

## 1.2 REPRESENTAÇÕES NUMÉRICAS

Na ciência, na tecnologia, nos negócios e em muitos outros campos de trabalho, estamos constantemente tratando com *quantidades*, que na maioria dos sistemas físicos são medidas, monitoradas, guardadas, manipuladas aritmeticamente, observadas ou utilizadas de alguma outra maneira. Quando manipulamos quantidades diversas, é importante representar seus valores de modo eficiente e preciso. Existem basicamente dois modos de representação dos valores das quantidades: o *analógico* e o *digital*.

### Representações analógicas

Na **representação analógica**, uma quantidade é representada por um indicador proporcional continuamente variável. Um exemplo disso é o velocímetro de um automóvel dos modelos clássicos dos anos 1960 e 1970, nos quais a deflexão do ponteiro é proporcional à velocidade. A posição angular do ponteiro representa o valor da velocidade, e o movimento do ponteiro segue as alterações, aumento ou diminuição da velocidade do automóvel. Nos carros mais antigos, um cabo flexível mecânico conectava a transmissão ao velocímetro no painel. É interessante notar que, nos carros mais modernos, há preferência pela representação analógica, ainda que a velocidade agora seja medida digitalmente.

Antes da revolução digital, os termômetros utilizavam representação analógica para medir a temperatura, e ainda há muitos desse tipo hoje em dia. O termômetro de mercúrio utiliza uma coluna cuja altura varia conforme a temperatura do ambiente. Esses instrumentos estão sendo retirados do mercado devido a preocupações ambientais, mas, apesar disso, são um excelente exemplo de representação analógica. Outro exemplo é o termômetro externo, no qual o ponteiro gira ao redor de um mostrador à medida que uma mola de metal se expande e contrai com as variações de temperatura. A posição do ponteiro é proporcional à temperatura. Independentemente de quão pequena é a mudança, há variação proporcional na indicação.

Nesses dois exemplos, as quantidades físicas (velocidade e temperatura) estão sendo associadas a um indicador por meios puramente mecânicos. Nos sistemas analógicos elétricos, a quantidade física medida ou processada é convertida em uma tensão ou corrente proporcional (sinal elétrico). Essa tensão ou corrente é então usada pelo sistema para exibição, processamento ou controle.

O som é um exemplo de quantidade física que pode ser representada por um sinal analógico elétrico. Em 1875, Alexander Graham Bell descobriu um meio para transformar sua voz em um sinal elétrico continuamente variável, enviá-la por um cabo e transformá-la outra vez em energia sonora na outra extremidade. Hoje em dia, o aparelho que converte a energia do som em um sinal de tensão analógico é conhecido como microfone. A Figura 1.4 mostra a aparência do sinal de voz analógico. A informação está contida nos tons e inflexões deste sinal de voz que muda permanentemente, e está codificada pela linguagem falada do interlocutor. Tons são medidos pela **frequência** ( $f$ ), que mostra quantos ciclos de onda acontecem em uma determinada quantidade de tempo (ciclos por segundo). O eixo horizontal (tempo) dá uma indicação do tempo de cada ciclo, conhecido como o **período** ( $T$ ) da onda (segundos por ciclo). A altura do som é medida pela **amplitude** da onda em unidades especificadas no eixo vertical (por exemplo, volts). Mudanças na amplitude representam inflexão ou ênfase de determinados sons. Em outras palavras, amplitudes mais altas resultam em sons mais altos e amplitudes mais baixas resultam em sons mais baixos.

