato de entrada. Na verdade, um determinado número de contatos na interface de entrada é alocado para o registro binário, o número de contatos igual ao número de bits no registro. O número binário pode ser convertido para a base 10 convencional conforme necessidade da aplicação.

A *interface de contato de saída* é o dispositivo que comunica os sinais ligados/desligados do computador para o processo. As posições do contato são definidas como ligado ou desligado. Essas posições são mantidas até que sejam alteradas pelo computador, talvez em resposta a eventos do processo. Nas aplicações de controle de processos por computador, o hardware controlado pela interface de contato de saída inclui alarmes, luzes indicadoras (em painéis de controle), solenoides e motores de velocidade constante. O computador controla a sequência de

Figura 6.11 Solução do Exemplo 6.4

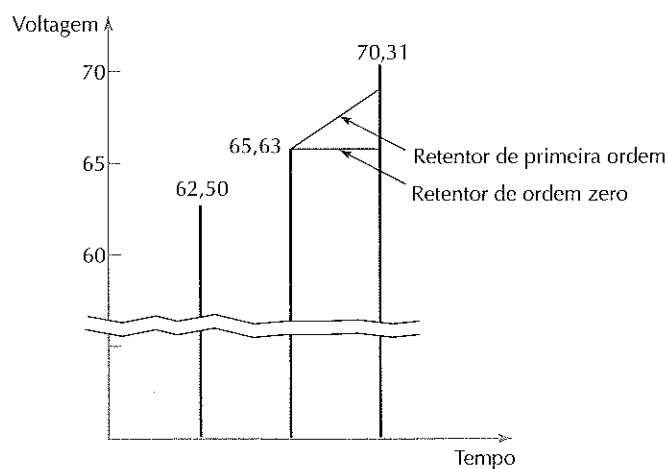




Tabela 6.5 Tipos de interfaces de entrada/saída do computador para diferentes tipos de variáveis e parâmetros discretos

| Tipo de dado digital                     | Interface de entrada para o computador | Interface de saída do computador |
|--|--|----------------------------------|
| Dado discreto binário (ligado/desligado) | Entrada de contato                     | Saída de contato                 |
| Dado discreto que não seja binário       | Matriz de entrada de contato           | Matriz de saída de contato       |
| Dados de pulso discretos                 | Contadores de pulsos                   | Geradores de pulsos              |

acionamentos (atividade ligadas/desligadas), no ciclo de trabalho por meio dessa interface.

A interface de contato de saída pode ser utilizada para transmitir outros dados que não sejam binários por meio da associação na interface de uma matriz de contatos com esse propósito. Os valores zero e um dos contatos na matriz são avaliados como um grupo, de modo a determinar o número discreto correspondente. Na verdade, esse procedimento é o oposto daquele utilizado pela interface de contato de entrada para dados discretos que não sejam binários.

### 6.5.2 Contadores e geradores de pulsos

Dados discretos também podem existir em forma de uma série de pulsos. Esses dados são gerados por transdutores digitais tais como codificadores óticos (encoders). Dados em pulsos também são utilizados no controle de certos dispositivos, como motores de passo.

Um *contador de pulsos* é um dispositivo utilizado para converter uma série de pulsos (chamado *trem de pulsos*, conforme mostrado na Figura 5.1) em um valor digital que é, então, passado ao computador por um canal de entrada. O tipo mais comum de contador de pulsos é aquele que conta pulsos elétricos. Ele é construído utilizando portas lógicas sequenciais, denominada *flip-flops*, que são dispositivos eletrônicos com capacidade de memória e que podem ser utilizados no armazenamento dos resultados do procedimento de contagem.

Os contadores de pulso podem ser utilizados tanto em aplicações de contagem como nas de medição. Uma aplicação de contagem típica pode somar o número de pacotes que passam por um sensor fotoelétrico em um transportador de um centro de distribuição. Uma aplicação de medição típica pode indicar a velocidade de rotação de um eixo. Um método possível para se chegar à medição é conectar o eixo a um codificador ótico, que gera um determinado número de pulsos elétricos para cada rotação. Para determinar a velocidade de rotação, o contador de pulsos mede o número de pulsos recebidos durante um determinado período de tempo e o divide pelo tempo e pelo número de pulsos em cada ciclo do codificador. Discutiremos esses contadores no contexto do controle digital na Seção 9.1.2.

