

# Introdução aos Sistemas de Controle

## 1-1 INTRODUÇÃO

O Controle Automático tem desempenhado um papel vital no avanço da engenharia e da ciência. Além de sua extrema importância para os veículos espaciais, para os sistemas de guiamento de mísseis, sistemas robóticos e similares, o controle automático tornou-se uma parte importante e integrante dos processos industriais e de manufatura modernos. Por exemplo, o controle automático é essencial no comando numérico de máquinas-ferramentas das indústrias manufatureiras, no projeto de sistemas de pilotagem automática da indústria aeroespacial e no projeto de automóveis e caminhões da indústria automobilística. É ainda essencial nas operações industriais tais como: controle de pressão, temperatura, umidade, viscosidade e vazão nas indústrias de processo.

Considerando que os avanços na teoria e na prática do controle automático propiciam meios para se atingir desempenho ótimo de sistemas dinâmicos, melhoria da produtividade, alívio no trabalho enfadonho de muitas operações manuais repetitivas de rotina e muito mais, os engenheiros e cientistas, em sua maioria, devem possuir agora um bom conhecimento deste campo.

**Revisão histórica.** O primeiro trabalho significativo em controle automático foi o de James Watt, que construiu, no séc. XVIII, um controlador centrífugo para o controle de velocidade de uma máquina a vapor. Outros trabalhos importantes nos primeiros estágios de desenvolvimento da teoria do controle se devem a Minorsky, Hazen e Nyquist, dentre outros. Em 1922, Minorsky trabalhou em controladores automáticos para pilotar navios e mostrou como poderia determinar sua estabilidade a partir da representação do sistema através de equações diferenciais. Em 1932, Nyquist desenvolveu um procedimento relativamente simples para determinar a estabilidade de sistemas a malha fechada com base na resposta estacionária de sistemas a malha aberta a excitações senoidais. Em 1934, Hazen, que introduziu o termo “servomecanismos” para designar sistemas de controle de posição, discutiu o projeto de servomecanismos a relé capazes de seguir, de muito perto, uma excitação variável no tempo.

Durante a década de 1940, os métodos de resposta de frequência tornaram possível aos engenheiros projetar sistemas de controle a malha fechada satisfazendo requisitos de desempenho. Do final da década de 1940 até o início dos anos 50, desenvolveu-se completamente o método do lugar das raízes graças a Evans.

Os métodos de resposta de frequência e do lugar das raízes, que constituem o núcleo da teoria de controle clássica, conduziram à realização de sistemas estáveis e que satisfazem um conjunto de requisitos de desempenho mais ou menos arbitrários. Tais sistemas são, em geral, aceitáveis, mas não correspondem a realizações projetadas intencionalmente segundo algum critério de *otimalidade*. A partir do final dos anos 50, a ênfase nos problemas de projeto de controle tem sido deslocada do projeto de um dos muitos sistemas possíveis de operar para o projeto de um sistema que seja ótimo de acordo com um determinado critério.

Tendo em vista que os sistemas modernos, dotados de muitas entradas e muitas saídas, se tornam mais e mais complexos, a descrição de um tal sistema de controle envolve um grande número de equações. A teoria de controle clássica, que trata somente de sistemas com uma única entrada e uma única saída, tornou-se insuficiente para lidar com sistemas de entradas e saídas múltiplas. A partir de 1960, aproximadamente, a disponibilidade dos computadores digitais tornou possível a análise, no domínio do tempo, de sistemas complexos, ensejando o desenvolvimento da moderna teoria de controle baseada nas técnicas de análise e síntese através de variáveis de estado. Esta teoria foi desenvolvida com o objetivo de tratar a complexidade crescente dos sistemas modernos e atender às rigorosas exigências quanto a peso, exatidão e custos de projetos relativos às aplicações militares, espaciais e industriais.

Durante o período de 1960 a 1980, foram investigados o controle ótimo de sistemas determinísticos e estocásticos bem como o controle adaptativo e o controle com aprendizado. De 1980 aos dias de hoje, os desenvolvimentos na moderna teoria de controle têm se concentrado no controle robusto, no controle de  $H_\infty$  e tópicos associados.

Agora que os computadores digitais vêm se tornando mais baratos e mais compactos, é crescente a sua utilização como parte integrante dos sistemas de controle. Aplicações recentes da moderna teoria de controle incluem outras áreas além da engenharia tais como sistemas biológicos, biomédicos, econômicos e socioeconômicos.

**Definições.** Antes de discutir os sistemas de controle, alguns termos básicos devem ser definidos.

**Variável Controlada e Variável Manipulada.** A variável *controlada* é a grandeza ou a condição que é medida e controlada. A variável *manipulada* é a grandeza ou a condição variada pelo controlador de modo a afetar o valor da variável controlada. A variável controlada é normalmente a grandeza de saída do sistema. **Controlar** significa medir o valor da variável controlada e aplicar o valor conveniente da variável manipulada ao sistema de modo a corrigir ou limitar o desvio entre o valor medido e o valor desejado da variável controlada.