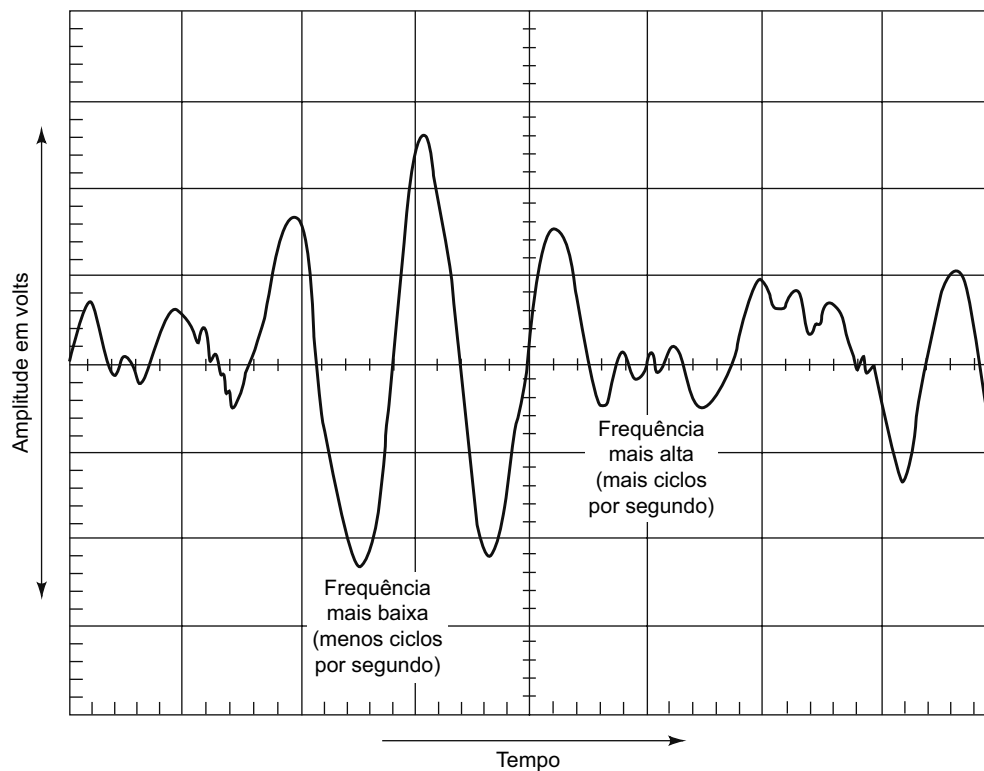
Não importa como sejam representadas, quantidades analógicas têm uma importante característica: *podem variar ao longo de uma faixa contínua de valores*. A velocidade de um automóvel pode ser representada por um valor qualquer entre zero e, digamos, 160 km/h. De modo similar, a temperatura indicada por um termômetro analógico pode ter qualquer valor de  $-29^{\circ}\text{C}$  a  $49^{\circ}\text{C}$ , e o sinal de tensão analógico produzido por um microfone pode ter qualquer valor entre zero e sua saída positiva ou negativa máxima.

### Representações digitais

Na **representação digital**, as quantidades são representadas não por indicadores continuamente variáveis, mas por símbolos chamados *dígitos*. Como exemplo, considere um termômetro digital interno/externo. Ele tem quatro dígitos e pode medir mudanças de  $0,1^{\circ}\text{C}$ . A temperatura real aumenta gradualmente de, digamos,  $22^{\circ}\text{C}$  para  $22,1^{\circ}\text{C}$ , mas a representação digital muda subitamente de  $22^{\circ}\text{C}$  para  $22,1^{\circ}\text{C}$ . Em outras palavras, esta representação digital de temperatura exterior varia em incrementos *discretos*, se comparada à representação analógica da temperatura fornecida por um termômetro de coluna líquida ou um bimetálico, nos quais a leitura varia continuamente.

Assim, pode-se dizer que a maior diferença entre quantidades analógicas e digitais é que:

$$\begin{aligned} \text{analógica} &\equiv \text{contínua} \\ \text{digital} &\equiv \text{discreta (passo a passo)} \end{aligned}$$



**FIGURA 1.4** Onda de áudio.

Devido a essa natureza discreta das representações digitais, não há ambiguidade quando se faz a leitura de uma quantidade digital, ao passo que o valor de uma quantidade analógica apresenta, muitas vezes, uma interpretação livre. Na prática, quando medimos uma quantidade analógica, sempre ‘arredondamos’ para um nível conveniente de precisão. Em outras palavras, digitalizamos a quantidade. A representação digital é o resultado da atribuição de um número de precisão limitada a uma quantidade continuamente variável.

