

# Tensão e corrente



## Objetivos

- Tomar conhecimento da estrutura atômica básica de condutores como o cobre e o alumínio e compreender por que eles são usados tão extensivamente nessa área.
- Compreender como a tensão terminal de uma bateria ou de qualquer fonte de corrente contínua é estabelecida, e como ela cria um fluxo de carga no sistema.
- Compreender como a corrente é estabelecida em um circuito e como sua magnitude é afetada pela carga que flui no sistema e pelo tempo envolvido.
- Familiarizar-se com os fatores que afetam a tensão terminal de uma bateria e com o tempo que uma bateria vai permanecer efetiva.
- Ser capaz de utilizar um voltímetro e um amperímetro corretamente para medir a tensão e a corrente de um circuito.

## 2.1 INTRODUÇÃO

Agora que a base para o estudo de eletricidade/eletrônica foi estabelecida, os conceitos de tensão e corrente podem ser investigados. O termo **tensão** é encontrado praticamente todos os dias. Nós todos já substituímos baterias em nossas lanternas, secretárias eletrônicas, calculadoras, automóveis, e assim por diante, que tinham especificações de tensão específicas. Temos conhecimento de que a maioria dos aparelhos em nossas casas funciona com tensão de 120 volts. Apesar de **corrente** ser, talvez, um termo menos familiar, sabemos o que acontece quando colocamos muitos aparelhos na mesma saída — a tomada não suporta a corrente excessiva resultante. É relativamente sabido que a corrente é algo que se desloca através dos fios e causa descargas e, possivelmente, fogo, caso ocorra um ‘curto-circuito’. A corrente aquece as serpentinas de um aquecedor elétrico ou a boca de um fogão elétrico; ela gera luz quando passa pelo filamento de uma lâmpada; provoca com o tempo dobras e torceduras no fio de um ferro de passar elétrico; e assim por diante. No fim das contas, os termos *tensão* e *corrente* são parte do vocabulário da maioria dos indivíduos.

Neste capítulo, o impacto básico da corrente e da tensão e as propriedades de cada uma são introduzidos e discutidos de maneira mais aprofundada. Esperamos que quaisquer mistérios acerca das características gerais de cada uma sejam eliminados, e que você compreenda claramente seu impacto em um circuito elétrico/eletrônico.

## 2.2 OS ÁTOMOS E SUA ESTRUTURA

Uma compreensão básica dos conceitos fundamentais de corrente e tensão requer um determinado nível de familiaridade com o átomo e sua estrutura. O átomo mais simples é o de hidrogênio, constituído por duas partículas fundamentais, o **próton** e o **elétron**, nas posições relativas mostradas na Figura 2.1(a). O **núcleo** do átomo de hidrogênio é o próton, uma partícula de carga positiva.

*O elétron em órbita tem carga elétrica negativa, igual em módulo à carga positiva do próton.*

No caso dos átomos de todos os outros elementos, o núcleo também contém **nêutrons**, que têm massa ligeiramente maior do que a dos prótons e não possuem *carga elétrica*. O átomo de hélio, por exemplo, tem dois nêu-

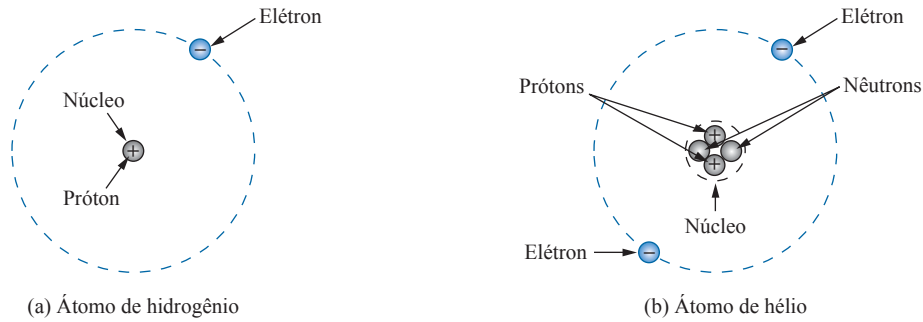


Figura 2.1 Átomos de hidrogênio e de hélio.

trons, além de dois elétrons e dois prótons, como mostra a Figura 2.1(b). Em geral,

*a estrutura atômica de qualquer átomo estável tem um número igual de elétrons e prótons.*

Diferentes átomos têm diversos números de elétrons em órbitas concêntricas chamadas *camadas* em torno do núcleo. A primeira camada, que é a mais próxima do núcleo, pode conter apenas dois elétrons. Se um átomo tem três elétrons, o elétron a mais tem de ser colocado na camada seguinte. O número de elétrons nas camadas seguintes é determinado por  $2n^2$ , onde  $n$  é o número de camadas. Cada camada é então dividida em subcamadas, em que o número de elétrons está limitado a 2, 6, 10 e 14, nessa ordem, na medida em que você se afasta do núcleo.

O **cobre** é o metal mais comumente usado na indústria eletroeletrônica. Um exame de sua estrutura atômica revela por que ele tem uma aplicação tão ampla. Como mostra a Figura 2.2, ele tem 29 elétrons que orbitam em torno do núcleo, com o 29º elétron aparecendo completamente sozinho na 4ª camada. Observe que o número

de elétrons em cada camada e subcamada está como foi definido anteriormente. Há duas questões importantes a serem observadas na Figura 2.2. Primeiro, a 4ª camada, que pode ter um total de  $2n^2 = 2(4)^2 = 32$  elétrons, tem apenas um elétron. A camada mais externa está incompleta e, na realidade, está longe de estar completa, pois ela tem apenas um elétron. Átomos com camadas completas (isto é, com um número de elétrons igual a  $2n^2$ ) são normalmente bastante estáveis. Aqueles átomos com uma pequena porcentagem do número definido para a camada mais exterior são normalmente considerados, de certa maneira, instáveis e voláteis. Depois, o 29º elétron é o elétron mais distante do núcleo. Cargas opostas são atraídas umas para as outras, mas quanto mais distantes elas estiverem, menor será a atração. Na realidade, a força de atração entre o núcleo e o 29º elétron do cobre pode ser determinada pela **lei de Coulomb** desenvolvida por Charles Augustin Coulomb (Figura 2.3) no fim do século XVIII.

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (\text{newtons, N}) \quad (2.1)$$

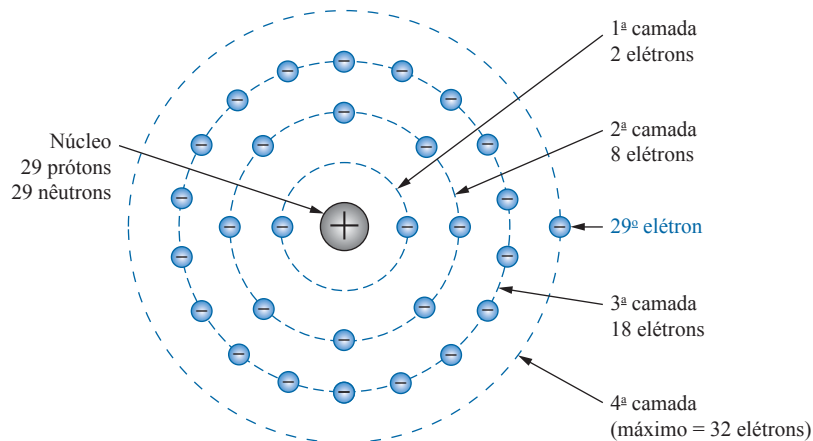


Figura 2.2 Estrutura atômica do cobre.



**Figura 2.3** Charles Augustin Coulomb.  
Cortesia da American Institute of Physics.

**Francês** (Angoulême, Paris)  
**(1736-1806) Cientista e inventor**  
**Engenheiro militar**, Índias Ocidentais.

Foi aluno da Escola de Engenharia de Mézières, a primeira escola desse tipo. Formulou a lei que levou seu nome, *lei de Coulomb*, que define a força entre duas cargas elétricas, força esta que é a principal responsável pelas interações em níveis atômicos. Realizou pesquisas extensas sobre o atrito nas máquinas industriais e em moinhos de vento, e também sobre a elasticidade de metais e fibras de seda.

onde  $F$  se dá em newtons (N),  $k$  = uma constante =  $9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ ,  $Q_1$  e  $Q_2$  são as cargas em coulombs (unidade de medida discutida na próxima seção) e  $r$  é a distância entre as duas cargas em metros.

Nesse ponto, a questão a ser observada é que a distância entre as cargas aparece como um termo ao quadrado no denominador. Primeiro, o fato de que esse termo está no denominador claramente revela que na medida em que ele aumenta, a força vai diminuir. Entretanto, tendo em vista que se trata de um termo quadrado, a força vai cair drasticamente com a distância. Por exemplo, se a distância for dobrada, a força cairá para 1/4, pois  $(2)^2 = 4$ . Se a distância for aumentada em um fator de 4, ela cairá em 1/16, e assim por diante. O resultado, portanto, é o de que a força de atração entre o 29º elétron e o núcleo é significativamente menor do que a força entre um elétron na primeira camada e o núcleo. O resultado é que o 29º elétron está ligado de maneira fraca à estrutura atômica, e com um pouco de pressão de fontes externas poderia ser encorajado a deixar o átomo de origem.

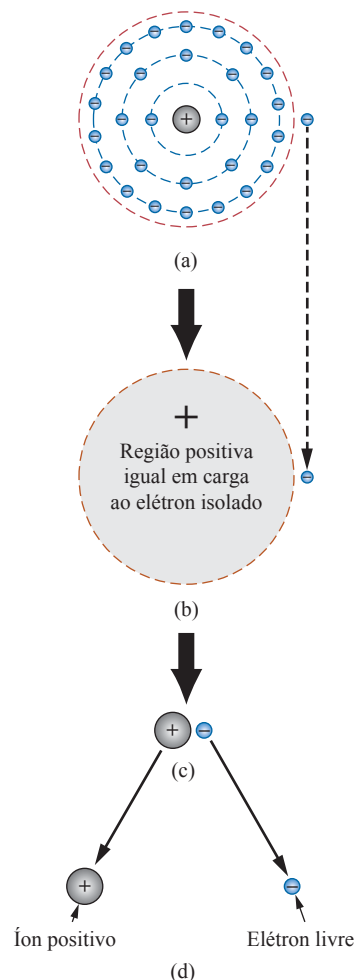
Se esse 29º elétron ganhar energia suficiente do meio externo para deixar o átomo de origem, ele será chamado de **elétron livre**. Em uma polegada cúbica de cobre à temperatura ambiente há aproximadamente  $1,4 \times 10^{24}$  elétrons livres. Expandidos, isso significa 1.400.000.000.000.000.000.000.000 elétrons livres em um uma polegada cúbica. O ponto é que estamos lidando com números enormes de elétrons, quando falamos a respeito do número de elétrons

em um fio de cobre — não apenas aqueles poucos que você poderia contar. Além disso, os números envolvidos são uma evidência clara da necessidade de dominar o uso das potências de dez para representar números e usá-los em cálculos matemáticos.

Outros metais que apresentam as mesmas propriedades do cobre, embora com diferenças quantitativas, são a prata, o ouro, o alumínio e alguns metais mais raros, como o tungstênio. Discussões adicionais sobre condutores e suas características são encontradas nas seções seguintes.

## 2.3 TENSÃO

Se separamos o 29º elétron na Figura 2.2 do resto da estrutura atômica de cobre usando uma linha tracejada, como mostra a Figura 2.4(a), criamos regiões com cargas positivas e negativas líquidas como mostra a Figura 2.4(b) e (c). Na região dentro da fronteira tracejada, o número de prótons no núcleo excede o número de elétrons em órbita por 1, de maneira que a carga líquida é positiva como



**Figura 2.4** Definição do íon positivo.

mostram ambas as figuras. Essa região positiva criada, que separa o elétron livre da estrutura, é chamada de **íon positivo**. Se o elétron livre deixa a proximidade do átomo de origem, como mostra a Figura 2.4(d), regiões de cargas positiva e negativa são estabelecidas.

Essa separação de carga para estabelecer regiões de cargas positiva e negativa é a ação que ocorre em toda bateria. Por meio da ação química, uma pesada concentração de carga positiva (íons positivos) é estabelecida no terminal positivo com uma concentração igualmente pesada de carga negativa (elétrons) no terminal negativo.

Em geral,

*toda fonte de tensão é estabelecida com a simples criação de uma separação de cargas positivas e negativas.*

É simples assim: se você quer criar um nível de tensão de qualquer magnitude, simplesmente estabeleça regiões de cargas positiva e negativa. Quanto maior for a tensão exigida, maior será a quantidade de cargas positiva e negativa.

Na Figura 2.5(a), por exemplo, uma região de carga positiva foi estabelecida por um volume de íons positivos, e uma região de carga negativa, por um número similar de elétrons, separadas por uma distância  $r$ . Tendo em vista que seria irrelevante falar a respeito da tensão estabelecida pela separação de um único elétron, um pacote de elétrons, chamado **coulomb (C)**, de carga foi definido como a seguir:

*Um coulomb de carga é a carga total associada a  $6,242 \times 10^{18}$  elétrons.*

Um coulomb de carga positiva teria a mesma magnitude, mas polaridade oposta.

Na Figura 2.5(b), se levarmos um coulomb de carga negativa para perto da superfície de carga positiva e o movermos na direção da carga negativa, teremos de gastar energia para superar as forças repulsivas da carga

negativa maior e as forças de atração da carga positiva. No processo de deslocar a carga do ponto  $a$  para o ponto  $b$  na Figura 2.5(b):

*se um total de 1 joule (J) de energia é usado para mover a carga negativa de 1 coulomb (C), há uma diferença de 1 volt (V) entre os dois pontos.*

A equação que define esta questão é:

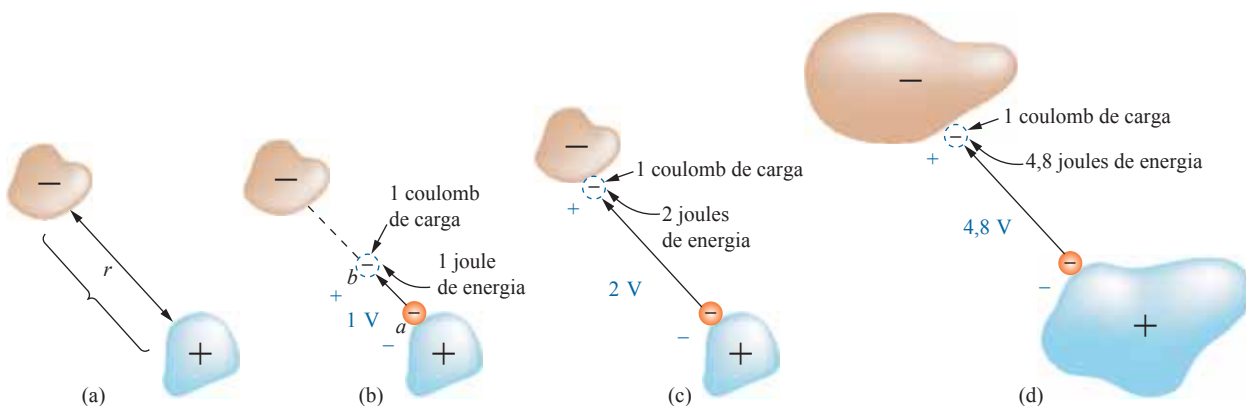
$$V = \frac{W}{Q} \quad \begin{matrix} V = \text{volts (V)} \\ W = \text{joules (J)} \\ Q = \text{coulombs (C)} \end{matrix} \quad (2.2)$$

Observe em particular que a carga é medida em coulombs, a energia em joules e a tensão em volts. A unidade de medida **volt** foi escolhida para honrar os esforços de Alessandro Volta, que demonstrou pela primeira vez que uma tensão poderia ser estabelecida por meio de uma ação química (Figura 2.6).