Para estudar Engenharia de Controle é preciso definir termos adicionais necessários à descrição de sistemas de controle.

**Sistemas a Controlar\* (Plants).** Um sistema a controlar é uma parte de um equipamento, eventualmente um conjunto de itens de uma máquina que funcionam juntos e cuja finalidade é desempenhar uma determinada operação. Neste livro, será designado por *sistema a controlar* qualquer objeto físico a ser controlado (tal como um dispositivo mecânico, uma caldeira para aquecimento, um reator químico ou uma espaçonave).

**Processos (Processes).** O *Dicionário Merriam-Webster* define processo como uma operação ou desenvolvimento natural, que evolui progressiva e continuamente, caracterizado por uma série de mudanças graduais que se sucedem umas às outras, de um modo relativamente fixo e objetivando um resultado particular ou meta; ou, uma operação artificial ou voluntária que evolui progressivamente e se constitui de uma série de ações controladas ou de movimentos sistematicamente dirigidos para se alcançar um determinado resultado ou meta. Neste livro, toda operação a ser controlada será designada *processo*. Exemplos: processos químicos, econômicos e biológicos.

**Sistemas.** Um sistema é uma combinação de componentes que atuam em conjunto e realizam um certo objetivo. Um sistema não é limitado apenas a algo físico. O conceito de sistema pode ser aplicado a fenômenos abstratos, dinâmicos, como os encontrados em Economia. A palavra *sistema* deve, por conseguinte, ser interpretada para designar sistemas físicos, biológicos, econômicos e outros.

**Distúrbios.** Um distúrbio ou perturbação é caracterizado por um sinal que tende a afetar de modo adverso o valor da variável de saída de um sistema. Se um distúrbio for gerado internamente no sistema, ele é dito um distúrbio *interno*; ao passo que um distúrbio *externo* é produzido fora do sistema e se comporta como um sinal de entrada no sistema.

**Controle com Retroação.** Controle com retroação ou a malha fechada se refere a uma operação que, em presença de distúrbios, tende a reduzir a diferença entre o sinal de saída de um sistema e o sinal de referência, e que opera com base nesta diferença. Aqui, apenas os distúrbios não-previsíveis (isto é, aqueles não-conhecidos *a priori*) são designados como tais, uma vez que as perturbações conhecidas ou previsíveis podem sempre ser compensadas no sistema.

## 1-2 EXEMPLOS DE SISTEMAS DE CONTROLE

Nesta seção serão apresentados alguns exemplos ilustrativos de sistemas de controle.

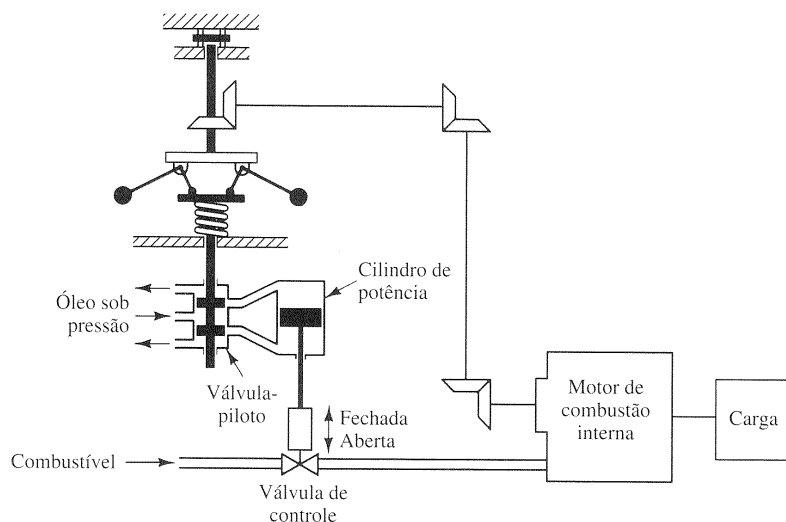
**Sistema de controle de velocidade.** O princípio básico do regulador de Watt para controlar a velocidade de um motor de combustão interna é ilustrado no diagrama esquemático da Fig. 1-1. A quantidade de combustível admitida no motor é ajustada de acordo com a diferença entre a velocidade desejada e a velocidade real do motor.

A sequência de ações pode ser estabelecida como se segue: a velocidade do regulador é ajustada de tal sorte que, na velocidade nominal, inexistia ação do óleo sob pressão em qualquer das câmaras do cilindro hidráulico de potência. Quando a velocidade real cai abaixo do valor desejado em função de algum distúrbio, então o decréscimo na força centrífuga atuando sob o regulador de esferas acarreta o movimento da válvula para baixo, fornecendo mais combustível ao motor e, como consequência, produzindo um aumento na velocidade do motor até que o valor desejado seja obtido. Por outro lado, quando a velocidade do motor aumenta acima do valor desejado, o aumento na força centrífuga faz com que a válvula se desloque para cima. Isto reduz o suprimento de combustível e a velocidade do motor é reduzida até ser alcançado o valor nominal.