O mundo é repleto de variáveis físicas que estão constantemente mudando. Se pudermos medi-las e representá-las como quantidade digital, podemos então registrar, manipular aritmeticamente ou, de alguma outra maneira, usar estas quantidades para controlar coisas.

### Exemplo 1.1

Dentre as quantidades a seguir, quais estão relacionadas a quantidades analógicas e quais estão relacionadas a quantidades digitais?

- Subida usando uma escada.
- Subida usando uma rampa.
- Corrente que flui de uma tomada elétrica por meio um motor.
- Altura de uma criança medida por uma fita métrica em divisão de 1 cm.
- Altura de uma criança colocando uma marca na parede.
- Volume de areia em um balde.
- Volume de água em um balde.

### Solução

- Digital.
- Analógica.
- Analógica.
- Digital: medido até o meio centímetro mais próximo.
- Analógica.
- Digital: só pode aumentar/diminuir por grãos discretos de areia.
- Analógica: (a não ser que você queira chegar ao nível da nanotecnologia!).

**Questões para revisão**

1. Quais são os dois estados binários de um sistema de telégrafo?
2. Como era codificada a informação de telégrafo usando esses dois estados?
3. Qual propriedade de uma forma de onda de áudio afeta a intensidade do som?
4. Qual propriedade de uma forma de onda de áudio afeta a altura de um tom?
5. Qual método de representar quantidades envolve passos discretos?
6. Qual método de representar quantidades é continuamente variável?

### 1.3 SISTEMAS ANALÓGICOS E DIGITAIS

Um **sistema digital** é uma combinação de dispositivos projetados para manipular informação lógica ou quantidades físicas representadas no formato digital; ou seja, as quantidades podem assumir apenas valores discretos. Esses dispositivos são, na maioria das vezes, eletrônicos, mas podem ser mecânicos, magnéticos ou pneumáticos. Alguns dos sistemas digitais mais conhecidos são os computadores, as calculadoras, os equipamentos de áudio e vídeo e o sistema de telecomunicações.

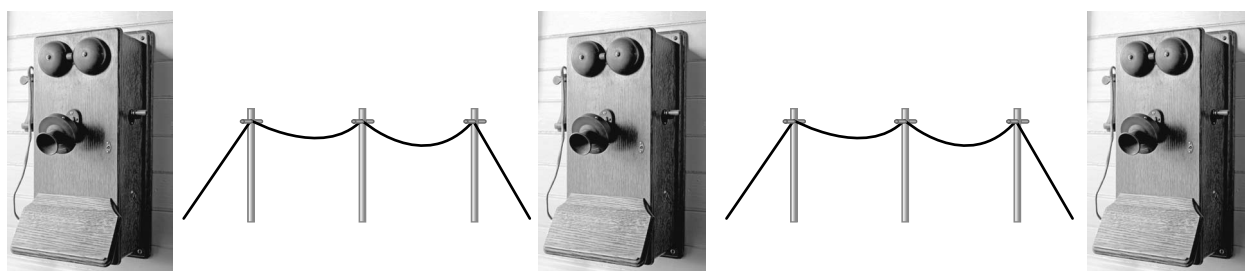
Um **sistema analógico** contém dispositivos que manipulam quantidades físicas representadas na forma analógica. Em um sistema analógico, as quantidades físicas podem variar ao longo de uma faixa contínua de valores. Por exemplo, a amplitude do sinal de saída de um alto-falante em um receptor de rádio pode apresentar qualquer valor entre zero e o seu limite máximo.

#### Sistemas mistos: digital e analógico

É comum ver ambas as técnicas, digital e analógica, empregadas dentro de um mesmo sistema. Desta maneira, o sistema é capaz de aproveitar as vantagens de cada uma. Nestes sistemas de sinal híbrido ou misto, um dos passos importantes da fase de projeto envolve determinar quais partes devem ser analógicas e quais devem ser digitais. A tendência de hoje em dia é digitalizar os sinais o mais cedo possível e convertê-los de volta para analógicos o mais tarde possível no percurso de fluxo do sinal.

