Título original: *University Physics with Modern Physics – Tenth Edition*

Tradução autorizada a partir da edição original em inglês,
publicada pela Pearson Education, Inc. sob o selo Addison Wesley.

Editor: Roger Trimer

Editora de Texto: Patrícia Carla Rodrigues

Preparação: José Antônio Rugeri

Revisão: Eliane A. M. Santoro e Juliana Takahashi

Capa: Marcelo Françozo, sobre o projeto original de Yvo Riezebos

Editoração Eletrônica: ERJ Composição Editorial e Artes Gráficas Ltda.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Young, Hugh D.

Sears e Zemansky Física III: eletromagnetismo / Hugh D. Young, Roger A. Freedman; colaboradores T. R. Sandin, A. Lewis Ford; tradução e revisão técnica: Adir Moysés Luiz; – São Paulo : Pearson Addison Wesley, 2004.

ISBN: 978-85-88639-04-1

1. Eletromagnetismo 2. Física I. Freedman, Roger A. II Sandin, T. R. III. Ford, A. Lewis. IV. Luiz, Adir Moysés. V. Título.

03-2725 CDD-537

Índice para catálogo sistemático:

1. Eletromagnetismo : Física 537

2007
5ª reimpressão
Direitos exclusivos para a língua portuguesa cedidos à
Pearson Education do Brasil,
uma empresa do grupo Pearson Education
Av. Ermano Marchetti, 1435
CEP: 05038-001, São Paulo – SP, Brasil
Tel.: (11) 2178-8686, Fax: (11) 2178-8688
e-mail: vendas@pearsoned.com

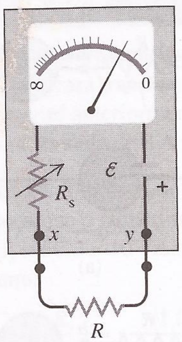


FIGURA 27.14 Circuito de um ohmímetro. O resistor R_s possui resistência variável, conforme indica a seta que corta o símbolo do resistor. Para usar o ohmímetro, inicialmente conecte x com y e ajuste R_s até que a leitura do instrumento seja zero. A seguir, conecte os terminais do resistor R nos pontos x e y e leia o valor da resistência na escala.

o circuito entre x e y está *aberto* (isto é, quando $R \rightarrow \infty$), não existe nenhuma corrente e, portanto, nenhuma deflexão. Para qualquer valor de R entre esses limites, a deflexão depende do valor de R e a escala do galvanômetro pode ser calibrada para medir R diretamente. Correntes mais elevadas correspondem a menores resistências, portanto a leitura da escala é feita de trás para a frente em comparação com a escala que mostra as correntes.

Você provavelmente já viu instrumentos elétricos com muitas escalas, ou "multímetros", que usam galvanômetros de d'Arsonval. Tais instrumentos usam basicamente um galvanômetro com bobina móvel com um único intervalo; os intervalos variáveis são obtidos por chaves que conectam diversas resistências em série ou em paralelo com a bobina do galvanômetro. Por meio de resistências apropriadas, um multímetro pode ser usado como um amperímetro ou como um voltímetro. Os multímetros também possuem uma pilha; colocando-a em série com as resistências apropriadas e com a bobina, o multímetro funciona como um ohmímetro.

Nos casos de maior precisão, os instrumentos que empregam galvanômetros de d'Arsonval foram superados pelos instrumentos eletrônicos com mostradores digitais. Tais instrumentos são mais precisos, estáveis e mecanicamente mais resistentes do que os instrumentos que usam galvanômetros de d'Arsonval. Um voltímetro digital pode ser fabricado com uma resistência interna extremamente elevada, da ordem de 100 MΩ.

POTENCIÔMETROS

O *potenciômetro* é um instrumento que serve para medir a fem de uma fonte sem consumir nenhuma corrente da fonte; ele também possui outras aplicações importantes. Essencialmente, ele compara uma diferença de potencial desconhecida com uma diferença de potencial ajustável e mensurável.