Neste sistema de controle de velocidade o processo a controlar (sistema controlado) é o motor de combustão interna e a variável controlada é a velocidade do eixo de saída do motor. A diferença entre o valor da velocidade desejada e o valor

---

\*Devido à inexistência, na língua portuguesa, do vocábulo “planta” com a acepção dada a *plant*, será utilizada a expressão *processo a controlar* ou simplesmente *processo* nos casos em que não se estabeleça conflito com a tradução de *process*. (N. do T.)



**Fig. 1-1** Sistema de controle de velocidade.

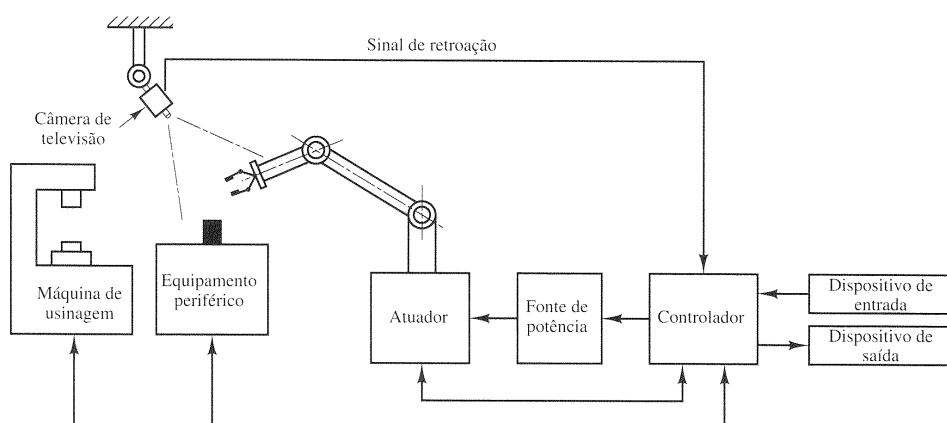
da velocidade real é o sinal de erro. O sinal de controle (quantidade de combustível) a ser aplicado ao processo a controlar (motor) é o sinal de atuação. A grandeza externa que perturba a variável controlada é o distúrbio. Uma variação não-esperada no valor da carga constitui um distúrbio.

**Sistema de controle de robôs.** Robôs industriais são freqüentemente utilizados na indústria visando a um aumento de produtividade. Os robôs podem efetuar tanto tarefas monótonas quanto tarefas complexas, sem erros de operação. Os robôs podem trabalhar em ambientes intoleráveis para os seres humanos. Por exemplo, podem operar sob temperaturas extremas (altas ou baixas) ou ainda sob valores anormais de pressão (alta ou baixa), sob a água ou no espaço sideral. Há robôs especiais para combate a incêndios, exploração subaquática, exploração espacial, dentre muitas outras tarefas.

Um robô industrial deve ser capaz de manipular partes mecânicas de forma e peso variados. Assim, deve possuir, no mínimo, um braço, um punho e uma mão. Deve dispor de potência suficiente e o mínimo de mobilidade para realizar a tarefa desejada. Com efeito, nos dias de hoje alguns robôs são capazes de se movimentar livremente em ambientes limitados das fábricas.

Um robô industrial deve contar com alguns dispositivos sensores. Em robôs de baixo nível de complexidade são instalados microrruptores de fim de curso nos braços. O robô primeiramente toca o objeto e, em seguida, através da atuação dos microrruptores, confirma a existência de um objeto no espaço de trabalho e prossegue, no próximo passo, os procedimentos para apanhá-lo.

Em robôs de alto nível de complexidade, um meio óptico (como um sistema de televisão) é utilizado para realizar uma varredura do ambiente de fundo onde se encontra o objeto. Ele reconhece padrões e determina a presença e a orientação do objeto. Torna-se necessário um computador para tratar sinais no processo de reconhecimento de padrões (ver Fig. 1-2). Em algumas aplicações o robô computadorizado reconhece a presença e a orientação de cada uma das partes mecânicas



