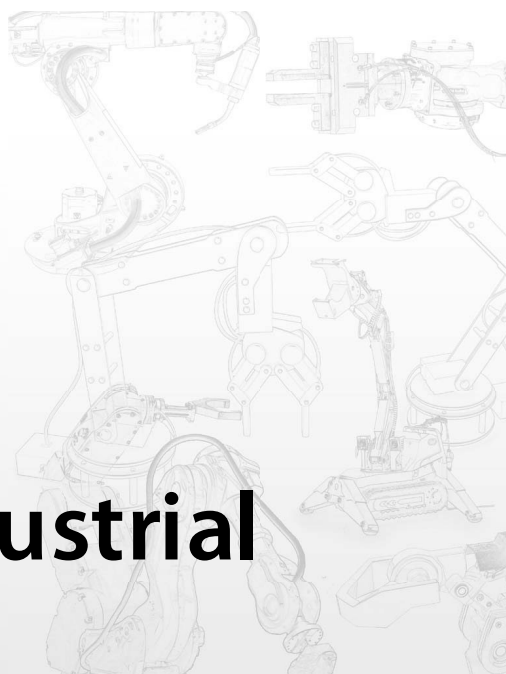


CAPÍTULO

5

Sistemas de controle industrial



CONTEÚDO DO CAPÍTULO

- 5.1 Indústrias de processos *versus* indústrias de produção discreta
 - 5.1.1 Níveis de automação nas duas indústrias
 - 5.1.2 Variáveis e parâmetros nas duas indústrias
- 5.2 Controle contínuo *versus* controle discreto
 - 5.2.1 Sistemas de controle contínuo
 - 5.2.2 Sistemas de controle discreto
- 5.3 Controle de processos por computador
 - 5.3.1 Requisitos de controle
 - 5.3.2 Recursos do controle por computador
 - 5.3.3 Formas de controle de processos por computador

O sistema de controle é um dos três componentes básicos de um sistema automatizado (Seção 4.1). Neste capítulo, examinamos os sistemas de controle industrial, em especial como os computadores digitais são utilizados para implementar a função de controle na produção. *Controle industrial* é definido aqui como a regulação automática das operações da unidade e de seus equipamentos associados, bem como a integração e a coordenação dessas operações no sistema de produção maior. No contexto do nosso livro, o termo *operações da unidade* se refere normalmente às operações de produção; entretanto, o termo também se aplica à operação de manuseio de materiais e outros equipamentos industriais. Vamos começar este capítulo comparando a aplicação de controle industrial nas indústrias de processamento com suas aplicações nas indústrias de produção discreta.

5.1 INDÚSTRIAS DE PROCESSOS *VERSUS* INDÚSTRIAS DE PRODUÇÃO DISCRETA

Em nossas discussões anteriores dos tipos de indústria no Capítulo 2, dividimos as indústrias e suas operações de produção em duas categorias básicas: (1) indústrias de processos e (2) indústrias de produção discreta. As indústrias de processos executam suas operações de produção em *montantes* de materiais, porque esses materiais tendem a ser líquidos, gases, pós e similares, enquanto as indústrias de produção discreta executam suas operações em *quantidades* de materiais, pois os materiais tendem a ser peças discretas e produtos. Os tipos de operações de unidade executados nos materiais são diferentes nas duas categorias de indústria. Algumas das operações da unidade típicas em cada categoria estão listadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Operações típicas da unidade nas indústrias de processos e nas indústrias de produção discreta

Operações típicas nas indústrias de processos	Operações típicas nas indústrias de produção discreta
Reações químicas	Fusão
Fragmentação	Forjamento
Deposição (por exemplo, deposição de vapor químico)	Extrusão
	Usinagem
Destilação	Montagem mecânica
Mistura de ingredientes	Moldagem de plástico
Separação de ingredientes	Estampagem em folha de metal

5.1.1 Níveis de automação nas duas indústrias

Os níveis de automação (Seção 4.3) nas duas indústrias são comparados na Tabela 5.2. As diferenças significativas são vistas nos níveis baixo e intermediário. No nível de dispositivo, há diferenças nos tipos de atuadores e sensores usados nas duas categorias de indústria, simplesmente porque os processos e os equipamentos são diferentes. Nas indústrias de processos, os dispositivos são usados em sua maioria para as malhas (*loops*) de controle

em operações de processamento químico, térmico ou similares, ao passo que, nas indústrias de produção discreta, os dispositivos controlam as ações mecânicas das máquinas. No próximo nível acima, a diferença é que as operações de unidade são controladas nas indústrias de processos e as máquinas são controladas em operações de produção discreta. No terceiro nível, a diferença está entre controle de operações de unidade interconectadas e máquinas interconectadas. Nos níveis superiores (fábrica e empresa), as questões de controle são semelhantes, admitindo o fato de que os produtos e processos sejam diferentes.

Tabela 5.2 Níveis de automação nas indústrias de processo e nas indústrias de produção discreta

Nível	Nível de automação nas indústrias de processo	Nível de automação nas indústrias de produção discreta
5	<i>Nível corporativo</i> — sistema de gerenciamento de informações, planejamento estratégico, gerenciamento de alto nível da empresa	<i>Nível corporativo</i> — sistema de gerenciamento de informações, planejamento estratégico, gerenciamento de alto nível da empresa
4	<i>Nível de fábrica</i> — agendamento, rastreamento de materiais, monitoramento de equipamentos	<i>Nível de fábrica ou produção</i> — agendamento, rastreamento de material em processo, roteamento de peças pelas máquinas, utilização das máquinas
3	<i>Nível de controle supervisão</i> — controle e coordenação de várias operações de unidade interconectadas que compõem o processo total	<i>Célula de manufatura ou nível de sistema</i> — controle e coordenação de grupos de máquinas e equipamentos de suporte trabalhando de modo sincronizado, incluindo os equipamentos de tratamento de material
2	<i>Nível de controle regulatório</i> — controle das operações de unidades	<i>Nível de máquina</i> — máquinas de produção e estações de trabalho para a produção discreta de peças e produtos
1	<i>Nível de dispositivo</i> — sensores e atuadores compreendendo as malhas de controle básicos para as operações de unidades	<i>Nível de dispositivo</i> — sensores e atuadores para completar as ações de controle de máquina

5.1.2 Variáveis e parâmetros nas duas indústrias

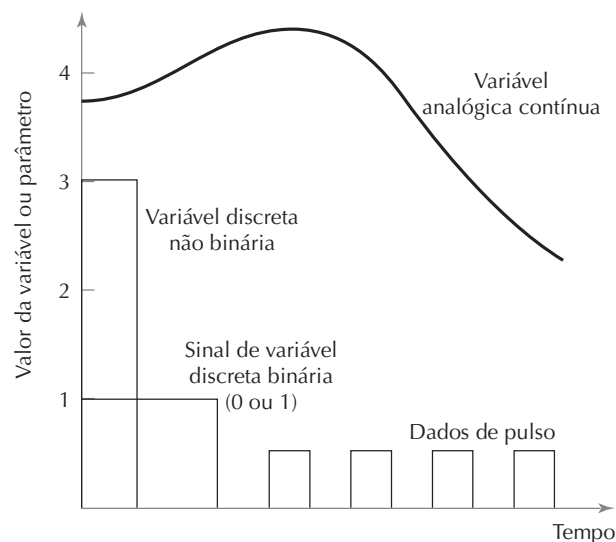
A distinção entre indústrias de processos e indústrias de produção discreta se estende às variáveis e aos parâmetros que caracterizam as respectivas operações de produção. O leitor vai lembrar dos capítulos anteriores (Seção 4.1.2), nos quais definimos variáveis como saídas do processo e parâmetros como entradas para o processo. Nas indústrias de processos, variáveis e parâmetros que interessam tendem a ser contínuos, enquanto na produção discreta eles tendem a ser discretos. Vamos explicar as diferenças com referência à Figura 5.1.

Uma *variável contínua* (ou parâmetro) é a que se mantém ininterrupta conforme o tempo procede, pelo menos durante a operação de produção. Uma variável contínua é de modo geral considerada *analógica*, o que significa que pode assumir qualquer valor dentro de um determinado intervalo; ela não é restrita a um conjunto discreto de valores. As operações de produção tanto nas indústrias de processo como nas de produção de peças discretas são caracterizadas por variáveis contínuas. Exemplos incluem força, temperatura, vazão, pressão e velocidade. Todas essas variáveis (quaisquer que se apliquem a um dado processo de produção) são contínuas no tempo durante o processo e podem assumir

qualquer número de infinitos valores possíveis dentro de certo intervalo.

Uma *variável discreta* (ou parâmetro) pode assumir apenas certos valores em um dado intervalo. O tipo mais comum de variável discreta é a binária, o que quer dizer que ela pode assumir um de dois valores possíveis, ligado ou desligado, aberto ou fechado, e assim por diante. Exemplos de variáveis e parâmetros discretos binários em produção incluem interruptor fim-de-curso aberto ou fechado, motor ligado ou desligado e peça de trabalho presente ou ausente em uma instalação. Nem todas as variáveis (e parâmetros) discretas são binárias. Outras possibilidades são variáveis que podem assumir mais de dois valores possíveis, porém menos de um número infinito, ou seja, *discretas não binárias*. Exemplos incluem a contagem diária de peças em uma operação de produção e a exibição na tela de um tacômetro digital. Uma forma especial de variável discreta (e parâmetro) é o *trem de pulsos*, que consiste em uma trilha de pulsos, como mostrado na Figura 5.1. Como variável discreta, um trem de pulsos pode ser usado para indicar contagem de peças, por exemplo, peças passando por um transportador ativam uma célula fotoelétrica que gera um pulso para cada peça detectada. Como um parâmetro de processo, um trem de pulsos pode ser usado para acionar um motor de passo.

Figura 5.1 Variáveis e parâmetros contínuos e discretos em operações de produção



5.2 CONTROLE CONTÍNUO *VERSUS* CONTROLE DISCRETO

Os sistemas de controle industrial usados nas indústrias de processos tendem a enfatizar o controle de variáveis e parâmetros contínuos. Por outro lado, as indústrias de produção produzem peças discretas e produtos, e seus controladores tendem a enfatizar variáveis e parâmetros discretos. Da mesma forma que temos dois tipos básicos de variáveis e parâmetros que caracterizam operações de produção, também temos dois tipos básicos de controle: (1) *controle contínuo*, em que variáveis e parâmetros são contínuos e analógicos, e (2) *controle discreto*, em que variáveis e parâmetros são discretos, na maioria discretos binários. Algumas das diferenças entre controle contínuo e controle discreto são resumidas na Tabela 5.3.