Se a carga é agora deslocada até a superfície da carga negativa maior, como mostra a Figura 2.5(c), usando 2 J de energia para toda a viagem, há 2 V entre os dois corpos carregados. Se o pacote de cargas positiva e negativa é maior, como mostra a Figura 2.5(d), mais energia terá de ser gasta para superar as forças repulsivas maiores da grande carga negativa e forças atrativas da grande carga positiva. Como mostra a Figura 2.5(d), 4,8 J de energia foram gastos, resultando em uma tensão de 4,8 V entre os dois pontos. Podemos concluir, portanto, que seriam necessários 12 J de energia para mover 1 C de carga negativa do terminal positivo para o terminal negativo de uma bateria de carro de 12 V.

Através de manipulações algébricas, podemos definir uma equação para determinar a energia necessária para mover a carga através de uma diferença de tensão:

$$W = QV \quad (\text{joules, J}) \quad (2.3)$$



**Figura 2.5** Definição da tensão entre dois pontos.



**Figura 2.6** Conde Alessandro Volta.

Cortesia da Coll. Académie nationale de médecine

**Italiano** (Como, Pávia)  
(1745-1827)

**Físico, professor de Física,**  
Pávia, Itália.

Iniciou suas pesquisas em eletricidade aos 18 anos, trabalhando com outros pesquisadores europeus. Sua maior contribuição foi a invenção de uma fonte de energia elétrica que utilizava reações químicas, no ano de 1800. Essa foi a primeira vez que a energia elétrica tornou-se disponível de uma maneira relativamente contínua, podendo ser usada para fins práticos. Desenvolveu o primeiro *condensador*, conhecido hoje como *capacitor*. Foi convidado a ir a Paris para demonstrar a *célula voltaica* para Napoleão. No Congresso Internacional de Eletricidade realizado em Paris em 1881, foi escolhido, em sua homenagem, o nome *volt* para a unidade de força eletromotriz.

Por fim, se queremos saber quanta carga esteve envolvida, usamos:

$$Q = \frac{W}{V} \quad (\text{coulombs, C}) \quad (2.4)$$

### EXEMPLO 2.1

Descubra a tensão entre dois pontos se 60 J de energia são necessários para mover uma carga de 20 C entre esses dois pontos.

Solução:

$$\text{Equação 2.2: } V = \frac{W}{Q} = \frac{60 \text{ J}}{20 \text{ C}} = 3 \text{ V}$$

### EXEMPLO 2.2

Determine a energia que é gasta ao se mover uma carga de 50  $\mu\text{C}$  entre dois pontos quando a tensão entre os pontos é 6 V.

Solução:

Equação 2.3

$$W = QV = (50 \times 10^{-6} \text{ C})(6 \text{ V}) = 300 \times 10^{-6} \text{ J} = 300 \mu\text{J}$$

Existe uma série de maneiras de separar a carga para estabelecer a tensão desejada. A mais comum é a ação química usada em baterias de carros, lanternas e, na realidade, em todas as baterias portáteis. Outras fontes usam métodos mecânicos como geradores de carros e instalações de energia a vapor ou fontes alternativas como células solares e moinhos de vento. No total, entretanto, a única finalidade do sistema é criar uma separação da carga. No futuro, portanto, quando você vir um terminal positivo e um negativo em qualquer tipo de bateria, pode pensar neles como pontos em que uma grande concentração de carga foi reunida para criar uma tensão entre os dois pontos. O mais importante é reconhecer que existe uma tensão entre os dois pontos — para uma bateria entre os terminais positivo e negativo. Ligar apenas o terminal positivo ou o negativo de uma bateria não faria sentido algum.

*Ambos os terminais têm de estar conectados para definir a tensão aplicada.*

Na medida em que movemos 1 C de carga, como mostra a Figura 2.5(b), a energia gasta depende de onde estamos no deslocamento da carga. A *posição* da carga é, portanto, um fator na determinação do nível de tensão em cada ponto do deslocamento. Tendo em vista que a **energia potencial** associada a um corpo é definida por sua posição, o termo *potencial* é frequentemente aplicado na definição de níveis de tensão. Por exemplo, a diferença em potencial é de 4 V entre os dois pontos, ou a **diferença potencial** entre um ponto e o chão é de 12 V, e assim por diante.

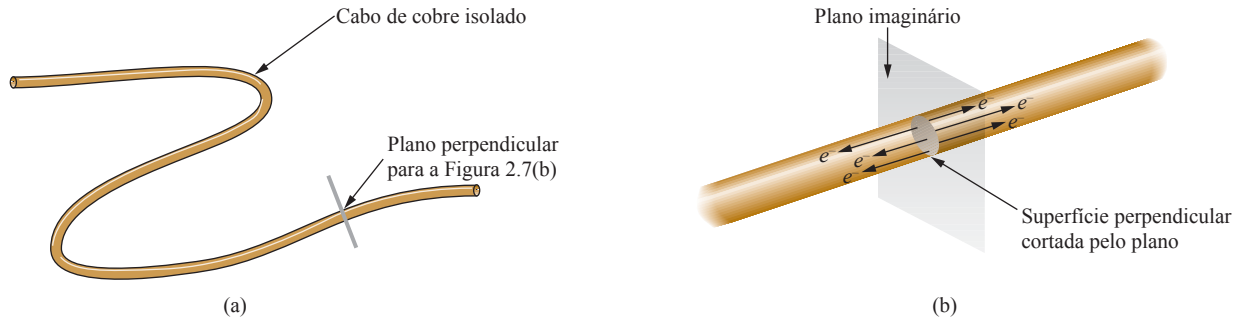
## 2.4 CORRENTE

A questão ‘O que veio primeiro, a galinha ou o ovo?’ também pode ser aplicada aqui porque o leigo tem a tendência de trocar o termo *corrente* pelo termo *tensão*, como se ambos fossem fontes de energia. Já é hora de acabar com essa confusão:

*A tensão aplicada é o mecanismo de partida; a corrente é uma reação à tensão aplicada.*

Na Figura 2.7(a), um fio de cobre está isolado em um banco de laboratório. Se cortássemos o cabo com um plano perpendicular imaginário, produzindo o corte transversal circular mostrado na Figura 2.7(b), ficaríamos surpresos ao descobrir que há elétrons livres cruzando a superfície em ambas as direções. Esses elétrons livres gerados em temperatura ambiente estão em movimento constante em direções aleatórias. Entretanto, em qualquer instante no tempo, o número de elétrons cruzando o plano imaginário em uma direção é exatamente igual ao número de elétrons cruzando na direção oposta, de maneira que o *fluxo líquido em qualquer direção específica é zero*. Mesmo que o cabo

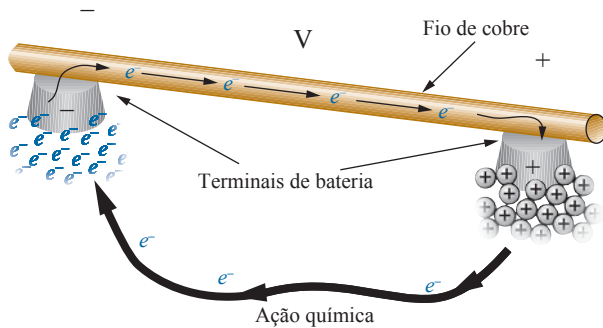




**Figura 2.7** Há um movimento de condutores livres em uma parte isolada do cabo de cobre, mas o fluxo de carga não consegue ter uma direção em particular.

pareça morto para o mundo, sozinho sobre um banco, internamente ele é bastante ativo. Isso seria verdadeiro para qualquer outro bom condutor.

Bem, para fazer com que esse fluxo de elétrons trabalhe para nós, precisamos lhe dar uma direção, e ser capazes de controlar sua magnitude. Isso é conseguido por meio da simples aplicação de uma tensão por meio do cabo para fazer com que os elétrons se desloquem na direção do terminal positivo da bateria, como mostra a Figura 2.8. No instante em que o fio é colocado transversalmente entre os terminais, os elétrons livres no fio se deslocam na direção do terminal positivo. Os íons positivos no fio de cobre simplesmente oscilam em uma posição fixa média. Na medida em que os elétrons passam através do fio, o terminal negativo da bateria atua como um suprimento adicional de elétrons para manter o processo ativo. Os elétrons que chegam ao terminal positivo são absorvidos e, por meio da ação química da bateria, elétrons adicionais são depositados no terminal negativo para compensar aqueles que partiram.

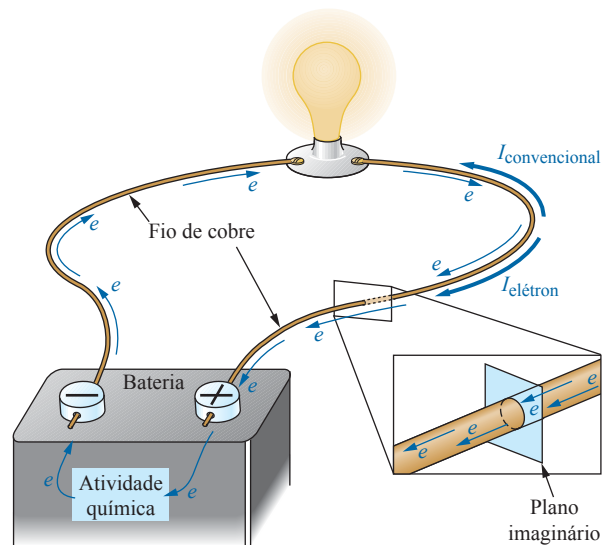


**Figura 2.8** Movimento de elétrons carregados negativamente em um fio de cobre quando colocados transversalmente entre os terminais de uma bateria com uma diferença no potencial de volts (V).

Para avançar mais um passo no processo, considere a configuração da Figura 2.9, em que um fio de cobre foi usado para conectar uma lâmpada a uma bateria para criar o circuito elétrico mais simples possível. A partir do instante em que a última conexão é realizada, os elétrons livres (de carga negativa) são atraídos pelo terminal positivo, enquanto os íons positivos resultantes no fio de cobre simplesmente oscilam em uma posição fixa média. O fluxo de carga (elétrons) através da lâmpada provocará o aquecimento do filamento através da fricção até que ele fique incandescente, emitindo assim a luz desejada.

No total, portanto, a tensão aplicada estabeleceu um fluxo de elétrons em uma direção em particular. Na realidade, por definição

*se  $6,242 \times 10^{18}$  elétrons (1 coulomb) passam através do plano imaginário na Figura 2.9 em 1 segundo, diz-se que o fluxo de carga, ou corrente, é de 1 ampère (A).*



**Figura 2.9** Circuito elétrico básico.

A unidade de medida de corrente, **ampère**, foi escolhida para honrar os esforços de André Ampère no estudo da eletricidade em movimento (Figura 2.10).

Usando o coulomb como unidade de carga, podemos determinar a corrente em ampères a partir da equação a seguir:

$$I = \frac{Q}{t} \quad \begin{array}{l} I = \text{ampères (A)} \\ Q = \text{coulombs (C)} \\ t = \text{tempo (s)} \end{array} \quad (2.5)$$

A letra maiúscula  $I$  foi escolhida a partir da palavra francesa para corrente: *intensité*. A abreviação no sistema SI para cada quantidade, na Equação 2.5, é mostrada à direita da equação. Essa equação revela claramente que, para intervalos de tempos iguais, quanto maior a carga que atravessar o fio, maior será a corrente resultante.

Por meio de manipulações algébricas, as outras duas grandezas podem ser determinadas da seguinte forma:

$$Q = It \quad (\text{coulombs, C}) \quad (2.6)$$

e

$$t = \frac{Q}{I} \quad (\text{segundos, s}) \quad (2.7)$$



**Figura 2.10** André Marie Ampère.  
Cortesia da Smithsonian Institute Library

**Francês** (Lyon, Paris)  
**(1775-1836)**

**Matemático e físico, professor de Matemática,**  
École Polytechnique de Paris.

Em 18 de setembro de 1820, ele introduziu um novo campo de estudos, denominado eletrodinâmica, voltado ao estudo dos efeitos causados por cargas elétricas em movimento, incluindo a interação entre condutores percorridos por correntes e os campos magnéticos adjacentes. Construiu o primeiro *solenóide* e demonstrou que ele se comportava como um ímã (o primeiro *eletroímã*). Sugeriu o nome *galvanômetro* para um instrumento destinado a medir a intensidade de uma corrente.

### EXEMPLO 2.3

A carga que atravessa, a cada 64 ms, a superfície imaginária, vista na Figura 2.9, é 0,16 C. Determine a corrente em ampères.

Solução:

Equação 2.5:

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{0,16 \text{ C}}{64 \times 10^{-3} \text{ s}} = \frac{160 \times 10^{-3} \text{ C}}{64 \times 10^{-3} \text{ s}} = \mathbf{2,50 \text{ A}}$$

### EXEMPLO 2.4

Determine o tempo necessário para que  $4 \times 10^{16}$  elétrons atravessem a superfície imaginária, vista na Figura 2.9, caso a corrente seja 5 mA.

Solução:

Determine a carga em coulombs:

$$4 \times 10^{16} \text{ elétrons} \left( \frac{1 \text{ C}}{6,242 \times 10^{18} \text{ elétrons}} \right) = 0,641 \times 10^{-2} \text{ C} = 6,41 \text{ mC}$$

$$\text{Equação 2.7: } t = \frac{Q}{I} = \frac{6,41 \times 10^{-3} \text{ C}}{5 \times 10^{-3} \text{ A}} = \mathbf{1,28 \text{ s}}$$

Em resumo, portanto,

*a tensão aplicada (ou diferença potencial) em um sistema elétrico/eletrônico é a 'pressão' para colocar o sistema em movimento, e a corrente é a reação a essa pressão.*

Uma analogia mecânica seguidamente usada para explicar isso é a simples mangueira de jardim. Na ausência de qualquer pressão, a água fica parada na mangueira sem uma direção geral, da mesma maneira que os elétrons não têm uma direção comum na ausência de uma tensão aplicada. Entretanto, abra a torneira e a pressão aplicada forçará a água a fluir pela mangueira. Similarmente, aplique uma tensão a um circuito, e isso resultará em um fluxo de carga ou corrente.

