VOLUME 3

ELETRICIDADE E MAGNETISMO

FÍSICA

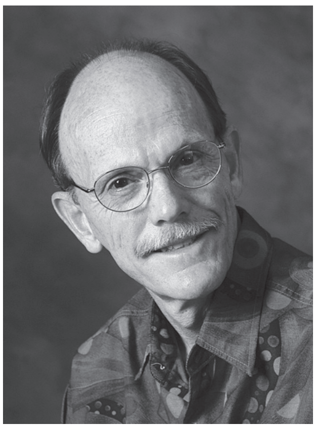
UMA ABORDAGEM ESTRATÉGICA

2ª EDIÇÃO

bookman®

RANDALL D. KNIGHT

Sobre o Autor



Randy Knight leciona Física básica há 25 anos na Ohio State University, EUA, e na Califórnia Polytechnic University, onde atualmente é professor de física. O professor Knight bacharelou-se em Física pela Washington University, em Saint Louis, e doutorou-se em Física pela University of Califórnia, Berkeley. Fez pós-doutorado no Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, antes de trabalhar na Ohio State University. Foi aí que ele começou a pesquisar sobre o ensino da física, o que, muitos anos depois, o levou a escrever este livro.

Os interesses de pesquisa do professor Knight situam-se na área de laser e espectroscopia, com cerca de 25 artigos de pesquisa publicados. Ele também dirige o programa de estudos ambientais da Cal Poly, onde, além de física introdutória, leciona tópicos relacionados a energia, oceanografia e meio ambiente. Quando não está em sala de aula ou na frente de um computador, o professor Knight está fazendo longas caminhadas, remando em um caiaque, tocando piano ou usufruindo seu tempo com a esposa Sally e seus sete gatos.

K71f Knight, Randall D.
Física 3 [recurso eletrônico] : uma abordagem estratégica / Randall Knight ; tradução Manuel Almeida Andrade Neto. – 2. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre : Bookman, 2009.

Editado também como livro impresso em 2009.
ISBN 978-85-7780-553-2

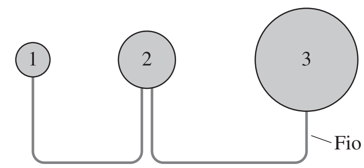
1. Física. 2. Eletricidade. 3. Magnetismo. I. Título.

CDU 537

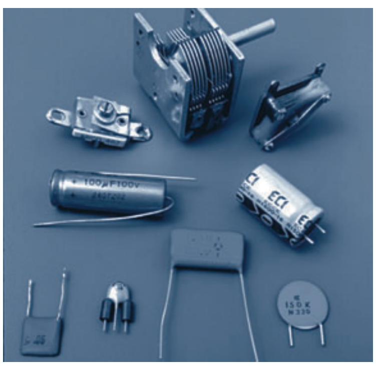
Catalogação na publicação: Renata de Souza Borges CRB-10/1922

esboçar um mapa de contorno que mostre um conjunto plausível de superfícies equipotenciais. Você pode, então, desenhar linhas de campo elétrico (linhas de campo são mais fáceis de desenhar do que vetores de campo) que sejam perpendiculares às equipotenciais, que apontem no sentido em que as equipotenciais decrescem e que estejam mais próximas umas das outras onde o espaçamento entre as linhas de contorno for menor.

PARE E PENSE 30.4 Três esferas de metal carregadas, com raios diferentes, estão conectadas por um fio fino metálico. O potencial elétrico e o correspondente campo elétrico na superfície de cada esfera são, respectivamente, V e E. Qual das seguinrtes alternativas é verdadeira?



a. $V_1 = V_2 = V_3$ e $E_1 = E_2 = E_3$
b. $V_1 = V_2 = V_3$ e $E_1 > E_2 > E_3$
c. $V_1 > V_2 > V_3$ e $E_1 = E_2 = E_3$
d. $V_1 > V_2 > V_3$ e $E_1 > E_2 > E_3$
e. $V_3 > V_2 > V_1$ e $E_3 = E_2 = E_1$
f. $V_3 > V_2 > V_1$ e $E_3 > E_2 > E_1$



Capacitores são elementos importantes de circuitos elétricos. Eles se apresentam em uma variedade de tamanhos e formas.