Na realidade, a maioria das operações nas indústrias de processo e de produção discreta inclui tanto variáveis e parâmetros contínuos como discretos. Como consequência, muitos controladores industriais são projetados com capacidade de receber, operar e transmitir os dois tipos de

sinais e dados. No Capítulo 6, discutiremos os vários tipos de sinais e dados em sistemas de controle industrial e como os dados são convertidos para o uso em controladores computacionais digitais.

Para complicar as coisas, desde que os computadores digitais começaram a substituir os controladores analógicos em aplicações de controle contínuo de processos, por volta de 1960, as variáveis contínuas de processo não são mais medidas de forma contínua. Em vez disso, são recolhidas periodicamente, criando então um sistema discreto de amostragem de dados que se aproxima do sistema contínuo real. De maneira similar, os sinais de controle enviados ao processo são quase sempre funções graduais que se aproximam dos sinais de controle anteriores transmitidos por controladores analógicos. Por isso, no controle de processos em computadores digitais, até variáveis e parâmetros contínuos possuem características de dados discretos, e essas características devem ser consideradas no projeto da interface entre o processo e o computador e nos algoritmos de controle usados pelo controlador.

Tabela 5.3 Comparação entre controle contínuo e controle discreto

Fator de comparação	Controle contínuo nas indústrias de processo	Controle discreto nas indústrias de produção discreta
Medidas típicas de saída de produto	Medidas de peso, medidas de volume de líquidos, medidas de volume de sólidos	Número de peças, número de produtos
Medidas típicas de qualidade	Consistência, concentração da solução, ausência de contaminantes, conformidade com as especificações	Dimensões, acabamento superficial, aparência, ausência de defeitos, confiabilidade do produto
Variáveis e parâmetros típicos	Temperatura, vazão, pressão	Posição, velocidade, aceleração, força
Sensores típicos	Medidores de fluxo, termopares, sensores de pressão	Interruptores de fim-de-curso, sensores fotoelétricos, extensômetros, sensores piezoelétricos
Atuadores típicos	Válvulas, aquecedores, bombas	Interruptores, motores, pistões
Constantes típicas de tempo de processo	Segundos, minutos, horas	Menos de um segundo

5.2.1 Sistemas de controle contínuo

No controle contínuo, o objetivo comum é manter o valor de uma variável de saída em um nível desejado, como na operação de um sistema de controle por realimentação (*feedback*), definida no capítulo ante-

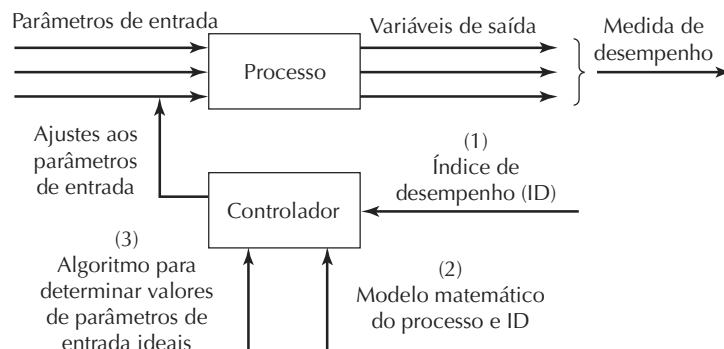
rior (Seção 4.1.3). Entretanto, a maioria dos processos contínuos na prática consiste em muitas malhas de realimentação separadas, das quais todas devem ser controladas e coordenadas para manter a variável de saída com o valor desejado. Exemplos de processos contínuos são os seguintes:

presença de uma perturbação e tomam medidas corretivas ajustando um parâmetro de processo que compense qualquer efeito que a perturbação terá no processo. No caso ideal, a compensação é completamente efetiva. Entretanto, a compensação completa é improvável por conta de imperfeições nas medidas da realimentação, operações do atuador e dos algoritmos de controle; então o controle preditivo é de forma usual combinado com o controle por realimentação, como mostrado na figura. O controle regulatório e o preditivo estão mais associados às indústrias de processo que às de produção discreta.

Otimização em estado estacionário. Esse termo se refere a uma classe de técnicas de otimização em que o

processo exibe as seguintes características: (1) há um índice de desempenho bem definido, como o custo do produto, a taxa de produção ou o rendimento do processo, (2) a relação entre as variáveis do processo e o índice de desempenho é conhecida e (3) os valores dos parâmetros de sistema que otimizam o índice de desempenho podem ser determinados matematicamente. Quando essas características se aplicam, o algoritmo de controle é projetado para fazer ajustes nos parâmetros do processo para conduzi-lo ao estado ideal. O sistema de controle é de malha aberta, como visto na Figura 5.4. Muitas técnicas matemáticas estão disponíveis para a solução de problemas com controle de estado estacionário otimizado, incluindo cálculos diferenciais, cálculos de variações e muitos métodos matemáticos de programação.

Figura 5.4 Controle em estado estacionário (malha aberta — *open loop*) ideal



Controle adaptativo. O sistema de controle do estado estacionário otimizado opera como um sistema de malha aberta. Isso funciona com sucesso quando não há perturbações que invalidam a relação conhecida entre os parâmetros do processo e seu desempenho. Quando essas perturbações estão presentes na aplicação, uma forma autocorretiva de controle otimizado chamada de controle adaptativo pode ser usada. Ele combina o controle por realimentação e o controle otimizado medindo as variáveis relevantes do processo durante a operação (como no controle por realimentação) e usando um algoritmo de controle que tenta otimizar algum índice de desempenho (como no controle otimizado).

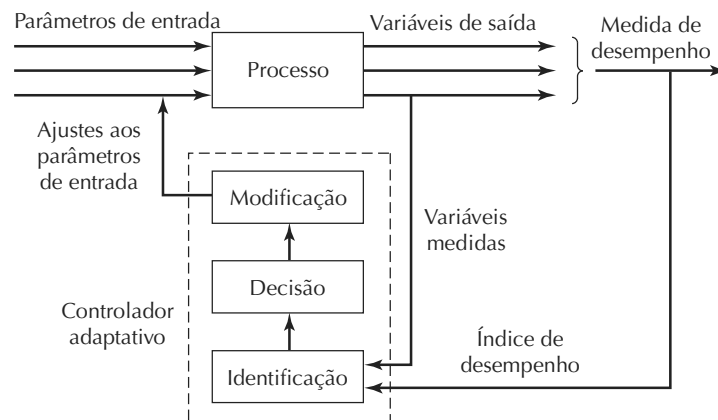
O controle adaptativo é distinto do controle por realimentação e do controle de otimização em estado estacionário por sua capacidade única de lidar com um ambiente que varia com o tempo. Não é incomum para um sistema operar em um ambiente que muda com o tempo e que essas mudanças tenham efeito potencial em seu desempenho. Se os parâmetros ou mecanismos internos do sistema são fixos, como no controle por realimentação ou controle otimizado, o sistema pode funcionar de forma bem diferente em tipos distintos de ambiente. Um sistema de con-

trole adaptativo é projetado para compensar a mudança do ambiente monitorando seu próprio desempenho e alterando alguns aspectos de seu mecanismo de controle para alcançar um desempenho ótimo ou próximo do ideal. Em um processo de produção, o “ambiente que muda com o tempo” consiste de variações nas variáveis do processo, materiais brutos, ferramentas, condições atmosféricas e assim por diante, todas que possam afetar o desempenho.

A configuração geral de um sistema de controle adaptativo é ilustrada na Figura 5.5. Para avaliar seu desempenho e responder de acordo, um sistema de controle adaptativo executa três funções, como mostra a figura:

1. **Função de identificação.** Nessa função, o valor atual do índice de desempenho do sistema é determinado com base em medidas coletadas do processo. Como o ambiente sofre alterações com o tempo, o desempenho do sistema também muda. Assim, a função de identificação deve ser completada de forma mais ou menos contínua durante o tempo em que o sistema estiver operando.
2. **Função de decisão.** Uma vez que o desempenho do sistema foi determinado, a próxima função é decidir quais mudanças devem ser feitas para aumentá-lo.

Figura 5.5 Configuração de um sistema de controle adaptativo



A função de decisão é implementada por meio do algoritmo programado do sistema adaptativo. Dependendo desse algoritmo, a decisão pode ser de mudar um ou mais parâmetros de entrada para o processo, alterar algum dos parâmetros internos do controlador ou fazer outras alterações.

3. *Funções de modificação.* A terceira função do controle adaptativo é implementar a decisão. Se de um lado a decisão é uma função lógica, de outro a modificação diz respeito a mudanças físicas no sistema, envolvendo hardware em vez de software. Na modificação, os parâmetros do sistema ou as entradas de processo são alterados usando-se os atuadores disponíveis para conduzir o sistema a um estado mais otimizado.

O controle adaptativo é mais aplicável aos níveis 2 e 3 em nossa hierarquia de automação (Tabela 5.2) e tem sido assunto de pesquisas e desenvolvimento por várias décadas. Foi originalmente motivado por problemas com o controle de voo de alta velocidade na era dos aviões a jato. Os princípios também foram aplicados a outras áreas, incluindo a de produção. Um exemplo notável é a *usinagem por controle adaptativo*, em que as mudanças nas variáveis de processo, como força de corte, potência e vibração, são usadas para controlar os parâmetros de processo como a velocidade do corte e a velocidade de avanço.

Estratégias de busca em tempo real. Podem ser usadas na abordagem de uma classe especial de problemas com controle adaptativo em que a função de decisão não pode ser definida de forma eficiente; isto é, a relação entre os parâmetros de entrada e o índice de desempenho não é conhecida, ou não é conhecida de forma suficiente para a utilização do controle adaptativo conforme a descrição anterior. Dessa forma, não é possível decidir as mudanças nos parâmetros internos do sistema para produ-

zir o aumento desejado do desempenho. Em vez disso, experimentos devem ser executados no processo. Pequenas mudanças sistemáticas são feitas nos parâmetros de entrada do processo para se observar o efeito dessas mudanças nas variáveis de saída. Baseando-se nos resultados dessas experiências, mudanças maiores são feitas nos parâmetros de entrada para conduzir o processo ao melhor desempenho.