Para analisar sistemas que usam ambas as técnicas, digital e analógica, vamos recapitular a evolução do telefone. Enquanto fazemos isto, descobriremos que há muitas maneiras de representar informações em sistemas. Bell percebeu que, para serem úteis, os telefones precisavam funcionar em rede, como mostra a Figura 1.5. A solução dele foi colocar em cada telefone um gerador elétrico à manivela. Quando alguém virava a manivela, ela produzia uma tensão que fazia que uma campainha tocasse em cada telefone conectado à rede. Parar a manivela fazia com que as campainhas parassem de tocar. Cada pessoa na rede recebia um código único de toques longos e curtos (como pulsos digitais). A parte que realizava a ligação **codificava** a identificação de uma pessoa pela maneira como ela movia a manivela do telefone. A parte que recebia a ligação **decodificava** mentalmente os padrões dos toques da campainha, para saber quando completar a conexão tirando o fone/receptor do gancho. A sinalização (toques) usava a representação digital, mas a comunicação de voz era puramente analógica.

O telefone de disco veio logo depois e usava uma série de pulsos mais sofisticada, que representava os dez dígitos do sistema de numeração decimal. Para discar um número, a pessoa colocava o dedo em um buraco numerado, girava o disco até o braço fixo, e soltava. Uma mola fazia o disco retornar à posição original enquanto girava um eixo de came que abria e fechava contatos de chave, produzindo pulsos. Uma sequência de pulsos representava cada número no disco. Por exemplo, nove pulsos representavam o número 9, dois pulsos representavam o número 2, e dez pulsos representavam o número 0. Mecanismos de chave eletromecânicos interpretavam (decodificavam) os pulsos e faziam a conexão aos cabos que iam até o telefone correto na rede e faziam com que ele tocasse até que alguém o respondesse. Observe que nestes



**FIGURA 1.5** Rede telefônica ‘de linhas compartilhadas’.

sistemas um tipo diferente de código digital foi usado. A codificação e decodificação eram feitas por máquinas eletromecânicas para realizar automaticamente uma conexão de comunicação analógica.

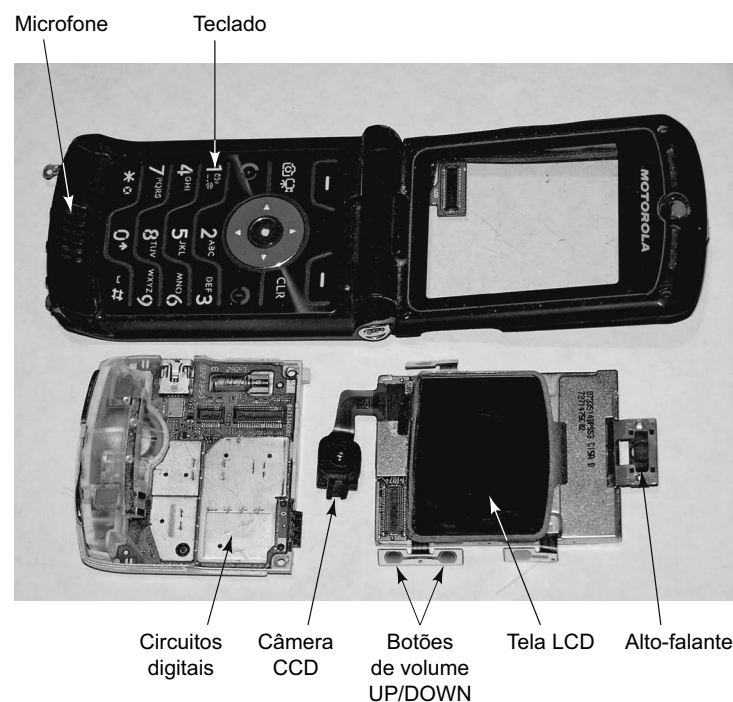
Telefones de teclas foram os seguintes. Um sinal audível complexo diferente, produzido pela combinação de duas frequências sinusoidais diversas, representava cada dígito de um número de telefone. Estes tons familiares de toque são chamados de Frequência múltipla de tom dual (DTMF – *dual tone, multiple frequency*). Circuitos eletrônicos eram capazes de reconhecer cada ‘tom de toque’, traduzi-los em uma sequência de dígitos e realizar as conexões certas para fazer com que um único telefone tocasse. Observe que, neste exemplo, a informação de chave digital é enviada usando sinais de tom analógicos, mas cada tom é formado por duas frequências distintas. Representações analógicas e digitais de informação sempre funcionaram juntas na comunicação eletrônica.