Observando novamente a Figura 2.9, vemos que foram indicados dois sentidos para o escoamento de carga. Um deles é denominado *sentido convencional*; o outro, *sentido eletrônico*. Neste livro, utilizaremos somente o sentido convencional por várias razões, incluindo o fato de que é o mais usado em instituições de ensino e na indústria, além de ser empregado na representação simbólica de todos os componentes eletrônicos e ser escolhido pela grande maioria dos pacotes de software educacionais. A controvérsia sobre o sentido da corrente é resultado de se ter considerado, na época em que a eletricidade foi descoberta, que as partículas móveis nos condutores metálicos tivessem carga positiva. Saiba que a escolha do sentido convencional não criará grandes dificuldades ou confusões

nos capítulos seguintes, pois uma vez que a direção de  $I$  esteja estabelecida, a questão estará encerrada, e a análise poderá continuar sem confusões.

## Considerações de segurança

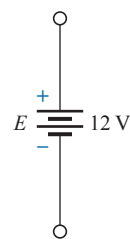
É importante compreender que mesmo a passagem de correntes relativamente pequenas através do corpo humano pode ser muito perigosa e causar sérios danos ao organismo. Resultados experimentais revelam que o corpo humano começa a reagir a correntes de apenas uns poucos miliampères. Embora algumas pessoas suportem correntes em torno de 10 mA durante pequenos intervalos de tempo sem efeitos graves, qualquer corrente acima de 10 mA deve ser considerada perigosa. Na verdade, correntes de 50 mA podem provocar um grave choque elétrico, e correntes acima de 100 mA podem ser fatais. Na maioria dos casos, a resistência da pele do corpo, quando está seca, é alta o bastante para limitar a corrente através do corpo em níveis relativamente seguros para os graus de tensão normalmente encontrados nas residências. Entretanto, quando a pele está úmida por causa de transpiração ou água do banho, ou quando há um ferimento, sua resistência diminui drasticamente, e os níveis de corrente podem subir e ser perigosos para a mesma tensão. Portanto, em geral, lembre-se simplesmente de que *água e eletricidade não se misturam*. Existem, atualmente, dispositivos de segurança para uso doméstico (por exemplo, o interruptor de corrente por falha no aterramento, que será estudado no Capítulo 4) que são projetados para serem usados especificamente em áreas úmidas como o banheiro e a cozinha; no entanto, acidentes acontecem. Trate a eletricidade com respeito, e não com medo.

## 2.5 FONTES DE TENSÃO

O termo **CC**, usado neste livro, é uma abreviação para **corrente contínua** (em inglês *direct current, dc*), que engloba os diversos sistemas elétricos nos quais há um sentido de cargas unidirecional (uma direção). Esta seção aborda fontes de tensão CC que aplicam uma tensão fixa a sistemas eletroeletrônicos.

O símbolo gráfico para todas as fontes de tensão CC é mostrado na Figura 2.11. Observe que o comprimento relativo das barras em cada extremidade define a polaridade da fonte de tensão. A barra longa representa o lado positivo; a barra curta, o negativo. Observe também o uso da letra  $E$  para denotar *fonte de tensão*. Isso ocorre porque

*uma força eletromotriz é uma força que estabelece o sentido de carga (ou corrente) em um sistema devido à aplicação de uma diferença em potencial.*



**Figura 2.11** Símbolo-padrão de uma fonte de tensão CC.

Em geral, fontes de tensão CC podem ser divididas em três tipos básicos: (1) baterias (reação química ou energia solar), (2) geradores (eletromecânica) e (3) fontes de alimentação (retificação, um processo de conversão a ser descrito em seus cursos de eletrônica).

## Baterias

**Informações gerais.** Para um leigo, a bateria é a fonte CC mais comum. Por definição, uma bateria (nome derivado da expressão ‘bateria de células’) consiste de uma combinação de duas ou mais **células** similares, sendo que uma célula é a unidade fundamental de geração de energia elétrica pela conversão de energia química ou solar. Todas as células podem ser classificadas como **primárias** ou **secundárias**. A célula secundária é recarregável, enquanto a primária não pode ser recarregada. Ou seja, a reação química que ocorre no interior da célula secundária é reversível, o que torna possível restaurar sua carga. Os dois tipos mais comuns de baterias recarregáveis são as baterias de chumbo-ácido (usadas principalmente em automóveis) e as baterias de níquel-hidreto metálico (Ni-HM), usadas em calculadoras, ferramentas portáteis, flashes de máquinas fotográficas, barbeadores elétricos portáteis etc. A vantagem óbvia da célula recarregável é a economia de tempo e dinheiro ao não ter que substituir frequentemente as células primárias.

Todas as células mencionadas neste capítulo, exceto a **célula solar**, que absorve energia dos fótons da luz incidente, estabelecem uma diferença de potencial entre seus terminais à custa de energia química. Além disso, todas têm *eletrodos* positivo e negativo, bem como um **eletrólito**, que é uma substância que completa o circuito entre os eletrodos no interior da bateria. O eletrólito é o elemento de contato e a fonte de íons para a condução entre os terminais.

**Células primárias (não recarregáveis).** A popular bateria alcalina primária possui um ânodo (+) de zinco pulverizado, um eletrólito de hidróxido de potássio (metal alcalino) e um cátodo (-) de carbono e dióxido de manganês, conforme ilustra a Figura 2.12(a). Na Figura 2.12(b), observe que, para os tipos cilíndricos (AAA, AA,





**Figura 2.12** Célula alcalina primária: (a) vista em corte de uma célula alcalina cilíndrica; (b) vários tipos de células primárias. (© Cortesia de (a) Hamera/Getty Images; (b) iStockphotos/Getty Images)

C e D), a tensão é a mesma, mas a especificação ampère-hora (Ah) aumenta significativamente com o tamanho. A especificação ampère-hora é uma especificação do nível de corrente que uma bateria pode fornecer por um período específico de tempo (a ser discutido em detalhes na Seção 2.6). Em particular, observe que em uma bateria grande, do tipo usado em lanternas, a tensão é apenas quatro vezes aquela da bateria AAA, mas a especificação ampère-hora de 52 Ah é quase 42 vezes àquela da bateria AAA.

Outro tipo de célula primária popular é a bateria de lítio, mostrada na Figura 2.13. Novamente, observe que a tensão é a mesma para todas elas, mas o tamanho aumenta substancialmente com a especificação ampère-hora e a corrente drenada padrão. Ela é particularmente útil em baixas temperaturas.

Em geral, portanto,

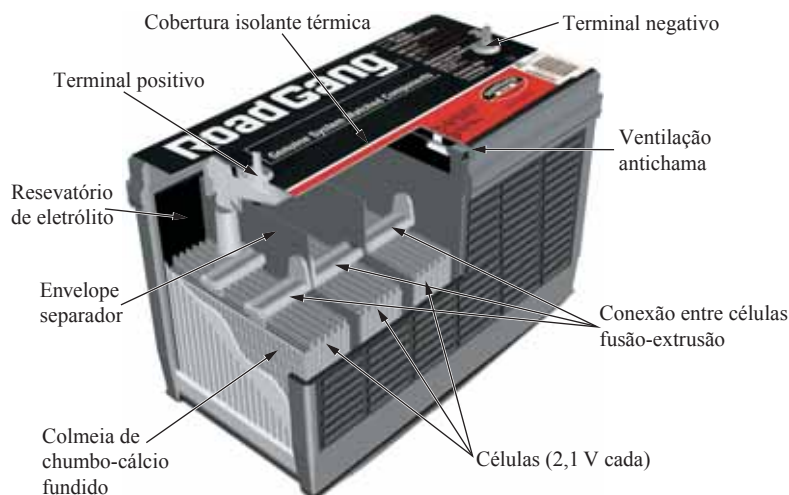
*para baterias do mesmo tipo, o tamanho é ditado fundamentalmente pela corrente drenada padrão ou pela especificação ampère-hora, não pela especificação de tensão terminal.*

**Células secundárias (recarregáveis)**

**Bateria de chumbo-ácido:** a bateria de 12 V que aparece na Figura 2.14, tipicamente usada em automóveis, possui um eletrólito de ácido sulfúrico, e eletrodos de chumbo esponjoso (Pb) e de peróxido de chumbo (PbO<sub>2</sub>). Quando uma carga é conectada aos terminais da bateria, existe uma transferência de elétrons do eletrodo de chumbo esponjoso para o de peróxido de chumbo através da carga. Essa transferência de elétrons continua até que a bateria esteja completamente descarregada. O tempo de descarga é determinado pelo grau de diluição do ácido sulfúrico e



**Figura 2.13** Baterias primárias de lítio.



**Figura 2.14** Bateria de chumbo-ácido de 12 V (na realidade 12,6 V) que não necessita de manutenção. (Cortesia da Remy, International, Inc.)

também pela quantidade de sulfato de chumbo depositada em cada placa. O estado de uma célula de chumbo pode ser determinado por meio da medição da densidade relativa do eletrólito usando-se um densímetro. O peso específico de uma substância é definido como seu peso por unidade de volume comparado com o peso por unidade de volume da água a 4°C. Para baterias completamente carregadas, o peso específico deve estar entre 1,28 e 1,30. Quando esse valor cai para cerca de 1,1, a bateria deve ser recarregada.

Como uma célula de chumbo é secundária, ela pode ser recarregada, qualquer que seja seu estado de descarga, pela simples conexão de uma **fonte de corrente CC** externa que force a passagem de corrente através da bateria em sentido oposto ao da corrente que percorre a carga. Isso removerá o sulfato de chumbo das placas da bateria restaurando a concentração de ácido sulfúrico.

A tensão de saída de uma célula de chumbo durante a maior parte do processo de descarga gira em torno de 2,1 V. As baterias comerciais usadas em automóveis têm em geral seis células em série, como ilustra a Figura 2.14, podendo assim fornecer uma tensão de 12,6 V. Em geral, as baterias de chumbo-ácido são usadas em situações em que são necessárias altas correntes durante períodos relativamente curtos de tempo. Houve uma época em que todas as baterias de chumbo-ácido possuíam respiradouro. Os gases criados durante o ciclo de descarga podiam escapar, e as aberturas dos respiradouros permitiam a substituição da água e do eletrólito, além do teste da concentração de ácido usando-se um densímetro. O uso de uma colmeia construída com uma liga forjada de chumbo e cálcio em vez da colmeia fundida de chumbo e antimônio usada anteriormente possibilitou o aparecimento de baterias que não precisavam de manutenção, como a que é mostrada na

Figura 2.14. A estrutura de chumbo-antimônio estava sujeita a corrosão, sobrecarga, desgaste ocasionado pelos gases e pela água e descarga espontânea. Um projeto aperfeiçoado que utilizava a colmeia de chumbo-cálcio eliminou ou reduziu substancialmente a maior parte desses problemas.

Parecia que com tantos avanços em tecnologia, o tamanho e o peso da bateria de chumbo-ácido seriam reduzidos significativamente em anos recentes, mas mesmo hoje ela é usada mais do que qualquer outra bateria em automóveis e em todos os tipos de máquinas. Entretanto, as coisas estão começando a mudar com o interesse em baterias de níquel-hidreto metálico e de íon de lítio, ambas contendo mais energia por tamanho de unidade do que a de chumbo-ácido. Ambas serão descritas nas seções a seguir.

**Bateria de níquel-hidreto metálico (Ni-HM):** a bateria recarregável de níquel-hidreto metálico (Ni-HM) tem atraído enorme atenção e passado por um grande desenvolvimento nos últimos anos. Em 2008, a Toyota anunciou que o Toyota Prius e dois outros híbridos usariam baterias NiMH, em vez das variações de chumbo-ácido. Para aplicações como flashes, barbeadores a pilha, televisores portáteis, ferramentas e outros, baterias recarregáveis como as de níquel-hidreto metálico (Ni-HM), mostradas na Figura 2.15, são frequentemente equipamentos escolhidos. Essas baterias são tão bem produzidas que podem sobreviver mais de 1.000 ciclos de carga/descarga em uma vida útil que pode durar anos.

É importante saber que, quando a bateria Ni-HM for a mais apropriada para um aparelho, não devemos utilizar células primárias (não recarregáveis). Muitos desses aparelhos possuem um circuito interno de recarga cujo funcionamento fica prejudicado se os alimentarmos com células primárias. Além disso, todas as baterias de Ni-HM



**Figura 2.15** Baterias recarregáveis de níquel-hidreto metálico (Ni-HM). (Cortesia da Gaby Kooijman/ Shutterstock)

são de 1,2 V por célula, enquanto a grande maioria das células primárias é de 1,5 V.

Há divergências em relação à frequência com que uma célula secundária deve ser recarregada. Na maioria dos casos, a bateria pode ser usada até que haja alguma especificação de que o nível de energia está baixo (bateria ‘fraca’), por exemplo, a luz de uma lanterna pouco intensa, o mau desempenho de uma ferramenta ou o piscar de advertência de uma pequena lâmpada que costuma ser instalada em alguns equipamentos. Tenha sempre em mente que as células secundárias têm certa ‘memória’. Se elas forem recarregadas continuamente após serem usadas por curtos períodos de tempo, podem começar a acreditar que são unidades de curta duração, e passar a não manter mais sua carga em níveis aceitáveis durante o período de tempo especificado pelo fabricante. Em todo caso, tente sempre evitar que a bateria fique quase ‘completamente’ descarregada, que acontece quando toda a energia é drenada da célula. Após vários ciclos de carga e descarga com a bateria nesse estado, sua vida útil fica reduzida. Finalmente, o mecanismo de carga para as células de níquel-cádmio é bastante diferente daquele utilizado em baterias de chumbo-ácido. As baterias de níquel-cádmio são carregadas utilizando-se uma fonte de corrente constante, com a tensão nos terminais permanecendo praticamente constante durante todo o ciclo de carga. A bateria de chumbo-ácido é carregada por uma fonte de tensão constante, enquanto a corrente varia de acordo com o estado da bateria. A capacidade de uma bateria Ni-HM aumenta de modo quase linear durante praticamente todo o ciclo de carga. Baterias de níquel-cádmio ficam relativamente quentes durante o processo de carga. Quanto mais baixa estiver a quantidade de carga da bateria durante o processo, maior sua temperatura. À medida que sua carga se aproxima do valor especificado, a temperatura da célula se aproxima da temperatura ambiente.