As estratégias de busca em tempo real incluem uma variedade de esquemas para a exploração dos efeitos das mudanças nos parâmetros do processo, partindo de técnicas de tentativa e erro até métodos de gradiente. Todos esses esquemas tentam determinar quais parâmetros de entrada causam o maior efeito positivo no índice de desempenho e depois mover o processo a essa direção. Há poucas evidências de que as técnicas de busca em tempo real sejam muito usadas na produção de peças discretas; suas aplicações são mais comuns nas indústrias de processo contínuo.

Outras técnicas especializadas. São estratégias que estão se desenvolvendo atualmente na teoria de controle e ciência da computação. Exemplos incluem os sistemas de aprendizagem, sistemas especialistas, redes neurais e outros métodos de inteligência artificial para o controle de processo.

5.2.2 Sistemas de controle discreto

No controle discreto, os parâmetros e as variáveis do sistema são modificados em momentos discretos de tempo. As mudanças envolvem variáveis e parâmetros que também são discretos, normalmente binários (LIGADO/DESLIGADO) e são definidas de forma antecipada por meio de um programa de instruções, por exemplo, um programa de ciclo de trabalho (Seção

4.1.2). As mudanças são executadas porque o estado do sistema mudou ou porque certo espaço de tempo passou. Esses dois casos podem ser descritos como (1) mudanças ocasionadas por evento ou (2) mudanças ocasionadas por tempo. [2]

Uma *mudança ocasionada por evento* é executada pelo controlador em resposta a algum evento que tenha causado alteração no estado do sistema. A mudança pode ser para iniciar ou terminar uma operação, ligar ou desligar um motor, abrir ou fechar uma válvula e assim por diante. Os exemplos de mudanças ocasionadas por evento são:

- Um robô carrega uma peça de trabalho para fixação e ela é detectada por um interruptor de fim-de-curso. A detecção da presença da peça é o evento que altera o estado do sistema. A mudança causada por evento é que o ciclo automático de usinagem pode começar.
- A diminuição do nível de compostos de plástico de moldagem no funil de uma máquina de moldagem por injeção aciona um interruptor de baixo nível, o que abre uma válvula para iniciar o fluxo de plástico novo para a máquina. Quando o nível de plástico atinge o interruptor de alto nível, este aciona a válvula para que feche, interrompendo assim o fluxo para o funil.
- A contagem de peças movidas por um transportador passando por um sensor óptico é um sistema conduzido por evento. Cada peça que passa pelo sensor é um evento que altera o contador.

Uma *mudança ocasionada por tempo* é executada pelo sistema de controle, seja em um ponto específico no tempo ou depois de passado um determinado período de tempo. Como no caso anterior, a mudança consiste em iniciar ou parar alguma coisa, e o tempo em que a mudança ocorre é importante. Os exemplos de mudanças ocasionadas por tempo são:

- Nas fábricas com tempos específicos de início e término dos expedientes e períodos uniformes de parada para todos os trabalhadores. O ‘relógio da fábrica’ é configurado para soar um alarme em momentos específicos durante o dia, que indicam esses tempos de início e término.
- Operações de tratamento de calor devem ocorrer por certo espaço de tempo. Um ciclo automatizado de tratamento de calor consiste do carregamento automático de peças para o forno (talvez por um robô) e da retirada, depois que as peças tenham sido aquecidas por um período de tempo determinado.
- Na operação de uma máquina de lavar, uma vez que o compartimento de lavagem tenha sido cheio até o

nível preestabelecido, o ciclo de lavagem é realizado pelo espaço de tempo configurado nos controles. Quando o tempo acaba, o temporizador termina o ciclo e inicia a drenagem. (Por comparação com o ciclo de lavagem, encher o compartimento da máquina com água é conduzido por evento. A máquina continua a encher até que o nível apropriado seja atingido, o que ocasiona o fechamento da válvula de entrada de água.)

Os dois tipos de mudanças correspondem a dois tipos distintos de controle discreto, chamados de controle lógico combinacional e controle sequencial. O *controle lógico combinacional* é usado para controlar a execução de mudanças ocasionadas por evento, e o *controle sequencial* é usado para gerenciar as mudanças ocasionadas por tempo. Esses tipos de controle são discutidos com mais detalhes no Capítulo 9.

O controle discreto é muito usado, tanto em produção discreta como em indústrias de processos. Na produção discreta, é usado para controlar a operação dos transportadores e outros sistemas de transporte de material (Capítulo 10), sistemas de armazenamento automatizado (Capítulo 11), máquinas de produção independentes (Capítulo 14), linhas de transferência automatizadas (Capítulo 16), sistemas de montagem automatizados (Capítulo 17) e sistemas flexíveis de manufatura (Capítulo 19). Todos esses sistemas são operados seguindo uma sequência bem definida de ações de início e parada, como movimentações elétricas de alimentação, transferência de peças entre estações de trabalho e inspeções automatizadas em tempo real.

Nas indústrias de processos, o controle discreto é mais associado ao processamento em lote do que aos processos contínuos. Em uma operação típica de processamento em lote, cada lote de ingredientes iniciais é submetido a um ciclo de etapas de processamento que envolve mudanças nos parâmetros de processo (por exemplo, mudanças de temperatura e pressão), a possível transferência de um recipiente para outro durante o ciclo e finalmente a embalagem. A etapa de embalagem difere de acordo com o produto. Para os alimentos, a embalagem pode ser feita em latas ou caixas; para produtos químicos, significa preencher recipientes com os produtos líquidos; para produtos farmacêuticos, podem-se preencher frascos com comprimidos de remédios. No controle de processamento em lote, o objetivo é gerenciar a sequência e a cronometragem das etapas de processamento, bem como regular os parâmetros do processo em cada etapa. Dessa forma, o controle de processo de lote normalmente inclui tanto o controle contínuo como o controle discreto.

5.3 CONTROLE DE PROCESSOS POR COMPUTADOR

A utilização de computadores digitais para controlar processos industriais se iniciou nas indústrias de processos contínuos no fim dos anos de 1950 (Nota histórica 5.1). Antes disso, controladores analógicos eram usados para implementar o controle contínuo, e sistemas de relés eram usados para implementar o controle discreto. Naquele tempo a tecnologia computacional estava em sua infância, e os únicos computadores disponíveis para o controle de processos eram os grandes e caros *mainframes* (computadores de grande porte). Comparados à tecnologia de hoje, os computadores digitais de 1950 eram lentos, não confiáveis e não muito adequados às aplicações de controle de

processos. Os computadores que eram instalados, algumas vezes, custavam mais caro que os processos que controlavam. Por volta de 1960, os computadores digitais começaram a substituir os controladores analógicos em aplicações de controle de processos contínuos e, por volta de 1970, os controladores lógicos programáveis começaram a substituir os bancos de relés em aplicações de controle discreto. Avanços na tecnologia dos computadores desde os anos de 1960 e 1970 resultaram no desenvolvimento do microprocessador. Hoje, praticamente todos os processos industriais, com certeza novas instalações, são controlados por computadores digitais baseados na tecnologia dos microprocessadores. Os controladores baseados em microprocessadores são discutidos na Seção 5.3.3.

Nota histórica 5.1

Controle de processos por computador [1;7]

O controle de processos industriais por computadores digitais pode ser traçado até às indústrias de processo do fim dos anos de 1950 e 1960. Essas indústrias, como refinarias de petróleo e fábricas de produtos químicos, usam processos de produção contínuos de alto volume caracterizados por muitas variáveis e malhas de controle associados. Os processos tinham sido controlados, por tradição, por dispositivos analógicos, cada malha tendo seu próprio valor desejado definido e, na maioria dos casos, operando de forma independente das outras malhas. Qualquer coordenação do processo era executada em uma sala de controle central, na qual os trabalhadores ajustavam as configurações individuais, na tentativa de atingir estabilidade e economia no processo. O custo dos dispositivos analógicos para todas as malhas de controle era considerável, e a coordenação humana do processo era abaixo do ideal. O desenvolvimento comercial do computador digital nos anos de 1950 ofereceu oportunidade de substituir alguns dos dispositivos de controle analógicos pelo computador.

A primeira tentativa de usar computador digital no controle de processos foi em uma refinaria Texaco em Port Arthur, no Texas, no fim dos anos de 1950. A Texaco havia sido contatada em 1956 pelo fabricante de computadores Thomson Ramo Woodridge (TRW), e um estudo de viabilidade foi realizado em uma unidade de polimerização na refinaria. O sistema de controle por computador entrou em operação em março de 1959. A aplicação de controle envolvia 26 fluxos, 72 temperaturas, três pressões e três composições. Esse trabalho inovador não escapou à atenção das outras indústrias de processos, bem como de outras companhias de computação. As indústrias de processos viram no controle de processos por computador um meio de automação e as companhias de computação encontraram um mercado com potencial para seus produtos.

Os computadores disponíveis no fim dos anos de 1950 não eram confiáveis, e a maior parte das instalações de controle de processos subsequentes operava ou por meio da impressão de instruções para o operador ou mediante a realização de ajustes nos valores desejados dos controladores analógicos, reduzindo assim o risco de inatividade dos processos por falhas nos computadores. O segundo modo de operação citado era chamado de *controle do valor desejado* (do inglês, *set point control*). Em março de 1961, um total de 37 sistemas de controle de processos havia sido instalado. Muita experiência foi adquirida dessas primeiras instalações. A *função de interrupção* (Seção 5.3.2), pela qual o computador suspende a execução atual do programa para responder rapidamente a uma necessidade de um processo, foi desenvolvida durante esse período.

O primeiro sistema de *controle digital direto* (do inglês, *direct digital control* — DDC) (Seção 5.3.3), em que certos dispositivos analógicos são substituídos por computadores, foi instalado pela Imperial

Chemical Industries, na Inglaterra, em 1962. Nessa implementação, 224 variáveis de processo eram medidas e 129 atuadores (válvulas) eram controlados. Foram feitas melhorias na tecnologia de DDC e outros sistemas foram instalados durante os anos de 1960. As vantagens do DDC observadas na época incluíam (1) economias com o custo pelo corte de instrumentação analógica, (2) painéis simplificados para o operador e (3) flexibilidade devido à capacidade de reprogramação.