O princípio de funcionamento de um potenciômetro é esquematizado na Figura 27.15. Os terminais a e b de um reostato de resistência total R_{ab} estão conectados permanentemente a uma fonte de fem conhecida $\mathcal{E}_1$. Um contato deslizante c é conectado por meio de um galvanômetro G a uma fonte cuja fem $\mathcal{E}_2$ desejamos determinar. À medida que o contato deslizante c se desloca ao longo do reostato, a resistência R_{cb} entre os pontos c e b varia; supondo um reostato uniforme, a resistência R_{cb} é proporcional à distância entre os pontos c e b. Para determinar o valor de $\mathcal{E}_2$, o contato c deve ser deslocado até um ponto no qual o ponteiro do galvanômetro não sofra nenhuma deflexão; isso corresponde a uma corrente nula no ramo do circuito onde se encontra $\mathcal{E}_2$. Fazendo $I_2 = 0$, a lei das malhas de Kirchhoff fornece

$$\mathcal{E}_2 = IR_{cb}.$$

Quando $I_2 = 0$, a corrente I produzida pela fonte de fem $\mathcal{E}_1$ possui o mesmo valor, qualquer que seja o valor da fem $\mathcal{E}_2$. Recalibramos o dispositivo substituindo $\mathcal{E}_2$ por uma fonte de fem conhecida; a seguir, qualquer fem $\mathcal{E}_2$ pode ser encontrada medindo-se o valor do comprimento cb para o qual $I_2 = 0$ (veja o Problema 27.25). Note que, para que isso funcione, V_{ab} deve ser maior do que a fem $\mathcal{E}_2$.

O termo *potenciômetro* também é usado para qualquer resistor variável, geralmente tendo um elemento de resistência e um contato deslizante controlado por um eixo acoplado a um botão. O símbolo de um potenciômetro em circuitos elétricos é indicado na Figura 27.15b.

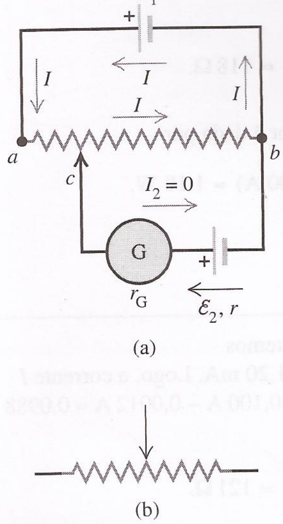


FIGURA 27.15 (a) Circuito de um potenciômetro. (b) Símbolo de um potenciômetro (resistor variável).

27.5 CIRCUITO *R-C*

Nos circuitos analisados até o momento, tomamos qualquer fem e todas as resistências como *constantes* (independentes do tempo); portanto, os potenciais, as correntes e as potências também são independentes do tempo. Porém, no simples processo de carregar e descarregar um capacitor, verificamos uma situação na qual *ocorrem* variações com o tempo das correntes, das voltagens e das potências. Conforme dissemos no Capítulo 25, os capacitores possuem muitas aplicações que usam sua propriedade de armazenar carga e energia, e por isso é de grande interesse saber como são carregados e descarregados.

CARREGANDO UM CAPACITOR

A Figura 27.16 mostra como um circuito simples pode ser usado para carregar um capacitor. Denomina-se **circuito *R-C*** um circuito que possui um resistor em série com um capacitor, tal como ilustrado nessa figura. Idealizamos a bateria (ou fonte de potência) com uma fem $\mathcal{E}$ constante e resistência interna nula ($r = 0$) e desprezamos as resistências dos condutores usados nas conexões.

Começamos com o capacitor inicialmente descarregado (Figura 27.16a); a seguir, em um dado instante $t = 0$, fechamos a chave completando o circuito e permitindo que a bateria seja carregada pela corrente (Figura 27.16b). Do ponto de vista prático, a corrente começa no mesmo instante em todas as partes do circuito, e a cada instante a corrente é a mesma em todas as partes.