**O TELEFONE CELULAR** Considere o telefone celular na Figura 1.6 ou, se tiver, pegue o seu aparelho e assombre-se com o que ele faz. Talvez neste instante pareça impossível que você possa compreender como opera um sistema tão complexo. Dentro de um telefone celular existem alguns circuitos eletrônicos sofisticados, a maioria dos quais são cobertos pela proteção de metal do painel de circuito. Todos os sistemas complexos (por exemplo, laptops, HDTV e controles automotivos) são feitos dos mesmos blocos constitutivos básicos. Ao aprender os blocos constitutivos básicos e usar a tecnologia disponível hoje, você pode projetar e minituarizar sistemas digitais como o mostrado no exemplo.

Um telefone celular é um sistema misto de sinais, o que significa que tem componentes analógicos e digitais e usa ambos os tipos de sinais. O Capítulo 11 vai explicar como isso é feito. A voz é captada por um microfone analógico e logo é convertida para sinal digital. O sinal de áudio digital e muitas outras informações digitais, como números de telefones, coordenadas de posição global, mensagens de texto etc., são combinados com uma onda de rádio de frequência muito alta e enviados para uma torre de telefonia celular. Seu telefone também recebe um sinal de rádio analógico, separa a informação digital, converte o sinal de áudio digital de volta para o analógico e o aplica ao alto-falante.

O teclado é a entrada mais óbvia para um telefone celular. Cada tecla pode estar em dois estados: pressionada ou não pressionada. Um sistema com apenas dois estados é um sistema binário. Obviamente, cada tecla tem de ser representada de uma maneira única para o sistema digital a fim de que os valores (números nas teclas) possam ser facilmente distinguidos uns dos outros. O **sistema de numeração binário** usa grupos de **dígitos binários** ou **bits** (1s e 0s) para representar números decimais em um sistema digital. Começaremos nosso estudo de números binários mais adiante neste capítulo. Como um telefone celular traduz a pressão de um botão específico para um código binário único? Você vai aprender o *processo de codificação* para teclados no Capítulo 9.

O telefone na Figura 1.6 também tem uma chave que reconhece se o aparelho está aberto (1) ou fechado (0). Tal sensor aberto/fechado também é usado para determinar quando ligar a luz de fundo e quando terminar uma chamada. Sistemas



**FIGURA 1.6** Telefone celular desmontado.

digitais são cheios de sensores e chaves como essa, que fornecem informações a respeito do que está acontecendo. Decisões lógicas são tomadas com base nessas informações desses dados de entrada. Por exemplo, os botões de volume aumentam ou reduzem o nível do som se o telefone está aberto, mas a configuração do volume não é afetada se você pressioná-los quando o telefone está fechado. A condição de um sensor afeta o papel de outros dados de entrada para o sistema. O ponto é que as ações resultantes do sistema digital dependem de combinações dos dados de entrada, com cada dispositivo de entrada estando em um de dois estados possíveis. Você vai aprender tudo a respeito da representação destas combinações lógicas e da utilização de circuitos lógicos para tomar decisões baseadas nos dados de entrada nos capítulos 3 e 4.