A tecnologia da computação avançava, levando ao desenvolvimento do *minicomputador* no fim dos anos de 1960. As aplicações de controle de processo eram fáceis de justificar com a utilização de computadores menores e mais baratos. O desenvolvimento do *microcomputador* no início dos anos de 1970 deu continuidade a essa tendência. Hardwares de controle de processos e equipamentos de interface (como conversores analógico-digital) de baixo custo tornavam-se disponíveis graças ao amplo mercado que se abriu com os controladores computacionais de baixo custo.

A maior parte do desenvolvimento em controle de processos por computador até esse momento havia sido destinada às indústrias de processo em vez das de produção discreta de peças e produtos. Assim como os dispositivos analógicos tinham sido usados para automatizar as operações das indústrias de processo, os bancos de revezamento foram usados de forma abrangente para satisfazer os requerimentos do controle de processos discreto (LIGADO/DESLIGADO) na automação da produção. O *controlador lógico programável* — CLP (do inglês, *programmable logic controller* — PLC), um computador de controle projetado para o controle de processos discreto foi desenvolvido no começo dos anos de 1970 (Nota histórica 9.1). Da mesma maneira, máquinas-ferramenta de *controle numérico* — CN (do inglês, *numerical control* — NC) (Nota histórica 7.1) e *robôs industriais* (Nota histórica 8.1), tecnologias que precederam o controle computacional, começaram a ser projetadas tendo computadores digitais como seus controladores.

A disponibilidade dos microcomputadores de baixo custo e dos controladores lógicos programáveis resultou em um número crescente de instalações nas quais um processo era controlado por múltiplos computadores reunidos em rede. O termo *controle distribuído* foi usado para esse tipo de sistema, o primeiro do qual foi um produto oferecido pela Honeywell em 1975. No início dos anos 1990, os *computadores pessoais* (do inglês, *personal computer* — PC) começaram a ser utilizados chão de fábrica, algumas vezes para fornecer agendamento e dados de engenharia para o pessoal de base da fábrica, em outros casos como a interface do operador para processos controlados por CLPs. Hoje, um número crescente de PCs é usado para controlar diretamente as operações de produção.

Nesta seção sobre controle de processos por computador, identificamos os requisitos colocados no computador em aplicações de controle industrial. Examinaremos em seguida as capacidades que foram incorporadas ao computador de controle para atender a esses requisitos e, finalmente, analisaremos as diversas formas de controle de computador usadas na indústria.

5.3.1 Requisitos de controle

Quer a aplicação envolva controle contínuo, controle discreto ou ambos, há alguns requisitos básicos que tendem a ser comuns a quase todas as aplicações de controle de processos. Em geral, elas se preocupam com a necessidade de comunicação e interação com o processo em tempo real. Um *controlador em tempo real* é um controlador capaz de responder ao processo dentro de um intervalo de tempo suficientemente pequeno para não atrapalhar o desempenho do processo. O controle em tempo real geralmente requer que o controlador seja *multitarefa*, o que significa lidar com várias tarefas de forma simultânea sem que elas interfiram umas nas outras.

Há dois requisitos básicos que devem ser gerenciados pelo controlador para alcançar o controle em tempo real:

1. *Interrupções iniciadas por processo.* O controlador deve ser capaz de responder a sinais de entrada do processo. Dependendo da importância relativa desses sinais, o computador pode precisar interromper a execução de um programa para atender a uma necessidade de maior prioridade do processo. Uma interrupção iniciada por processo é quase sempre ativada por condições anormais de operação, indicando que alguma ação corretiva deve ser tomada de pronto.
2. *Ações iniciadas por temporizador.* O controlador deve ser capaz de executar certas ações em intervalos específicos de tempo. As ações iniciadas por temporizador podem ser geradas por intervalos de tempo regulares, desde valores muito pequenos (por exemplo, 100 μ s) até vários minutos, ou podem ser geradas em momentos distintos do tempo. Ações típicas iniciadas por temporizador em controle de processos incluem (1) a leitura de valores de sensores do processo em intervalos de coleta regulares, (2) a ligação e o desligamento

de interruptores, motores e outros dispositivos binários associados ao processo em pontos discretos do tempo durante o ciclo de trabalho, (3) exibição de dados de desempenho no painel do operador em intervalos regulares durante um ciclo de produção e (4) recálculo dos valores ideais de parâmetros do processo em momentos específicos.

Esses dois requisitos correspondem aos dois tipos de mudanças mencionados previamente no contexto de sistemas de controle discreto: (1) mudanças ocasionadas por evento e (2) mudanças ocasionadas por tempo.

Além desses requisitos, o computador de controle deve também lidar com outros tipos de interrupções e eventos. Dentre os quais, os seguintes:

3. *Comandos do computador para o processo.* Além de receber sinais de entrada do processo, o computador deve enviar sinais de controle para o processo com o objetivo de realizar uma ação corretiva. Esses sinais de saída podem acionar um dispositivo de hardware ou reajustar o valor desejado em uma malha de controle.
4. *Eventos iniciados por programa ou sistema.* São eventos relacionados ao próprio sistema do computador; eles se parecem com os tipos de operações de computador associadas a aplicações de negócios e engenharia. Um *evento iniciado por sistema* envolve a comunicação entre os computadores e os dispositivos periféricos ligados em uma rede. Nessas redes múltiplas de computadores, os sinais de realimentação, comandos de controle e outros dados devem ser transferidos entre os computadores durante todo o controle do processo. Um *evento iniciado por programa* ocorre quando o programa chama uma ação não relacionada ao processo, tal como a impressão ou a exibição de relatórios em impressora ou monitor. No controle de processos, eventos iniciados por programa ou sistema ocupam de modo geral um nível baixo de prioridade quando comparados com interrupções de processo, comandos para o processo e eventos iniciados por temporizador.
5. *Eventos iniciados por operador.* Finalmente, o computador de controle deve ser capaz de aceitar entradas da equipe de operação. Os eventos iniciados por operador incluem (1) entrada de novos programas; (2) edição de programas existentes; (3) entrada de dados do consumidor, número do pedido ou instruções de iniciação para o próximo ciclo de produção; (4) requisição de dados do processo e (5) solicitação de paradas de emergência.

5.3.2 Recursos do controle por computador

Os requisitos acima podem ser satisfeitos oferecendo-se ao controlador certos recursos que o permitam interagir em tempo real com o processo e o operador. Os recursos são (1) pesquisa, (2) intertravamentos, (3) sistema de interrupção e (4) tratamento de exceções.

Pesquisa (amostragem de dados). No controle de processos por computador, a pesquisa se refere à amostragem periódica de dados que indicam o estado do processo. Quando os dados consistem de um sinal analógico contínuo, amostragem significa substituir o sinal contínuo por uma série de valores numéricos que o representam em momentos distintos do tempo. O mesmo tipo de substituição ocorre com dados discretos, exceto pelo fato de que o número de valores numéricos possíveis que os dados podem assumir é mais limitado — com certeza o caso dos dados binários. Discutiremos no Capítulo 6 as técnicas pelas quais dados contínuos e discretos são recebidos e transmitidos pelo computador. Outros nomes para a pesquisa incluem *amostragem* e *digitalização*.

Em alguns sistemas, o procedimento de pesquisa procura se houve alguma mudança nos dados desde o último ciclo de busca e então coleta apenas novos dados do processo. Isso tende a encurtar o tempo do ciclo necessário para a pesquisa. As questões relacionadas à pesquisa incluem:

1. *Frequência de pesquisa.* É a recíproca do intervalo de tempo entre as coletas de dados.
2. *Ordem de pesquisa.* É a sequência em que os diferentes pontos de coleta de dados do processo são colhidos.
3. *Formato da pesquisa.* Refere-se à forma em que o procedimento de amostragem é projetado. As alternativas incluem: (a) informar todos os novos dados de todos os sensores e outros dispositivos a cada ciclo de pesquisa; (b) atualizar o sistema de controle apenas com os dados que sofreram mudanças desde o último ciclo de pesquisa ou (c) usar *digitalização de alto e baixo nível* ou *digitalização condicional*, na qual apenas certos dados principais são coletados em cada ciclo da pesquisa (digitalização de alto nível); se os dados indicarem alguma irregularidade no processo, uma digitalização de baixo nível é realizada com o objetivo coletar dados mais completos e assegurar a causa da irregularidade.

Essas questões tornam-se bastante críticas em processos muito dinâmicos, nos quais as mudanças no estado do processo ocorrem de forma rápida.

Intertravamentos. É um mecanismo de segurança para a coordenação de atividades de dois ou mais dispositivos e previne que um dispositivo interfira em outro(s). No controle de processos, os intertravamentos oferecem os meios pelos quais o controlador é capaz de sequenciar as atividades em uma célula de trabalho, garantindo que as ações de um equipamento sejam completadas antes que o próximo equipamento inicie sua atividade. Os intertravamentos operam regulando o fluxo de sinais de controle entre o controlador e os dispositivos externos.

Há dois tipos de intertravamentos, os de entrada e os de saída, em que entrada e saída são definidos em relação ao controlador. Um *intertravamento de entrada* é um sinal que se origina em um dispositivo externo (por exemplo, um interruptor de fim-de-curso, um sensor ou uma máquina de produção) enviado para o controlador. Eles podem ser usados para qualquer uma das seguintes funções:

1. Para proceder com a execução do programa de ciclo de trabalho. Por exemplo, a máquina de produção envia um sinal para o controlador informando que terminou o processamento da peça: esse sinal constitui um intertravamento de entrada indicando que o controlador pode então proceder para o próximo passo no ciclo de trabalho, que é descarregar a peça.
2. Para interromper a execução do programa de ciclo de trabalho. Por exemplo, enquanto está descarregando a peça da máquina, o robô acidentalmente a deixa cair; o sensor em sua garra transmite um sinal de bloqueio para o controlador, indicando que a sequência regular do ciclo de trabalho deve ser interrompida até que sejam tomadas medidas corretivas.

Um *intertravamento de saída* é um sinal enviado pelo controlador para algum dispositivo externo. É usado para controlar as atividades de cada dispositivo externo e para coordenar sua operação com as dos outros equipamentos na célula. Por exemplo, um intertravamento de saída pode ser usado para enviar um sinal de controle para uma máquina de produção com o objetivo de iniciar o ciclo automático após a peça de trabalho ter sido carregada.