ATENÇÃO ▸ Até este ponto, tomamos as diferenças de potencial (voltagens), as correntes e as cargas como constantes e usamos as *letras maiúsculas* V, I e Q para designar, respectivamente, essas grandezas. Para distinguir uma grandeza constante daquela que varia com o tempo, usaremos *letras minúsculas* v, i e q para designar, respectivamente, as voltagens, as correntes e as cargas variáveis com o tempo. Sugerimos que você adote essa convenção em seus estudos. ◂

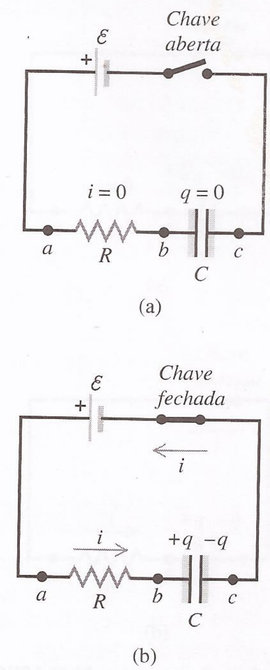


FIGURA 27.16 Circuito para carregar um capacitor. (a) Imediatamente antes de a chave ser fechada, a carga é igual a zero. Quando a chave é fechada ($t = 0$), a corrente salta de zero até $\mathcal{E}/R$. (b) Depois de um tempo t posterior, quando $t \to \infty$, $q \to Q$ e $i \to 0$.

Como o capacitor da Figura 27.16 está inicialmente descarregado, a diferença de potencial v_{bc} através dele é igual a zero para $t = 0$. Para esse instante, pela lei das malhas de Kirchhoff, a voltagem v_{ab} através do resistor R é igual à fem da bateria $\mathcal{E}$. A corrente inicial através do resistor, que chamaremos de I_0, é dada pela lei de Ohm: $I_0 = v_{ab}/R = \mathcal{E}/R$.

À medida que o capacitor se carrega, sua voltagem v_{bc} aumenta e a diferença de potencial v_{ab} através do resistor diminui, o que corresponde a uma diminuição da corrente. A soma dessas duas voltagens é constante e igual a $\mathcal{E}$. Depois de um longo tempo, o capacitor fica completamente carregado, a corrente torna-se igual a zero e a diferença de potencial v_{ab} através do resistor se anula. Então, a fem total $\mathcal{E}$ surge nos terminais do capacitor e $v_{bc} = \mathcal{E}$.

Seja q a carga do capacitor e i a corrente no circuito após um tempo t depois de a chave ser fechada. Escolhemos como sentido positivo da corrente aquele que corresponde ao fluxo de carga positiva que entra na placa esquerda do capacitor, como indicado na Figura 27.16b. As voltagens instantâneas v_{ab} e v_{bc} são dadas por

$$v_{ab} = iR, \qquad v_{bc} = \frac{q}{C}.$$

Aplicando a lei das malhas de Kirchhoff, obtemos

$$\mathcal{E} - iR - \frac{q}{C} = 0. \tag{27.9}$$

Ocorre uma queda de potencial igual a iR quando nos deslocamos de a para b e igual a q/C quando nos deslocamos de b para c. Explicitando i na Equação (27.9), encontramos

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R} - \frac{q}{RC}. \tag{27.10}$$

No instante $t = 0$, quando a chave está inicialmente fechada, o capacitor está descarregado e, portanto, $q = 0$. Substituindo $q = 0$ na Equação (27.10), verificamos que a corrente *inicial* I_0 é dada por $I_0 = \mathcal{E}/R$, como já havíamos observado. Se o capacitor não estivesse conectado no circuito, o último termo da Equação (27.10) não existiria; então, a corrente seria *constante* e igual a $\mathcal{E}/R$.

À medida que a carga q aumenta, o termo q/RC torna-se maior e a carga do capacitor tende a seu valor final, o qual será designado por Q_f. A corrente diminui e por fim se anula. Quando $i = 0$, a Equação (27.10) fornece

$$\frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{Q_f}{RC}, \qquad Q_f = C\mathcal{E}. \tag{27.11}$$

Note que a carga final Q_f não depende de R.