**Fig. 1-2** Robô utilizando um processo de reconhecimento de padrões.

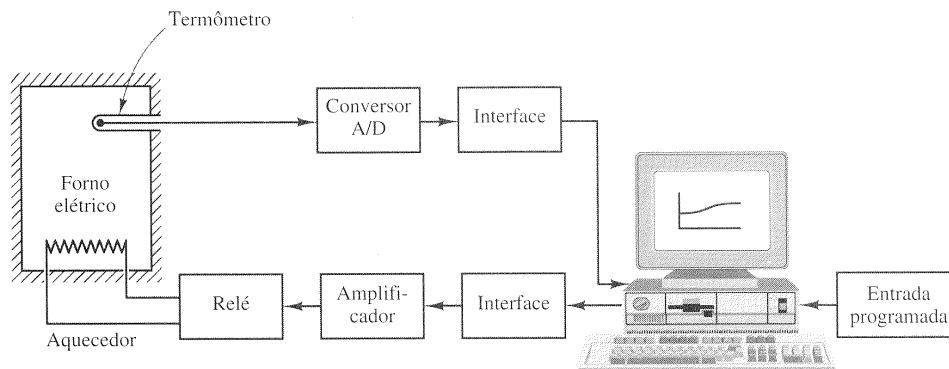


Fig. 1-3 Sistema de controle de temperatura.

através de um processo de reconhecimento de padrões que consiste na leitura de um código de barras gravado em cada uma das partes. O robô apanha o componente, movimenta-o até o local adequado de montagem e integra as diversas partes em um novo conjunto. Um computador digital bem programado atua como controlador.

**Sistema de controle de temperatura.** A Fig. 1-3 mostra o diagrama esquemático de um sistema de controle de temperatura de um forno elétrico. A temperatura do forno elétrico é medida através de um termômetro, que é um dispositivo analógico. O valor analógico da temperatura é convertido para um valor numérico por intermédio de um conversor A/D (analógico-digital). O valor digital, assim obtido, alimenta o controlador através de uma interface. O valor numérico da temperatura é comparado com o valor programado de entrada e, quando existe qualquer discrepância (erro), o controlador envia um sinal para o aquecedor através do conjunto interface-amplificador-relé, de modo a trazer o valor da temperatura para o valor desejado.

**Controle de temperatura do compartimento de passageiros de um automóvel.** A Fig. 1-4 apresenta o diagrama funcional de um sistema de controle de temperatura para o compartimento de passageiros de um automóvel. A temperatura desejada, convertida em tensão elétrica, é o sinal de entrada do controlador. A temperatura real do compartimento é convertida em tensão elétrica por meio de um sensor e enviada ao controlador (retroação) para ser comparada com o sinal de entrada. A temperatura ambiente no exterior do carro e o fluxo térmico resultante da radiação solar, que não são constantes ao longo do percurso, agem como distúrbios. Este sistema emprega ambas as técnicas de controle: retroação e de ação preditiva (*feedforward*). (A técnica de ação preditiva propicia uma ação corretiva antecipada, isto é, antes que os efeitos do distúrbio se manifestem na saída do sistema.)

A temperatura no interior do habitáculo difere consideravelmente em função do ponto onde ela seja medida. Em vez de utilizar múltiplos sensores para medir a temperatura em diversos pontos e obter o valor médio das leituras, é mais econômico instalar um pequeno exaustor em local onde normalmente a temperatura é sentida pelos ocupantes do carro. A tem-

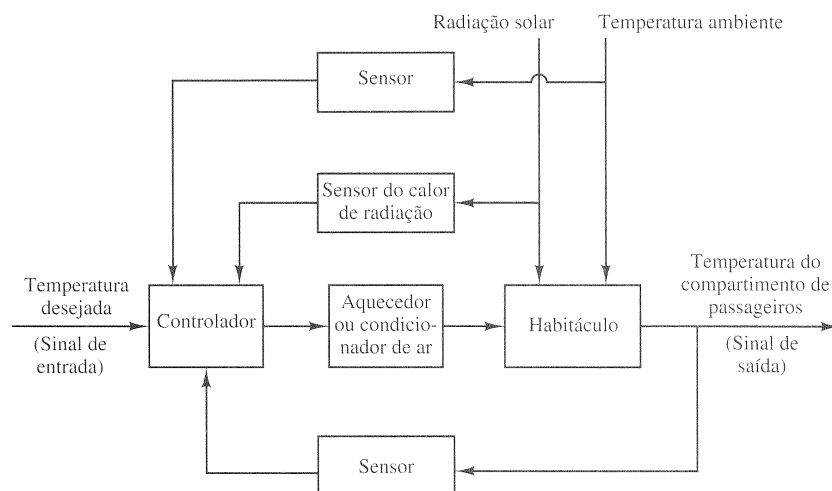


Fig. 1-4 Controle de temperatura do compartimento de passageiros de um carro.

peratura do fluxo de ar passando pelo exaustor fornece uma indicação da temperatura no interior do compartimento e será utilizada como valor do sinal de saída do sistema.

O controlador recebe os sinais de entrada, de saída e dos sensores das fontes de distúrbio. O controlador processa estas informações e gera um sinal de controle otimizado para o sistema de ar condicionado ou para o sistema de calefação, de modo que a temperatura no interior do carro seja aproximadamente a desejada.