30.5 Capacitância e capacitores

Introduzimos o capacitor de placas parelelas no Capítulo 27 e fizemos uso freqüente dele desde então. Assumimos que o capacitor estivesse carregado, mas não abordamos *como* ele é carregado. A Figura 30.21 mostra as duas placas de um capacitor conectadas por fios condutores aos dois terminais de uma bateria. O que acontece? E como a diferença de potencial ΔV_C, através do capacitor, está relacionada à diferença de potencial ΔV_{bat} da bateria?

A **FIGURA 30.21a** mostra a situação imediatamente após o capacitor ter sido conectado à bateria e antes dele estar completamente carregado. A escada rolante de carga, que é a bateria, transfere cargas de uma placa do capacitor para a outra, e esse é o trabalho que a bateria realiza durante o carregamento do capacitor. (Os fios conectores são condutores, e você aprendeu no Capítulo 26 que as cargas podem se mover através de condutores, formando uma *corrente*.) A voltagem do capacitor ΔV_C aumenta constantemente à medida que a separação de cargas segue crescendo.

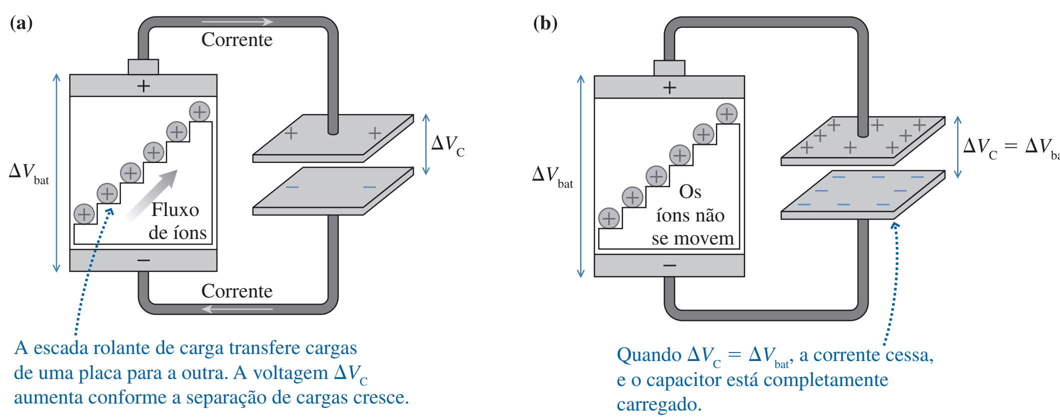


FIGURA 30.21 Um capacitor de placas paralelas é carregado por uma bateria.

Mas esse processo não pode continuar indefinidamente. A carga positiva cada vez maior na placa superior do capacitor exerce uma força repulsiva sobre as novas cargas trazidas pela escada rolante, e, em algum momento, a carga do capacitor ficará tão grande que novas cargas não poderão mais entrar na placa. O capacitor da **FIGURA 30.21b** está, agora, *completamente carregado*. No Capítulo 32, analisaremos quanto tempo o processo requer, mas o tempo é tipicamente menor do que um nanosegundo para um capacitor conectado diretamente a uma bateria por fios de cobre.

Uma vez que o capacitor esteja completamente carregado, com as cargas sem estar mais em movimento, a placa positiva do capacitor, o fio superior e o terminal positivo da bateria formam um único condutor em equilíbrio eletrostático. Essa é uma idéia importante e que não era verdadeira enquanto o capacitor estava sendo carregado. Como você acabou de aprender, quaisquer dois pontos de um condutor em equilíbrio eletrostático estão a um mesmo potencial. Assim, a placa positiva de um capacitor completamene carregado está no mesmo potencial, como o terminal positivo da bateria.