Um *gerador de pulsos* é um dispositivo que produz uma série de pulsos elétricos cujas quantidade e frequência totais são definidas pelo computador de controle. O número total de pulsos pode ser utilizado para acionar um eixo de um sistema de posicionamento. A frequência da cadeia de pulsos, ou taxa de pulsos, poderia ser usada no controle da velocidade de rotação de um motor de passos. Um gerador de pulsos opera repetindo continuamente as operações de fechamento e abertura de um contato elétrico, produzindo assim uma sequência de pulsos elétricos discretos. A amplitude (nível de voltagem) e a frequência são projetadas de modo a ser compatíveis com o dispositivo sendo controlado.

## Referências

- [1] ASTROM, K. J.; WITTENMARK, B. *Computer-controlled systems: Theory and design*. 3. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997.
- [2] BATESON, R. N. *Introduction to control system technology*. 7. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.
- [3] BEATY, H. W.; KIRTLEY JR., J. L. *Electric motor handbook*. Nova York, NY: McGraw-Hill Book Company, 1998.
- [4] BOUCHER, T. O. *Computer automation in manufacturing*. Londres: Chapman & Hall, 1996.
- [5] DOEBLIN, E. O. *Measurement systems: Applications and design*. 4. ed. Nova York, NY: McGraw-Hill, 1990.
- [6] FRADEN, J. *Handbook of modern sensors*. 3. ed. Nova York, NY: Springer-Verlag, 2003.

- [7] GARDNER, J. W. *Microsensors: Principles and applications*. Nova York, NY: John Wiley & Sons, 1994.
- [8] GROOVER, M. P.; WEISS, M.; NAGEL, R. N.; ODREY, N. G.; MORRIS, S. B. *Industrial automation and robotics*. Nova York, NY: McGraw-Hill (Primus Custom Publishing), 1998.
- [9] OLSSON, G.; PIANI, G. *Computer systems for automation and control*. Londres: Prentice Hall, 1992.
- [10] PESSEN, D. W. *Industrial automation: Circuit design and components*. Nova York, NY: John Wiley & Sons, 1989.
- [11] RIZZONI, G. *Principles and applications of electrical engineering*. 5. ed. Nova York, NY: McGraw-Hill, 2007.
- [12] STENERSON, J. *Fundamentals of programmable logic controllers, sensors, and communications*. 3. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall, 2004.

## Questões de revisão

- 6.1 O que é um sensor?
- 6.2 Qual a diferença entre um sensor analógico e um sensor discreto?
- 6.3 Qual a diferença entre um sensor ativo e um sensor passivo?
- 6.4 Em um sensor, o que é a função transferência?
- 6.5 O que é um atuador?
- 6.6 Quase todos os atuadores podem ser classificados em três categorias, segundo o tipo de energia utilizada. Defina essas categorias.
- 6.7 Cite os dois componentes de um motor elétrico.
- 6.8 No motor CC, o que é um comutador?
- 6.9 Quais são as duas desvantagens significativas dos motores CC elétricos que fazem com que os motores CA se tornem relativamente atraentes?
- 6.10 Qual a diferença entre a operação de um motor de passo convencional e um motor CC ou CA?
- 6.11 O que é um solenoide?
- 6.12 Qual a diferença entre um atuador hidráulico e um atuador pneumático?
- 6.13 Descreva brevemente as três fases do processo de conversão analógico-digital.
- 6.14 Qual é a resolução de um conversor analógico-digital?
- 6.15 Descreva brevemente as duas fases do processo de conversão digital-analógico.
- 6.16 Qual a diferença entre uma interface de contato de entrada e uma interface de contato de saída?
- 6.17 O que é um contador de pulsos?