**Sistemas empresariais.** Um sistema empresarial pode ser constituído de muitos grupos funcionais. Cada uma das tarefas alocadas a um determinado grupo representará um elemento dinâmico do sistema. A fim de se obter uma operação apropriada de um tal sistema, há necessidade de se adotarem métodos com retroação para relatar as realizações de cada um dos grupos. O inter-relacionamento entre grupos funcionais deve ser minimizado de modo a reduzir os atrasos indesejáveis no sistema. Quão menor este inter-relacionamento, menor será o volume do fluxo de informações e de materiais de trabalho.

Um sistema empresarial é um sistema a malha fechada. Um bom projeto reduzirá o controle administrativo requerido. Note-se que os distúrbios neste sistema correspondem à carência de mão-de-obra ou de matéria-prima, interrupção nas comunicações, erros humanos etc.

Para uma administração apropriada é imperativo o estabelecimento de um sistema de previsão estimativa bem fundamentado, com base em dados estatísticos. (É um fato bem conhecido que o desempenho de um sistema deste tipo pode ser melhorado pelo uso do *lead time*\* ou da *antecipação*.)

Para aplicar a teoria de controle com o objetivo de melhorar o desempenho de um sistema deste tipo deve-se representar as características dinâmicas de cada um dos grupos componentes do sistema por meio de um conjunto de equações relativamente simples.

Embora seja, sem dúvida, um problema difícil obter uma descrição dos grupos funcionais por meio de representações matemáticas, a aplicação das técnicas de otimização a sistemas empresariais melhora significativamente o desempenho destes sistemas.

### 1-3 CONTROLE A MALHA FECHADA *VERSUS* CONTROLE A MALHA ABERTA

**Sistemas de controle com retroação.** Um sistema que mantém uma relação preestabelecida entre a grandeza de saída e a grandeza de referência, comparando-as e utilizando a diferença como meio de controle, é dito um *sistema de controle com retroação*. Um exemplo disso seria o sistema de controle de temperatura de um ambiente. Medindo-se a temperatura do ambiente e comparando-a com a temperatura de referência (temperatura desejada), o termostato aciona o equipamento de calefação ou de refrigeração, ligando ou desligando cada um deles, de tal sorte que a temperatura do ambiente permaneça na faixa de conforto estabelecida, a despeito das condições externas.

Os sistemas de controle com retroação não ficam limitados às aplicações de engenharia, mas podem ser encontrados em diversos outros campos. O corpo humano, por exemplo, é um sistema de controle com retroação altamente sofisticado. A pressão sanguínea e a temperatura do corpo são mantidas constantes por intermédio de retroação fisiológica. Com efeito, a retroação desempenha uma função vital: ela torna o corpo humano relativamente insensível às perturbações externas, habilitando-o a funcionar de forma adequada sob condições ambientais mutáveis.

**Sistemas de controle a malha fechada.** Os sistemas de controle com retroação são freqüentemente referidos como *sistemas de controle a malha fechada*. Na prática, os termos controle com retroação e controle a malha fechada são usados indistintamente. Num sistema de controle a malha fechada, o sinal atuante de erro, que é a diferença entre o sinal de entrada e o sinal de retroação (que pode ser o próprio sinal de saída ou uma função do sinal de saída e de suas derivadas e/ou integrais), excita o controlador de modo a reduzir o erro e trazer o valor do sinal de saída para o valor desejado. A expressão controle a malha fechada acarreta sempre o uso da retroação a fim de reduzir o erro do sistema.

**Sistemas de controle a malha aberta.** Os sistemas nos quais o sinal de saída não afeta a ação de controle são chamados *sistemas de controle a malha aberta*. Em outras palavras, num sistema de controle a malha aberta, não se mede o sinal de saída nem tampouco este sinal é enviado de volta para comparação com o sinal de entrada. Um exemplo prático disto é o da máquina de lavar roupa. As operações de colocar de molho, lavar e enxaguar numa lavadora são executadas numa seqüência programada em função do tempo. A máquina não mede o sinal de saída, isto é, a limpeza das roupas.

Nos sistemas de controle a malha aberta o sinal de saída não é comparado com o sinal de referência na entrada. Assim, a cada sinal de referência na entrada corresponde uma condição de operação fixa; como resultado, a exatidão do sistema depende de uma calibração. Na presença de distúrbios, os sistemas de controle a malha aberta não desempenham a tarefa desejada. Na prática, os sistemas de controle a malha aberta são usados somente quando as relações entre entrada e saída do processo a controlar forem conhecidas e quando não existirem distúrbios internos e externos. Tais sistemas não são, obviamente, sistemas de controle com retroação. Note-se que todos os sistemas em que as ações de controle são direta-

---

\**Lead time* é uma expressão corrente em administração empresarial e significa o tempo necessário para realizar uma tarefa, produzir um item etc. O conhecimento do *lead time* permite a contratação de serviços com antecedência tal que se possa ter o resultado na data desejada. (N. do T.)

mente uma função do tempo constituem um sistema a malha aberta. O controle de tráfego por meio de sinais operados com base no tempo é um outro exemplo de controle a malha aberta.

