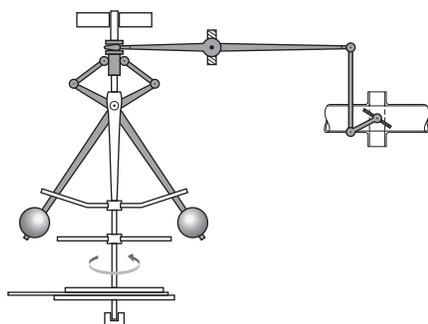


Visão Geral e um Breve Histórico da Teoria de Controle Realimentado



Controle realimentado (ou retroativo) de sistemas dinâmicos é um conceito antigo com muitas características que têm evoluído ao longo do tempo. A ideia central é que a saída de um sistema pode ser medida e retransmitida a um controlador usado para fazer o controle. Comprovou-se que um sinal de realimentação pode ser usado para controlar uma vasta variedade de sistemas dinâmicos, incluindo, por exemplo, aeronaves e discos rígidos para armazenamento de dados. Para alcançar um bom controle, existem quatro requisitos básicos:

- O sistema deve ser sempre estável.
- A saída do sistema deve rastrear o sinal de comando na entrada.
- A saída do sistema não deve responder a entradas de distúrbio.
- Esses requisitos devem ser cumpridos, mesmo se o modelo utilizado no projeto não for totalmente preciso, ou se a dinâmica do sistema físico mudar ao longo do tempo ou devido a mudanças ambientais.

O requisito de estabilidade é básico e pode ter dois motivos. Em primeiro lugar, o sistema pode ser instável. Esse caso é ilustrado por um Segway (veículo automotor com duas rodas em paralelo), que pode simplesmente cair se o controle for desligado. Por outro lado, a realimentação pode conduzir o sistema à instabilidade. A referida experiência de instabilidade é chamada de “círculo vicioso”, no qual o sinal de retroação piora a situação ao invés de melhorar.

Há muitos exemplos de sistemas que têm como requerimento que sua saída siga um comando. Por exemplo, dirigir um carro para que o veículo permaneça na sua faixa. Da mesma forma, pilotar um avião durante a aproximação da pista de pouso exige que o trajeto de descida seja precisamente seguido.

Rejeição de distúrbios é uma das aplicações mais antigas do controle realimentado. Neste caso, o “comando” é uma constante de referência para qual a saída deve obedecer quando as condições ambientais mudam. Um exemplo muito comum é o quarto com temperatura controlada automaticamente, cuja função é manter a temperatura próxima da temperatura de referência enquanto a temperatura externa e o vento mudam, e quando as portas e janelas são abertas e fechadas.

Finalmente, para projetar um controlador para um sistema dinâmico, é necessário ter um modelo matemático da resposta dinâmica do sistema, sendo que o modelo preferido é o mais simples. Infelizmente, quase todos os sistemas físicos são muito complexos e frequentemente não lineares. Como resultado, o projeto será normalmente baseado em um modelo simplificado e deve ser robusto o suficiente para que o controle atenda a seus requisitos de desempenho quando aplicado ao dispositivo real. Além disso, mais uma vez em quase todos os casos, quando o tempo e o ambiente mudam até os melhores modelos estarão sujeitos a erros, porque a dinâmica do sistema foi alterada. Novamente, o projeto não deve ser muito sensível a estas inevitáveis mudanças e, assim, deve funcionar suficientemente bem independentemente delas.

As ferramentas disponíveis para engenheiros de controle resolverem estes problemas têm evoluído ao longo do tempo. Foi especialmente importante o desenvolvimento dos computadores digitais, tanto como auxiliares de cálculo quanto como dispositivos de controle embarcados. Como dispositivos de computação, os computadores têm permitido a identificação de modelos cada vez mais complexos e a aplicação de métodos de projeto de controle muito sofisticados. Além disso, como dispositivos embarcados, dispositivos digitais têm permitido a implementação de leis de controle bastante complexas. Engenheiros de controle não só devem ser hábeis em manipular essas ferramentas de projeto, mas também precisam entender os conceitos por trás delas para poder utilizá-las da melhor forma. Também é importante que o engenheiro de controle compreenda as capacidades e as limitações dos dispositivos de controle disponíveis.

Visão geral do capítulo

Neste capítulo, começamos nossa exploração do controle retroativo usando um exemplo simples e familiar: um forno doméstico controlado por um termostato. Os componentes genéricos de um sistema de controle são identificados no contexto desse exemplo. Em outro exemplo – controle de velocidade de cruzeiro de um automóvel –, desenvolvemos as equações elementares estáticas e atribuímos valores numéricos aos elementos do modelo do sistema, a fim de comparar o desempenho do controle em malha aberta com o controle em malha fechada quando dinâmicas são ignoradas.

A fim de contextualizar nossos estudos e fornecer uma visão de como o campo tem evoluído, a Seção 1.3 fornece um breve histórico da teoria de controle. Além disso, outros capítulos apresentarão breves seções com notas históricas a respeito dos temas apresentados. Finalmente, a Seção 1.4 fornece uma visão geral do conteúdo e organização de todo o livro.

1.1 Um sistema de controle retroativo simples

Em sistemas de controle retroativo, a variável controlada – como temperatura e velocidade – é medida por um sensor, e a informação medida é retransmitida (realimentada) ao controlador para influenciar a variável controlada. O princípio é facilmente ilustrado por um sistema muito comum, um forno doméstico controlado por um termostato. Os componentes deste sistema e suas interconexões são mostradas na Fig. 1.1. Esse diagrama identifica os componentes principais do sistema e mostra as direções de fluxo de informação de um componente para outro.

Podemos facilmente analisar o funcionamento deste sistema qualitativamente a partir do diagrama. Suponha que tanto a temperatura da sala onde está localizado o termostato e a temperatura exterior são significativamente inferiores à temperatura de referência (também chamada de set point) quando a energia é aplicada. O termostato está na lógica de controle e abrirá a válvula de gás do forno. Isso fará com que o calor a ser fornecido para a sala Q_{in} tenha uma taxa significativamente maior do que a perda de calor Q_{out} . Como resultado, a temperatura da sala subirá até que ela exceda por uma pequena quantidade a referência do termostato. Neste momento, o forno será desligado e a temperatura começará a cair. Quando a temperatura cair um pouco abaixo do valor de referência, o termostato agirá novamente e o ciclo se repetirá.

Respostas típicas da temperatura da sala, juntamente com os ciclos do forno ligado e desligado, são mostradas na Fig. 1.1. A temperatura do lado externo é mantida em 50°F e o termostato é inicialmente fixado em 55°F. Às 6h da manhã, o termostato é fixado em 65°F e o número de ciclos do forno aumenta para manter a temperatura nesse nível.¹ Observe que a casa está bem isolada, de modo que a queda da temperatura com o forno desligado é significativamente mais lenta do que o aumento da temperatura quando o forno está ligado. A partir desse exemplo, podemos identificar os componentes genéricos do sistema de controle retroativo, como mostrado na Fig. 1.2.