Analogamente, a placa negativa de um capacitor completamente carregado encontra-se no mesmo potencial que o terminal negativo da bateria. Conseqüentemente, a diferença de potencial ΔV_C entre as placas do capacitor corresponde exatamente à diferença de potencial ΔV_{bat} entre os terminais da bateria. **Um capacitor ligado a uma bateria será carregado até que $V_C = \Delta V_{bat}$.** Uma vez que o capacitor esteja carregado, você pode desconectá-lo da bateria; ele manterá sua carga e a diferença de potencial até que, e a menos que algo – uma corrente – permita que as cargas positivas se movam de volta para a placa negativa. Um capacitor no vácuo ideal permaneceria carregado para sempre.

Você aprendeu no Capítulo 29 que a diferença de potencial de um capacitor de placas paralelas está relacionada ao campo elétrico em seu interior pela equação $\Delta V_C = Ed$, onde d é a separação entre as placas. Como você sabe do Capítulo 27, o campo elétrico no interior do capacitor é

$$E = \frac{Q}{\epsilon_0 A} \tag{30.15}$$

onde A é a área superficial das placas. Combinando essas relações, obtemos

$$Q = \frac{\epsilon_0 A}{d}\Delta V_C \tag{30.16}$$

Em outras palavras, **a carga sobre as placas de um capacitor é diretamente proporcional à diferença de potencial entre as placas.**

A razão da carga Q para a diferença de potencial ΔV_C é chamada de **capacitância** C:

$$C \equiv \frac{Q}{\Delta V_C} = \frac{\epsilon_0 A}{d} \qquad \text{(capacitor de placas paralelas)} \tag{30.17}$$

A capacitância é uma propriedade puramente *geométrica* de dois eletrodos porque ela depende tão somente de sua área superficial e do espaçamento entre suas placas. A unidade do SI para a capacitância é o **farad**, em homenagem a Michael Faraday. Um farad é definido como

$$1 \text{ farad} = 1 \text{ F} \equiv 1 \text{ C/V}$$

Um farad vem a ser um valor enorme de capacitância. Capacitâncias de capacitores práticos são normalmente medidas em microfarads (μF) ou picofarads (1 pF $= 10^{-12}$ F).

Com essa definição de capacitância, a Equação 30.17 pode ser escrita como

$$\boxed{Q = C\Delta V_C \qquad \text{(carga de um capacitor)}} \tag{30.18}$$

A carga de um capacitor é determinada conjuntamente pela diferença de potencial suprida por uma bateria *e* por uma propriedade dos eletrodos chamada capacitância.

As teclas da maioria dos teclados de computador são chaves feitas com capacitores. Ao ser pressionar uma tecla, empurra-se as duas placas de um capacitor uma para perto da outra, o que aumenta sua capacitância. Um capacitor maior pode reter mais carga, então uma corrente momentânea leva carga da bateria (ou de uma fonte de alimentação) para o capacitor. Essa corrente é sentida, e o teclar é, então, registrado. Capacitores que funcionam como chaves são muito mais confiáveis do que as chaves de contado do tipo "liga-desliga".

EXEMPLO 30.6 Carregando um capacitor

O espaçamento entre as placas de um capacitor de 1,0 μF é de 0,050 mm.

a. Qual é a área superficial das placas?

b. Que quantidade de carga encontra-se sobre as placas se o capacitor está acoplado a uma bateria de 1,5 V?

MODELO Considere que a bateria seja ideal e que suas placas sejam paralelas.

RESOLUÇÃO a. A partir da definição de capacitância,

$$A = \frac{dC}{\epsilon_0} = 5{,}65 \text{ m}^2$$

b. A carga é $Q = C\Delta V_C = 1{,}5 \times 10^{-6}$ C $= 1{,}5$ μC.

AVALIAÇÃO A área superficial necessária para construir um capacitor de 1,0 μF (um valor típico bastante comum) é enorme. Veremos na Seção 30.7 como a área pode ser reduzida pela inserção de um isolante entre as placas de um capacitor.