**Bateria de íon de lítio:** a bateria que tem recebido mais pesquisa e desenvolvimento nos últimos anos é a bateria de íon de lítio. Ela carrega mais energia em um espaço menor do que ambas as baterias recarregáveis de chumbo-ácido e Ni-HM. Suas características positivas são tão interessantes que, uma vez que tenham sido canalizadas de maneira apropriada, com segurança e eficiência e a um preço razoável, poderão varrer do mercado as outras baterias. Entretanto, por ora, ela é usada extensivamente em aplicações menores como computadores, uma série de produtos de consumo e, recentemente, em ferramentas. Ainda há um longo caminho a percorrer até que ela seja utilizada amplamente pela indústria automobilística. O Chevrolet Volt, um carro conceitual híbrido *plug-in* da General Motors, utiliza uma bateria de íon de lítio, mas é limitado a uma autonomia de 64 km, e então é preciso usar um pequeno motor a gasolina. O moderno estradeiro Tesla, com sua bateria de mais de 6.800 células de íon de lítio, pode rodar em torno de 400 km, mas usa um conjunto de baterias que custa entre US\$ 10.000 e US\$ 15.000. Outro problema é a ‘vida de prateleira’. Uma vez produzidas, essas baterias começam a morrer lentamente apesar de poderem passar por ciclos normais de carga/descarga, o que as torna parecidas com uma célula primária normal, então, o ciclo de vida útil é uma grande preocupação. Você talvez se lembre dos laptops em chamas em 2006 e da necessidade da Sony fazer um *recall* de algo em torno de 6 milhões de computadores. A fonte do problema era a bateria de íon de lítio, que simplesmente superaquecia; a pressão se intensificava e ocorria uma explosão. Isso ocorria devido a impurezas no eletrólito que impediam os íons de lítio de se mover de um lado da câmara da bateria para o outro. Desde então, esse problema foi corrigido, e baterias de íon de lítio, como a que aparece na Figura 2.16, são usadas quase exclusivamente em laptops.



**Figura 2.16** Bateria de íon de lítio de um laptop da Dell: 11,1 V, 4.400 mAh.

### Células solares

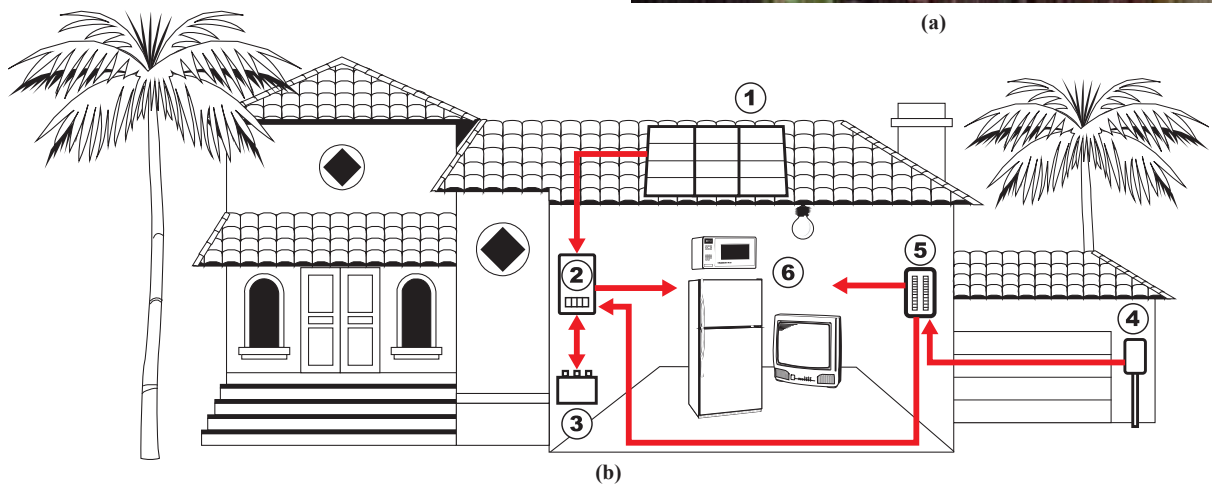
O uso de células solares como parte do esforço para gerar energia ‘limpa’ cresceu exponencialmente nos últimos anos. Em uma determinada época, o custo e as baixas eficiências de conversão eram os principais empecilhos para o uso amplo da célula solar. Entretanto, a empresa Nanosolar reduziu significativamente o custo de painéis solares utilizando um processo de impressão que necessita muito menos do caro material de silicone no processo de manufatura. Levando em conta que o custo de geração de eletricidade solar gira em torno de 20 a 30 centavos de dólar/kW, comparado a uma média de 11 centavos de dólar/kW de uma companhia de energia elétrica local, esse novo processo de impressão terá um impacto significativo sobre a redução de custos. Outro fator que reduzirá custos é a melhoria no nível de eficiência obtido pelos fabricantes. Em uma determinada época, o nível de conversão aceito era de 10 a 14 por cento. Recentemente, entretanto, um nível de eficiência de conversão de quase 20 por cento foi obtido em laboratório, e alguns acreditam que uma eficiência de 30 a 60 por cento será uma possibilidade no futuro. Levando em consideração que a potência gerada em um dia claro e ensolarado médio é  $100 \text{ mW/cm}^2$ , a eficiência é um elemento importante em quaisquer planos futuros

de expansão da energia solar. A uma eficiência de 10 a 14 por cento, a energia disponível máxima por  $\text{cm}^2$  seria de apenas 10 a 14 mW. Para  $1 \text{ m}^2$ , o retorno seria de 100 a 140 W. Entretanto, se a eficiência pudesse ser aumentada para 20 por cento, a produção seria significativamente mais alta, 200 W para o painel de  $1 \text{ m}^2$ .

A unidade de três painéis solares relativamente pequena que aparece no teto da garagem da casa da Figura 2.17(a) pode proporcionar uma fonte de energia de 550 watt/hora (a unidade de medida watt/hora para energia será discutida em detalhes no Capítulo 4). Uma unidade como essa pode fornecer energia elétrica suficiente para fazer funcionar uma geladeira com consumo eficiente de energia por 24 horas por dia, enquanto simultaneamente fornece energia suficiente para uma TV colorida por 7 horas, um forno micro-ondas por 15 minutos, uma lâmpada de 60 W por 10 horas e um relógio elétrico por 10 horas. O sistema básico opera como mostra a Figura 2.17(b). Os painéis solares (1) convertem luz do sol em energia elétrica CC. Um inversor (2) converte a energia CC em



(a)



(b)

**Figura 2.17** Sistema solar: (a) painéis no teto da garagem; (b) operação do sistema. (Cortesia da SolarDirect.com.)



energia CA padrão para uso na casa (6). As baterias (3) podem armazenar energia do sol para uso se houver luz solar insuficiente ou uma queda de energia. À noite ou em dias escuros, quando a demanda excede o painel solar e a energia armazenada na bateria, a companhia de energia elétrica local (4) pode fornecer energia para os aparelhos domésticos (6) através de uma instalação especial no painel elétrico (5). Apesar de haver um gasto inicial para instalar o sistema, é vitalmente importante dar-se conta de que a fonte de energia é gratuita — não há uma conta mensal de luz do sol para pagar — e vai fornecer uma quantidade de energia significativa por um período muito longo de tempo.

### Geradores

O **gerador CC** é bastante diferente da bateria, tanto na construção quanto no modo de operação (Figura 2.18). Quando o eixo do gerador gira na velocidade nominal em função de um torque aplicado por alguma fonte externa de energia mecânica, o valor nominal de tensão aparece em seus terminais. A tensão e a capacidade de potência de um gerador CC são normalmente bem maiores do que a da maioria das baterias, e sua vida útil é determinada apenas por sua construção. Os geradores CC comerciais mais usados são os de 120 e 240 V. Conforme mencionado anteriormente nesta seção, para os propósitos deste livro

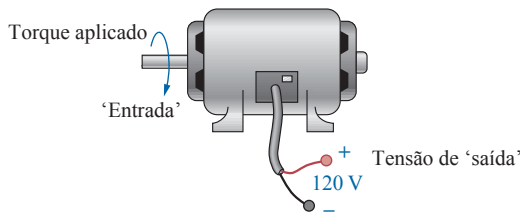


Figura 2.18 Gerador CC.

não faremos nenhuma distinção entre os símbolos de uma bateria e de um gerador.

### Fontes de alimentação

A fonte de corrente contínua mais comum nos laboratórios usa os processos de **retificação** e **filtragem**, procurando obter uma tensão CC estável. Esses dois processos serão estudados em detalhes no curso básico de eletrônica. Em resumo, uma tensão que varia no tempo (como uma tensão CA de uma tomada elétrica residencial) é convertida em uma tensão de magnitude fixa. Uma fonte CC de laboratório desse tipo é mostrada na Figura 2.19.

Muitas das fontes CC de laboratório possuem três terminais de saída, fornecendo uma tensão ajustável e regulada, como indicado horizontalmente na parte de baixo da Figura 2.19 e verticalmente na Figura 2.20(a). O símbolo para GND ou potencial zero (a referência) também é mostrado na Figura 2.20(a). Se desejarmos uma tensão de saída de 10 V acima da referência (GND), as ligações devem ser feitas conforme mostra a Figura 2.20(b). Se desejarmos uma tensão de 15 V abaixo do potencial GND, então as ligações devem ser feitas conforme a Fi-



Figura 2.19 Fonte CC de alimentação digital de 0 a 60 V, 0 a 1,5 A. (Cortesia de Fotosenmeer/Shutterstock.)

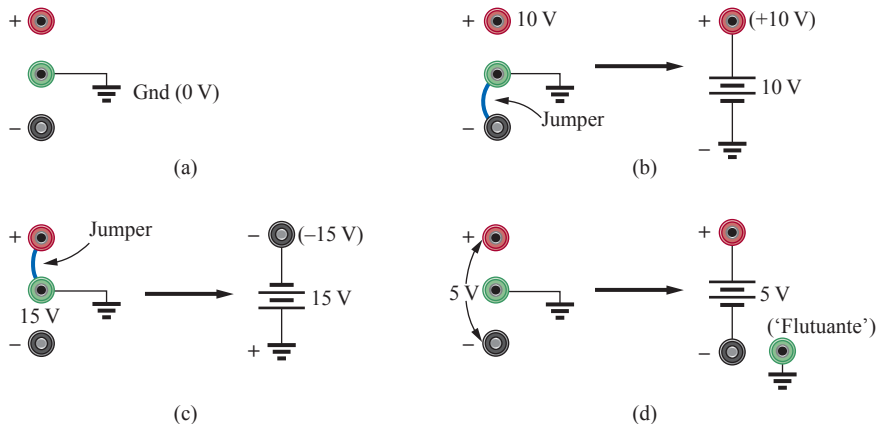


Figura 2.20 Fontes de alimentação CC utilizadas em laboratórios: (a) terminais disponíveis; (b) tensão positiva em relação a GND; (c) tensão negativa com relação a GND; (d) fonte flutuante.



gura 2.20(c). Se ligarmos as conexões conforme a Figura 2.20(d), dizemos que temos uma tensão de 5 V ‘flutuante’, pois as ligações não incluem o nível de referência. Raramente se usa a configuração mostrada na Figura 2.20(d), já que o operador fica desprotegido porque ela não apresenta uma ligação direta e de baixa resistência para GND. Além disso, não há um nível de referência comum para todo o sistema. De qualquer modo, *os terminais positivos e os negativos devem aparecer em qualquer configuração dos circuitos.*

### Células combustíveis

Um dos desenvolvimentos mais interessantes em anos recentes tem sido o crescente interesse em **células combustíveis** como fonte de energia alternativa. Células combustíveis estão sendo usadas em pequenas usinas geradoras de energia, transporte (ônibus) e em uma ampla gama de aplicações em que a portabilidade é um fator importante, como em um ônibus espacial. Milhões estão sendo gastos por grandes fabricantes de automóveis para produzir veículos de células combustíveis a preços acessíveis.

Células combustíveis têm uma vantagem distinta de operar a eficiências de 70 a 80 por cento em vez da eficiência típica de 20 a 25 por cento dos motores de combustão interna dos automóveis atuais. Elas também não têm peças móveis, produzem pouca ou nenhuma poluição, geram muito pouco ruído e usam combustíveis como o hidrogênio e o oxigênio, que estão prontamente disponíveis. Células combustíveis são consideradas células primárias (da variedade de alimentação contínua) porque elas não podem ser recarregadas. Elas manterão suas características enquanto o combustível (hidrogênio) e o oxigênio sejam

fornecidos à célula. Os únicos subprodutos do processo de conversão são pequenos montantes de calor (que são frequentemente utilizados em outro lugar no projeto do sistema), água (que também pode ser reutilizada) e níveis desprezíveis de alguns óxidos, dependendo dos componentes do processo. Como um todo, células combustíveis são ambientalmente corretas.

A operação da célula combustível é essencialmente oposta àquela do processo químico da eletrólise. A eletrólise é o processo por meio do qual a corrente elétrica é passada através de um eletrólito para decompô-lo em seus componentes fundamentais. Um eletrólito é qualquer solução que permite a condução através do movimento de íons entre eletrodos adjacentes. Por exemplo, a corrente que passa pela água resulta em um gás hidrogênio junto ao cátodo (terminal negativo) e gás oxigênio no ânodo (terminal positivo). Em 1839, Sir William Grove acreditou que esse processo poderia ser revertido, e demonstrou que a aplicação apropriada do gás hidrogênio e do oxigênio resultava em uma corrente através de uma carga aplicada conectada aos eletrodos do sistema. A primeira unidade comercial foi usada em um trator em 1959, seguida por um *energy pack* no programa Gemini de 1965. Em 1966, a primeira pequena usina de energia foi projetada, e hoje ela é um componente importante do programa de ônibus espaciais.