O componente central em um sistema realimentado é o **processo** que tem sua saída controlada. No nosso exemplo, o processo seria a sala cuja saída é a sua temperatura e a **perturbação** do processo é o fluxo de calor externo na casa devido à condução através das paredes e do telhado. (O fluxo externo de calor também depende de outros fatores, como o vento, as portas abertas, etc.) O projeto do processo obviamente pode ter um impacto importante sobre a eficácia do controle. A temperatura de uma sala bem isolada com janelas de isolamento térmico pode ser controlada com mais facilidade do que outra com isolamento térmico ruim. Da mesma forma, o projeto de aeronaves realizado com o controle em mente faz uma enorme diferença para o desempenho final. Em todos os casos, quanto mais cedo as questões de controle forem introduzidas no projeto do processo, melhor. O **atuador** é o dispositivo que pode influenciar a variável controlada do processo e, no nosso caso, o atuador é o forno a gás. Na verdade, o forno normalmente tem uma chama-piloto, uma válvula de gás e um ventilador, que liga e desliga em

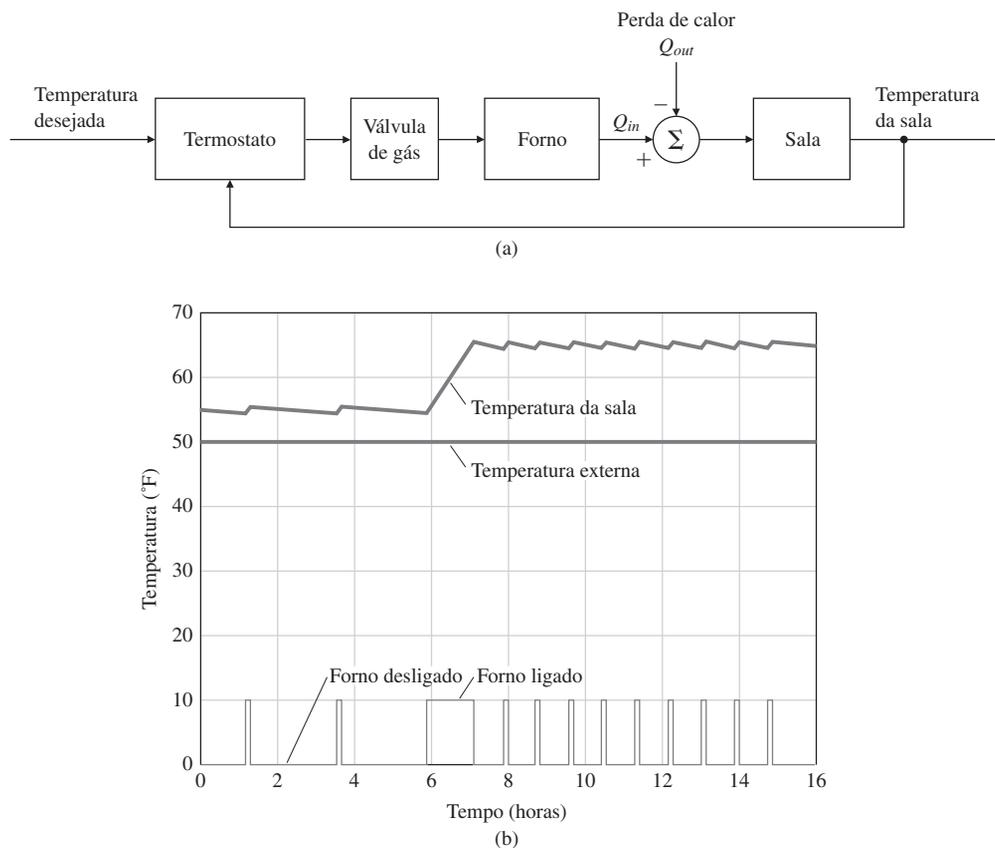


Figura 1.1 (a) Diagrama de blocos de componentes de um sistema de controle de temperatura em uma sala; (b) gráfico da temperatura na sala e ação do forno.

¹ Note que o forno é ligado alguns minutos antes das 6 horas em sua programação noturna regular.

função da temperatura do ar no forno. Esses detalhes ilustram o fato de que muitos sistemas realimentados contêm componentes que constituem outros sistemas realimentados.² A principal característica do atuador é sua habilidade de mover a saída do processo com velocidade e nível adequados. O forno deve produzir mais calor do que a casa perde no pior dia e deve distribuí-lo rapidamente se a temperatura da casa tiver de ser mantida em uma faixa estreita. Potência, velocidade e confiabilidade são geralmente mais importantes que a precisão. Em geral, o processo e os atuadores estão intimamente ligados e os centros de projeto de controle buscam uma entrada adequada ou sinal de controle para enviar ao atuador. A combinação do processo e do atuador é chamada de **planta** e a componente que realmente calcula o sinal de controle desejado é o **controlador**. Devido à flexibilidade do processamento de sinais elétricos, o controlador funciona normalmente baseado em sinais elétricos, embora o uso de controladores pneumáticos baseados em ar comprimido tenha um longo e importante lugar em processos de controle. Com o desenvolvimento da tecnologia digital, custo, eficiência e flexibilidade conduziram ao uso de processadores de sinais digitais como o controlador em um número crescente de casos. O **termostato** na Fig. 1.1 mede a temperatura ambiente e é chamado de **sensor** na Fig. 1.2; um dispositivo cuja saída contém ruído inevitavelmente é o sensor. A seleção e posicionamento dos sensores é muito importante no projeto de controle, por isso às vezes não é possível que a variável controlada e a variável sensorizada sejam a mesma. Por exemplo, embora possamos realmente desejar controlar a temperatura da casa como um todo, o termostato está em um quarto particular, que pode ou não estar na mesma temperatura do resto da casa. Por exemplo, se o termostato está ajustado para 68°F mas é colocado na sala de estar perto de uma lareira, uma pessoa que trabalha na sala de estudo ainda pode sentir frio.^{3,4} Como veremos, além do posicionamento, propriedades importantes do sensor são: precisão das medições, baixo ruído, confiabilidade e linearidade. O sensor normalmente converte a variável física em um sinal elétrico para ser utilizado pelo controlador. Nosso sistema geral também inclui um **filtro de entrada**, cuja função é converter o sinal de referência na forma elétrica para o controlador manipulá-lo

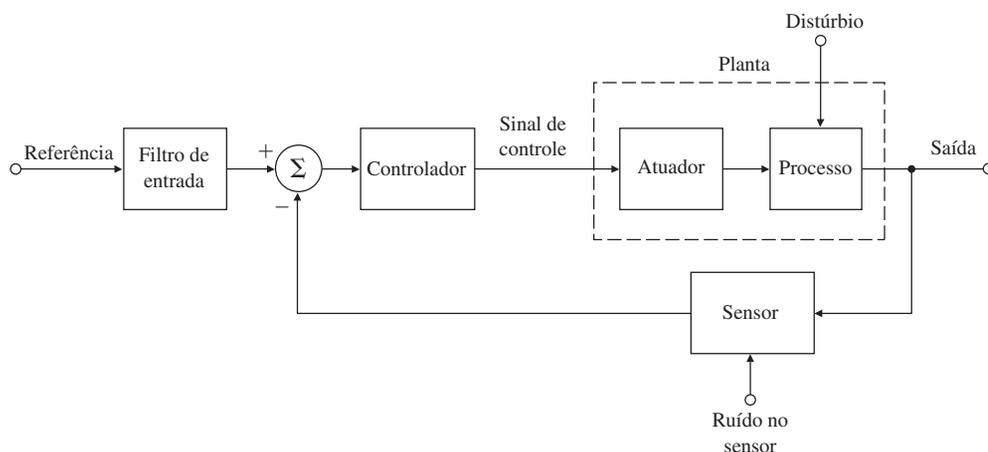


Figura 1.2 Diagrama de blocos dos componentes de um controle realimentado elementar.