## Vantagens das técnicas digitais

Um número cada vez maior de aplicações em eletrônica, assim como em muitas outras tecnologias, utiliza técnicas digitais para implementar funções que eram realizadas por métodos analógicos. Os principais motivos da migração para a tecnologia digital são:

1. *Os sistemas digitais são geralmente mais fáceis de ser projetados.* Isso porque os circuitos utilizados são *circuitos de chaveamento*, nos quais não importam os valores *exatos* de tensão ou corrente, mas apenas a faixa — ALTA (*HIGH*) ou BAIXA (*LOW*) — na qual eles se encontram.
2. *O armazenamento de informação é mais fácil.* Esta é uma habilidade de dispositivos e circuitos especiais, que podem guardar (*latch*) informação digital e mantê-la pelo tempo necessário, e de técnicas de armazenamento de massa (grande quantidade de informação), que podem armazenar bilhões de bits de informação em um espaço físico relativamente pequeno. A capacidade de armazenamento de sistemas analógicos é, ao contrário da dos digitais, extremamente limitada.
3. *É mais fácil manter a precisão e exatidão em todo o sistema.* Uma vez que um sinal é digitalizado, a informação que ele contém não se deteriora ao ser processada. Nos sistemas analógicos, os valores de tensão e corrente tendem a ser distorcidos pelos efeitos da variação na temperatura, na umidade e na tolerância dos componentes nos circuitos que processam o sinal.
4. *As operações podem ser programadas.* É bastante fácil projetar um sistema digital cuja operação é controlada por um conjunto de instruções armazenadas denominado *programa*. Os sistemas analógicos também podem ser *programados*, porém, a variedade e a complexidade das operações disponibilizadas são bastante limitadas.
5. *Os circuitos digitais são menos afetados por ruído.* Flutuações espúrias na tensão (ruído) não são tão críticas em sistemas digitais porque o valor exato da tensão não é importante, desde que o ruído não tenha amplitude suficiente que dificulte a distinção entre um nível ALTO (H) e um nível BAIXO (L).
6. *CI's (chips) digitais podem ser fabricados com mais dispositivos internos.* É verdade que os circuitos analógicos também foram beneficiados com o grande desenvolvimento da tecnologia de CI's, mas são relativamente complexos e utilizam dispositivos que não podem ser economicamente integrados (capacitores de alto valor, resistores de precisão, indutores e transformadores), evitando, assim, que os sistemas analógicos alcancem igualmente um alto grau de integração.

## Limitações das técnicas digitais

Há poucas desvantagens quando se usam técnicas digitais. Os dois principais problemas são:

***O mundo real é analógico.  
Processar sinais digitais leva tempo.***

A maioria das grandezas físicas é de natureza analógica e muitas vezes são entradas e saídas monitoradas, operadas (alteradas) e controladas por um sistema. Como exemplos, temos a temperatura, a pressão, a posição, a velocidade, o nível de um líquido e a vazão, entre outros. Estamos habituados a expressar essas grandezas *digitalmente*, como quando dizemos que a temperatura é 18°C (17,8°C quando desejarmos mais precisão), mas o que estamos realmente fazendo é uma aproximação digital para uma grandeza analógica.