**Sistemas de controle a malha fechada *versus* sistemas de controle a malha aberta.** Uma vantagem dos sistemas de controle a malha fechada é o fato de que o uso da retroação torna a resposta do sistema relativamente insensível a perturbações externas e a variações internas de parâmetros do sistema. É, portanto, possível a utilização de componentes baratos e sem muita exatidão para obter o controle preciso de um determinado processo, o que é impossível com o controle a malha aberta. Do ponto de vista da estabilidade, é mais fácil construir sistemas a malha aberta porque a estabilidade destes sistemas é menos problemática. Por outro lado, a estabilidade em sistemas de controle a malha fechada é sempre um grande problema pela tendência em corrigir erros além do necessário, o que pode ocasionar oscilações de amplitude constante ou crescente com o tempo.

Deve-se enfatizar que, para sistemas onde as entradas são conhecidas antecipadamente no tempo e não há distúrbios é aconselhável o uso de controle a malha aberta. Os sistemas de controle a malha fechada se mostram vantajosos apenas quando estão presentes perturbações e/ou alterações imprevisíveis nos parâmetros de componentes do sistema. Convém notar que a potência de saída determina parcialmente o custo, o peso e as dimensões do sistema de controle. O número de componentes utilizados num sistema de controle a malha fechada é maior que o de um sistema similar com o controle a malha aberta. Assim, um sistema de controle a malha fechada é maior em custo e em potência. No sentido de reduzir a potência necessária à operação do sistema, o controle a malha aberta deve ser escolhido sempre que possível. Uma combinação apropriada de controle a malha aberta e controle a malha fechada é, normalmente, menos dispendiosa e fornece um desempenho global do sistema bastante satisfatório.

## 1-4 PROJETO DE SISTEMAS DE CONTROLE

Os sistemas de controle reais são geralmente não-lineares. Quando, no entanto, podem ser aproximados por meio de modelos matemáticos lineares, torna-se possível utilizar um dos muitos métodos de projeto bem detalhados. Num sentido prático, as especificações de desempenho requeridas para o sistema em pauta sugerem qual método deve ser utilizado. Quando as especificações são dadas em termos das características transitórias da resposta e/ou de medidas de desempenho no domínio de frequência, não há outra escolha além de usar a abordagem clássica baseada no método do lugar das raízes e/ou nos métodos de resposta de frequência. (Esses métodos são apresentados nos Caps. 6 a 9.) Se as especificações forem fornecidas através de índices de desempenho em termos de variáveis de estado, então a preferência será pelas técnicas de controle moderno. (Estas abordagens são desenvolvidas nos Caps. 11 a 13.)

Enquanto as abordagens de projeto de sistemas de controle via lugar das raízes e de resposta de frequência constituem um esforço de engenharia, o projeto de sistemas no contexto da teoria de controle moderno (métodos no espaço de estados) utiliza formulação matemática do problema e aplica teoria matemática para projetar problemas nos quais os sistemas podem ter múltiplas entradas e múltiplas saídas e serem variantes no tempo. Através da aplicação da teoria de controle moderno, o projetista está capacitado a iniciar o projeto a partir de um índice de desempenho, junto com as restrições impostas ao sistema, e proceder ao projeto de um sistema estável por meio de um enfoque inteiramente analítico. A vantagem do projeto calcado na teoria de controle moderno é que ele permite ao projetista obter um sistema de controle que é ótimo com respeito ao índice de desempenho considerado.

Os sistemas que podem ser projetados através do enfoque convencional são usualmente limitados aos sistemas monovariáveis (uma única variável de entrada e uma única variável de saída), lineares e invariantes no tempo. O projetista busca satisfazer todas as especificações de desempenho por meio de uma repetição disciplinada da técnica de ensaio-e-erro. Após concluir o projeto, o projetista testa o sistema para ver se todas as especificações de desempenho foram atendidas. Se alguma especificação deixa de ser alcançada, o processo é repetido, ajustando-se valores de parâmetros ou trocando-se a configuração até que as especificações fornecidas sejam respeitadas. Como o projeto é baseado em um procedimento de ensaio-e-erro, a inventividade e a experiência do projetista desempenham um papel relevante na realização de um projeto bem-sucedido. Um projetista experiente pode ser capaz de obter um sistema aceitável sem necessitar de muitas tentativas.