A corrente e a carga do capacitor em função do tempo são indicadas na Figura 27.17. No instante em que a chave é fechada ($t = 0$), a corrente dá um salto para seu valor inicial $I_0 = \mathcal{E}/R$; depois disso, ela tende a zero gradualmente. A carga do capacitor começa igual a zero e tende a seu valor final dado pela Equação (27.11), $Q_f = C\mathcal{E}$.

Podemos deduzir expressões gerais para a corrente i e para a carga q em função do tempo. Considerando nossa escolha do sentido positivo da corrente (Figura 27.16b), i é a taxa com a qual a carga positiva chega à placa esquerda (positiva) do capacitor; logo, $i = dq/dt$. Fazendo essa substituição na Equação (27.10), obtemos

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\mathcal{E}}{R} - \frac{q}{RC} = -\frac{1}{RC}(q - C\mathcal{E}).$$

Podemos reagrupar a expressão na forma

$$\frac{dq}{q - C\mathcal{E}} = -\frac{dt}{RC}$$

e a seguir, integrando ambos os membros da equação, encontramos q' e t', portanto podemos usar q e t para os limites superiores. Os limites inferiores são $q' = 0$ e $t' = 0$:

$$\int_0^q \frac{dq'}{q' - C\mathcal{E}} = -\int_0^t \frac{dt'}{RC}$$

Quando fazemos a integração, obtemos

$$\ln\left(\frac{q - C\mathcal{E}}{-C\mathcal{E}}\right) = -\frac{t}{RC}.$$

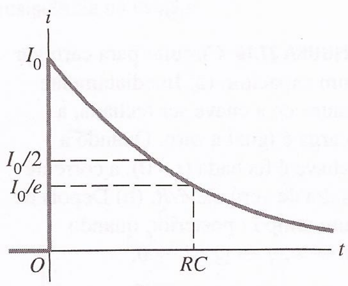
Tomando a função exponencial de ambos os membros da equação (ou seja, tomando a função inversa do logaritmo neperiano) e explicitando q, encontramos

$$\frac{q - C\mathcal{E}}{-C\mathcal{E}} = e^{-t/RC},$$

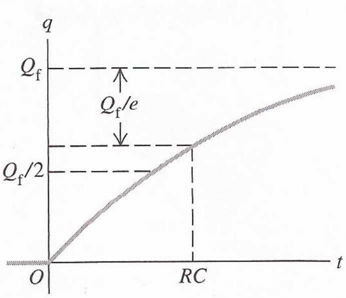
$$q = C\mathcal{E}(1 - e^{-t/RC}) = Q_f(1 - e^{-t/RC}) \quad \text{(circuito } R\text{-}C\text{, carregando um capacitor).} \tag{27.12}$$

A corrente instantânea i nada mais é do que a derivada da Equação (27.12) em relação ao tempo:

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{\mathcal{E}}{R}e^{-t/RC} = I_0 e^{-t/RC} \quad \text{(circuito } R\text{-}C\text{, carregando um capacitor).} \tag{27.13}$$



(a)



(b)

FIGURA 27.17 A corrente i e a carga q do capacitor em função do tempo para o circuito indicado na Figura 27.16. A corrente inicial é I_0 e a carga inicial do capacitor é igual a zero. A corrente tende a zero assintoticamente e a carga do capacitor tende assintoticamente a seu valor final Q_f.

Tanto a carga quanto a corrente são funções *exponenciais* do tempo. A Figura 27.17a mostra um gráfico da Equação (27.13), e a Figura 27.17b explicita um gráfico da Equação (27.12).

CONSTANTE DE TEMPO

Depois de um tempo igual a RC, a corrente em um circuito R-C diminui de um valor $1/e$ (aproximadamente igual a 0,368) em relação a seu valor inicial. Nesse instante, a carga do capacitor atingiu $(1 - 1/e) = 0{,}632$ de seu valor final $Q_f = C\mathcal{E}$. O produto RC fornece a medida da velocidade durante o processo de carga do capacitor. O produto RC denomina-se **constante de tempo** ou **tempo de relaxação** do circuito, sendo designado pela letra τ:

$$\tau = RC \quad \text{(constante de tempo de um circuito } R\text{-}C\text{).} \tag{27.14}$$

Quando o valor de τ é pequeno, o capacitor se carrega rapidamente; quando ele é grande, o tempo para carregar o capacitor é mais longo. Se a resistência é pequena, a corrente flui com mais facilidade e o capacitor se carrega mais rapidamente. Quando R é dado em ohms e C, em farads, τ é dado em segundos.