Os componentes básicos de uma célula combustível são descritos na Figura 2.21(a), e os detalhes da construção estão na Figura 2.21(b). O gás hidrogênio (o combustível) é fornecido ao sistema a uma taxa proporcional à corrente exigida pela carga. Na extremidade oposta da célula, o oxigênio é fornecido na medida do necessário. O resultado líquido é um fluxo de elétrons através da carga e uma des-

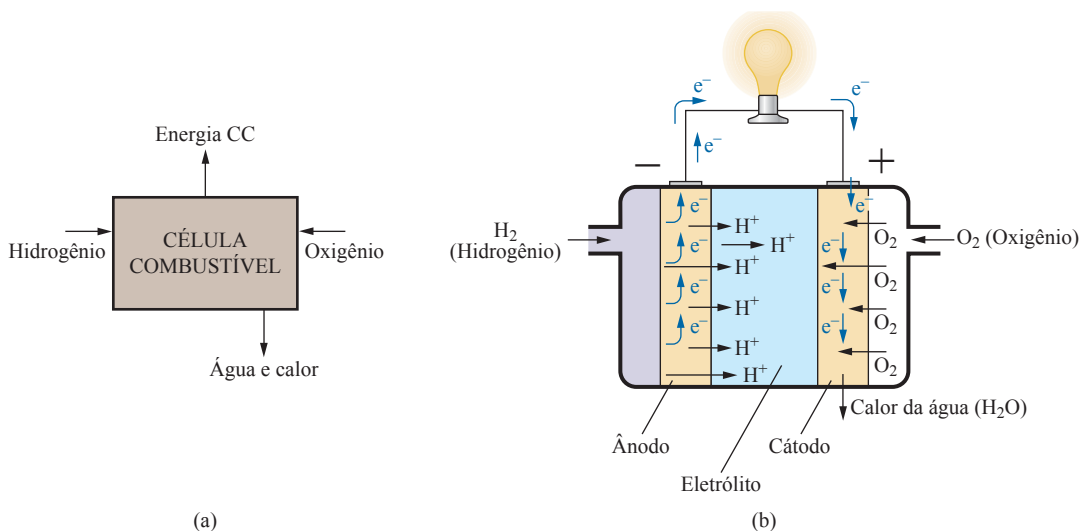


Figura 2.21 Célula combustível: (a) componentes; (b) construção básica.

carga de água com uma dispersão de algum calor desenvolvido no processo. O montante de calor é mínimo, apesar de ele também poder ser usado como um componente no projeto para incrementar a eficiência da célula. A água (muito limpa) pode simplesmente ser descartada ou usada em outras aplicações como a refrigeração do sistema. Se a fonte de hidrogênio ou de oxigênio é removida, o sistema falha. O diagrama de fluxo do sistema é relativamente simples, como mostra a Figura 2.21(a). Em uma célula real, mostrada na Figura 2.21(b), o gás hidrogênio é aplicado a um eletrodo poroso chamado *ânodo* que é revestido com um catalisador de platina. O catalisador serve para acelerar o processo de decomposição do átomo de hidrogênio em íons hidrogênio positivos e elétrons livres. O eletrólito entre os eletrodos é uma solução ou membrana que permite a passagem de íons hidrogênio positivos, mas não de elétrons. Diante dessa barreira, os elétrons escolhem passar a carga adiante e acender a lâmpada, enquanto os íons hidrogênio positivos migram na direção do cátodo. No cátodo poroso (também revestido com um catalisador), os átomos de oxigênio que chegam se combinam com os íons hidrogênio e os elétrons do circuito para criar água ( $H_2O$ ) e calor. O circuito está, portanto, completo. Os elétrons são gerados e então absorvidos. Se o fornecimento de hidrogênio é cortado, a fonte de elétrons é cortada, e o sistema deixa de ser uma célula combustível operacional.

Em algumas células combustíveis, uma membrana de eletrólito líquida ou fundida é usada. Dependendo do sistema usado, as reações químicas sofrerão pequenas mudanças, e não serão muito diferentes do que foi descrito anteriormente. A célula combustível de ácido fosfórico é uma célula popular que usa um eletrólito líquido, enquanto a PEM usa uma membrana de eletrólito polímera. O tipo líquido ou fundido é tipicamente usado em usinas de energia estacionárias, enquanto o tipo membrana é preferido no uso veicular.

O output de uma célula combustível única é uma baixa tensão e de alta corrente CC. Empilhar as células em série ou paralelamente aumenta a produção de tensão e o nível de corrente.

Células combustíveis têm sido alvo de muita atenção e empenho em termos de seu desenvolvimento. É certamente possível que células combustíveis possam algum dia substituir baterias na vasta maioria das aplicações que exijam uma fonte de energia portátil. A Figura 2.22 mostra os componentes de um automóvel com uma célula combustível de hidrogênio.

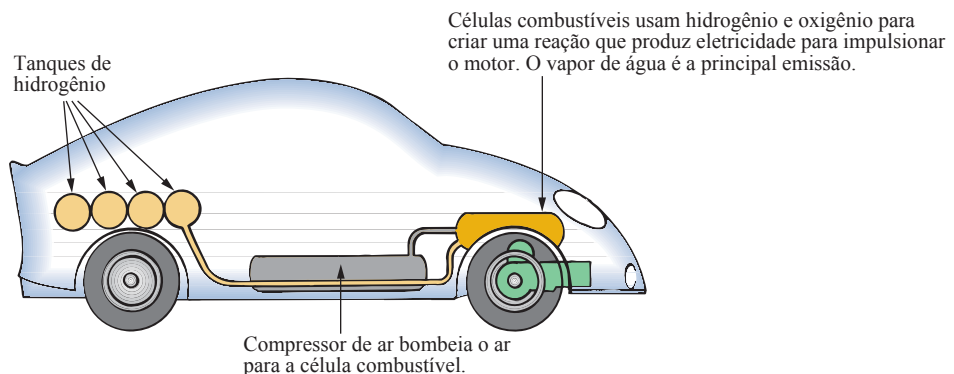
## 2.6 ESPECIFICAÇÃO AMPÈRE-HORA

O dado de informação mais importante de qualquer bateria (além de sua especificação de tensão) é sua **especificação ampère-hora (Ah)**. Você provavelmente observou nas fotografias de baterias mostradas neste capítulo que tanto a especificação de tensão quanto a de ampère-hora foram fornecidas para cada bateria.

*A especificação ampère-hora (Ah) indica quanto tempo uma bateria de tensão fixa será capaz de fornecer uma corrente em particular.*

Uma bateria com uma especificação ampère-hora de 100 fornecerá teoricamente uma corrente de 1 A por 100 horas, 10 A por 10 horas ou 100 A por 1 hora. Como se pode ver, obviamente, quanto maior for a corrente, menor será o tempo. A equação para determinar a duração de uma bateria a uma determinada corrente é a seguinte:

$$\text{Vida (horas)} = \frac{\text{especificação ampère-hora (Ah)}}{\text{ampères drenados (A)}} \quad (2.8)$$



Empilhar as células em série ou em paralelo irá aumentar o nível da tensão ou corrente gerados.

**Figura 2.22** Automóvel com célula combustível de hidrogênio.

### EXEMPLO 2.5

Por quanto tempo uma bateria de transistor 9 V com uma especificação ampère-hora de 520 mAh vai fornecer uma corrente de 20 mA?

Solução:

$$\text{Equação 2.8: Vida} = \frac{520 \text{ mAh}}{20 \text{ mA}} = \frac{520}{20} \text{ h} = \mathbf{26 \text{ h}}$$

### EXEMPLO 2.6

Por quanto tempo uma bateria de uma lanterna de 1,5 V fornece uma corrente de 250 mA para iluminar a lâmpada se a especificação ampère-hora é 16 Ah?

Solução:

$$\text{Equação 2.8: Vida} = \frac{16 \text{ Ah}}{250 \text{ mA}} = \frac{16}{250 \times 10^{-3}} \text{ h} = \mathbf{64 \text{ h}}$$

## 2.7 FATORES DA VIDA DA BATERIA

A seção anterior deixou claro que a vida de uma bateria está diretamente relacionada à magnitude da corrente de descarga. Entretanto, há fatores que afetam a especificação ampère-hora de uma bateria, de maneira que podemos descobrir que uma bateria com uma especificação de ampère-hora de 100 pode fornecer uma corrente de 10 A por 10 horas, mas pode fornecer uma corrente de 100 A por apenas 20 minutos em vez da 1 hora inteira calculada usando a Equação 2.8. Em outras palavras,

*a capacidade de uma bateria (em ampère-horas) muda com a alteração na demanda de corrente.*

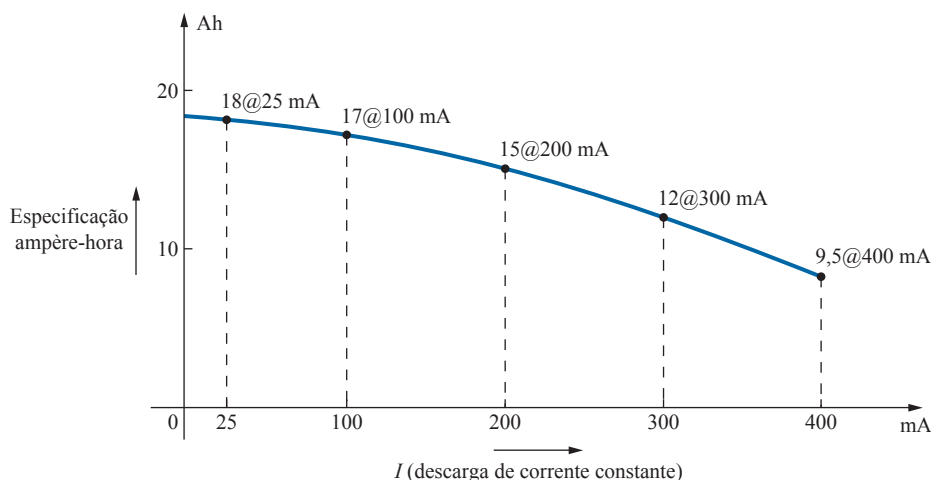
Isso não significa dizer que a Equação 2.8 é totalmente inválida. Ela sempre pode ser usada para ganhar algum conhecimento sobre quanto tempo uma bateria pode fornecer uma corrente em particular. Entretanto,

tenha em mente que existem fatores que afetam a especificação ampère-hora. Assim como a maioria dos sistemas, incluindo o corpo humano, quanto maior for a demanda, mais curto será o tempo que o nível de descarga pode ser mantido. Isso fica claro se olharmos as curvas na Figura 2.23 para a célula Eveready Energizer D. Na medida em que a descarga constante aumenta, a especificação de ampère-hora diminui de aproximadamente 18 Ah a 25 mA para algo em torno de 12 Ah a 300 mA.

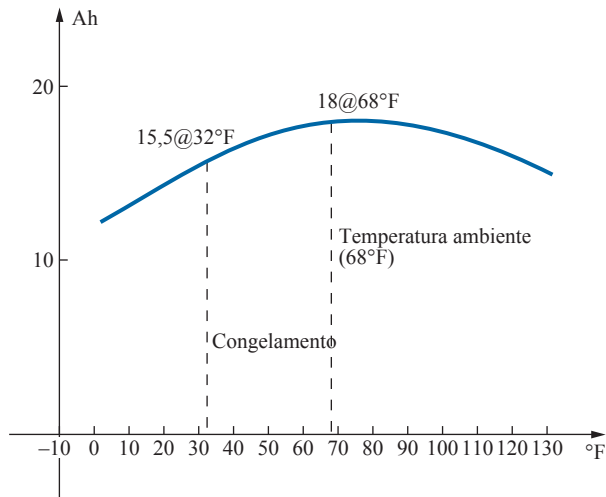
Outros fatores que afetam a especificação ampère-hora são a temperatura da unidade e o meio circundante. Na Figura 2.24, a capacidade da mesma bateria apresentada na Figura 2.23 mostra um valor de pico próximo da temperatura ambiente comum de 68°F. A capacidade de uma bateria diminui a temperaturas muito frias ou muito quentes. Claramente, a especificação ampère-hora será fornecida à temperatura ambiente ou a uma temperatura próxima dela para lhe dar um valor máximo, mas ela vai cair com um aumento ou uma redução na temperatura. Muitos de nós já observamos que as baterias de carros, rádios, rádios de duas vias, lanternas e outras parecem ter menos energia em um clima realmente frio. Poderíamos imaginar, então, que a capacidade da bateria aumentaria a temperaturas mais altas — mas nem sempre é o caso. Em geral, portanto,

*a especificação ampère-hora de uma bateria diminui do nível estabelecido para temperatura ambiente a temperaturas muito frias ou muito quentes.*

Outro fator interessante que afeta o desempenho de uma bateria é o tempo que se exige que ela forneça uma tensão em particular a uma corrente de descarga contínua. Observe as curvas na Figura 2.25, onde a tensão terminal caiu em cada nível de descarga de corrente na medida em



**Figura 2.23** Especificação ampère-hora (capacidade) versus corrente de descarga para uma célula Energizer® D.



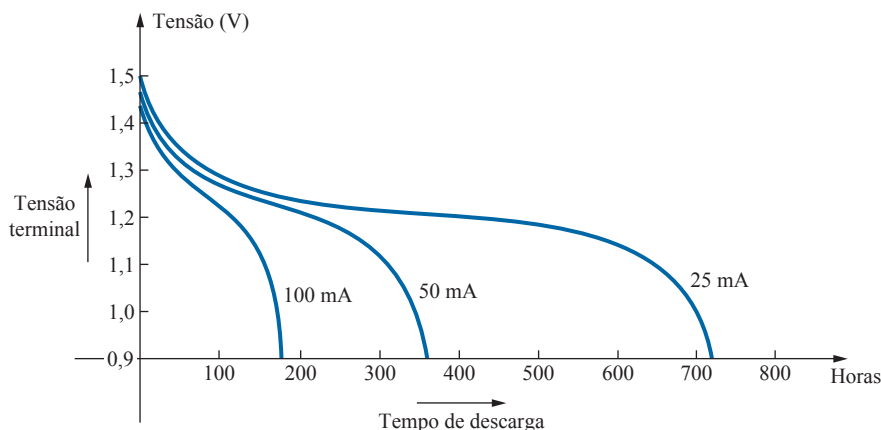
**Figura 2.24** Especificação ampère-hora (capacidade) versus temperatura para uma célula Energizer® D.

que o período de tempo aumentou. Quanto mais baixa a descarga de corrente, por mais tempo a bateria pode fornecer a corrente desejada. A 100 mA, ela ficou limitada a algo em torno de 100 horas próxima da tensão indicada, mas a 25 mA ela não caiu abaixo de 1,2 V, até que aproximadamente 500 horas tivessem passado. Isso é um aumento no tempo de 5:1, o que é significativo. O resultado é que

*a tensão terminal de uma bateria vai eventualmente cair (a qualquer nível de descarga de corrente) se o período de tempo de descarga contínua for longo demais.*

## 2.8 CONDUTORES E ISOLANTES

Se ligarmos fios construídos com materiais diferentes aos terminais da mesma bateria e medirmos a corrente



**Figura 2.25** Tensão terminal versus tempo de descarga em correntes específicas em uma célula Energizer® D.

em cada um deles, verificaremos que elas são diferentes. Muitos fatores, como densidade, mobilidade e características de estabilidade do material que constitui o fio explicam essas diferenças nos fluxos de carga. Entretanto, em geral,

*denominamos condutores os materiais que permitem a passagem de um fluxo intenso de elétrons com a aplicação de uma força (tensão) relativamente pequena.*

Além disso,

*os átomos dos materiais que são bons condutores possuem apenas um elétron na camada de valência (camada mais distante do núcleo).*

Como o **cobre** é o condutor mais frequentemente usado, ele foi escolhido como padrão para o cálculo das condutividades relativas que aparece na Tabela 2.1. Observe que o alumínio, que algumas vezes substituiu o cobre, tem apenas 61 por cento da condutividade do cobre. Mas outros fatores, como o custo e o peso da linha de transmissão, devem ser levados em conta.