É usualmente desejável que o sistema projetado apresente erros tão pequenos quanto possível ao sinal de entrada. A este respeito, o amortecimento do sistema deve ser razoável. A dinâmica do sistema deve ser relativamente insensível a pequenas variações nos valores dos parâmetros. Os distúrbios indesejáveis devem ser bem atenuados. [Em geral, a parte relativa às altas frequências deve ser atenuada rapidamente de modo que os ruídos de alta frequência (tais como os ruídos dos sensores) possam ser atenuados. Se as frequências do ruído e dos distúrbios forem conhecidas, é possível utilizar filtros de corte (*notch*) para atenuar estas frequências específicas.] Se o projeto do sistema ficar reduzido a umas poucas opções, pode-se efetuar uma escolha ótima a partir de considerações do tipo desempenho global, custo, espaço e peso.

## 1-5 ESCOPO DO LIVRO

A seguir, será apresentado um breve resumo da estrutura e do conteúdo do livro.

O Cap. 1 traz uma introdução aos sistemas de controle. No Cap. 2 é apresentada a teoria básica sobre transformada de Laplace, necessária à compreensão da teoria de controle abordada neste livro. O Cap. 3 trata da modelagem matemática

de sistemas dinâmicos em termos de função de transferência e de equações no espaço de estados. Este capítulo inclui uma discussão sobre a linearização de sistemas não-lineares. O Cap. 4 trata da análise da resposta transitória de sistemas de primeira e de segunda ordens. Este capítulo fornece ainda detalhes da análise da resposta transitória com MATLAB. O Cap. 5 apresenta as ações de controle básicas e, em seguida, discute os controladores pneumáticos, hidráulicos e eletrônicos. Este capítulo discute ainda o critério de estabilidade de Routh.

O Cap. 6 fornece a análise de sistema de controle por meio do lugar das raízes. São apresentadas as regras básicas para construção dos lugares. Incluem-se discussões detalhadas de como traçar o lugar das raízes com o uso do MATLAB. O Cap. 7 trata do projeto de sistemas de controle através do método do lugar das raízes. São discutidas, em detalhe, abordagens baseadas no lugar das raízes para projetar compensadores de avanço de fase, compensadores de atraso de fase e compensadores de avanço e atraso de fase. O Cap. 8 fornece a análise de sistemas de controle através da resposta de frequência. São discutidos diagramas de Bode, gráficos polares, critério de estabilidade de Nyquist e resposta de frequência a malha fechada. O Cap. 9 trata do projeto de sistemas de controle via método da resposta de frequência. Aqui os diagramas de Bode são usados para projetar compensadores de avanço de fase, compensadores de atraso de fase e compensadores de avanço e atraso de fase. O Cap. 10 discute os controladores PID — básico e modificado. São incluídos tópicos sobre regras para sintonia dos controladores PID, modificações introduzidas nos esquemas de controle PID, controle a dois graus de liberdade e considerações de projeto para controle robusto.

O Cap. 11 apresenta material básico para a análise de sistemas de controle no espaço de estados. Deduz-se a solução das equações de estado de sistemas lineares e invariantes no tempo e discutem-se os conceitos de controlabilidade e observabilidade. O Cap. 12 trata do projeto de sistemas de controle no espaço de estados. Este capítulo começa com os problemas de alocação de pólos, seguidos do projeto de observadores de estado e conclui com o projeto de servossistemas do tipo 1. O MATLAB é usado na solução dos problemas de alocação de pólos, no projeto de observadores de estado e no projeto de servossistemas. O Cap. 13, o último, apresenta a análise de estabilidade segundo Liapunov e o controle ótimo quadrático. Este capítulo inicia com a análise de estabilidade segundo Liapunov. Em seguida, a abordagem de estabilidade segundo Liapunov é usada para projetar sistemas de controle com referência-modelo. Finalmente, os problemas de controle com função de custo quadrática são discutidos em detalhes. Aqui, a abordagem de estabilidade segundo Liapunov é usada para deduzir a equação de Riccati do controle ótimo quadrático. São incluídas soluções dos problemas de controle ótimo quadrático via MATLAB.

O apêndice resume o material básico necessário ao uso efetivo do MATLAB. Este apêndice é dirigido especificamente aos leitores que ainda não estejam familiarizados com o MATLAB.

## PROBLEMAS ILUSTRATIVOS E SOLUÇÕES

**A-1-1.** Enumere as maiores vantagens e desvantagens dos sistemas de controle a malha aberta.

**Solução.** As vantagens de um sistema de controle a malha aberta são as seguintes:

1. Construção simples e manutenção fácil.
2. Menos dispendioso que um sistema de controle a malha fechada correspondente.
3. Não há problemas de estabilidade.
4. Conveniente nos casos em que é difícil ou não é economicamente viável medir a saída. (Por exemplo, no caso da máquina de lavar roupa, seria bastante dispendioso providenciar um dispositivo para medir a qualidade da saída da lavadora — a limpeza das roupas.)