Confeccionando um capacitor

O capacitor de placas paralelas é importante porque é fácil para analisar e porque produz um campo elétrico uniforme. Mas capacitores e capacitância não estão limitados a eletrodos planos e paralelos. *Quaisquer* dois eletrodos, sem que importe suas formas, formam um capacitor.

A **FIGURA 30.22** mostra dois eletrodos de formas arbitrárias carregados com $\pm Q$. A carga total, como no caso do capacitor de placas paralelas, é nula. Pela definição, a capacitância dos dois eletrodos é

$$C = \frac{Q}{\Delta V_C} \tag{30.19}$$

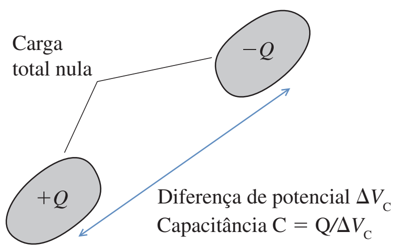


FIGURA 30.22 Dois eletrodos quaisquer formam um capacitor.

onde ΔV_C é a diferença de potencial entre os eletrodos positivo e negativo. Pode parecer que a capacitância depende de uma quantidade de carga, todavia a diferença de potencial é proporcianal a Q. Conseqüentemente, **a capacitância depende apenas da geometria dos eletrodos.**

Para fazermos uso da Equação 30.19, devemos ser capazes de determinar a diferença de potencial entre os dois eletrodos quando se encontram carregados com $\pm Q$. O exemplo seguinte mostra como isso é feito.

EXEMPLO 30.7 Um capacitor esférico

Uma esfera metálica de raio R_1 está dentro de uma esfera oca e metálica de raio R_2, sendo ambas concêntricas. Qual é a capacitância desse capacitor esférico?

MODELO Considere que a esfera interna seja negativa, e a externa, positiva.

VISUALIZAÇÃO A **FIGURA 30.23** mostra as duas esferas

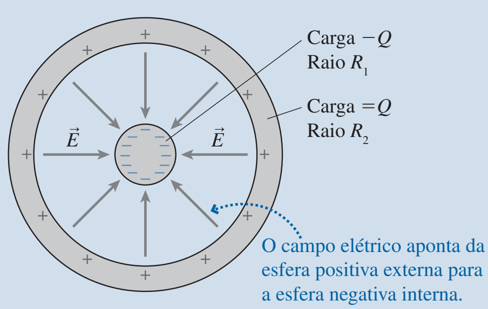


FIGURA 30.23 Um capacitor esférico.

RESOLUÇÃO Talvez você esteja pensndo que poderíamos determinar a diferença de potencial entre as esferas usando o resultado do Capítulo 29 para o potencial de uma esfera carregada. Entretanto, aquele era o potencial de uma esfera carregada *isolada*. Para determinar a diferença de potencial entre *duas* esferas, precisamos usar a Equação 30.3:

$$\Delta V = V_f - V_i = -\int_{s_i}^{s_f} E_s\, ds$$

O campo elétrico entre as esferas é a superposição dos campos criados pela esfera interna e pela esfera externa. O campo produzido pela esfera interna é igual ao gerado por uma carga puntiforme $-Q$, enquanto, pela lei de Gauss, o campo no interior da esfera exterior é nulo. Integraremos ao longo de uma linha radial que vai de $s_i = R_1$, sobre a esfera interior, até $s_f = R_2$, sobre a esfera exterior. O componente E_s do campo é negativo porque o campo aponta para dentro. Assim, a diferença de potencial é

$$\Delta V_C = -\int_{R_1}^{R_2}\left(\frac{-Q}{4\pi\epsilon_0 s^2}\right)ds = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0}\int_{R_1}^{R_2}\frac{ds}{s^2} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$$

Então, a partir da definição de capacitância,

$$C = \frac{Q}{\Delta V_C} = 4\pi\epsilon_0\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)^{-1} = 4\pi\epsilon_0\frac{R_1R_2}{R_2 - R_1}$$

AVALIAÇÃO Como esperado, a capacitância depende da geometria, mas não, da carga Q. Note que não precisamos considerar uma esfera interior negativa, mas uma esfera interior positiva teria exigido uma integração em direção ao interior, desde R_2 até R_1, para que ficássemos com ΔV_C positivo.