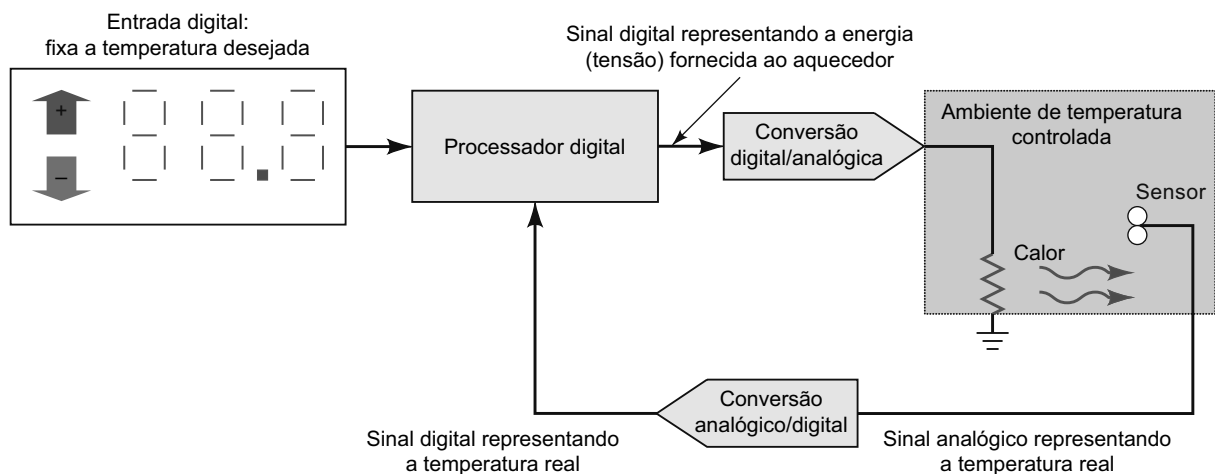
Para obter vantagens das técnicas digitais quando lidamos com entradas e saídas analógicas, quatro passos devem ser seguidos:

1. Converter a variável física em um sinal elétrico (analógico).
2. Converter as entradas elétricas (analógicas) do mundo real no formato digital.
3. Realizar o processamento (operação) da informação digital.
4. Converter as saídas digitais de volta ao formato analógico (o formato do mundo real).

Poderia ser escrito um livro inteiro só sobre o primeiro passo. Há muitos tipos de dispositivos que convertem variáveis físicas em sinais elétricos analógicos (sensores), usados para medir elementos do mundo 'real', analógico. Em um carro,

por exemplo, há sensores para o nível do combustível (tanque da gasolina), temperatura (do ar e do motor), velocidade (velocímetro), aceleração (sensor de desaceleração do airbag), pressão (óleo, coletor de ar) e consumo de combustível.

Para ilustrar um típico sistema que utiliza esse método, a Figura 1.7 mostra um sistema de controle de temperatura. Um usuário move botões para cima ou para baixo para fixar a temperatura desejada em incrementos de  $0,1^{\circ}\text{C}$  (representação digital). Um sensor de temperatura no ambiente aquecido converte a temperatura medida em uma tensão proporcional. Essa tensão analógica é convertida em uma quantidade digital por um **conversor analógico-digital (ADC)**. Esse valor é então comparado ao valor desejado e usado para determinar o valor digital do calor necessário. O valor digital é convertido em uma quantidade analógica (tensão) por um **conversor digital-analógico (DAC)**. Essa tensão é aplicada a um dispositivo de aquecimento, que produzirá uma quantidade de calor proporcional à tensão aplicada e afetará a temperatura do ambiente controlado.



**FIGURA 1.7** Diagrama de um sistema de controle de temperatura de precisão que utiliza processamento digital.

### Questões para revisão

1. Cite três maneiras de uma informação ser codificada usando um sistema digital binário.
2. O que era digital e o que era analógico nos primeiros sistemas telefônicos?
3. O que é digital e o que é analógico nos sistemas de telefones celulares modernos?
4. Quais são as vantagens das técnicas digitais sobre as analógicas?
5. Qual é a principal limitação ao uso de técnicas digitais?

## 1.4 SISTEMAS DE NUMERAÇÃO DIGITAL

Há muitos sistemas de numeração em uso na tecnologia digital. Os mais comuns são os sistemas decimal, binário e hexadecimal. Humanos operam usando números decimais, sistemas digitais operam usando números binários, e o **hexadecimal** é um sistema de numeração que torna mais fácil para humanos lidar com números binários. Os três sistemas de numeração são definidos e funcionam da mesmíssima maneira. Vamos começar examinando o decimal. Por ser tão conhecido, raramente paramos para pensar sobre como este sistema de numeração realmente funciona. Examinar suas características nos ajudará a entender melhor os outros sistemas.