As desvantagens de um sistema de controle a malha aberta são as seguintes:

1. Distúrbios e mudanças na calibração ocasionam erros e a saída pode ser bem diferente daquela desejada.
2. Para manter a saída com a qualidade requerida, há necessidade de recalibração periódica.

**A-1-2.** A Fig. 1-5(a) diz respeito ao diagrama esquemático de um sistema de controle de nível. Aqui o controlador automático mantém o nível do líquido comparando o nível real com o nível desejado e corrigindo qualquer erro eventual através do ajuste da abertura da válvula pneumática. A Fig. 1-5(b) é um diagrama de blocos do sistema de controle em pauta. Esboçar um diagrama de blocos para um sistema de controle de nível controlado por um operador humano.

**Solução.** No sistema controlado por um operador humano, os olhos, o cérebro e os músculos correspondem, respectivamente, ao sensor, ao controlador e à válvula pneumática. Um diagrama de blocos é mostrado na Fig. 1-6.

**A-1-3.** Um sistema organizacional de engenharia é composto de muitos grupos funcionais especializados tais como administração, pesquisa e desenvolvimento, projeto preliminar, experimentos, projeto do produto e desenhos, fabricação e montagem, testes. Estes grupos são interconectados a fim de constituírem uma operação global conjunta.

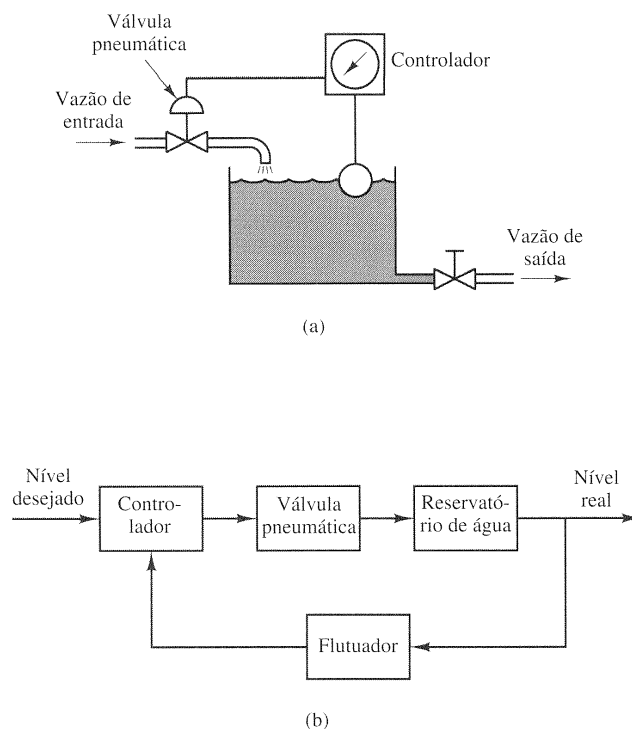


Fig. 1-5 (a) Sistema de controle de nível; (b) diagrama de blocos.

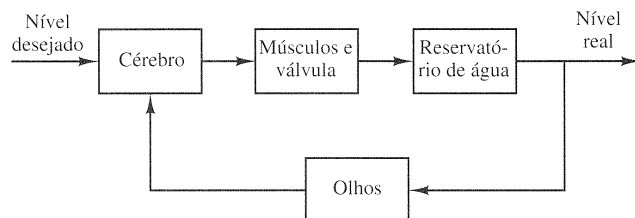


Fig. 1-6 Diagrama de blocos de um sistema de nível controlado por um operador humano.

Pode-se analisar o sistema reduzindo-o a um conjunto mais elementar de componentes necessários, os quais fornecem o detalhamento analítico exigido, bem como por um conjunto de equações simples que representam as características dinâmicas de cada componente. (O desempenho dinâmico de um sistema como este é determinado a partir da relação entre a realização progressiva e o tempo.)

Esboçar um diagrama de blocos funcional mostrando o sistema organizacional de engenharia.

**Solução.** Um diagrama de blocos funcional pode ser elaborado por meio de blocos que representam as atividades funcionais e por linhas de sinal de interligação que representam o fluxo de saída de informação ou de produto de cada uma das atividades. Um diagrama de blocos possível é mostrado na Fig. 1-7.

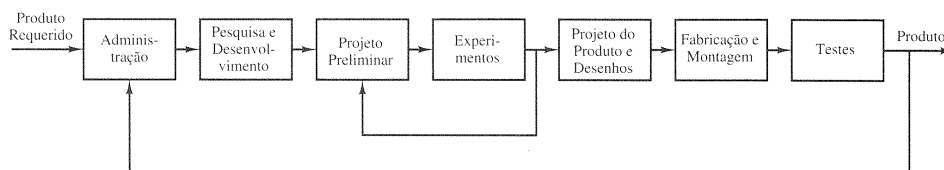


Fig. 1-7 Diagrama de blocos de um sistema organizacional de engenharia.