Sistema de interrupção. Relacionado estreitamente com os intertravamentos está o sistema de interrupção. Como sugerido por nossa discussão de intertravamentos de entrada, há ocasiões em que se torna necessário ao processo ou operador interromper a operação normal do controlador para lidar com questões mais sérias. Todos os sistemas de computador são capazes de ser interrompidos, no pior dos casos, desligando-se a

energia. Um sistema de interrupção mais sofisticado é necessário em aplicações de controle de processos. Um *sistema de interrupção* é uma característica de controle por computador que permite a suspensão da execução do programa atual para executar outro programa ou sub-rotina, em resposta a um sinal de entrada indicativo de evento de maior prioridade. Ao receber um sinal de interrupção, o computador transfere para uma sub-rotina predefinida, projetada para lidar com a interrupção específica. O estado do atual programa é registrado para que sua execução possa continuar assim que o atendimento da interrupção for terminado.

As condições de interrupção podem ser classificadas como interna e externa. *Interrupções internas* são geradas pelo próprio sistema de computador. Incluem os eventos iniciados por temporizador, como pesquisa de dados dos sensores conectados ao processo, ou o envio de comandos ao processo em pontos específicos do tempo. Interrupções iniciadas por sistema e programa também são classificadas como internas porque são geradas dentro do sistema. *Interrupções externas* são alheias ao sistema de computador; elas incluem interrupções iniciadas por processos e entrada do operador.

Um sistema de interrupção é necessário ao controle de processos porque é essencial que os programas mais importantes (com maior prioridade) sejam executados antes dos menos importantes (com baixas prioridades). O projetista do sistema decide qual nível de prioridade deve ser anexado a cada função de controle. Uma função de prioridade mais alta pode interromper uma função de prioridade mais baixa. O número de níveis de prioridade e a relativa importância das funções dependem dos requisitos da situação individual do controle de processos. Por exemplo, o desligamento de emergência de um processo por riscos de segurança ocuparia um nível muito alto de prioridade, mesmo que fosse uma interrupção iniciada por operador. A maioria das entradas do operador teria baixas prioridades.

Uma possível organização classificatória de prioridade das funções de controle de processos é mostrada na Tabela 5.4. Naturalmente, o sistema de prioridades pode ter um número maior ou menor de níveis, dependendo da situação de controle. Por exemplo, algumas interrupções de processo podem ser mais importantes que outras, e algumas interrupções de sistema podem ter precedência sobre certas interrupções de processos, sendo assim necessários mais do que os seis níveis mostrados nessa tabela.

Para responder aos muitos níveis de prioridade definidos para uma dada aplicação de controle, uma interrupção de sistema pode ter um ou mais níveis de interrupção. Um *sistema de interrupção de nível único*

Tabela 5.4 Níveis de prioridade possíveis em um sistema de interrupção

Nível de prioridade	Função do computador
1 (prioridade mais baixa)	A maior parte de entradas do operador
2	Interrupções de sistema e programa
3	Interrupções de temporizador
4	Comandos para o processo
5	Interrupções de processo
6 (prioridade mais alta)	Parada de emergência (entrada do operador)

tem apenas dois modos de operação: normal e de interrupção. O modo normal pode ser interrompido, o de interrupção não. Isso significa que interrupções que se sobrepõem recebem tratamento do tipo “primeiro que chega”, “primeiro a ser atendido”, o que pode ter consequências perigosas se uma interrupção de processo importante fosse forçada a esperar sua vez enquanto uma série de interrupções menos importantes de operador e sistema fossem atendidas. Um *sistema de interrupção de múltiplos níveis* tem um modo de operação normal além de mais de um nível de interrupção. O modo normal pode ser interrompido por qualquer nível de interrupção, e os níveis de interrupção têm prioridades relativas, que determinam quais funções podem interromper as outras. O Exemplo 5.1 ilustra a diferença entre os sistemas de interrupção de nível único e múltiplo.

EXEMPLO 5.1**Sistemas de interrupção de nível único versus os de múltiplos níveis**

Três interrupções representando tarefas de três níveis diferentes chegam ao tratamento na ordem inversa de suas respectivas prioridades. A tarefa 1, com a prioridade mais baixa, chega primeiro. Logo, chega a tarefa 2, de maior prioridade. E depois dela chega a tarefa 3, de maior prioridade. Como o sistema de controle por computador responderia funcionando sob (a) um sistema de

interrupções de nível único e (b) um sistema de interrupções de múltiplos níveis?

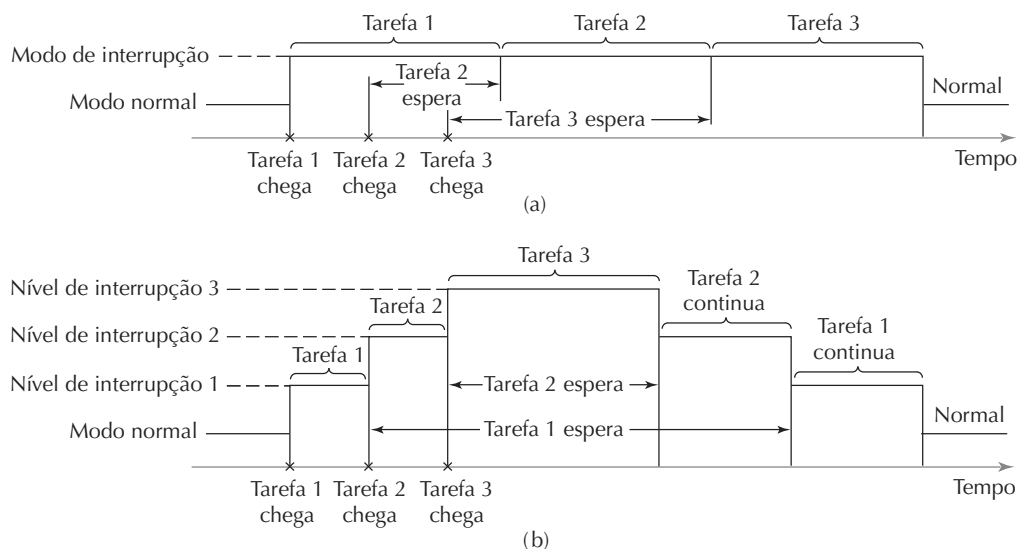
Solução: A resposta para os dois sistemas de interrupção é mostrada na Figura 5.6.

Tratamento de exceções. No controle de processos, uma *exceção* é um evento que está fora da operação normal ou desejada do sistema de controle de processos. Lidar com exceções é uma função essencial do controle de processos industriais e geralmente ocupa uma grande porção do algoritmo de controle. A necessidade do tratamento de exceções pode ser indicada por meio do procedimento normal de pesquisa ou pelo sistema de interrupção. Exemplos de eventos que invocam as rotinas de tratamento de exceções incluem:

- Problemas de qualidade no produto.
- Variáveis de processo operando fora dos intervalos normais.
- Escassez de matérias-primas ou insumos necessários para suprir o processo.
- Condições de perigo, como incêndio.
- Mau funcionamento do controlador.

Na realidade, o tratamento de exceções é uma maneira de detecção e recuperação de erros, discutida no contexto de recursos avançados de automação (Seção 4.2.3).

Figura 5.6 Resposta do sistema de controle por computador do Exemplo 5.1 a três interrupções de prioridade para (a) um sistema de interrupção de nível único e (b) um sistema de interrupção de múltiplos níveis. A tarefa 3 é a de maior nível de prioridade. A tarefa 1 é a de nível mais baixo. As tarefas chegam para ser atendidas na ordem 1, depois 2 e depois 3. Em (a), a tarefa 3 deve esperar até que as tarefas 1 e 2 sejam completadas. Em (b), a tarefa 3 interrompe a execução da tarefa 2, cujo nível de prioridade a havia permitido interromper a tarefa 1



5.3.3 Formas de controle de processos por computador

Há várias formas de utilização de computadores para controle de um processo. Primeiro, podemos fazer a distinção entre monitoramento de processos e controle de processos, conforme ilustrada na Figura 5.7. No monitoramento de processos o computador é usado apenas para coletar dados dos processos, ao passo que no controle de processos o computador regula o processo. Em algumas implementações de controle de processos certas ações são realizadas pelo computador de controle que não precisam que dados de realimentação sejam coletados do processo. Esse é o controle de malha aberta. Entretanto, na maior parte dos casos, algum tipo de realimentação ou intertravamento é necessário para garantir que as instruções de controles tenham sido executadas de maneira devida. Dessas situações, a mais comum é o controle de malha fechada.

Nesta seção, examinaremos os vários tipos de monitoramento e controle de processos por computador, dos quais todos são comumente usados na indústria hoje, exceto um. O controle digital direto (do inglês, *direct digital control* — DDC) representa uma fase transitória na evolução da tecnologia de controle de processos por computador. Em seu estado puro, ele não é mais usado hoje. No entanto, descrevemos com brevidade o DDC a fim de revelar as oportunidades para as quais ele contribuiu. Os siste-

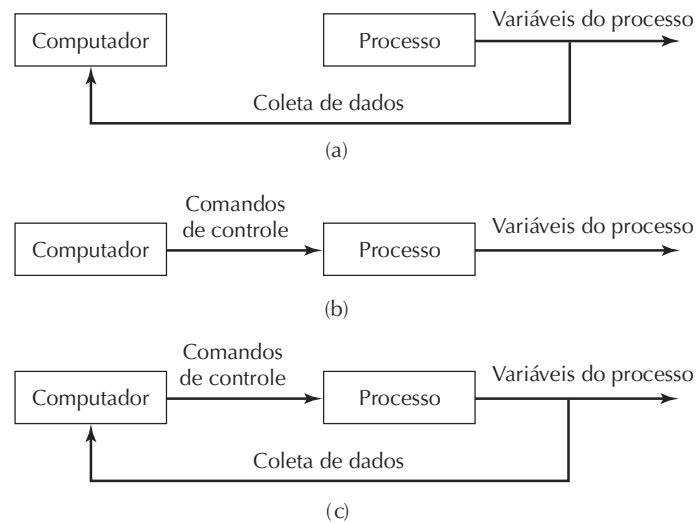
mas de controle distribuído, muitas vezes implementados usando-se computadores pessoais, são os meios mais recentes de implementação do controle de processos por computador.