Na Figura 27.17a, o eixo horizontal representa uma *assíntota* da curva. Falando estritamente, a corrente i nunca atinge exatamente o zero. Porém, quanto mais tempo esperamos, ela se torna mais próxima do zero. Depois de um tempo igual a $10RC$, a corrente passa a ser igual a 0,000045 de seu valor inicial. Analogamente, a curva indicada na Figura 27.17b tende assintoticamente à linha horizontal tracejada assinalada com a ordenada Q_f. A carga q nunca atinge esse valor exato, porém, depois de um tempo igual a $10RC$, a carga torna-se igual a 0,000045 do valor final Q_f. Convidamos você a verificar que o produto RC possui dimensão de tempo.

DESCARREGANDO UM CAPACITOR

Suponha agora que o capacitor da Figura 27.16b já esteja carregado com uma carga Q_0; a seguir removemos a bateria do circuito *R-C* e conectamos os pontos *a* e *c* a uma chave aberta (Figura 27.18a). Depois fechamos a chave e damos partida para o cronômetro em $t = 0$; nesse instante, $q = Q_0$. Então, o capacitor se *descarrega* através do resistor e sua carga diminui até zero.

Novamente, designamos por q a carga do capacitor em função do tempo e i a corrente variável com o tempo depois que a chave é fechada. Na Figura 27.18b, fizemos a mesma escolha da Figura 27.16b para o sentido positivo da corrente. Assim, a lei das malhas de Kirchhoff fornece a Equação (27.10), porém com $\mathcal{E} = 0$; ou seja,

$$i = \frac{dq}{dt} = -\frac{q}{RC}. \qquad (27.15)$$

A corrente i agora é negativa; isso ocorre porque uma carga positiva q está deixando a placa esquerda do capacitor da Figura 27.18b, de modo que a corrente possui o sentido oposto ao indicado na figura. No instante $t = 0$, quando $q = Q_0$, a corrente inicial é dada por $I_0 = -Q_0/RC$.

Para determinarmos q em função do tempo, reagrupamos a Equação (27.15), novamente mudando os nomes da variáveis para q' e t' e integramos. Agora, os limites para q' são de Q_0 até q. Obtemos

$$\int_{Q_0}^{q} \frac{dq'}{q'} = -\frac{1}{RC}\int_0^t dt',$$

$$\ln\frac{q}{Q_0} = -\frac{t}{RC},$$

$$q = Q_0 e^{-t/RC} \quad \text{(circuito } R\text{-}C\text{, descarregando um capacitor).} \qquad (27.16)$$

A corrente instantânea i é a derivada da equação anterior em relação ao tempo:

$$i = \frac{dq}{dt} = -\frac{Q_0}{RC}e^{-t/RC} = I_0 e^{-t/RC} \quad \text{(circuito } R\text{-}C\text{, descarregando um capacitor).} \qquad (27.17)$$

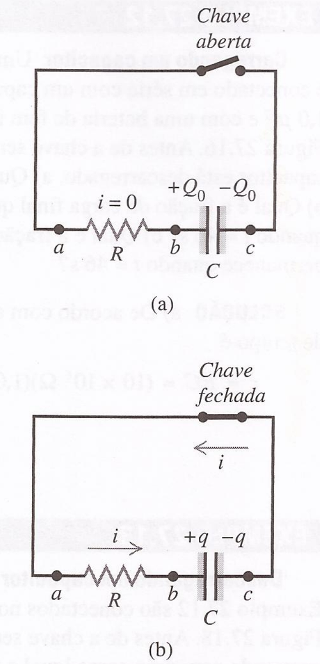


FIGURA 27.18 (a) Antes de a chave ser fechada no instante $t = 0$, a carga do capacitor é Q_0 e a corrente é zero. (b) No instante t depois de a chave ser fechada, a carga do capacitor é q e a corrente é i. O sentido real da corrente é oposto ao indicado; a corrente i é negativa. Depois de um longo tempo, tanto a carga q quanto a corrente i tendem a zero.