² Jonathan Swift (1733) disse isso desta forma: “Assim, naturalistas observam, uma pulga tem pulgas menores sobre ela. E estas têm ainda menores para mordê-las. E assim por diante, *ad infinitum*”.

³ Na reforma da cozinha na casa de um dos autores, os novos fornos foram colocados contra a parede em que o termostato estava instalado do outro lado. Agora, quando o jantar é preparado na cozinha em um dia frio, o autor congela durante seu estudo, a menos que o termostato seja reajustado.

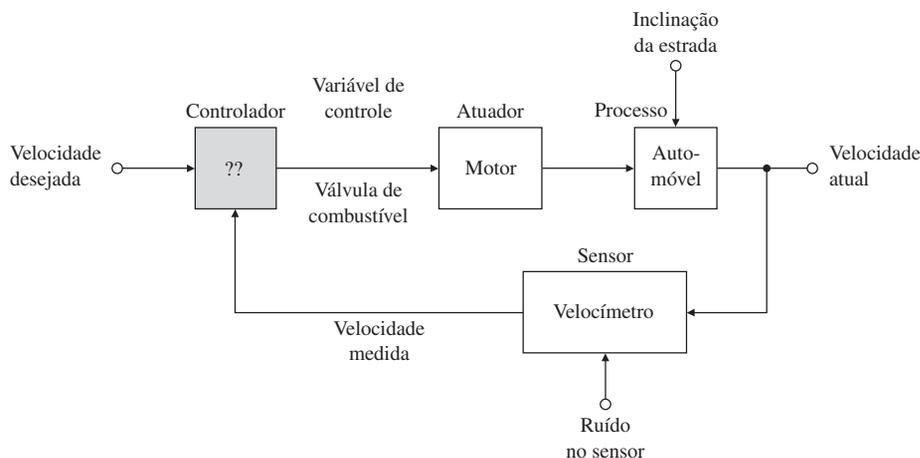
⁴ Esta história é de um empregado novo em uma fábrica de nitroglicerina, que era responsável por controlar a temperatura crítica de uma parte do processo manualmente. Foi-lhe dito para “manter a leitura abaixo de 300^o”. Em uma inspeção de rotina, o fiscal percebeu que o lote estava perigosamente quente e encontraram o trabalhador com o termômetro sob a água fria da torneira: ele pretendia diminuir o valor da leitura da temperatura no termômetro. Eles saíram um pouco antes da explosão. Moral da história: às vezes, o controle automático é melhor do que o manual.

posteriormente. Em alguns casos, o filtro de entrada pode modificar o comando de entrada de referência de forma a melhorar a resposta do sistema. Finalmente, há uma **comparação** para calcular a diferença entre o sinal de referência e a saída do sensor para dar ao controlador uma medida do erro do sistema.

Neste texto, serão apresentados os métodos de análise e seus componentes de sistemas de controle realimentados e serão descritas as técnicas mais importantes que os engenheiros de projeto podem usar com confiança na aplicação da realimentação para resolver problemas de controle. Também vamos estudar as vantagens específicas da realimentação que compensam a complexidade que ela exige. No entanto, embora o sistema de controle de temperatura seja de fácil compreensão, ele é não linear, como pode ser visto pelo fato de que o forno está ligado ou desligado. Para introduzir controles lineares, precisamos de um outro exemplo.

1.2 A primeira análise da realimentação

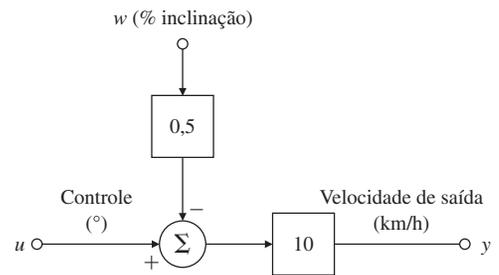
O valor da realimentação pode ser facilmente demonstrado por meio de uma análise quantitativa de um modelo simplificado de um sistema familiar, o controle da velocidade de cruzeiro em um automóvel (Fig. 1.3). Para estudar esta situação analítica, precisamos de um **modelo** matemático do nosso sistema na forma de um conjunto de relações quantitativas entre as variáveis. Para este exemplo, nós ignoramos a resposta dinâmica do veículo e consideramos apenas o comportamento estável. (A resposta dinâmica, é claro, desempenha um papel importante em capítulos posteriores.) Além disso, vamos supor que, para a gama de velocidades a ser utilizada pelo sistema, podemos aproximar as relações como lineares. Depois de medir a velocidade do veículo em uma estrada plana a 65 km/h, descobrimos que uma mudança de 1° no ângulo do acelerador (nossa variável de controle) provoca uma mudança de 10 km/h na velocidade. A partir de observações durante a condução subindo e descendo colinas, verificou-se que, quando a inclinação da pista muda em 1%, medimos uma mudança de velocidade de 5 quilômetros por hora. O velocímetro tem precisão de uma fração de 1 km/h e será considerado exato. Com essas relações, podemos desenhar o **diagrama de blocos** da planta (Fig. 1.4), que mostra essas relações matemáticas em forma gráfica. Neste diagrama, as linhas ligam e transportam os sinais e um bloco é como um amplificador ideal que multiplica o sinal na sua entrada pelo valor marcado no bloco para produzir o sinal de saída. Para somar dois ou mais sinais, vamos mostrar as linhas dos sinais indo para um somador, um círculo com o sinal de somatório Σ dentro. Um sinal algébrico (mais ou menos) ao lado de cada seta indica se a entrada adiciona ou subtrai a saída total do somatório. Para essa análise, queremos comparar os efeitos da variação de 1% na velocidade da saída quando a velocidade de referência é definida em 65 km/h com e sem realimentação para o controlador.



Controle em
malha aberta

Figura 1.3 Diagrama de blocos dos componentes de controle de velocidade em cruzeiro de um automóvel.

Figura 1.4 Diagrama de blocos da planta do sistema de controle de velocidade em cruzeiro.



No primeiro caso, mostrado na Fig. 1.5, o controlador não usa a leitura do velocímetro, mas estabelece $u = r/10$. Esse é um exemplo de um **sistema de controle em malha aberta**. O termo *malha aberta* se refere ao fato de que não existe um caminho fechado em torno do qual os sinais percorrem o diagrama de blocos. Em nosso exemplo simples, a velocidade é a saída em malha aberta, y_{ol} , que é dada pelas equações

$$\begin{aligned} y_{ol} &= 10(u - 0,5w) \\ &= 10\left(\frac{r}{10} - 0,5w\right) \\ &= r - 5w. \end{aligned}$$

O erro na velocidade de saída é

$$e_{ol} = r - y_{ol} \quad (1.1)$$

$$= 5w \quad (1.2)$$

e o erro em porcentagem é

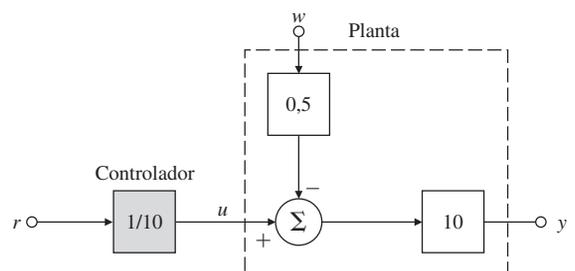
$$\% \text{ erro} = 500 \frac{w}{r}. \quad (1.3)$$

Se $r = 65$ e $w = 0$, a velocidade será 65 sem erro algum. No entanto, se $w = 1$, correspondendo a uma inclinação de 1%, então a velocidade será 60 e temos um erro de 5 km/h, o que é um erro 7,69% na velocidade. Para uma inclinação de 2%, o erro de velocidade deve ser de 10 km/h, o que é um erro de 15,38% e assim por diante. O exemplo mostra que não haveria erro quando $w = 0$, mas esse resultado depende que o ganho do controlador seja exatamente o inverso do ganho de planta 10. Na prática, o ganho da planta está sujeito a alterações e, se isto acontecer, erros também serão introduzidos. Se houver erro no ganho de planta em malha aberta, o erro da velocidade em porcentagem seria o mesmo que o erro do ganho da planta em porcentagem.