## Problemas

### Sensores

- 6.1 Durante a calibragem, um termopar ferro/constantan é zerado (configurado para emitir uma voltagem igual a zero) a 0 °C. A 750 °C, ele emite uma voltagem de 38,8 mV. Existe uma relação de entrada/saída linear entre 0 °C e 750 °C. Determine (a) a função transferência do termopar e (b) a temperatura correspondente à voltagem de saída de 29,6 mV.
- 6.2 Um tacômetro digital é utilizado para determinar a velocidade de superfície de uma peça de trabalho rotativa em pés/min. Os tacômetros são projetados para leitura da velocidade de rotação em rev/min, mas, nesse caso, o eixo do tacômetro está diretamente acoplado a uma roda cujo aro externo é feito de borracha. Quando esse aro é pressionado contra a superfície da peça de trabalho em rotação, o tacômetro realiza a leitura da velocidade da superfície. A unidade de medida desejada para essa leitura é pés/min. Qual é o diâmetro do aro da roda que irá oferecer uma leitura direta da velocidade da superfície em pés/min?
- 6.3 Um medidor digital de vazão opera emitindo um pulso para cada unidade de volume de fluido que o percorre. O medidor que nos interessa possui uma unidade de volume de 57,9 cm<sup>3</sup> por pulso. Em determinada aplicação de controle de processo, o medidor emitiu 6.489 pulsos durante o período de 3,6 minutos. Determine (a) o volume total de fluido que percorreu o medidor, (b) a vazão do fluido e (c) a frequência de pulsos (Hz) correspondente a uma vazão de 75.000 cm<sup>3</sup>/min.
- 6.5 Um termopar para interface ferramenta-cavaco é utilizado para medir a temperatura de corte em uma operação de torneamento. Os dois metais não semelhantes nesse tipo de termopar são o material da ferramenta e o metal da peça de trabalho. Durante a operação de torneamento, o cavaco da peça de trabalho forma uma junção com a aresta de ataque da ferramenta para criar o termoacoplamento exatamente na posição em que a temperatura deve ser medida: na interface entre a ferramenta e o cavaco. Um procedimento separado de calibragem deve ser executado para cada combinação do material da ferramenta

com o metal de trabalho. Na combinação que aqui nos interessa, a curva de calibração (inverso da função transferência) para determinado grau de ferramenta de metal duro utilizada no torneamento de aço C1040 é:  $T = 88,1E_{tc} - 127$ , em que  $T$  é a temperatura em °F e  $E_{tc}$  é a saída da força eletromotriz do termopar em mV. (a) Revise a equação da temperatura de modo que ela assuma a forma de uma função transferência semelhante à da Equação (6.3). Qual a sensibilidade desse termopar? (b) Durante uma operação de torneamento em linha reta, a força eletromotriz de saída do termopar foi medida em 9,25 mV. Qual era a temperatura de corte correspondente?

#### Atuadores

- 6.5 Um servomotor DC é utilizado para atuar em um dos eixos de um posicionador  $x$ - $y$ . O motor tem torque constante de 8,75 pol-lb/A e voltagem constante de 10 V/ (1.000 rev/min). A resistência da armadura é de 2 ohms. Em determinado momento, a mesa de posicionamento não está se movendo e uma voltagem de 20 V é aplicada aos terminais do motor. Determine o torque (a) imediatamente depois que a voltagem é aplicada e (b) a uma velocidade de rotação de 400 rev/min. (c) Qual a velocidade teórica máxima do motor?
- 6.6 Um servomotor CC possui um torque constante de 0,088 N.m/A e uma voltagem constante igual a 0,12 V/(rad/s). A resistência da armadura é de 2,3 ohms. Uma voltagem de 30 V é utilizada na operação do motor. Determine (a) o torque inicial gerado pelo motor assim que a voltagem é aplicada, (b) a velocidade máxima quando o torque é igual a zero e (c) o ponto de operação do motor quando ele está conectado a uma carga cuja característica de torque é proporcional à velocidade com uma constante de proporcionalidade igual a 0,011 N.m/(rad/s).
- 6.7 No problema anterior, qual a potência fornecida pelo motor no ponto de operação em (a) Watts e em (b) hp?
- 6.8 Uma tensão de 24 V é aplicada a um servomotor CC cujas constantes de torque e voltagem são 0,115 N.m/A e 0,097 V/(rad/s), respectivamente. A resistência da blindagem é 1,9 ohms. O motor está diretamente ligado ao eixo de um ventilador para um processo industrial. (a) Qual o torque estático do motor? (b) Determine o ponto de operação do motor, se a característica torque-velocidade do ventilador for dada pela equação  $T_L = K_{L1}\omega + K_{L2}\omega^2$ , em que  $T_L$  é o torque de carga, N.m;  $\omega$  é a velocidade angular, rad/s;  $K_{L1}$  é igual a 0,005 N.m/(rad/s) e  $K_{L2}$  é igual a 0,00033 N.m/(rad/s)<sup>2</sup>. (c) Qual potência está sendo gerada pelo motor no ponto de operação?
- 6.9 O ângulo de passo de um motor de passos é igual a 1,8°. A aplicação que nos interessa deve fazer o eixo do motor dar dez giros completos a uma velocidade angular de 20 rad/s. Determine (a) o número necessário de pulsos e (b) a frequência de pulsos para alcançar a rotação especificada.
- 6.10 Um motor de passos possui um ângulo de passo de 7,5°. (a) Quantos pulsos são necessários para que o motor dê cinco giros completos? (b) Qual a frequência de pulsos necessária para que o motor gire a uma velocidade de 200 rev/min?
- 6.11 O eixo de um motor de passo está diretamente conectado a um fuso que aciona uma mesa de trabalho em um sistema de posicionamento  $x$ - $y$ . O motor possui um ângulo de passo igual a 5°. O passo do fuso é de 6 mm, o que significa que a mesa de trabalho se move em direção ao eixo do fuso a uma distância de 6 mm para cada giro completo do fuso. Deseja-se mover a mesa a uma distância de 300 mm a uma velocidade máxima de 40 mm/s. Determine (a) o número de pulsos e (b) a frequência de pulsos necessária para alcançar esse movimento.
- 6.12 Um cilindro hidráulico de ação simples com retorno por mola possui um diâmetro interno de 88 mm. Sua aplicação deve empurrar paletes para fora de um transportador, em uma área de armazenamento. A unidade de potência hidráulica pode gerar até 3,2 MPa de pressão a uma vazão de 175.000 mm<sup>3</sup>/s para acionar o pistão. Determine (a) a velocidade máxima possível do pistão e (b) a força máxima que pode ser aplicada ao aparelho.
- 6.13 Um cilindro hidráulico de dupla ação possui um diâmetro interno de 75 mm. O pistão tem diâmetro de 14 mm. A fonte de energia hidráulica pode gerar até 5 MPa de pressão a uma taxa de fluxo de 200.000 mm<sup>3</sup>/s para acionar o pistão. (a) Quais a velocidade máxima possível do pistão e a força máxima que pode ser aplicada no curso adiante? (b) Quais a velocidade máxima possível do pistão e a força máxima que pode ser aplicada no curso reverso?
- 6.14 Um cilindro hidráulico de ação dupla é usado para atuar em uma articulação linear de um robô industrial. O diâmetro interno é de 3,5 pol. O pistão tem diâmetro de 0,5 pol. A unidade de potência hidráulica pode gerar até 500 lb/pol<sup>2</sup> de pressão com uma vazão de 1.200 pol<sup>3</sup>/min para acionar o pistão. (a) Determine a velocidade máxima possível do pistão e a força máxima que pode ser aplicada no avanço. (b) Determine a velocidade máxima possível do pistão e a força máxima que pode ser aplicada no recuo.