### Sistema decimal

O **sistema decimal** é composto de 10 numerais ou símbolos. São eles: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9; usando esses símbolos como *dígitos* de um número, podemos expressar qualquer quantidade. O sistema decimal, também chamado de sistema de *base 10* por ter dez dígitos, desenvolveu-se naturalmente; afinal, as pessoas possuem dez dedos. De fato, a palavra *dígito* é derivada da palavra ‘dedo’ em latim.

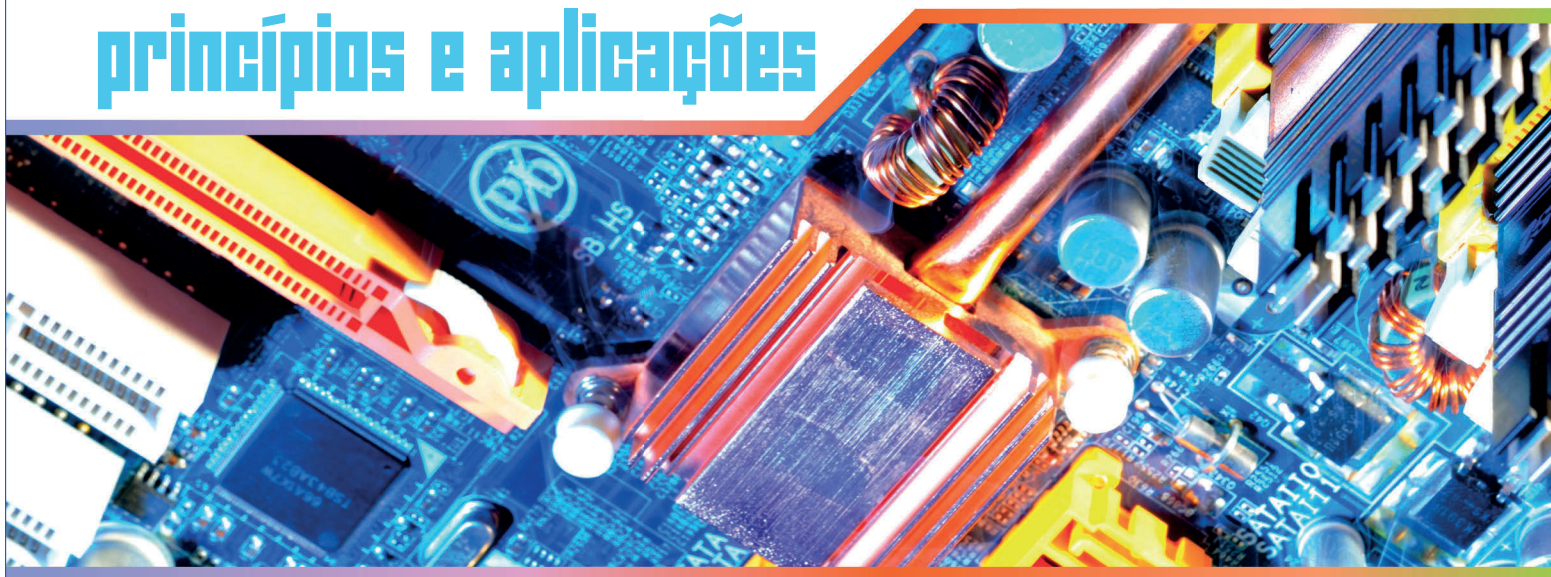
O sistema decimal é um *sistema de valor posicional*, no qual o valor de cada dígito depende de sua posição no número. Por exemplo, considere o número decimal 453. Sabemos que o dígito 4 representa, na verdade, 4 *centenas*, o 5 representa 5 *dezenas* e o 3 representa 3 *unidades*. Em essência, o dígito 4 é o de maior peso entre os três; ele é denominado *dígito mais*

RONALD J. TOCCI  
NEAL S. WIDMER | GREGORY L. MOSS

11ª EDIÇÃO

# SISTEMAS DIGITAIS

princípios e aplicações



ALWAYS LEARNING

PEARSON