Associação de capacitores

Na prática, às vezes dois ou mais capacitores são ligados juntos. A **FIGURA 30.24** ilustra as duas combinações básicas: **capacitores em paralelo** e **capacitores em série**. Note que todo capacitor, sem que importe a sua forma geométrica real, é representado em *diagramas de circuito* por duas linhas paralelas.

NOTA ► Os termos "capacitores em paralelo" e "capacitor de placas paralelas" não descrevem a mesma coisa. O primeiro termo descreve como dois ou mais capacitores estão ligados uns aos outros. O segundo termo descreve como um capacitor específico é construído. ◄

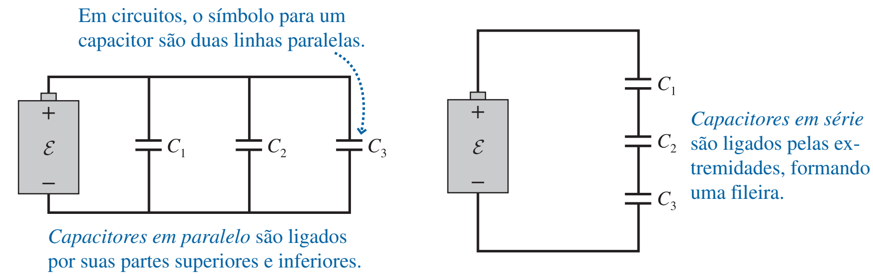


FIGURA 30.24 Capacitores em paralelo e em série.

Como mostraremos mais adiante, capacitores em parelelo ou em série podem ser representados por uma única **capacitância equivalente**. Demostraremos isso primeiro para os dois capacitores em paralelo C_1 e C_2 da **FIGURA 30.25a**. Devido ao fato de as placas superiores dos dois capacitores estarem conectadas por um fio condutor, eles formam um único condutor em equilíbrio eletrostático. Assim, as duas placas superiores estão em um mesmo potencial. Conseqüentemente, dois (ou mais) capacitores em paralelo mantêm, individualmente, uma *mesma* diferença de potencial ΔV_C entre suas duas placas.

As cargas dos capacitores são $Q_1 = C_1\Delta V_C$ e $Q_2 = C_2\Delta V_C$. No total, a escada rolante de cargas da bateria transferiu uma carga total $Q = Q_1 + Q_2$ dos eletrodos negativos para os eletrodos positivos. Suponha, como na **FIGURA 30.25b**, que substituamos os dois capacitores por um único capacitor com carga $Q = Q_1 + Q_2$ e diferença de potencial ΔV_C. Esse capacitor é equivalente aos dois originais no sentido de que a bateria não pode distinguir a diferença. Em ambos os casos, a bateria tem de estabelecer a mesma diferença de potencial e transferir a mesma quantidade de carga.

Por definição, a capacitância desse capacitor equivalente é

$$C_{eq} = \frac{Q}{\Delta V_C} = \frac{Q_1 + Q_2}{\Delta V_C} = \frac{Q_1}{\Delta V_C} + \frac{Q_2}{\Delta V_C} = C_1 + C_2 \qquad (30.20)$$

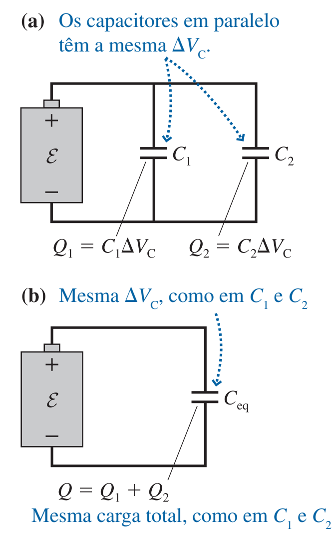


FIGURA 30.25 Substituindo dois capacitores em paralelo por um capacitor equivalente.