O diagrama de blocos de um sistema realimentado é mostrado na Fig. 1.6, na qual o ganho do controlador foi ajustado para 10. Lembre-se de que, nesse exemplo simples, assume-se um sensor ideal cujo bloco não é mostrado. Nesse caso, as equações são

$$\begin{aligned} y_{cl} &= 10u - 5w, \\ u &= 10(r - y_{cl}). \end{aligned}$$

Figura 1.5 Controle de velocidade em cruzeiro em malha aberta.



as quais são combinadas da seguinte forma

$$\begin{aligned}
 y_{cl} &= 100r - 100y_{cl} - 5w, \\
 101y_{cl} &= 100r - 5w, \\
 y_{cl} &= \frac{100}{101}r - \frac{5}{101}w, \\
 e_{cl} &= \frac{r}{101} + \frac{5w}{101}.
 \end{aligned}$$

Assim, a realimentação tem reduzido a sensibilidade do erro de velocidade em relação à inclinação da estrada por um fator de 101, quando comparado com o sistema em malha aberta. Observe, no entanto, que agora há um pequeno erro de velocidade em terreno plano, porque mesmo quando $w = 0$,

$$y_{cl} = \frac{100}{101}r = 0,99r \text{ km/h.}$$

Este erro será pequeno, enquanto o ganho da malha (produto de ganhos do controlador e da planta) for grande.⁵ Se considerarmos novamente a velocidade de referência de 65 km/h e comparar as velocidades com uma inclinação de 1%, a porcentagem do erro de velocidade de saída é

$$\% \text{ erro} = 100 \frac{\frac{65 \times 100}{101} - \left(\frac{65 \times 100}{101} - \frac{5}{101} \right)}{\frac{65 \times 100}{101}} \tag{1.4}$$

$$= 100 \frac{5 \times 101}{101 \times 65 \times 100} \tag{1.5}$$

$$= 0,0769\%. \tag{1.6}$$

A redução da sensibilidade da velocidade em relação ao distúrbio de inclinação e ao ganho da planta em nosso exemplo se dá em virtude de o ganho da malha ser de 100 no caso realimentado. Infelizmente, há limite para o quão alto esse ganho pode ser; quando as dinâmicas são introduzidas, a realimentação pode fazer a resposta piorar ou até mesmo fazer com que o sistema fique instável. O dilema é ilustrado por outra situação familiar, na qual é fácil alterar o ganho de realimentação. Se alguém tentar aumentar muito o ganho de um amplificador de alto-falantes, o sistema de som produzirá um som agudo muito desagradável. Esta é uma situação na qual o ganho na malha de realimentação é muito grande. A questão de como obter o maior ganho possível para reduzir os erros sem fazer com que o sistema fique instável é parte importante do projeto do controle retroativo.

O compromisso de projeto

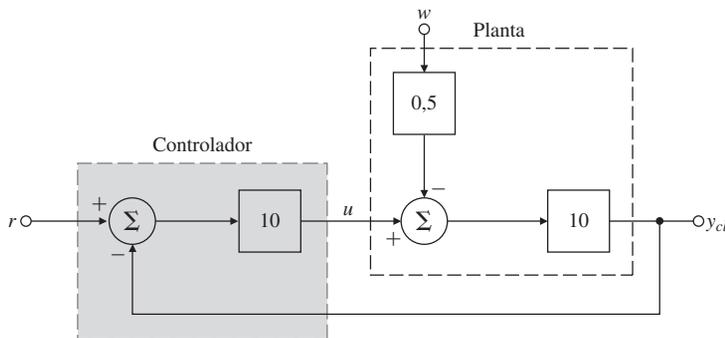


Figura 1.6 Controle de velocidade de cruzeiro em malha fechada.

⁵ Se o erro for muito grande, é uma prática comum *redefinir* a referência, neste caso para $\frac{101}{100}r$, de modo que a saída atinja o verdadeiro valor desejado.

1.3 Uma breve história

Uma história interessante dos primeiros trabalhos sobre o controle realimentado foi escrita por O. Mayr (1970), que apresenta antigos mecanismos de controle. Dois dos exemplos mais antigos são: o controle de vazão para regular um relógio d'água e o controle de nível em um recipiente de vinho, o qual deve ser mantido cheio independentemente de quantos copos são enchidos nele. O controle de vazão de líquidos é reduzido para o controle de nível do fluido, uma vez que um pequeno orifício irá produzir fluxo constante se a pressão for constante, o que é o caso se o nível do líquido acima do orifício for constante. O mecanismo de controle de nível de líquido inventado na antiguidade e ainda hoje utilizado (por exemplo, no reservatório de água do vaso sanitário comum) é a **válvula de boia**. Quando o nível do líquido diminui, o mesmo acontece com a boia, permitindo a entrada do fluxo no tanque; com o aumento do nível, o fluxo diminui e, se necessário, ele é cortado. A Fig. 1.7 mostra como uma válvula de boia opera. Observe que neste caso o sensor e o atuador não são dispositivos distintos, mas estão contidos no dispositivo formado pela combinação do tubo de fornecimento e da boia.

Controle de nível de líquido

A invenção mais recente descrita por Mayr (1970) é um sistema, projetado por Cornelis Drebbel aproximadamente em 1620, para controlar a temperatura de um forno usado para aquecer uma incubadora⁶ (Fig. 1.8). O forno consiste de uma caixa para conter o fogo, com uma haste na parte superior equipada com uma tampa. Dentro da caixa há uma incubadora de parede dupla, paredes ocas que são preenchidas com água para transferir uniformemente o calor para a incubadora. O sensor de temperatura é um recipiente de vidro cheio de álcool e mercúrio que está colocado no interior da parede oca da incubadora preenchida com água. Quando o fogo aquece a caixa e a água, o álcool se expande e a haste lateral flutua para cima, diminuindo a abertura que permite a combustão. Se a caixa estiver muito fria, o álcool contrai, a abertura aumenta e o fogo se torna mais forte. A temperatura desejada é definida pelo comprimento da haste lateral, que define a abertura para uma dada expansão do álcool.

A incubadora de Drebbel

Um famoso problema na história dos sistemas de controle foi a busca de um meio para controlar a velocidade de rotação de um eixo, problema aparentemente motivado pelo desejo de se controlar automaticamente a velocidade da pedra de moagem em um moinho movido pelo vento (Fuller, 1976). Entre os vários métodos propostos, o mais promissor usava um pêndulo cônico, ou **governador de bolas flutuantes**, para medir a velocidade do moinho. As velas do moinho de vento eram recolhidas ou baixadas por meio de cordas e polias, como uma persiana, para manter a velocidade fixa. No entanto, foi a adaptação desses princípios que possibilitou o surgimento da máquina a vapor nos laboratórios de James Watt em torno de 1788. Uma versão antiga é mostrada na Fig. 1.9, enquanto as Figuras. 1.10 e 1.11 focalizam no governador de bolas flutuantes e no esboço dos seus componentes, respectivamente.