Monitoramento de processos por computador.

É um dos meios pelos quais o computador pode se comunicar com um processo. Envolve a utilização do computador para observar o processo e os equipamentos associados e para coletar e gravar dados da operação. O computador não é usado para controlar diretamente o processo; o controle permanece nas mãos das pessoas, que usam os dados para conduzi-las durante o gerenciamento e a operação do processo. Os dados coletados pelo computador no monitoramento de processos por computador podem, de modo geral, ser classificados em três categorias:

1. **Dados do processo.** Valores medidos dos parâmetros de entrada e das variáveis de saída que indicam o desempenho do processo. Quando os valores indicam um problema, o operador humano toma as ações corretivas.
2. **Dados de equipamento.** Esses dados indicam o estado de um equipamento na célula de trabalho e são usados para monitorar a utilização das máquinas, agendar a troca de ferramentas, evitar avarias nas máquinas, diagnosticar o mau funcionamento de equipamentos e planejar manutenções preventivas.

Figura 5.7 (a) Monitoramento de processo, (b) controle de processo em malha aberta e (c) controle de processo em malha fechada



3. *Dados do produto.* Normas governamentais pedem que algumas indústrias de produção colem e preservem dados de fabricação de seus produtos. As indústrias farmacêuticas e de suprimentos médicos são um exemplo proeminente. O monitoramento por computador é o meio mais conveniente para satisfazer tais normas. Uma empresa também pode querer coletar dados para uso próprio.

A coleta de dados das operações da fábrica pode ser realizada de várias maneiras: dados de fabricação podem ser informados pelos trabalhadores em terminais manuais localizados pela planta ou ser coletados de forma automática por meio de interruptores de fim-de-curso, sistemas de sensores, leitores de códigos de barra ou outros dispositivos. Os sensores são descritos no Capítulo 6, e as tecnologias de coleta e identificação automática de dados são discutidas no Capítulo 12. A coleta e a utilização de dados de produção nas operações da fábrica para fins de agendamento e rastreamento são chamadas de *controle do chão de fábrica*.

Controle digital direto. O DDC foi, com certeza, um dos passos mais importantes no desenvolvimento do controle de processos por computador. Vamos examinar brevemente esse modo de controle por computador e suas limitações, o que motivou melhorias levando à tecnologia moderna desse controle. O DDC é um sistema de controle de processos por computador em que certos componentes de um sistema de controle analógico convencional são substituídos pelo computador digital. A regulação do processo é realizada pelo computador em uma base de tempo compar-

tilhado e com uma amostragem de dados em vez dos vários componentes analógicos individuais trabalhando de forma contínua e dedicada. Com o DDC, o computador calcula valores desejados dos parâmetros de entrada e valores-meta, e esses valores são aplicados por uma conexão direta com o processo, por isso o nome 'controle digital direto'.

A diferença entre controle digital direto e controle analógico pode ser percebida comparando-se as figuras 5.8 e 5.9. A primeira mostra a instrumentação para uma malha de controle analógico comum. O processo inteiro teria muitas malhas de controle individuais, mas apenas um é exibido aqui. Os componentes típicos de hardware para a malha de controle analógico incluem o sensor e o transdutor, um instrumento para a exibição de variáveis de saída (tais instrumentos nem sempre estão incluídos na malha), algum meio de se estabelecer o valor desejado da malha (representado na figura como um mostrador, sugerindo que a configuração é determinada por um operador humano), um comparador (para comparar as variáveis de saída medidas com o valor desejado), o controlador analógico, um amplificador e o atuador que determina os parâmetros de entrada para o processo.

No sistema DDC (Figura 5.9), alguns dos componentes da malha de controle permanecem inalterados, incluindo (provavelmente) o sensor e o transdutor, bem como o amplificador e o atuador. Os componentes mais prováveis de ser substituídos no DDC incluem o controlador analógico, os instrumentos de exibição e gravação, os mostradores de valor desejado e o comparador. Os novos componentes na malha incluem o computador digital, conversores analógico-digital e digital-analógico (do inglês, *analog-to-*

Figura 5.8 Uma malha de controle analógico comum

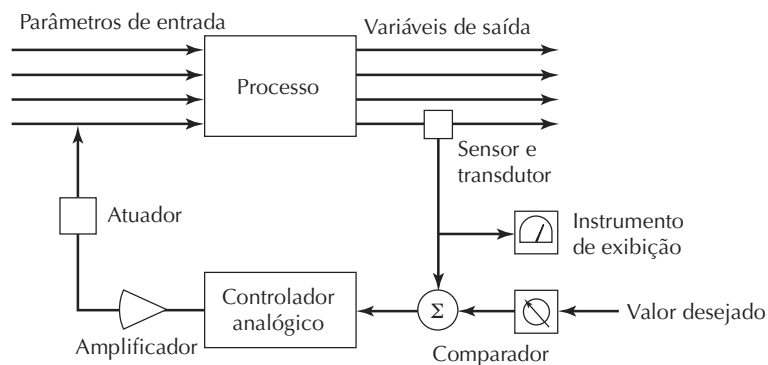
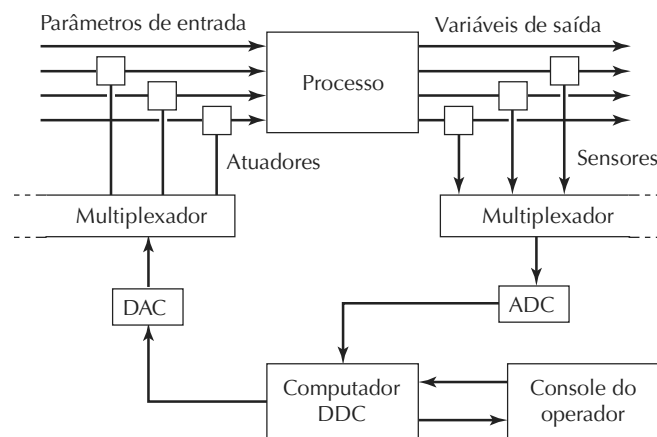


Figura 5.9 Componentes de um sistema DDC



-digital converter e digital-to-analog converter — ADC e DAC), e os multiplexadores para compartilhar os dados de malhas de controle diferentes para o mesmo computador.

O DDC foi originalmente concebido como um meio mais eficiente de realizar os mesmos tipos de ações de controle que o controlador analógico que ele estava substituindo. No entanto, a prática de apenas usar o computador digital para imitar a operação de controladores analógicos parece ter sido uma fase de transição no controle de processos por computador. Outras oportunidades para o computador de controle seriam logo reconhecidas, incluindo:

- *Mais opções de controle que o analógico tradicional.* Com o controle digital por computador, é possível executar algoritmos de controle mais complexos que os executados nos modos de controle proporcional-integral-derivativos convencionais usados por controladores analógicos; por exemplo, o controle ligado/desligado ou as não linearidades nas funções de controle podem ser implementados.

- *Integração e otimização de várias malhas.* É a habilidade de integrar medidas de realimentação de várias malhas e de implementar estratégias de otimização para melhorar o desempenho geral do processo.
- *Habilidade de editar os programas de controle.* Usando computador digital, fica relativamente fácil mudar um algoritmo de controle quando necessário, apenas reprogramando o computador. Reprogramar a malha de controle analógico normalmente requer mudanças de hardware que custam mais e são menos convenientes.

Essas melhorias tornaram o conceito original de controle digital direto algo obsoleto. Além disso, a própria tecnologia de computação progrediu bastante, de modo que computadores muito menores e mais baratos, e ainda assim mais poderosos, estão disponíveis para o controle de processos em vez dos enormes *mainframes* disponíveis no começo dos anos de 1960. Isso permitiu que o controle de processos por computador fosse economicamente justificado para processos e equipamentos de menor escala; também motivou o

uso dos *sistemas de controle distribuídos*, em que uma rede de microcomputadores é usada para controlar um processo complexo de várias operações de unidade e/ou máquinas.

Controle numérico e robótica. O controle numérico (do inglês, *numerical control* — NC) é outra maneira industrial de controle por computador. Envolve a utilização do computador (aqui também microcomputador) para dirigir uma ferramenta de usinagem por meio de uma sequência de etapas de processamento, definida por um programa de instruções que especifica os detalhes de cada etapa e sua ordem. A característica distintiva do CN é o controle da posição relativa de uma ferramenta em relação a um objeto (peça de trabalho) sendo processado. Cálculos devem ser feitos para determinar a trajetória que será seguida pela ferramenta de corte para dar forma à geometria da peça. Dessa forma, o CN requer que o controlador execute não apenas controle sequencial, mas também cálculos geométricos. Por conta de sua importância no controle e na automação industrial, o CN é tratado em detalhes no Capítulo 7.

A robótica industrial tem estreita relação com o CN; nela as juntas do manipulador (braços do robô) são controladas para mover o final do braço por uma sequência de posições durante o ciclo de trabalho. Como no CN, o controlador deve realizar cálculos durante o ciclo de trabalho para implementar interpolação do movimento, controle por realimentação e outras funções. Além disso, uma célula de trabalho robótica geralmente inclui outros equipamentos além do robô, e as atividades dos outros equipamentos devem ser coordenadas com as do robô. Essa coordenação é atingida usando intertravamentos. Discutiremos robótica industrial no Capítulo 8.

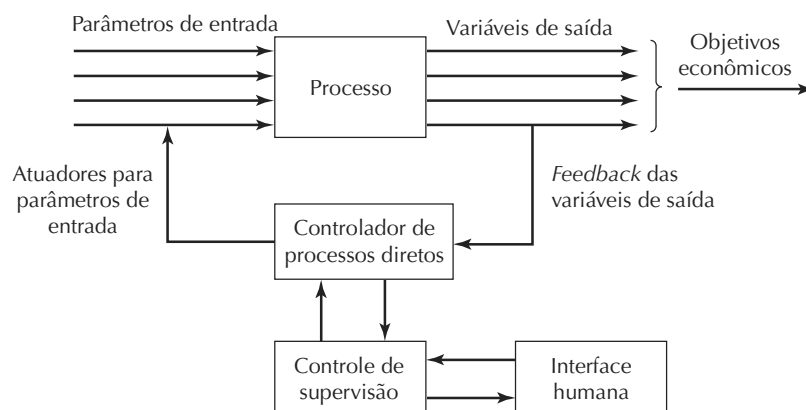
Controladores lógicos programáveis. Os CLPs (do inglês, *programmable logic controllers* — PLC) foram introduzidos por volta de 1970 como melhoria nos

controladores eletromecânicos por relés usados na época para implementar o controle discreto nas indústrias de produção discreta. A evolução dos CLPs foi facilitada pelos avanços na tecnologia de computação, e os CLPs de hoje são muito mais capazes que os controladores de 1970. Podemos definir um *controlador lógico programável* moderno como um controlador baseado em microprocessador que usa instruções guardadas na memória programável para implementar funções de lógica, sequenciamento, tempo, contagem e controle aritmético a fim de controlar as máquinas e processos. Os CLPs atuais são usados tanto para aplicações de controle contínuo como para as de controle discreto, tanto nas indústrias de processo como nas de produção discreta. No Capítulo 9, trataremos dos CLPs e dos tipos de controle para cuja implementação eles são utilizados.