*Os isolantes são materiais que possuem pouquíssimos elétrons livres, sendo necessária a aplicação de um potencial (uma tensão) muito elevado para estabelecer uma corrente mensurável.*

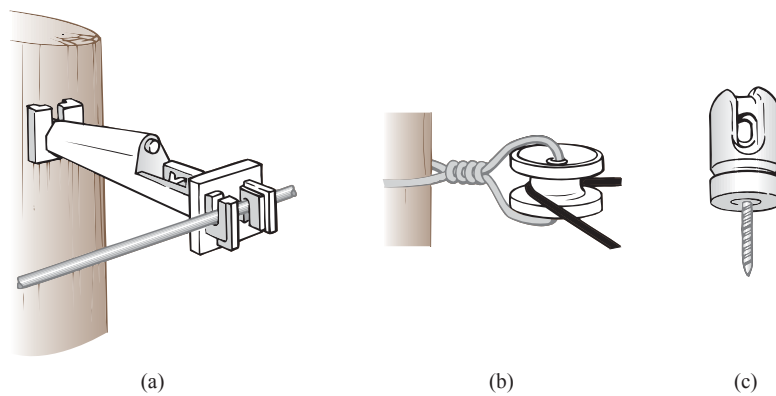
Um dos usos mais comuns do material isolante é o encapamento de fios condutores, que, quando desencapados, podem causar acidentes graves. As pessoas que trabalham com manutenção de rede elétrica usam luvas de borracha e ficam sobre plataformas recobertas com borracha como medidas de proteção, quando atuam em linhas de transmissão de alta tensão. Alguns tipos de isolantes e suas aplicações aparecem na Figura 2.26.

**Tabela 2.1** Condutividade relativa de vários materiais.

Metal	Condutividade relativa (%)
Prata	105
Cobre	<b>100</b>
Ouro	70,5
Alumínio	61
Tungstênio	31,2
Níquel	22,1
Ferro	14
Constantan	3,52
Nicromo	1,73
Calorita	1,44

**Tabela 2.2** Rigidez dielétrica de alguns dos isolantes mais comuns.

Material	Rigidez dielétrica média (kV/cm)
Ar	30
Porcelana	70
Óleos	140
Baquelite®	150
Borracha	270
Papel (parafinado)	500
Teflon®	600
Vidro	900
Mica	2.000



**Figura 2.26** Vários tipos de isolantes e suas aplicações. (a) Isolante extensor Fi-Shock. (b) Isolante de canto Fi-Shock. (c) Isolante aparafusado Fi-Shock.

É importante lembrar, no entanto, que mesmo o melhor dos isolantes pode sofrer certa ruptura (permitindo um fluxo de cargas através dele), caso seja submetido a uma diferença de potencial suficientemente elevada. Alguns dos valores para isolantes bem conhecidos são dados na Tabela 2.2. De acordo com essa tabela, para isolantes com a mesma forma geométrica, seria necessária uma diferença de potencial por unidade de comprimento (campo elétrico)  $270/30 = 9$  vezes mais intensa para provocar a ruptura da borracha do que aquela necessária para o ar; no caso da mica, seria necessária uma tensão 67 vezes maior que a necessária para o ar.

O prefixo *semi*, que faz parte da terminologia, é definido, conforme o dicionário, como sendo *metade*, *parcial* ou *entre*, dependendo de seu uso. Toda a indústria eletrônica depende dessa classe de materiais, visto que os dispositivos eletrônicos e os circuitos integrados (CIs) são construídos usando-se materiais semicondutores. Embora o *silício* (Si) seja o material mais usado, o *germânio* (Ge) e o *arseneto de gálio* (GaAs) são também utilizados em muitos dispositivos importantes.

*Os materiais semicondutores possuem quatro elétrons em sua camada mais externa (camada de valência).*

## 2.9 SEMICONDUTORES

*Os semicondutores constituem um determinado grupo de elementos químicos cujas características elétricas são intermediárias entre as dos condutores e as dos isolantes.*

Os semicondutores também se caracterizam por serem fotocondutores e por terem um coeficiente negativo de variação da resistividade com a temperatura. A fotocondutividade é um fenômeno no qual os fótons (pequenos pacotes de energia) de um feixe de luz incidente causam o aumento de densidade de portadores de corrente desse material e, como consequência, ocorre um aumento do

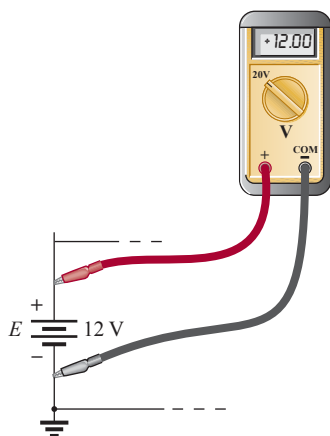


fluxo de cargas. Um coeficiente de temperatura negativo significa que a resistência (uma característica que será descrita no próximo capítulo) diminui quando a temperatura aumenta (um comportamento contrário ao da maioria dos condutores). Nos próximos capítulos, voltaremos a falar dos semicondutores, e se falará muito deles, é claro, em seu curso básico de eletrônica.

## 2.10 AMPERÍMETROS E VOLTÍMETROS

É importante saber medir os níveis de corrente e de tensão de um sistema elétrico para verificar seu funcionamento, identificar defeitos e investigar efeitos que possam ocorrer e que seriam impossíveis de serem previstos em uma análise teórica. Como o próprio nome indica, os **amperímetros** são utilizados para medir a intensidade da corrente, e os **voltímetros**, a diferença de potencial entre dois pontos. Se os níveis de corrente forem em geral da ordem de miliampères, o instrumento usado será denominado *miliamperímetro*, e se os níveis de corrente estiverem na faixa de microampères, o instrumento usado será um *microamperímetro*. Denominações similares podem ser feitas para a tensão. Em toda a indústria, as medidas de tensões são mais comuns do que as de corrente, pois não é necessário alterar as conexões do sistema para medir uma tensão.

A diferença de potencial entre dois pontos de um circuito é medida ligando as pontas de prova do voltímetro *aos dois pontos em paralelo*, conforme indica a Figura 2.27. Para obter uma leitura positiva, devemos ligar a ponta de prova positiva do voltímetro no ponto de maior potencial do circuito e a ponta de prova negativa no ponto de menor potencial. Se a ligação estiver invertida, o resultado será negativo ou uma especificação abaixo de zero.

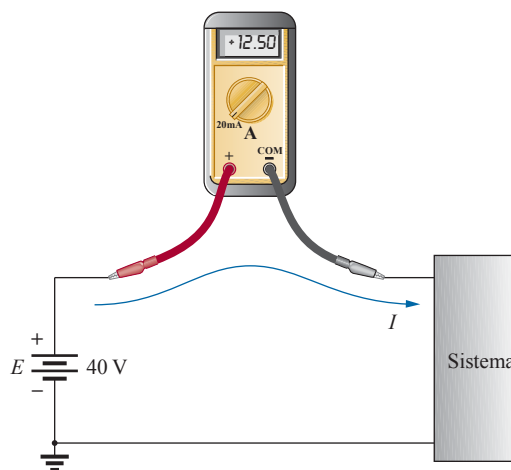


**Figura 2.27** Conexão de um voltímetro para uma leitura positiva (+).

Os amperímetros devem ser ligados conforme ilustra a Figura 2.28. Visto que eles medem a taxa do fluxo de cargas, ou seja, a corrente, o medidor tem de ser colocado no circuito de modo que a corrente passe pelo medidor. A única maneira de isso acontecer é abrindo o caminho (a ligação) no qual a corrente tem de ser medida, colocando o medidor entre os dois terminais resultantes da abertura do circuito. Para o circuito mostrado na Figura 2.28, o terminal positivo (+) da fonte de tensão tem de ser desconectado do sistema, e o amperímetro, inserido conforme mostrado. Para uma leitura positiva, a polaridade dos terminais do amperímetro deve ser tal que a corrente (no sentido convencional) entre pelo terminal positivo do amperímetro.

A introdução de qualquer medidor em um sistema eletroeletrônico levanta uma dúvida em relação à influência do medidor no comportamento do sistema. Essa e outras questões são analisadas nos capítulos 5 e 6, após a introdução de outros termos e conceitos. Por enquanto, é suficiente dizer que, como os voltímetros e os amperímetros não possuem fontes internas, eles afetarão o circuito quando forem introduzidos para fins de medição. Mas o projeto de cada um é feito para que esses efeitos sejam minimizados.

Existem instrumentos projetados para medir apenas corrente elétrica, e outros que medem apenas tensão. Porém, os medidores mais comuns em laboratório são o *volt-ohm-miliamperímetro* (VOM) e o *multímetro digital* (DMM), que aparecem nas figuras 2.29 e 2.30, respectivamente. Ambos os instrumentos medem tensão, corrente e uma terceira grandeza, a resistência, que será introduzida no próximo capítulo. O VOM é um instrumento analógico, pois requer a leitura e a interpretação da posição de um ponteiro sobre uma escala contínua, enquanto o DMM possui um visor numérico com precisão determinada pela



**Figura 2.28** Conexão de um amperímetro para uma leitura positiva (+).



**Figura 2.29** Volt-ohm-miliamperímetro (VOM) analógico. (Cortesia da Simpson Electric Co.)



**Figura 2.30** Multímetro digital (DMM). (Cortesia da Fluke Corporation. Reproduzido com permissão.)

escolha da escala. Ao longo do livro, serão feitos vários comentários sobre as características e a utilização desses medidores. Mas um estudo mais profundo deve ser feito em aulas de laboratório.

## 2.11 APLICAÇÕES

Ao longo deste livro, seções de aplicações, como esta, foram incluídas para possibilitar pesquisas posteriores de termos, quantidades e sistemas introduzidos neste capítulo. O propósito principal desta seção é estabelecer uma relação entre os conceitos teóricos abordados no texto e o mundo real e prático. Embora a maioria dos componentes que aparecem nos sistemas mostrados ainda não tenha sido apresentada (e, na realidade, alguns dos componentes não serão examinados até que estudos mais avançados

sejam realizados), os tópicos foram cuidadosamente escolhidos e devem ser bem interessantes para um principiante nesse tema. Foram incluídos comentários suficientes para possibilitar um entendimento geral da função de cada parte do sistema, que será compreendido em detalhes em um outro momento. Como os exercícios relativos ao assunto ‘Aplicações’ não aparecem no final do capítulo, o conteúdo foi elaborado de maneira que não apresente um alto grau de dificuldade para o estudante, esperando-se que seja um estímulo para que ele se interesse em solucionar questões básicas como: Qual a constituição interna do sistema? Qual a função que determinados elementos desempenham no sistema? E, é claro: como o sistema funciona? O importante, portanto, é que cada seção Aplicações seja uma oportunidade de iniciar a construção de uma fundamentação prática que vá além do simples conteúdo do capítulo. Não se preocupe se não entender todos os detalhes de cada aplicação. O entendimento virá com o tempo e com a experiência. Por enquanto, concentre-se no que pode ser obtido dos exemplos para, em seguida, continuar com o estudo do material.

### Lanterna

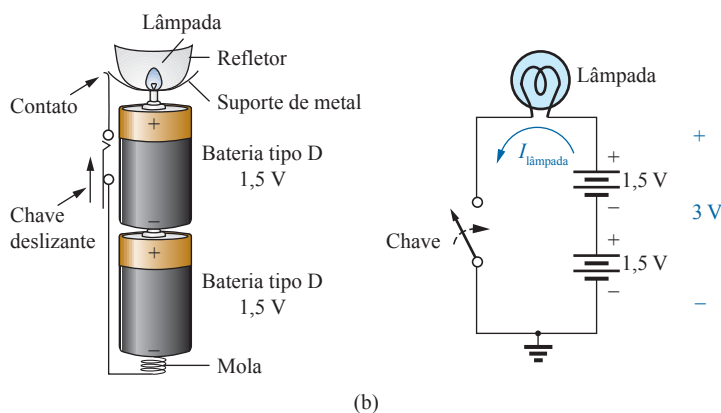
Embora as lanternas usem um dos circuitos elétricos mais simples, alguns fundamentos relativos a sua operação nos levam a sistemas mais sofisticados. Primeiro, e obviamente, trata-se de um sistema CC com vida útil totalmente dependente do estado das baterias e da lâmpada. A menos que a bateria seja do tipo recarregável, cada vez que for usá-la você terá reduzido sua vida útil. Durante várias horas o brilho não diminuirá de modo perceptível. Entretanto, à medida que ela alcança sua capacidade ampère-hora final, a intensidade luminosa diminuirá a uma taxa que varia rapidamente (de forma quase exponencial). Em uma lanterna-padrão que usa duas baterias, conforme mostra a Figura 2.31(a), e seu esquema elétrico, na Figura 2.31(b), cada bateria de 1,5 V tem uma especificação de cerca de 18 ampères-hora, como é mostrado na Figura 2.12. A lâmpada miniatura, que possui uma base de rosca, tem especificação de 2,5 V e 300 mA com boa luminosidade e uma vida útil de aproximadamente 30 horas. Trinta horas pode não parecer uma longa vida útil, mas tem de ser considerado o período de tempo que a lanterna é usada em cada ocasião. Se levarmos em conta que uma corrente de 300 mA seja drenada da bateria pela lâmpada quando estiver ligada, a vida útil da bateria, conforme a Equação 2.8, será em torno de 60 horas. Comparando a vida útil de 60 horas da bateria com a expectativa de vida útil de 30 horas para a lâmpada, fica sugerido que normalmente teremos de substituir a lâmpada com mais frequência do que as baterias.



(a)



(c)



(b)

**Figura 2.31** (a) Lanterna Eveready<sup>®</sup> que usa bateria (ou pilha) do tipo D; (b) esquema elétrico da lanterna mostrada no item (a); (c) pilha Powercheck<sup>™</sup> do tipo D da marca Duracell<sup>®</sup>.

No entanto, muitos de nós temos verificado experimentalmente o contrário: substituímos as baterias duas ou três vezes antes que seja necessária a substituição da lâmpada. Esse é um simples exemplo do fato de não podermos tirar conclusões direcionadas somente pelas especificações de cada componente de um projeto elétrico. As condições de operação, as características finais e os detalhes relativos à resposta real do sistema ao uso durante períodos curtos e longos de tempo têm de ser levados em consideração. Como mencionado antes, a bateria perde parte de sua potência cada vez que é usada. Embora a tensão final possa não ter variado muito inicialmente, a capacidade da bateria de fornecer o mesmo nível de corrente diminui a cada utilização. Além disso, as baterias se descarregam lentamente graças a ‘correntes de fuga’ existentes, mesmo com a chave desligada. O ar em torno da bateria não é ‘puro’, visto que a umidade e outros elementos podem proporcionar um caminho para as correntes de fuga pelo ar, pela superfície da própria bateria ou por outras superfícies em contato com a bateria que a façam eventualmente descarregar. Quantas vezes deixamos no carro lanternas com baterias novas por um longo tempo só para encontrá-las com uma luz fraca ou com as baterias descarregadas quando mais precisamos delas? Outro problema é o vazamento de ácidos que aparecem como manchas marrons ou como corrosão no invólucro das baterias. Esses vazamentos também afetam a vida útil da bateria. Além disso, quando a lanterna é ligada, há um surto inicial de corrente que drena da bateria uma corrente maior do que a que teria em uso contínuo

por um período de tempo. Em outras palavras, ao ligar e desligar a lanterna continuamente, teremos um grande efeito prejudicial para a vida da bateria. Temos de saber também que uma especificação de vida útil de 30 horas para a lâmpada é um valor considerado para uso contínuo, ou seja, 300 mA circulando pela lâmpada de maneira contínua durante 30 horas. Certamente, o filamento da lâmpada e o bulbo se aquecem com o tempo, e esse aquecimento é um efeito prejudicial para o fio do filamento. Quando a lanterna é ligada e desligada, permite-se que a lâmpada esfrie e recupere suas características normais, evitando, portanto, qualquer dano real. Então, com um uso normal podemos esperar que a lâmpada dure mais do que as 30 horas especificadas para uso contínuo.