Governador de bolas flutuantes

A ação do governador de bolas flutuantes (também chamado de governador centrífugo) é simples de ser descrita. Suponha que o motor está operando em equilíbrio. Duas bolas pesadas giram em torno de um eixo central, e descrevendo a figura de um cone em determinado ângulo com o eixo. Quando uma carga é aplicada repentinamente no motor, sua velocidade irá diminuir, e as bolas do governador vão cair para um cone menor. Assim, o ângulo da bola é usado

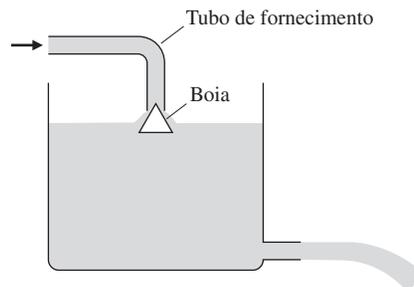


Figura 1.7 Histórico do sistema de controle de nível e fluxo de líquido.

⁶ Médicos franceses introduziram incubadoras no cuidado de bebês prematuros há mais de 100 anos.

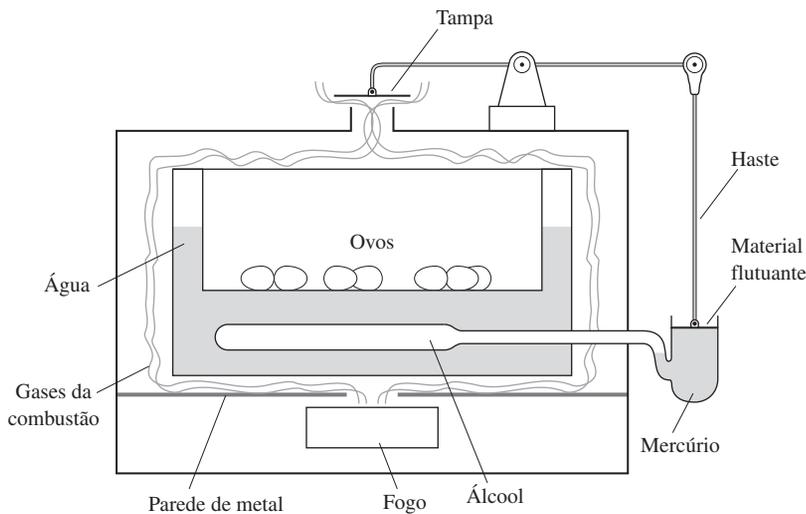


Figura 1.8 Incubadora de ovos de galinha desenvolvida por Drebbel.

Fonte: adaptação de Mayr, 1970.

para detectar a velocidade de saída. Esta ação abrirá, por meio de alavancas, a válvula principal do cilindro de vapor (que é o atuador), fornecendo mais vapor ao motor, restaurando grande parte da velocidade perdida. Para manter a válvula de vapor em uma nova posição, é necessário que as bolas flutuantes girem em um ângulo diferente, o que implica que a velocidade sob carga não é exatamente a mesma de antes. Nós vimos este efeito antes, com controle de velocidade em cruzeiro, em que o controle realimentado permitiu um pequeno erro. Para recuperar a mesma velocidade anterior do sistema, seria necessário redefinir a velocidade desejada, alterando o comprimento da haste da alavanca da válvula. Inventores posteriores introduziram mecanismos que integravam o erro da velocidade para fornecer uma reconfiguração automática. No capítulo 4, vamos analisar estes sistemas para mostrar que essa integração pode resultar em sistemas retroativos com erro nulo em estado estacionário quando sujeitos a perturbações constantes.

Por ser um homem prático, Watt não se envolveu na análise teórica do governador. Fuller (1976) delineou o desenvolvimento inicial da teoria de controle por um período de estudos de Christian Huygens, em 1673, a James Clerk Maxwell, em 1868. Fuller dá crédito especial das contribuições da G. B. Airy, professor de matemática e astronomia na Universidade de Cambridge de 1826 a 1835 e Astrônomo Real no Observatório Greenwich de 1835 a 1881. Airy mostrou-se interessado no controle de velocidade; se seus telescópios pudessem girar em sentido contrário à rotação da Terra, uma estrela fixa poderia ser observada por períodos prolongados. Usando o governador pêndulo-centrífugo, ele descobriu que era capaz de um movimento instável – “e a máquina (se posso por assim dizer) tornou-se perfeitamente violenta” (Airy, 1840; citado por Fuller, 1976).

Início da teoria de controle

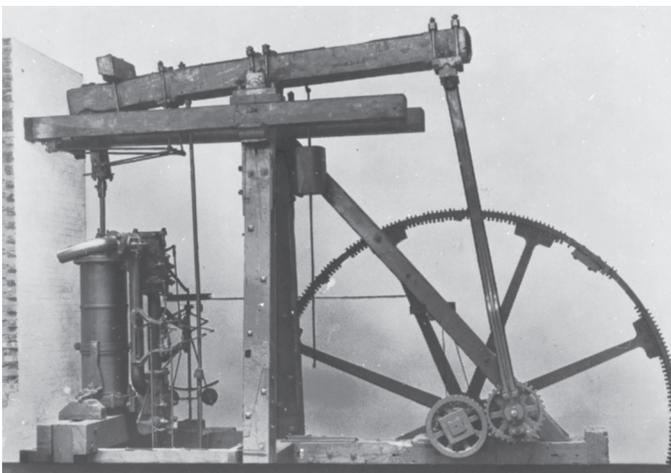
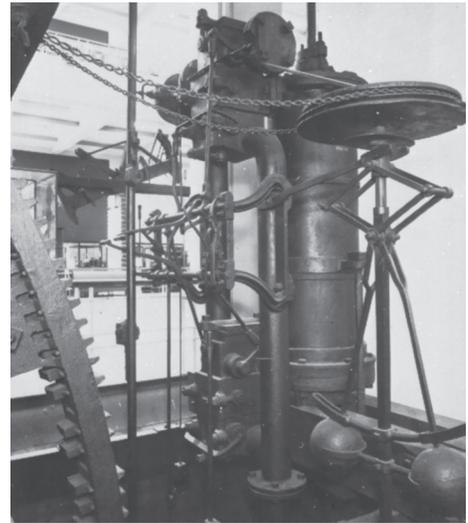


Figura 1.9 Fotografia de um antigo motor a vapor de Watt.

Fonte: British Crown Copyright, Science Museum, London.

Figura 1.10 Fotografia focalizando o governador de bolas flutuantes.

Fonte: British Crown Copyright, Science Museum, London.



De acordo com Fuller, Airy foi o primeiro a discutir instabilidade em sistemas de controle realimentado e o primeiro a analisar tais sistemas usando equações diferenciais. Estes foram os primeiros estudos sobre o controle realimentado.

Análise da estabilidade

Aparentemente, o primeiro estudo sistemático da estabilidade do controle realimentado foi apresentado no artigo intitulado “On Governors”, de J. C. Maxwell (1868)⁷. Nesse artigo, Maxwell desenvolveu as equações diferenciais do governador, linearizando-as com base no equilíbrio, e afirmou que a estabilidade depende das raízes de certa equação (equação característica) que devem ter parte real negativa. Maxwell tentou obter condições relacionando os coeficientes de um polinômio com raízes de parte real negativa. Ele foi bem-sucedido apenas para os casos de segunda e terceira ordem. A determinação de critérios de análise de estabilidade foi o problema considerado para o Prêmio Adams de 1877, dado a E. J. Routh⁸. Seu critério permanece como uma ferramenta de muito interesse, tal que engenheiros de controle ainda estão aprendendo a aplicar sua simples técnica. A análise da equação característica manteve-se como a base da teoria de controle até a invenção do amplificador eletrônico por H. S. Black, em 1927, no laboratório Bell Telephone Laboratories.