Os gráficos da corrente e da carga são indicados na Figura 27.19; ambas as grandezas tendem a zero exponencialmente. Comparando esses resultados com as equações (27.12) e (27.13), vemos que as expressões das correntes são idênticas, exceto o sentido de I_0. A carga do capacitor tende a zero assintoticamente na Equação (27.16), enquanto a *diferença* entre q e Q_f tende a zero assintoticamente na Equação (27.12).

Considerações de energia permitem obter uma compreensão melhor do comportamento de um circuito *R-C*. Enquanto o capacitor está sendo carregado, a bateria fornece energia ao circuito com uma taxa instantânea $P = \mathcal{E}i$. A taxa instantânea de dissipação de energia no resistor é i^2R e a taxa instantânea de armazenamento de energia no capacitor é $iv_{bc} = iq/C$. Multiplicando a Equação (27.9) por i, obtemos

$$\mathcal{E}i = i^2R + iq/C. \qquad (27.18)$$

A partir desse resultado, se conclui que uma parte da potência $\mathcal{E}i$ fornecida pela bateria é dissipada no resistor (i^2R) e a outra parte é armazenada no capacitor (iq/C).

A energia *total* fornecida pela bateria enquanto o capacitor está sendo carregado é igual à fem $\mathcal{E}$ multiplicada pela carga total Q_f, ou seja, $\mathcal{E}Q_f$. A energia total armazenada no capacitor, de acordo com a Equação (25.9), é $Q_f\mathcal{E}/2$. Portanto, *exatamente a metade* da energia total fornecida pela bateria é armazenada no capacitor e a outra metade é dissipada no resistor. É surpreendente que essa divisão meio a meio da energia não dependa de C, nem de R, nem de $\mathcal{E}$. Esse resultado também pode ser obtido detalhadamente fazendo-se a integral sobre o tempo total para cada uma das grandezas que indicam potência na Equação (27.18). Deixamos esse cálculo como divertimento para você (veja o Problema 27.69).

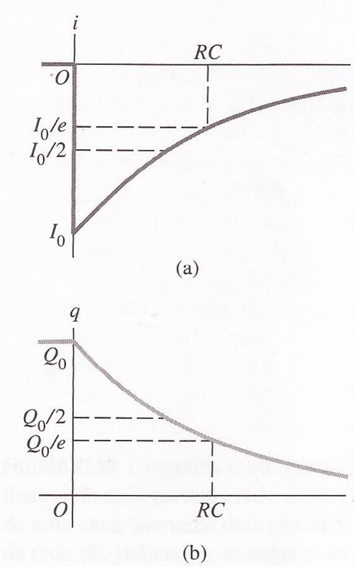


FIGURA 27.19 A corrente i e a carga q do capacitor em função do tempo para o circuito indicado na Figura 27.18. A corrente inicial é I_0 e a carga inicial do capacitor é Q_0; tanto i quanto q tendem a zero assintoticamente.

EXEMPLO 27.12

Carregando um capacitor Um resistor com resistência 10 MΩ é conectado em série com um capacitor cuja capacitância é de 1,0 μF e com uma bateria de fem igual a 12 V, como indicado na Figura 27.16. Antes de a chave ser fechada no instante $t = 0$, o capacitor está descarregado. a) Qual é a constante de tempo? b) Qual é a fração da carga final que está sobre uma das placas quando $t = 46$ s? c) Qual é a fração da corrente inicial que permanece quando $t = 46$ s?