Ainda que a lâmpada esteja especificada para operar em 2,5 V, podemos ver que as duas baterias resultam em tensão aplicada de 3 V, que sugere más condições de operação. Entretanto, uma lâmpada especificada para 2,5 V pode operar facilmente entre 2,5 e 3 V. Além disso, como foi mostrado neste capítulo, a tensão final diminui com o aumento da demanda de corrente. Sob condições normais de operação, considera-se que uma bateria de 1,5 V esteja em boas condições se a tensão final na carga for de 1,3 a 1,5 V. Quando a tensão cai para um valor entre 1 e 1,1 V, a bateria estará fraca, e quando a tensão cai para um valor entre 0,8 e 0,9 V, ela terá perdido sua efetividade. Os níveis de tensão podem ser relacionados diretamente a uma banda de teste que encontramos nas baterias Duracell<sup>®</sup>, como a mostrada na Figura 2.31(c). Na banda de teste dessa bateria,

a área de tensão superior (verde nas baterias atuais) está próxima de 1,5 V (classificada como 100 por cento); a área mais clara à direita representa uma faixa de tensão de 1,3 a 1 V; e a área que indica a substituição da bateria, situada na extrema direita, representa tensões abaixo de 1 V.

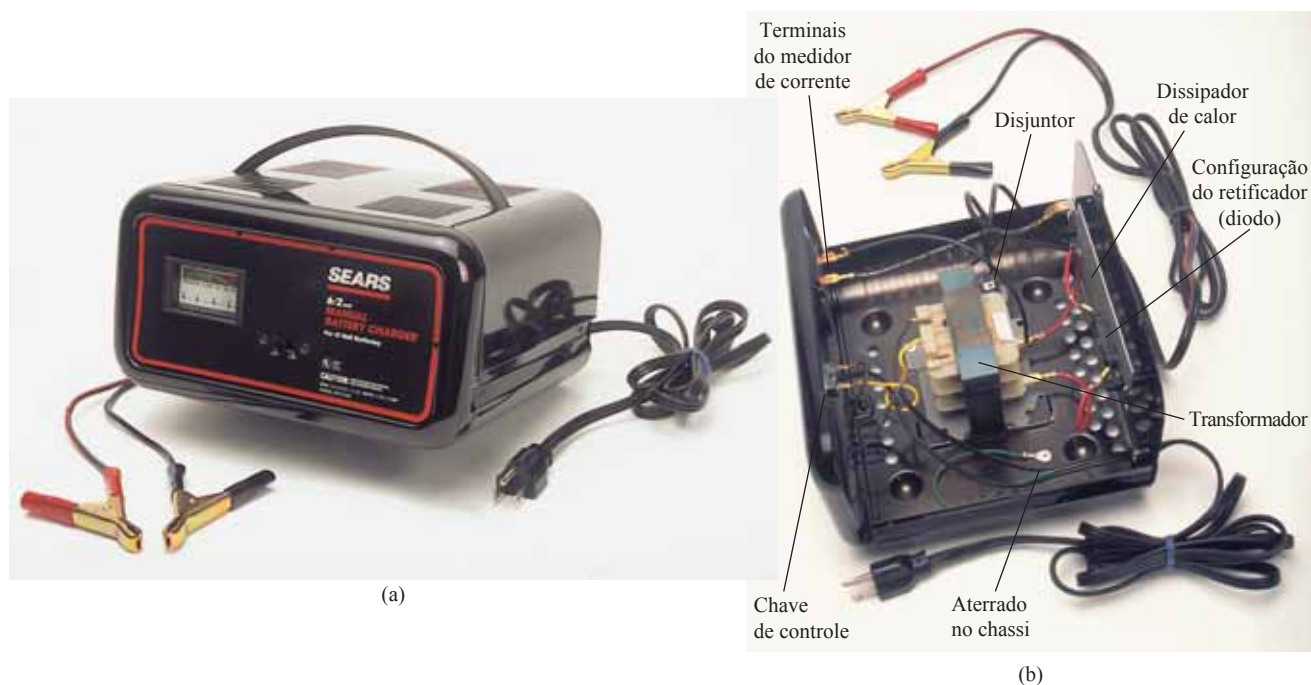
A tensão total de alimentação de 3 V será obtida apenas se as baterias estiverem conectadas, conforme mostra a Figura 2.31(b). Colocar acidentalmente os dois terminais positivos juntos resultará em tensão total de 0 V, e a lâmpada não acenderá de forma alguma. *Para a maioria dos sistemas que usam mais do que uma bateria, o terminal positivo de uma sempre será conectado ao terminal negativo da outra. Para todas as baterias de baixa tensão, a extremidade com o 'bico' é o terminal positivo, e a extremidade plana é o terminal negativo. Além disso, o terminal negativo, ou a extremidade plana da bateria, sempre é conectado na mola helicoidal do compartimento das baterias para mantê-las na posição. A extremidade positiva da bateria sempre é conectada ao conector plano ou ao elemento a ser ligado.* Se você observar a lâmpada cuidadosamente, verá que a ponta que está conectada ao terminal positivo da bateria está isolada do soquete em torno da base da lâmpada. O soquete está ligado ao segundo terminal da bateria que é usado para completar o circuito pela chave liga/desliga.

Se uma lanterna apresentar defeito de operação, a primeira coisa a se verificar é o estado das baterias. É melhor substituir as duas de uma vez. Um sistema com uma bateria boa e outra próxima do fim da vida útil ocasiona

dificuldade à bateria boa para suprir a corrente demandada, e, na verdade, a bateria ruim consumirá corrente da bateria boa. Em seguida, verifique as condições da lâmpada observando o filamento para ver se ele está rompido em algum ponto. Isso pode acontecer por causa da passagem de um nível de corrente contínua por um longo tempo ou por causa de uma queda da lanterna. Se a bateria e a lâmpada parecerem estar em bom estado, a próxima área de interesse será os contatos entre o terminal positivo e a lâmpada, e entre esta e a chave. Limpando ambos os contatos com um pano embebido com uma substância de polimento, esse problema será eliminado.

### Carregador de bateria automotiva de 12 V

Carregadores de bateria são aparelhos domésticos comuns usados para carregar diversas baterias, desde as pequenas para lanternas até as de chumbo-ácido de alta capacidade. Visto que todos os carregadores são alimentados por 120 V CA obtidos de uma tomada elétrica como a de uma casa, a construção básica de cada um é bastante similar. Em todos os sistemas do tipo carregador de bateria, um *transformador* (Capítulo 22) tem de ser incluído para reduzir o nível da tensão CA a um valor apropriado para que o nível CC seja estabelecido. Uma configuração com *diodos* (também denominados *retificadores*) tem de ser incluída para converter a tensão CA, cuja amplitude varia com o tempo para um nível CC fixo, como o descrito neste capítulo. Diodos e/ou retificadores serão estudados em detalhe no curso inicial de eletrônica.



**Figura 2.32** Carregador de bateria: (a) aparência externa; (b) construção interna.



Alguns carregadores CC também incluem um *regulador* para fornecer um nível CC melhorado (que varia menos ao longo do tempo ou com as variações na carga). Como o carregador de bateria automotiva é um dos mais comuns, ele será descrito nos próximos parágrafos.

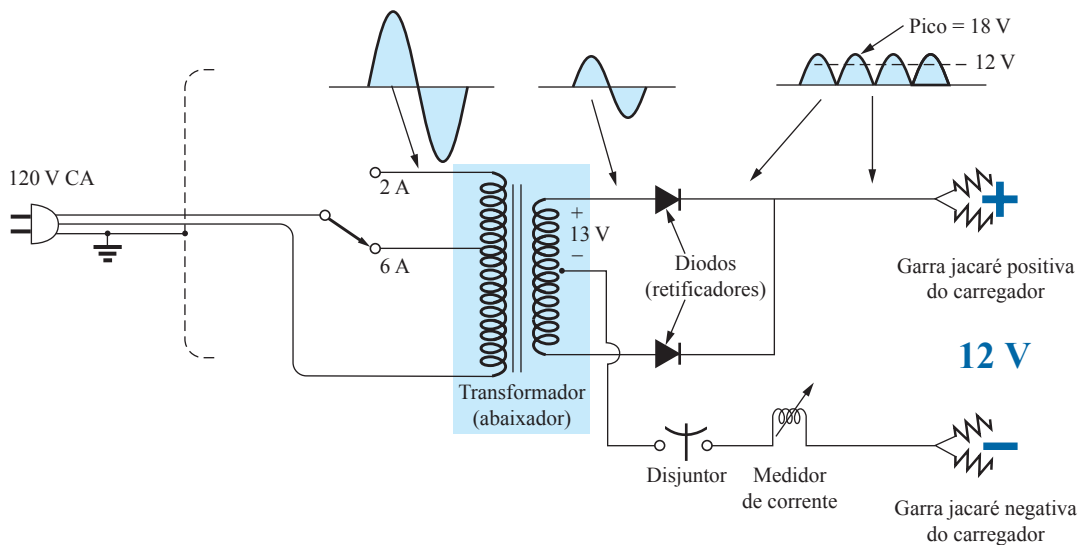
A aparência externa e a construção interna do equipamento Sears 6/2 AMP Manual Battery Charger são mostradas na Figura 2.32. Observe na Figura 2.32(b) que o transformador (como acontece na maioria dos carregadores) ocupa a maior parte do espaço interno. O espaço vazio restante e os furos no gabinete garantem uma saída para o calor gerado em função dos altos níveis de corrente de operação.

O esquema mostrado na Figura 2.33 inclui todos os componentes básicos de um carregador de bateria. Observe primeiro que a tensão de 120 V da tomada é aplicada diretamente no primário do transformador. A corrente de carga, que pode ser de 6 ou 2 A, é ajustada pela chave (que simplesmente controla a quantidade de espiras do primário do transformador) que será conectada ao circuito em função da corrente de carga escolhida. Se a bateria for carregada com um nível de corrente de 2 A, todas as espiras do primário serão conectadas ao circuito, e a razão entre o número de espiras do primário e o número de espiras do secundário terá um valor máximo. Se a bateria for carregada com um nível de corrente de 6 A, menos espiras do primário estarão conectadas ao circuito, e assim a razão terá um valor menor. Quando estudarmos os transformadores, entenderemos que as tensões no primário e no secundário estão diretamente relacionadas com a *relação de espiras* entre o primário e o secundário. Se essa relação diminui, a tensão também diminui. O efeito contrário (tensão no secundário maior do que no primário)

também ocorre se o número de espiras do secundário for maior do que o do primário.

O aspecto da forma de onda para uma corrente de carga de 6 A é mostrado na Figura 2.33. Observe que até agora a tensão CA apresentou o mesmo formato, tanto no primário quanto no secundário. A única diferença está nos valores de pico das formas de onda. Agora os diodos assumem o comando e convertem a forma de onda CA, que possui um valor médio igual a zero (a forma de onda acima e abaixo do eixo são iguais), em uma forma de onda que tem um valor médio (todo o sinal está acima do eixo), conforme mostra a mesma figura. Por enquanto, apenas reconheça que os diodos são dispositivos eletrônicos semicondutores que permitem somente a passagem de um fluxo de corrente apenas no sentido indicado pela seta no símbolo (adotando-se o sentido convencional). Ainda que a forma de onda resultante a partir da ação dos diodos tenha um aspecto pulsante com um valor de pico em torno de 18 V, ela carregará uma bateria de 12 V, ainda que a tensão da forma de onda seja maior que a da bateria, como mostra a área sombreada. Abaixo da tensão de 12 V, a bateria não se descarrega de volta pelo circuito do carregador porque os diodos só permitem o fluxo de corrente em uma direção.

Em particular, observe na Figura 2.32(b) a existência de uma placa larga através da qual flui a corrente do módulo de retificadores (diodos) para o terminal positivo da bateria. O principal objetivo dessa placa é proporcionar um *dissipador de calor* (uma placa faz com que o calor seja transferido para o ar ao redor dela) para o módulo de diodos. Caso não existisse essa placa, os diodos eventualmente se fundiriam, provocando a autodestruição em função dos níveis de corrente. Cada componente mostrado



**Figura 2.33** Esquema elétrico do carregador de bateria mostrado na Figura 2.32.



na Figura 2.33 foi cuidadosamente identificado na Figura 2.32(b) para estabelecer uma referência.

Quando uma corrente de carga de 6 A for aplicada pela primeira vez na bateria, a demanda, conforme indicado pelo medidor no painel frontal do instrumento, poderá chegar a 7 A ou a quase 8 A. Entretanto, o nível de corrente diminui à medida que a bateria é carregada até atingir um nível de 2 ou 3 A. Para unidades como essa, que não possuem interruptor automático, é importante desconectar o carregador, quando a corrente cair completamente para o nível de carga plena da bateria; caso contrário, a bateria entrará em sobrecarga, podendo ser danificada. Uma bateria que estiver com 50 por cento de carga pode levar cerca de 10 horas para carregar, portanto, não espere que uma operação de carga dure apenas 10 minutos. Além disso, se uma bateria estiver em um estado muito ruim, com uma tensão abaixo do normal, a corrente inicial de carga pode ser muito alta para o carregador. Para proteger o carregador em tais situações, o disjuntor abrirá o circuito, interrompendo o processo de carga. Por causa dos altos níveis de corrente, é importante que as instruções de uso, que vêm junto com o carregador, sejam cuidadosamente lidas e executadas.

### Fonte CC para secretárias eletrônicas/telefones

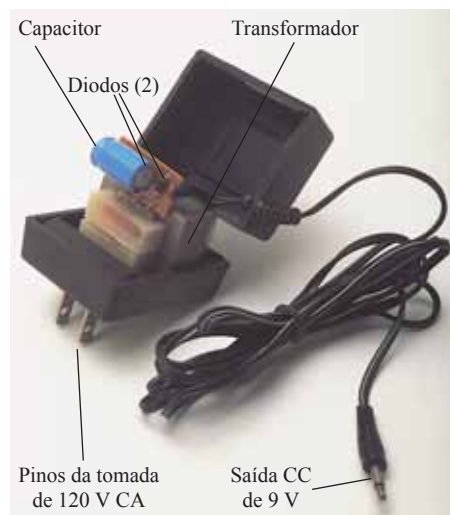
Uma grande variedade de sistemas de uso doméstico, ou em escritórios, recebem a tensão de operação a partir de um sistema de conversão CA/CC, que é conectado diretamente em uma tomada de 120 V. Computadores do tipo laptop, secretárias eletrônicas/telefones, rádios, relógios, telefones celulares, aparelhos de CD, entre outros, recebem alimentação CC a partir de um sistema montado em um módulo, como o que aparece na Figura 2.34. A conversão de CA para CC ocorre dentro desse módulo, que é conectado diretamente na tomada. A tensão CC é disponibilizada na extremidade do fio, relativamente longo, que foi projetado para ser conectado na unidade de operação. Por menor que esse módulo possa ser, ele



**Figura 2.34** Fonte CC de 9 V para secretária eletrônica/telefone.

contém basicamente os mesmos componentes que aparecem no carregador de bateria mostrado na Figura 2.32.