Logo após a publicação do artigo de Routh, o matemático russo A. M. Lyapunov (1893) começou a estudar a questão da estabilidade do movimento. Seus estudos, baseados em equações diferenciais não lineares de movimento, incluem os resultados de equações lineares equivalentes ao critério de Routh. Seu trabalho foi fundamental para o que hoje é chamado de abordagem em variáveis de estado na teoria de controle, mas essa abordagem não foi introduzida na literatura de controle até 1958.

Resposta em frequência

O desenvolvimento do amplificador realimentado é brevemente descrito em um interessante artigo baseado em uma palestra de H. W. Bode (1960), reproduzida em Bellman e Kalaba (1964). Com a introdução de amplificadores eletrônicos, ligações telefônicas de longa distância se tornaram possíveis nas décadas seguintes à Primeira Guerra Mundial. No entanto, como as distâncias aumentaram, também cresceu a perda de energia elétrica; apesar da utilização de fios de maior diâmetro, o aumento do número de amplificadores foi necessário para repor a energia perdida. Infelizmente, um grande número de amplificadores causa uma grande distorção, pois eles são constituídos por válvulas que apresentam uma pequena não linearidade, que é multiplicada muitas vezes. Para resolver o problema da distorção, Black propôs um amplificador realimentado. Como mencionado antes no problema de controle de velocidade

⁷ Uma exposição da contribuição de Maxwell é dada em Fuller (1976).

⁸ E. J. Routh foi o melhor aluno de sua classe na Universidade de Cambridge em 1854, enquanto J. C. Maxwell foi o segundo lugar. Em 1877, Maxwell estava no comitê do Prêmio Adams e escolheu o problema de estabilidade como o tema do ano.

em cruzeiro de um automóvel, quanto mais desejamos reduzir erros (ou distorções), mais a aplicação da realimentação se torna necessária. O ganho na malha que conecta planta, sensores e atuadores deve ser muito grande. Entretanto, com um ganho muito alto de realimentação o sistema começa a ficar instável. Os critérios de análise de estabilidade de Maxwell e Routh foram brevemente discutidos, mas vale ressaltar que quando a dinâmica é muito complexa (equações diferenciais de ordem aproximadamente ou superior a 50) o critério Routh não é muito útil. Assim, os engenheiros de telecomunicações no Bell Telephone Laboratories, familiarizados com o conceito de resposta em frequência e com a matemática de variáveis complexas, voltaram-se para o estudo da análise complexa. Em 1932, H. Nyquist publicou um artigo descrevendo um método para determinar a estabilidade por meio de uma representação gráfica da resposta em frequência. A partir desta teoria, desenvolveu-se uma extensiva metodologia descrita por Bode (1945) para o projeto de amplificadores realimentados que ainda é amplamente utilizada no projeto de controle realimentado. Os diagramas de Nyquist e Bode são discutidos em mais detalhes no Capítulo 6.

Simultaneamente ao desenvolvimento do amplificador realimentado, o controle realimentado foi se tornando padrão em processos industriais. Este campo – caracterizado por processos que não são apenas altamente complexos, mas também não lineares e sujeitos a retardos no tempo entre o atuador e sensor que podem ser relativamente longos – desenvolveu o **controle proporcional-integral-derivativo (PID)**. O controlador PID foi primeiramente descrito por Callender e outros (1936). Essa tecnologia foi baseada em um extenso trabalho experimental e em simples aproximações linearizadas para a dinâmica do sistema. Isso levou a experimentos padrões adequados para a aplicação em campo e, depois, à “sintonia” satisfatória dos parâmetros do controlador PID (controladores PID são abordados no Capítulo 4). Também estavam em desenvolvimento naquela época dispositivos de orientação e controle de aeronaves; foi especialmente importante o desenvolvimento de sensores para medição de altitude e velocidade de aeronaves. Um relato interessante sobre esse ramo da teoria de controle está em McRuer (1973).

Um enorme impulso foi dado ao campo do controle realimentado durante a Segunda Guerra Mundial. Nos Estados Unidos, engenheiros e matemáticos no Laboratório de Radiação do MIT combinaram seu conhecimento para reunir não só a teoria de Bode do amplificador realimentado e do controle PID, mas também a teoria de processos estocásticos desenvolvida por N. Wiener (1930). O resultado foi o desenvolvimento de um conjunto abrangente de técnicas para

Controle PID

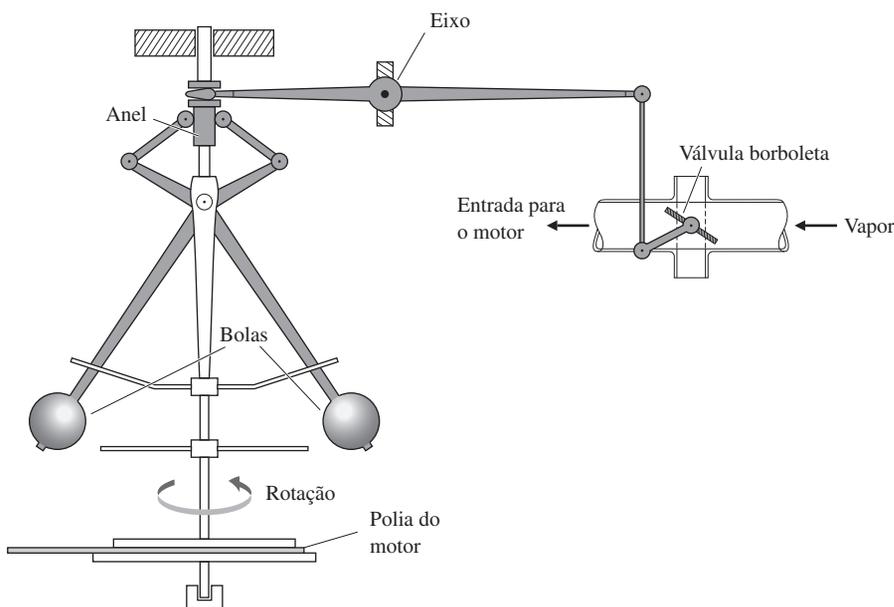


Figura 1.11 Componentes para o funcionamento de um governador de bolas flutuantes.

a concepção de **servomecanismos**, como os mecanismos de controle passaram a ser chamados. Muito deste trabalho foi coletado e publicado nos registros do Laboratório de Radiação por James e outros (1947).

Outra abordagem para projetar sistemas de controle foi introduzida em 1948 por W. R. Evans, que estava trabalhando no campo da orientação e controle de aeronaves. Muitos dos seus problemas envolviam dinâmicas instáveis ou com estabilidade neutra, o que dificultou a aplicação de métodos baseados em frequência. Então, ele sugeriu voltar ao estudo da equação característica que tinha sido a base do trabalho de Maxwell e Routh quase 70 anos antes. No entanto, Evans desenvolveu técnicas e regras que permitem fazer um acompanhamento gráfico dos caminhos das raízes da equação característica à medida que um parâmetro é alterado. Seu método, o **lugar das raízes**, é apropriado para o projeto, bem como para análise de estabilidade, e continua sendo uma técnica importante atualmente. O método do lugar das raízes desenvolvido por Evans é abordado no Capítulo 5.