## ADC e DAC

- 6.15 Um sinal contínuo de voltagem deve ser convertido em seu equivalente digital utilizando um conversor analógico-digital. A faixa máxima de voltagem é  $\pm 30$  V. O ADC possui capacidade de 12 bits. Determine (a) o número de níveis de quantização, (b) a resolução, (c) o espaçamento entre cada nível de quantização e (d) o erro de quantização para esse ADC.
- 6.16 Um sinal de voltagem na faixa de zero a 115 V deve ser convertido por meio de um ADC. Determine o número mínimo de bits necessários para a obtenção de um erro de quantização de, no máximo, (a)  $\pm 5$  V, (b)  $\pm 1$  V e (c)  $\pm 0,1$  V.
- 6.17 Um conversor digital-analógico usa uma voltagem de referência de 120 V CC e possui oito dígitos binários de precisão. Em um dos instantes de amostragem, os dados contidos no registro binário são 01010101. Se um retentor de ordem zero for utilizado para gerar o sinal de saída, qual será o nível de voltagem do sinal?
- 6.18 Um conversor digital-analógico usa voltagem de referência de 80 V e possui precisão de seis dígitos. Em quatro instantes sucessivos de amostragem, cada um com um segundo de duração, os dados binários contidos no registro de saída foram 100000, 011111, 011101 e 011010. Determine a equação para a voltagem como uma função do tempo entre os instantes de amostragem 3 e 4 utilizando retentores (a) de ordem zero e (b) de primeira ordem.
- 6.19 No problema anterior, imagine que um retentor de segunda ordem fosse utilizado para gerar o sinal de saída. A equação para esse retentor seria  $E(t) = E_0 + \alpha t + \beta t^2$ , em que  $E_0$  é a voltagem inicial no começo do intervalo de tempo. (a) Para os dados binários citados no problema anterior, determine os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  que seriam utilizados na equação para o intervalo de tempo entre os instantes 3 e 4. (b) Compare a atuação dos retentores de primeira e de segunda ordem na antecipação da voltagem no quarto instante.