Controle supervísório. O termo *controle supervísório* é habitualmente associado às indústrias de processo, mas o conceito também se aplica à automação da produção discreta, em que corresponde ao controle da célula ou de nível de sistema. Ele representa um nível mais alto de controle do que o DDC, o CN e os CLPs. De modo geral, esses outros tipos de sistemas de controle são colocados em comunicação direta com o processo. Em contrapartida, o controle supervísório muitas vezes sobrepõe esses sistemas de controle de nível de processo e direciona suas operações. A relação entre o controle supervísório e as técnicas de controle de nível de processo é ilustrada na Figura 5.10.

No contexto das indústrias de processo, o *controle supervísório* denota um sistema de controle que gerencia as atividades de um número de operações de unidade integradas para alcançar certos objetivos econômicos do processo. Em algumas aplicações, o controle supervísório não é muito mais que o controle regulatório ou o controle pre-

Figura 5.10 Controle supervísório sobreposto aos outros sistemas de controle no nível de processo



ditivo, já em outras, é projetado para implementar o controle otimizado ou adaptativo. Procura otimizar alguma função de objeto bem definida, o que é normalmente baseado em um critério econômico, como rendimento, taxa de produção, custo, qualidade ou outros objetivos que dizem respeito ao desempenho do processo.

No contexto da produção discreta, o *controle supervísório* pode ser definido como o sistema de controle que direciona e coordena as atividades de vários equipamentos interagindo entre si em um sistema ou célula de manufatura, como um grupo de máquinas interconectadas por um sistema de manuseio de matéria-prima. Mais uma vez, os objetivos do controle supervísório são motivados por considerações econômicas e podem incluir a diminuição do custo por peça ou produto por meio da determinação de condições de operação otimizadas, o aumento da utilização de máquinas por meio do agendamento eficiente ou a diminuição dos custos das ferramentas por meio do rastreamento de sua vida útil e do agendamento de sua troca.

É tentador conceituar um sistema de controle supervísório como totalmente automático, de modo que opere sem a interferência ou assistência humana, mas, em quase todos os casos, os sistemas de controle supervísório são projetados para permitir a interação com operadores humanos, e a responsabilidade pelo controle é dividida entre os controladores e os homens. As proporções relativas de responsabilidades são diferentes dependendo da aplicação.

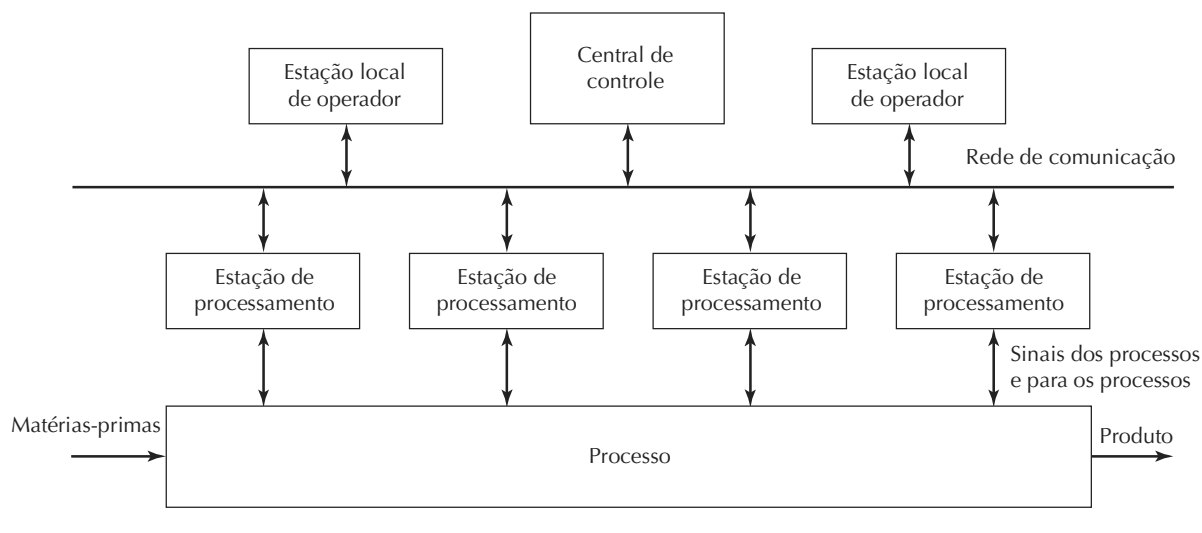
Sistemas de controle distribuído. Com o desenvolvimento do microprocessador, tornou-se possível conectar vários computadores para compartilhar e distribuir a carga de trabalho do controle de processos. O termo *sistema de controle distribuído* (do inglês, *distributed control system* — DCS), também chamado sistema digital de controle distribuído (SDCD), é usado para descrever essa configuração, que consiste dos seguintes componentes e características [8]:

tem — DCS), também chamado sistema digital de controle distribuído (SDCD), é usado para descrever essa configuração, que consiste dos seguintes componentes e características [8]:

- Várias estações de controle de processo localizadas pela planta para controlar malhas individuais e dispositivos do processo.
- Uma central de controle equipada com estações com operador onde ocorre o controle supervísório da fábrica.
- Estações locais com operador distribuídas pela planta, o que dá redundância ao SDCCD. Se uma falha ocorrer na central de controle, as estações locais de operador assumem as funções da central de controle. Se uma estação local com operador falhar, outra estação assume suas funções.
- Todos os processos e as estações com operador interagem uns com os outros por meio da rede de comunicação, ou via de dados (do inglês, *data highway*), como também é chamada.

Esses componentes são ilustrados em uma configuração típica de um sistema de controle de processos distribuído apresentado na Figura 5.11. Há vários benefícios e vantagens nos SDCCDs: (1) um SDCCD pode ser instalado para uma dada aplicação com configuração bem básica e depois melhorado e expandido conforme necessidade; (2) como o sistema consiste de muitos computadores, isso facilita a execução multitarefa em paralelo; (3) por causa de seus vários computadores, um SDCCD tem redundância embutida; (4) o cabeamento de controle é reduzido em comparação a uma configuração de controle por computador central e (5) as redes oferecem informações sobre o

Figura 5.11 Sistema de controle distribuído



processo em toda a empresa para um gerenciamento mais eficiente da fábrica e do processo.

O desenvolvimento dos SDCDs começou por volta de 1970. Um dos primeiros sistemas comerciais foi o TDC2000 da Honeywell, introduzido em 1975 [1]. As primeiras aplicações de SDCD ocorreram nas indústrias de processos. Nas indústrias de produção discreta, os controladores lógicos programáveis foram introduzidos na mesma época. O conceito de controle distribuído se aplica igualmente bem aos CLPs; ou seja, vários CLPs distribuídos pela fábrica, para controlar equipamentos individuais, mas integrados por meio de uma rede de comunicação em comum. A introdução do PC pouco depois do SDCD e do CLP, e seu subsequente aumento de poder de computação e redução no custo através dos anos estimularam a crescente adoção de SDCDs baseados em PCs para as aplicações de controle de processos.

PCs no controle de processos. Hoje, os PCs dominam o mundo dos computadores. Tornaram-se a ferramenta-padrão com a qual os negócios são conduzidos, seja no setor de produção ou de serviços. Por isso, não é surpresa que sejam usados em um número crescente de aplicações de controle de processos. Duas categorias básicas de implementações do PC em controle de processos podem ser destacadas: (1) interface com o operador (interface homem-máquina — IHM) e (2) controle direto. Seja na utilização para interface com o operador, seja no controle direto, os PCs normalmente são conectados em rede com outros computadores, criando um sistema de controle distribuído.

Quando usado como interface com o operador, o PC é ligado a um ou mais CLPs ou outros dispositivos (possivelmente outros microcomputadores) que controlam diretamente o processo. Os computadores pessoais foram usados para realizar a função de comunicação com o operador desde o início dos anos de 1980. Nessa função, o computador executa certas funções de monitoramento e controle supervisão, mas não controla diretamente o processo. Algumas vantagens da utilização do PC apenas como a interface com o operador são que: (1) o PC oferece uma interface amigável para o operador; (2) pode ser usado para todos os cálculos convencionais e funções de processamento de dados que os PCs realizam de forma tradicional; (3) o CLP ou outro dispositivo que esteja controlando diretamente o processo é isolado do PC, de modo que uma falha no último não afetará o controle do processo e (4) o computador pode ser atualizado facilmente conforme os avanços da capacidade e tecnologia dos PCs, enquanto o software de controle de CLP e as conexões com o processo permanecem no lugar.

A segunda maneira de utilizar os PCs no controle de processos é o *controle direto*, o que significa que o PC é diretamente ligado ao processo e controla sua operação em tempo real. O pensamento tradicional tem sido o de que é muito arriscado permitir ao PC controlar diretamente as operações de produção. Se o computador falhasse, a operação descontrolada poderia parar de funcionar, fabricar um produto defeituoso ou tornar-se perigosa. Outro fator é que os PCs convencionais, equipados com sistemas operacionais e softwares aplicativos usuais orientados aos negócios, são projetados para funções de cálculo e processamento de dados, não para controle de processos. Não são pensados de modo a ser ligados a um processo externo da maneira necessária para o controle de processos em tempo real. Por fim, a maior parte dos PCs é projetada para ser usada em escritórios e não no ambiente agressivo da fábrica.