Lugar das raízes

Projeto no espaço de estados

Durante a década de 1950, vários autores, incluindo R. Bellman e R. E. Kalman, nos Estados Unidos, e L. S. Pontryagin, na U.R.S.S., começaram novamente a considerar a equação diferencial ordinária (ODE) como um modelo para sistemas de controle. Muito deste trabalho foi estimulado pelo novo campo de controle de satélites artificiais, no qual a ODE é uma forma natural para a representação dos modelos. Os computadores digitais também apoiaram esta iniciativa, pois poderiam ser utilizados para realizar cálculos impensáveis 10 anos antes. (Atualmente, é claro, esses cálculos podem ser feitos por qualquer estudante de engenharia com um computador portátil.) O trabalho de Lyapunov foi traduzido para a linguagem de controle nessa época, e o estudo do controle ótimo, iniciado por Wiener e Phillips durante a Segunda Guerra Mundial, foi estendido para otimizar trajetórias de sistemas não lineares com base no cálculo variacional. Muito deste trabalho foi apresentado na primeira conferência da recém-formada Federação Internacional de Controle Automático, realizada em Moscou em 1960⁹. Este trabalho não utilizou a resposta em frequência ou a equação característica, mas trabalhou diretamente com a ODE em sua forma “normal”, ou na forma de “espaço de estados”, geralmente relacionada com a ampla utilização de computadores. Embora as bases do estudo de equações diferenciais tenham sido estabelecidas no final do século 19, essa abordagem é chamada frequentemente de **controle moderno** para diferenciá-la do **controle clássico**, que é baseado em variáveis complexas e nos métodos de Bode e outros. A partir da década de 1970 até atualmente, vemos um crescente campo de trabalho que pretende usar as melhores características de cada técnica.

Controle moderno

Controle clássico

Assim, chegamos ao estado atual em que os princípios de controle são aplicados em uma ampla gama de disciplinas, incluindo todos os ramos da engenharia. O engenheiro de controle bem preparado precisa entender a teoria matemática básica que fundamenta o campo e deve ser capaz de selecionar a melhor técnica de projeto adequada para o problema em mãos. Com o uso onipresente de computadores, é especialmente importante que o engenheiro seja capaz de usar seu conhecimento para orientar e verificar os cálculos feitos no computador.¹⁰

1.4 Uma visão geral do livro

O objetivo central deste livro é apresentar as técnicas mais importantes para o projeto de sistemas de controle com uma entrada e uma saída. O **Capítulo 2** irá rever as técnicas necessárias para obtenção dos modelos de sistemas dinâmicos que queremos controlar. Estes incluem modelismo para engenharia mecânica, elétrica, eletromecânica e alguns outros sistemas físicos. O Capítulo 2 também descreve sucintamente a linearização de modelos não lineares, mas isso será discutido mais profundamente no Capítulo 9.

⁹ O controle ótimo ganhou um grande impulso quando Bryson e Denham (1962) mostraram que um avião supersônico deve mergulhar em um certo ponto para atingir uma determinada altitude em tempo mínimo. Esse resultado não intuitivo foi posteriormente demonstrado aos pilotos de caça em testes de voo.

¹⁰ Para mais informações sobre a história do controle, consulte os artigos da *IEEE Control Systems Magazine* de novembro de 1984 a junho de 1996.

No **Capítulo 3** e no **Apêndice A**, será discutida a análise da resposta dinâmica utilizando a transformada de Laplace junto à relação entre o tempo de resposta e aos polos e zeros da função de transferência. Esse capítulo também inclui uma discussão sobre o problema crítico de análise de estabilidade do sistema, incluindo o teste de Routh.

O **Capítulo 4** cobre as equações e as características básicas da realimentação. É feita uma análise dos efeitos da realimentação em relação à rejeição de distúrbios, precisão de rastreamento, sensibilidade a parâmetros variantes e resposta dinâmica. A ideia básica do controle PID elementar é discutida. Também neste capítulo uma breve introdução é dada para a implementação digital das funções de transferência e, portanto, de controladores lineares invariantes no tempo, de modo que os efeitos do controlador digital possam ser comparados com controladores analógicos.

Nos **Capítulos 5, 6 e 7**, são introduzidas técnicas para a realização dos objetivos de controle, identificados pela primeira vez no Capítulo 4 em sistemas dinâmicos mais complexos. Esses métodos incluem o lugar das raízes, resposta em frequência e técnicas baseadas em variáveis de estado. Estes são os meios alternativos para o mesmo fim e têm diferentes vantagens e desvantagens para o projeto de controladores. Os métodos são fundamentalmente complementares, e cada um precisa ser compreendido para obter projetos de sistemas de controle mais eficazes.

No **Capítulo 8**, são discutidas ideias sobre a implementação de controladores em computadores digitais que foram introduzidas no Capítulo 4. O capítulo aborda como “digitalizar” as equações de controle desenvolvidas nos Capítulos 5, 6 e 7, como a amostragem introduz um atraso que tende a desestabilizar o sistema e como, para um bom desempenho, se dá a necessidade da taxa de amostragem ser um múltiplo das frequências do sistema. A análise dos sistemas de amostragem exige outra ferramenta de análise – a transformada z – e essa ferramenta é descrita e seu uso é ilustrado.

A maioria dos sistemas reais é não linear. No entanto, os métodos de análise e projeto na maior parte do livro são para sistemas lineares. No **Capítulo 9**, é explicado por que o estudo de sistemas lineares é pertinente, porque é útil para o projeto, embora a maioria dos sistemas seja não linear, e como os projetos de sistemas lineares podem ser modificados para lidarem com a maioria das não linearidades comuns nos sistemas. O capítulo aborda a saturação, descrevendo as funções do controlador antiwindup, e contém uma breve introdução à teoria de estabilidade de Lyapunov. A aplicação de todas as técnicas em problemas de substancial complexidade é discutida no **Capítulo 10**, em que os métodos de projeto são implementados simultaneamente em estudos de casos específicos.

Hoje, projetistas de controle fazem uso extensivo de programas computacionais que estão disponíveis comercialmente. Também existem ferramentas de projeto de controle disponíveis para estudantes. Para esse propósito, os programas mais utilizados são o MATLAB[®] e o SIMULINK[®], da Mathworks. Linhas de instruções para o MATLAB foram incluídas em todo o texto para ajudar a ilustração deste método na solução de muitos problemas que necessitam do auxílio computacional. Muitas das figuras do livro foram criadas usando o MATLAB e os arquivos para a sua criação estão disponíveis no site do Grupo A.

É desnecessário dizer que muitos temas não são tratados no livro. Não aprofundamos os métodos de controle multivariável, que são apropriados para sistemas com mais de uma entrada e/ou saída, exceto quando parte, no Capítulo 10, do estudo da processadora térmica rápida. O controle ótimo também é tratado apenas de uma maneira introdutória no Capítulo 7.

Além disso, o detalhamento dos métodos experimentais de teste e modelagem também está fora do escopo deste texto. O livro concentra-se na análise e no projeto de controladores lineares para modelos lineares de plantas – não porque pensamos que esse é o passo final de um projeto, mas porque essa é a melhor forma de entender as ideias básicas e geralmente é o primeiro passo para se chegar a um projeto satisfatório. Acreditamos que o domínio do conteúdo apresentado aqui fornece uma base para o entendimento dos temas mais avançados e práticos – uma base sólida o suficiente para permitir que o leitor desenvolva um novo método de projeto, seguindo passos similares de todos aqueles que trabalharam para nos dar o conhecimento que aqui apresentamos.