Na Figura 2.35, pode-se ver o transformador usado para reduzir a tensão a níveis apropriados (também, nesse caso, é o maior dos componentes do sistema). Observe que dois diodos estabelecem um nível CC, e um filtro capacitivo (Capítulo 10) é acrescentado para suavizar a tensão CC. O sistema pode ser relativamente pequeno pelo fato de os níveis de corrente de operação serem baixos, permitindo o uso de fios de pequeno diâmetro na construção do transformador e limitando seu tamanho. As baixas correntes também reduzem a preocupação relativa aos efeitos de aquecimento, permitindo o uso de um módulo pequeno. O módulo mostrado na Figura 2.35, especificado para 9 V a 200 mA, é normalmente usado para fornecer alimentação a secretárias eletrônicas/telefones. Uma posterior redução nas variações da tensão CC é realizada por um regulador construído dentro da unidade que recebe essa tensão de alimentação. O regulador é normalmente um pequeno *chip* (circuito integrado) colocado na unidade que recebe a tensão para separar o calor gerado por ele do calor gerado pelo transformador, reduzindo assim o aquecimento da tomada localizada na parede. Além disso, a colocação do regulador na unidade que recebe a tensão de alimentação reduz a possibilidade de captação de ruído e oscilações ao longo do fio que liga a unidade de conversão à unidade de operação, e assegura que a tensão especificada esteja disponível na própria unidade, e não em um valor menor por causa de quedas de tensão na linha.



**Figura 2.35** Constituição interna da fonte CC de 9 V mostrada na Figura 2.34.

## 2.12 ANÁLISE COMPUTACIONAL

Em alguns textos, o procedimento para escolher uma fonte de tensão CC e colocá-la em um esquema usando métodos computacionais é introduzido nesse ponto. Essa abordagem, entretanto, exige que os estudantes voltem

a este capítulo quando o primeiro circuito completo for instalado e examinado. Portanto, o procedimento é introduzido no Capítulo 4, quando o primeiro circuito completo for examinado, dessa maneira concentrando o material e nos livrando da necessidade de reler este e o Capítulo 3.

## PROBLEMAS

### Seção 2.2 Os átomos e sua estrutura

- Os átomos de alumínio e prata têm como número de elétrons, respectivamente, 13 e 47. Esboce a configuração eletrônica de cada um e apresente uma breve justificativa que explique por que eles são bons condutores.
  - Usando a Internet, descubra a estrutura atômica do ouro e explique por que ele é um excelente condutor de eletricidade.
- Calcule a força de atração, em newtons, entre as cargas  $Q_1$  e  $Q_2$  mostradas na Figura 2.36, quando:
  - $r = 1$  m
  - $r = 3$  m
  - $r = 10$  m
  - A força diminuiu rapidamente com o aumento na distância?
- Calcule a força de repulsão, em newtons, entre  $Q_1$  e  $Q_2$ , de acordo com a Figura 2.37, quando:
  - $r = 1$  mi (1,6 km)
  - $r = 10$  pés
  - $r = 1/16$  pol.
- Trace o gráfico da força de atração (em newtons) *versus* a separação (em polegadas) para duas cargas de  $2 \mu\text{C}$ . Use uma distância de 1 pol. para 10 pol. em incrementos de 1 pol. Comente a forma da curva. Ela é linear ou não linear? O que essa curva sugere sobre traçar o gráfico de uma função cuja magnitude é afetada por um termo quadrático no denominador da equação?
  - Usando o gráfico da parte (a), calcule a força de atração a uma separação de 2,5 pol.
  - Calcule a força de atração com uma separação de 2,5 pol. e a compare com o resultado da parte (b).
- Para duas cargas similares, a força  $F_1$  existe para uma separação de  $r_1$  metros. Se a distância é aumentada para  $r_2$ , calcule o novo nível de força  $F_2$  em termos da força original e da distância envolvida.
- Determine a distância entre duas cargas de  $20 \mu\text{C}$  se a força entre elas for de  $3,6 \times 10^4$  N.
- Dois corpos carregados, com cargas  $Q_1$  e  $Q_2$ , quando separados por uma distância de 2 m, apresentam uma força de repulsão igual a 1,8 N.
  - Qual será a força de repulsão quando eles estiverem separados por 10 m?
  - Se a razão  $Q_1/Q_2 = 1/2$ , calcule  $Q_1$  e  $Q_2$  ( $r = 10$  m).

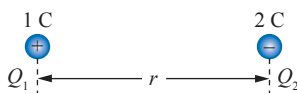


Figura 2.36 Problema 2.

### Seção 2.3 Tensão

- Qual a tensão entre dois pontos se 1,2 J de energia é necessária para mover  $20 \mu\text{C}$  entre esses dois pontos?
- Se a diferença de potencial entre dois pontos é 60 V, qual o trabalho necessário para levar 8 mC de um ponto a outro?
- Calcule a carga em elétrons que exige 120  $\mu\text{J}$  de energia para ser deslocada através de uma diferença de potencial de 20 mV.
- Quanto de carga passa por uma bateria de 9 V se a energia usada for de 72 J?
- Quanta energia em elétron-volts é necessária para mover 1 trilhão (1 milhão de milhões) de elétrons através de uma diferença de potencial de 40 V?
  - Quantos joules de energia o resultado da parte (a) representa?
  - Compare os resultados de (a) e (b). O que você pode dizer a respeito do uso de joules e elétron-volts como uma unidade de medida? Sob quais condições eles devem ser aplicados?

### Seção 2.4 Corrente

- Calcule a corrente em ampères se uma carga de 12 mC passar através de um fio em 2,8 s.
- Se 312 C de carga passarem através de um fio em 2 min, qual será a corrente em ampères?
- Se uma corrente de 40 A é mantida por 0,8 min, quantos coulombs de carga passam através do fio?
- Quantos coulombs de carga passam através de uma lâmpada em 1,2 min se a corrente for constante e igual a 250 mA?
- Se a corrente em um condutor for constante e igual a 2 mA, quanto tempo será necessário para 6 mC passarem através do condutor?
- Se  $21,847 \times 10^{18}$  elétrons passam em um fio em 12 s, qual será a corrente correspondente?
- Quantos elétrons passarão através de um condutor em 1 min e 30 s se a corrente for de 14 mA?
- Um fusível especificado para 1 A irá se 'queimar' se 86 C passar por ele em 1,2 min?
- Se  $0,84 \times 10^{16}$  elétrons passam por um fio em 60 ms, qual é a corrente?
- Das opções a seguir, qual você escolheria?

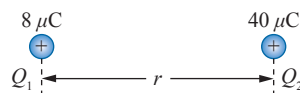


Figura 2.37 Problema 3.

- a) Um centavo para cada elétron que passa por um fio em  $0,01 \mu\text{s}$  a uma corrente de 2 mA, ou
- b) Um dólar para cada elétron que passa por um fio em  $1,5 \text{ ns}$  se a corrente for de  $100 \mu\text{A}$ .
- \*23. Se um condutor com uma corrente de 200 mA passando por ele converte 40 J de energia elétrica em calor em 30 s, qual é a queda potencial através do condutor?
- \*24. Uma carga está fluindo por um condutor a uma taxa de 420 C/min. Se 742 J de energia elétrica são convertidos em calor em 30 s, qual é a queda potencial através do condutor?
- \*25. A diferença de potencial entre dois pontos em um circuito elétrico é de 24 V. Se 0,4 J de energia fossem dissipados em um período de 5 ms, qual seria a corrente entre os dois pontos?

### Seção 2.6 Especificação ampère-hora

26. Qual é a corrente que, teoricamente, poderia ser fornecida por uma bateria com uma especificação de 200 Ah durante 40 h?
27. Qual a especificação em Ah de uma bateria capaz de fornecer 0,8 A durante 75 horas?
28. Durante quantas horas uma bateria com uma especificação de 32 Ah poderia teoricamente fornecer uma corrente de 1,28 A?
29. Uma bateria-padrão automotiva de 12 V tem capacidade de 40 Ah, enquanto outra, de maior capacidade, tem especificação de 60 Ah. Qual a relação entre os níveis de energia de cada uma, e a relação entre as correntes que cada uma é capaz de fornecer para dar partida em motores?
30. A qual taxa de descarga a especificação ampère-hora da Célula Energizer D da Figura 2.23 cai para 75 por cento do seu valor a 25 mA?
31. Qual é a perda percentual em especificação ampère-hora da temperatura ambiente comparada com a de congelamento em uma Célula Energizer D da Figura 2.24?
32. Usando o gráfico da Figura 2.25, por quanto tempo mais você pode manter 1,2 V a uma taxa de descarga de 25 mA comparado com uma descarga de 100 mA?

- \*33. Um televisor portátil que usa uma bateria recarregável de 12 V e 3 Ah pode operar por um período de aproximadamente 6 h. Qual a corrente média consumida durante esse período? Qual a energia, em joules, gasta pela bateria?

### Seção 2.8 Condutores e isolantes

34. Discuta as duas propriedades da estrutura atômica do cobre que o tornam um bom condutor.
35. Explique o significado dos termos *isolante* e *rigidez dielétrica*.
36. Liste três aplicações dos isolantes além daquelas apresentadas na Seção 2.8.
37. a) Usando a Tabela 2.2, determine o nível de tensão aplicada necessária para estabelecer a condução através de 1/2 polegada de ar.  
b) Repita a parte (a) para 1/2 polegada de borracha.  
c) Compare os resultados das partes (a) e (b).

### Seção 2.9 Semicondutores

38. O que é um semicondutor? Como suas propriedades se comparam às propriedades de um condutor e de um isolante?
39. Consulte um livro sobre dispositivos eletrônicos semicondutores e atente para o uso extensivo dos materiais semicondutores germânio e silício. Faça uma revisão das características de cada um desses materiais.

### Seção 2.10 Amperímetros e voltímetros

40. Quais as diferenças significativas na forma de conectar um amperímetro e um voltímetro em um circuito?
41. Compare escalas analógicas e digitais:  
a) Com qual delas você se sente mais à vontade? Por quê?  
b) Qual delas normalmente proporciona um grau maior de precisão?  
c) Você consegue pensar em alguma vantagem da escala analógica sobre a escala digital? Tenha em mente que a maioria das escalas no *cockpit* de um avião ou na sala de controle de grandes usinas de energia é analógica.  
d) Você acredita que é necessário saber ler bem as escalas analógicas? Por quê?

## GLOSSÁRIO

**Ampère (A):** Unidade de medida do sistema SI associada ao fluxo de carga através de um condutor.

**Amperímetro:** Instrumento projetado para medir a corrente através de elementos de um circuito que estejam em série com esse medidor.

**Célula:** Unidade fundamental de fonte de energia elétrica resultante da conversão de energia química ou solar.

**Célula combustível:** Fonte não poluente de energia que pode gerar corrente através de uma carga aplicando, simplesmente, os níveis corretos de hidrogênio e oxigênio.

**Célula primária:** Fonte de tensão que não pode ser recarregada.

**Célula secundária:** Fonte de tensão que pode ser recarregada.

**Célula solar:** Fonte de tensão obtida a partir da conversão da energia luminosa (fótons) em energia elétrica.

**Cobre:** Material possuidor de propriedades físicas que o tornam particularmente útil como condutor de eletricidade.

**Condutores:** Materiais que permitem uma grande circulação de elétrons com uma pequena tensão aplicada.

**Corrente:** Fluxo de carga resultante da aplicação de uma diferença em potencial entre dois pontos em um sistema elétrico.

**Corrente contínua (CC):** Corrente que possui uma única direção (unidirecional) e uma magnitude fixa através do tempo.

**Coulomb (C):** Unidade fundamental do sistema SI para medição de carga elétrica. Equivale à carga de  $6,242 \times 10^{18}$  elétrons.

**Diferença de potencial:** Diferença algébrica entre os potenciais (ou tensões) de dois pontos em um sistema elétrico.

**Eletrólise:** Processo de passar uma corrente através de um eletrólito para decompô-lo em seus componentes fundamentais.

**Eletrólito:** Elemento de contato e fonte de íons entre os eletrodos da bateria.

**Elétron:** Partícula com polaridade negativa que descreve uma órbita em torno do núcleo do átomo.

**Elétron livre:** Elétron que não está associado a nenhum átomo em particular de uma rede cristalina, estando assim relativamente livre para se mover sob a influência de forças externas.

**Energia potencial:** Energia que um corpo possui em função de sua posição.

**Especificação ampère-hora (Ah):** Capacidade de uma fonte que informa por quanto tempo determinado nível de corrente pode ser drenado dela.

**Fonte de corrente CC:** Fonte que gera uma corrente fixa, ainda que a carga à qual esteja conectada possa provocar uma variação de tensão nos terminais dessa fonte.

**Gerador CC:** Fonte de tensão CC produzida por intermédio de uma máquina rotativa cujo eixo gira em função de alguma força externa.

**Íon positivo:** Átomo com carga elétrica positiva por causa da perda de um ou mais de seus elétrons.

**Isolantes:** Materiais que necessitam da aplicação de uma tensão muito alta para produzirem um fluxo de corrente mensurável.

**Lei de Coulomb:** Equação que define a intensidade da força de atração ou repulsão entre duas cargas.

**Nêutron:** Partícula encontrada no núcleo do átomo e que não apresenta carga elétrica.

**Núcleo:** Estrutura central de um átomo que é constituída de prótons e nêutrons.

**Peso específico:** Razão entre o peso de um dado volume de uma substância e o peso de um volume igual ao da água a 4°C.

**Próton:** Partícula de polaridade positiva encontrada nos núcleos dos átomos.

**Retificação:** Processo pelo qual um sinal CA é convertido em um sinal que tem um valor médio CC.

**Semicondutor:** Material que possui uma condutância situada entre a de um isolante e a de um condutor. É de grande importância na fabricação de dispositivos eletrônicos.

**Tensão:** Termo aplicado à diferença em potencial entre dois pontos como estabelecida por uma separação de cargas opostas.

**Volt (V):** Unidade de medida que expressa a diferença de potencial entre dois pontos. Se um joule de energia for necessário para mover uma carga de um coulomb entre dois pontos, diz-se que a diferença de potencial entre os pontos é de um volt.

**Voltímetro:** Instrumento projetado para medir tensões sobre elementos de um circuito ou entre dois pontos distintos desse circuito.