SOLUÇÃO a) De acordo com a Equação (27.14), a constante de tempo é

$$\tau = RC = (10 \times 10^6\ \Omega)(1{,}0 \times 10^{-6}\ \text{F}) = 10\ \text{s}.$$

b) A fração da carga final do capacitor é q/Q_f. De acordo com a Equação (27.12),

$$\frac{q}{Q_f} = 1 - e^{-t/RC} = 1 - e^{-(46\ \text{s})/(10\ \text{s})} = 0{,}99.$$

O capacitor fica 99% carregado depois de um tempo igual a 4,6RC, ou 4,6 constantes de tempo.

c) De acordo com a Equação (27.13),

$$\frac{i}{I_0} = e^{-4{,}6} = 0{,}010.$$

Depois de um tempo igual a 4,6 constantes de tempo, a corrente diminuiu para 1% do seu valor inicial.

EXEMPLO 27.13

Descarregando um capacitor O resistor e o capacitor do Exemplo 27.12 são conectados novamente, como indica a Figura 27.18. Antes de a chave ser fechada, o capacitor foi carregado com uma carga igual a 5,0 μC; a seguir a chave é fechada no instante $t = 0$ e o capacitor começa a se descarregar. a) Em que instante a carga do capacitor é igual a 0,50 μC? b) Qual é a corrente nesse instante?

SOLUÇÃO a) De acordo com a Equação (27.16), o tempo t é dado por

$$t = -RC \ln \frac{q}{Q_0}$$

$$= -(10 \times 10^6\ \Omega)(1{,}0 \times 10^{-6}\ \text{F}) \ln \frac{0{,}50\ \mu\text{C}}{5{,}0\ \mu\text{C}} = 23\ \text{s}.$$

O resultado equivale a 2,3 vezes a constante de tempo $\tau = RC = 10$ s.

b) De acordo com a Equação (27.17), para $Q_0 = 5{,}0\ \mu\text{C} = 5{,}0 \times 10^{-6}$ C,

$$i = -\frac{Q_0}{RC} e^{-t/RC} = -\frac{5{,}0 \times 10^{-6}\ \text{C}}{10\ \text{s}} e^{-2{,}3} = -5{,}0 \times 10^{-8}\ \text{A}.$$

Durante a descarga do capacitor, a corrente possui um sentido contrário ao da corrente que flui quando o capacitor está carregando. Poderíamos economizar o esforço para calcular $e^{-t/RC}$ notando que, no referido instante, $q = 0{,}10Q_0$; de acordo com a Equação (27.16), isso significa que $e^{-t/RC} = 0{,}10$.

27.6 Sistemas de Distribuição de Potência

Um Estudo de Análise de Circuitos

Concluímos este capítulo com uma breve discussão sobre aplicações práticas de sistemas de distribuição de potência em residências e automóveis. Os automóveis usam sistemas elétricos com corrente contínua (dc), enquanto a distribuição da energia elétrica para uso comercial, industrial e doméstico é feita através da corrente alternada (ac) em virtude da facilidade de aumentar ou diminuir a diferença de potencial mediante o uso de transformadores. Os conceitos básicos sobre a fiação e sobre as conexões podem ser aplicados para os dois tipos de corrente. Discutiremos os circuitos de corrente alternada com detalhes no Capítulo 32.

Lâmpadas, motores e demais aparelhos elétricos devem sempre ser conectados em *paralelo* com a fonte de tensão (pelos fios fornecidos pela companhia de distribuição de energia elétrica ou pelos fios provenientes da bateria e do alternador de um automóvel). Se os aparelhos elétricos fossem conectados em série, caso um aparelho queimasse, todos os demais deixariam de funcionar (veja o Exemplo 27.2 na Seção 27.2). O esquema básico do sistema de fiação de uma casa é indicado na Figura 27.20. Um dos fios da "linha", como chamamos o par de fios condutores, denomina-se fio *neutro*; ele é sempre conectado à "terra" existente no painel de entrada. Para uma casa, a *terra* é na realidade um eletrodo inserido no solo (geralmente um bom condutor) ou, algumas vezes, conectado aos canos de água metálicos. Os eletricistas costumam chamar um dos fios da linha de "neutro" — que possui o mesmo potencial da terra — e o outro fio de "ligado" ou "com tensão", o qual possui um dado potencial em relação à terra. Muitos sistemas de distribuição para uso doméstico apresentam *duas* linhas com tensão com polaridades contrárias em relação ao fio neutro. Voltaremos a falar desses detalhes mais adiante.