RESUMO

- **Controle** é o processo de fazer com que uma variável do sistema assuma um determinado valor, chamado de **valor de referência**. Um sistema concebido para acompanhar uma referência é chamado de **controle de rastreamento** ou **servo**. Um sistema projetado para manter uma saída fixa, independentemente dos distúrbios presentes, é chamado de **regulação** ou **controle de regulação**.
- Os dois tipos de controle foram definidos e ilustrados com base nas informações utilizadas para o controle e nomeados de acordo com a estrutura resultante. No **controle de malha aberta**, o sistema resultante *não* contém um sensor para medição da saída e, assim, não há uma ação de correção para fazer com que a saída seja igual ao sinal de referência. No **controle de malha fechada**, o sistema inclui um sensor para medir o sinal de saída e utiliza a **realimentação** para influenciar na variável de controle.
- Um simples sistema realimentado consiste do **processo**, o qual possui a saída que deve ser controlada, o **atuador**, cuja saída causa uma mudança na saída do sistema, **sensores** para a medição dos sinais de **referência** e saída, e o controlador que implementa a lógica pela qual o sinal de controle que comanda o atuador é calculado.
- **Diagramas de blocos** são úteis para a visualização da estrutura do sistema e o fluxo de informações no sistema de controle. Os diagramas de blocos mais comuns representam as relações matemáticas entre os sinais em um sistema de controle.
- As teorias e técnicas de projeto de controle passaram a ser divididas em duas categorias: métodos de **controle clássico**, baseados no uso das transformadas de Laplace e Fourier, que foram os métodos dominantes no campo de controle até cerca de 1960, enquanto métodos de **controle moderno** são baseados em equações diferenciais na forma de espaço de estados e foram introduzidos no campo a partir de década de 1960. Muitas ligações foram descobertas entre as duas categorias, e engenheiros bem preparados devem estar familiarizados com ambas as técnicas.

QUESTÕES DE REVISÃO

1. Quais são os principais componentes de um sistema de controle realimentado?
2. Qual é o propósito do sensor?
3. Cite três propriedades importantes de um bom sensor.
4. Qual é o propósito de um atuador?
5. Cite três propriedades importantes de um bom atuador.
6. Qual é o propósito do controlador? Qual(is) é(são) a(s) saída(s) e a(s) entrada(s) do controlador?
7. Que(ais) variável(eis) física(s) de um processo pode(m) ser medida(s) diretamente por um sensor de efeito Hall?
8. Que variável física é medida por um tacômetro?
9. Descreva três técnicas diferentes para a medição de temperatura.
10. Por que a maioria dos sensores tem uma saída elétrica, independentemente da natureza física da variável que está sendo medida?

PROBLEMAS

- 1.1 Desenhe um diagrama de blocos para o controle realimentado para cada um dos sistemas.
 - (a) Sistema de direção manual de um automóvel
 - (b) Incubadora de Drebbel
 - (c) Controle de nível de água por uma boia e válvula
 - (d) Motor a vapor de Watt com um governador de bolas flutuantes

Em cada caso, indique a localização dos elementos listados abaixo e dê as unidades associadas a cada sinal.

- Processo
- A saída desejada do processo
- Sensor
- Atuador
- A saída desejada do atuador
- Controlador
- A saída do controlador
- O sinal de referência
- O sinal de erro

Observe que, em alguns casos, o mesmo dispositivo físico pode executar mais de uma função.

- 1.2** Identifique os princípios físicos e descreva o funcionamento do termostato em uma casa ou escritório.
- 1.3** Uma máquina para fabricação de papel é diagramada na Fig. 1.12. Existem dois principais parâmetros sob controle: a densidade das fibras, controlada pela consistência do material bruto que flui a partir do reservatório principal, e o teor de umidade do produto final que sai do secador. O conteúdo do reservatório de mistura é diluído pelo líquido de diluição controlado por uma válvula de controle (VC). Um medidor fornece uma leitura da consistência. Na “seção seca” da máquina, há um sensor de umidade. Desenhe um gráfico de sinais e identifique os nove componentes listados no Problema 1.1 parte (d) para
- (a) Controle de consistência
 - (b) Controle de umidade
- 1.4** Muitas variáveis no corpo humano estão sob controle realimentado. Para cada uma das seguintes variáveis controladas, desenhe um gráfico que mostre o processo sendo controlado, o sensor que mede a variável, o atuador que regula a variável controlada, o caminho que a informação percorre até fechar a realimentação e os distúrbios que perturbam a variável. Talvez seja necessário consultar uma enciclopédia ou um livro de fisiologia humana para obter informações sobre este problema.
- (a) Pressão sanguínea
 - (b) Concentração de açúcar no sangue
 - (c) Frequência cardíaca
 - (d) Ângulo dos olhos
 - (e) Diâmetro das pupilas
- 1.5** Desenhe um gráfico com os componentes para o controle de temperatura em um frigorífico ou para um ar condicionado automotivo.
- 1.6** Desenhe um gráfico com os componentes para o controle de posição de um elevador. Indique como é feita a leitura da posição da cabine do elevador. Qual é a precisão adequada para o sensor?

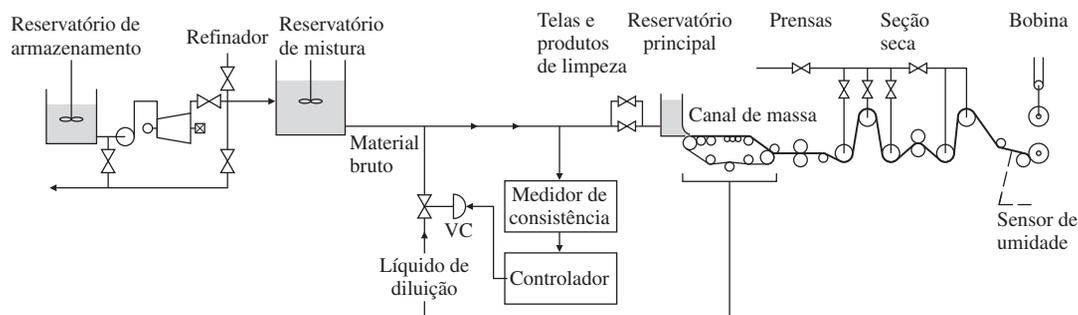


Figura 1.12 Máquina de fazer papel.

Fonte: Åström (1970, p. 192); reproduzido com permissão.

O sistema de controle deve considerar o fato de que em elevadores de edifícios altos, há uma grande extensão de cabos.

- 1.7** O controle realimentado necessita medir a variável que está sendo controlada. Como os sinais elétricos podem ser transmitidos, amplificados e transformados facilmente, muitas vezes queremos ter um sensor cuja saída é uma tensão ou corrente proporcional à variável que está sendo medida. Descreva um sensor que daria uma saída elétrica com intensidade proporcional a:
- (a) Temperatura
 - (b) Pressão
 - (c) Nível de líquido
 - (d) Fluxo de líquido ao longo de uma tubulação (ou sangue ao longo de uma artéria)
 - (e) Posição linear
 - (f) Posição de rotação
 - (g) Velocidade linear
 - (h) Velocidade de rotação
 - (i) Aceleração translacional
 - (j) Torque
- 1.8** Cada uma das variáveis enumeradas no Problema 1.7 pode ser utilizada no controle realimentado. Descreva um atuador que poderia aceitar uma entrada elétrica e ser usado para controlar as variáveis indicadas. Dê as unidades do sinal de saída do atuador.