Avanços recentes tanto na tecnologia dos PCs como nos softwares disponíveis desafiaram esse pensamento tradicional. A partir do início dos anos de 1990, os PCs foram instalados em um passo acelerado para o controle direto de processos industriais. Vários fatores permitiram essa tendência:

- Familiaridade generalizada com os PCs. Os softwares amigáveis para casa e empresas certamente contribuíram para a popularidade dos PCs. Entre os trabalhadores, há uma crescente expectativa de que serão fornecidos computadores no local de trabalho, mesmo que seja uma fábrica.
- A disponibilidade de PCs de alto desempenho, capazes de satisfazer os requisitos exigentes do controle de processos (Seção 5.3.1).
- A tendência em direção à *filosofia da arquitetura livre* em projetos de sistemas de controle, em que fornecedores de hardware e software de controle concordam em obedecer a normas de produção que permitem a interoperabilidade de seus produtos. Isso significa que componentes de diferentes fornecedores podem ser interconectados no mesmo sistema. A filosofia tradicional era de que cada fornecedor projetava sistemas proprietários, obrigando o usuário a comprar um pacote completo de hardware e software de um mesmo fornecedor. A arquitetura livre permite ao usuário uma escolha mais abrangente de produtos no projeto de uma dada aplicação do controle de processos.
- A disponibilidade dos sistemas operacionais dos PCs, que facilitam o controle em tempo real, a execução em multitarefa e a comunicação em rede. Ao mesmo tempo, esses sistemas oferecem a conveniência da interface

amigável do PC e grande parte do poder de uma estação de engenharia. Instalado em uma fábrica, um PC equipado com o software apropriado pode executar diversas funções de forma simultânea, como registro de dados e análise de tendências e exibir visualização animada do processo durante sua execução; tudo isso enquanto reserva parte da capacidade da CPU para controle direto do processo.

No que tange à questão do ambiente da fábrica, isso pode ser resolvido usando-se PCs de nível industrial, equipados com gabinetes projetados para o ambiente das fábricas. Em comparação com a configuração de PC/CLP discutida anteriormente, na qual o PC é usado apenas como interface com o operador, há uma economia de custo na instalação de um PC para o controle direto, em vez de um PC mais um CLP. Uma questão relacionada é a integração de dados: configurar uma ligação de dados entre um PC e um CLP é mais complexo do que manter todos os dados no PC.

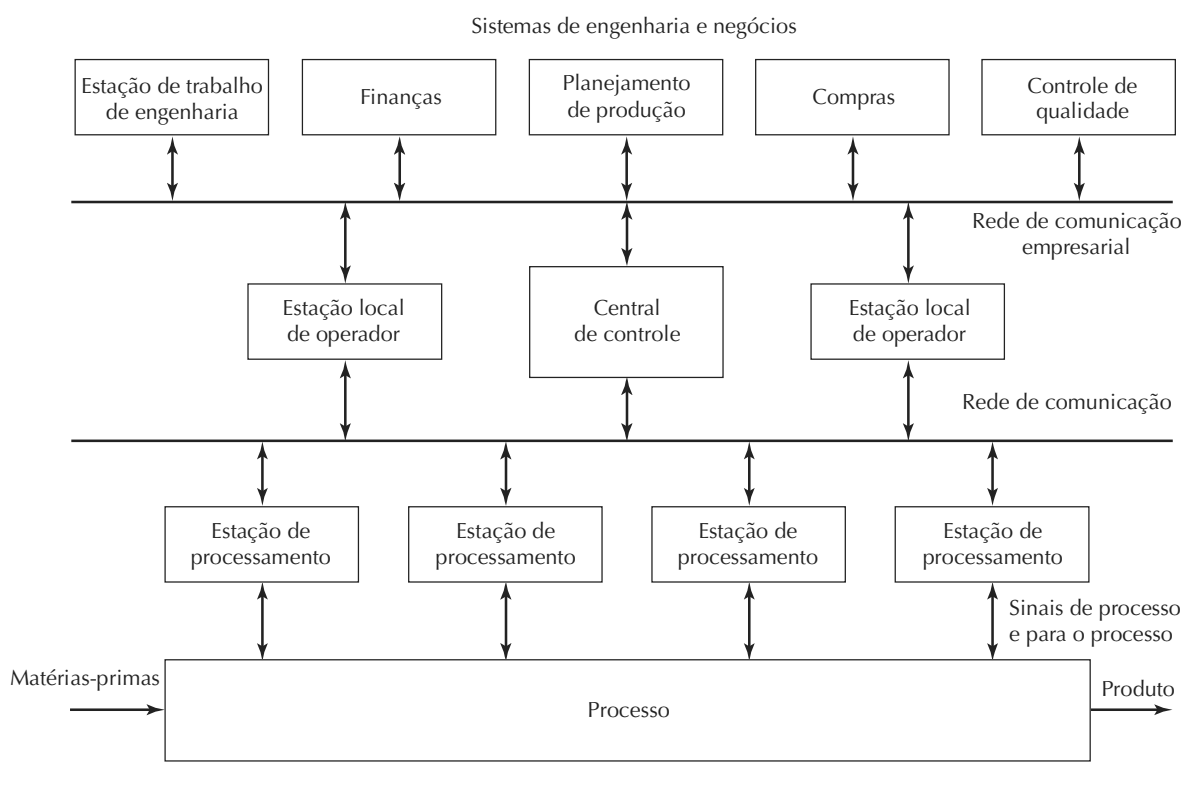
Integração de dados da fábrica em extensão empresarial. A evolução mais recente em controle distribuído baseado em PC é a integração dos dados das operações da fábrica em extensão empresarial, como mostrado na Figura 5.12. Essa tendência é compatível com as filosofias modernas de gerenciamento de informação e capa-

citação dos trabalhadores. Essas filosofias adotam menos níveis de gerenciamento empresarial e mais responsabilidades para os trabalhadores da linha de frente em vendas, agendamento de pedidos e produção. As tecnologias de redes de comunicação que permitem tal integração estão disponíveis. Os sistemas operacionais mais recentes para PC oferecem várias funcionalidades ideais embutidas para a comunicação do sistema de controle industrial da fábrica aos sistemas de extensão empresarial e o suporte para a troca de dados entre as várias aplicações (por exemplo, permitir que dados coletados na fábrica sejam usados em pacotes de análise, como planilhas). O termo *planejamento de recursos empresariais* (do inglês, *enterprise resource planning* — ERP) refere-se a um sistema de software de computador que atinge a integração em extensão empresarial não apenas dos dados da fábrica, mas de todos os outros dados necessários à execução de funções de negócios da organização. Uma característica importante do ERP é a utilização de uma única base de dados central que pode ser acessada de qualquer lugar na companhia.

A seguir, algumas das capacidades possíveis por meio da disponibilização dos dados de processo em extensão empresarial:

1. Os gerentes podem ter acesso direto às operações no nível da fábrica.

Figura 5.12 SDCD baseado em PC com extensão empresarial



2. Os planejadores da produção podem usar os dados mais atuais sobre o tempo e as taxas de produção no agendamento dos próximos pedidos.
3. A equipe de vendas pode fornecer estimativas realistas para as datas de entrega aos consumidores, baseando-se na carga atual da fábrica.
4. Rastreadores de pedidos podem oferecer aos consumidores informações de estado atual dos pedidos.
5. A equipe de controle de qualidade é alertada sobre problemas de qualidade reais ou potenciais nos pedidos em andamento, baseado no acesso aos históricos de desempenho dos pedidos anteriores.
6. A contabilidade dos custos tem acesso aos dados mais recentes de custos da produção.
7. A equipe de produção pode acessar detalhes de projetos, das peças e dos produtos para esclarecer ambiguidades e realizar seu trabalho de maneira mais eficiente.

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] BOUCHER, T. O. *Computer automation in manufacturing*. Londres: Chapman & Hall, 1996.
- [4] CAWLFIELD, D. “PC-based direct control flattens control hierarchy, opens information flow”. *Instrumentation & Control Systems*, p. 61-67, set. 1997.
- [5] GROOVER, M. P. “Industrial control Systems”. In: ZANDIN, K. (ed.) *Maynard’s industrial engineering handbook*. 5. ed. Nova York, NY: McGraw-Hill Book Company, 2001.
- [6] HIRSH, D. “Acquiring and sharing data seamlessly”. *Instrumentation and Control Systems*, p. 25-35, out. 1997.
- [7] OLSSON, G.; PIANI, G. *Computer systems for automation and control*. Londres: Prentice Hall, 1992.
- [8] PLATT, G. *Process control: A primer for the nonspecialist and the newcomer*. 2. ed. NC: Instrument Society of America, Research Triangle Park, 1998.
- [9] RULLAN, A. “Programmable logic controllers versus personal computers for process control”. *Computers and Industrial Engineering*, v. 33, n. 1-2, p. 421-424, 1997.
- [10] STENERSON, J. *Fundamentals of programmable logic controllers, sensors, and communications*. 3. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall, 2004.

Questões de revisão

- 5.1 O que é controle industrial?
- 5.2 Qual a diferença entre variável contínua e variável discreta?
- 5.3 Nomeie e defina brevemente cada um dos três tipos de variáveis discretas.
- 5.4 Qual a diferença entre sistema de controle contínuo e sistema de controle discreto?
- 5.5 O que é controle preditivo?
- 5.6 O que é controle adaptativo?
- 5.7 Quais são as três funções do controle adaptativo?
- 5.8 Qual é a diferença entre uma mudança ocasionada por evento e uma mudança ocasionada por tempo no controle discreto?
- 5.9 Quais são os dois requisitos básicos que devem ser gerenciados pelo controlador para atingir o controle em tempo real?
- 5.10 O que é pesquisa no controle de processos por computador?
- 5.11 O que é um intertravamento? Quais são os dois tipos de intertravamentos no controle industrial?
- 5.12 O que é um sistema de interrupção no controle de processos por computador?
- 5.13 O que é monitoramento de processos por computador?
- 5.14 O que é controle digital direto (DDC), e porque ele não é mais usado nas aplicações de controle de processos industriais?
- 5.15 Os controladores lógicos programáveis (CLPs) estão mais estreitamente associados às indústrias de processos ou às indústrias de produção discreta?
- 5.16 O que é um sistema de controle distribuído?
- 5.17 Qual é a filosofia de arquitetura livre no projeto de sistemas de controle?