Essa análise depende do fato de que **cada capacitor em paralelo possui a mesma diferença de potencial** ΔV_C. Poderíamos facilmente estender essa análise para mais do que dois capacitores. Se os capacitores $C_1, C_2, C_3,$... estão em paralelo, sua capacitância equivalente é

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots \qquad \text{(capacitores em paralelo)} \qquad (30.21)$$

Nem a bateria nem qualquer outra parte de um circuito pode distinguir se os capacitores ligados em paralelo foram substituídos por um único capacitor de capacitância igual a C_{eq}.

Agora consideremos os dois capacitores ligados em série da **FIGURA 30.26a**. A seção central, consistindo da placa inferior de C_1 e da placa superior de C_2, conectadas por um fio, está eletricamente isolada. A bateria não pode remover ou adicionar carga a essa seção. Se ela inicia sem uma carga resultante, deve terminar também sem uma carga resultante. Em conseqüência, os dois capacitores em série têm cargas iguais $\pm Q$. A bateria transfere Q da placa inferior de C_2 para a placa superior de C_1. Essa transferência polariza a seção central, como mostrado, mas ela ainda possui $Q_{res} = 0$.

As diferenças de potencial através dos dois capacitores são $\Delta V_1 = Q/C_1$ e $\Delta V_2 = Q/C_2$. A diferença de potencial total através dos dois capacitores é $\Delta V_C = \Delta V_1 + \Delta V_2$. Suponha que, como na **FIGURA 30.26b**, substituamos os dois capacitores por um único capacitor com carga Q e diferença de potencial $\Delta V_C = \Delta V_1 + \Delta V_2$. Esse capacitor é equivalente aos dois originais porque a bateria tem de estabelecer a mesma diferença de potencial e transferir a mesma quantidade de carga nos dois casos.

Por definição, a capacitância desse capacitor equivalente é $C_{eq} = Q/\Delta V_C$. O inverso da capacitância equivalente é, portanto,

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{\Delta V_C}{Q} = \frac{\Delta V_1 + \Delta V_2}{Q} = \frac{\Delta V_1}{Q} + \frac{\Delta V_2}{Q} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \qquad (30.22)$$

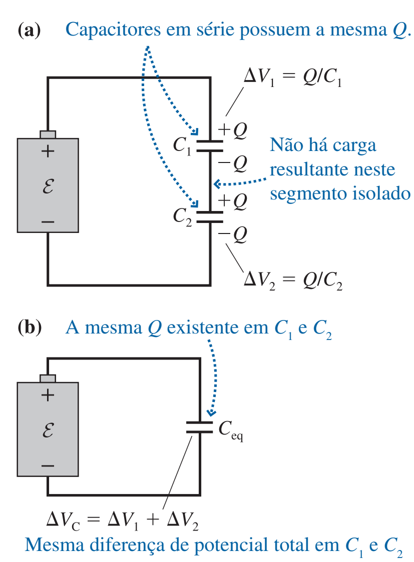


FIGURA 30.26 Substituindo dois capacitores em série por um capacitor equivalente.

Essa análise depende do fato de que **cada capacitor em série possui a mesma carga Q.** Poderíamos estender facilmente essa análise para mais do que dois capacitores. Se os capacitores C_1, C_2, C_3,... estão ligados em série, sua capacitância equivalente é

$$C_{eq} = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \cdots\right)^{-1} \quad \text{(capacitores em série)} \tag{30.23}$$

NOTA ► Tenha o cuidado de evitar o erro comum que consiste em adicionar os inversos e esquecer de inverter a soma. ◄

Vamos resumir os fatos-chave antes de resolvermos um exemplo numérico:

- Todos os capacitores ligados em paralelo estão submetidos à mesma diferença de potencial ΔV_C. Todos os capacitores ligados em série possuem a mesma quantidade de carga $\pm Q$.
- A capacitância equivalente de uma combinação em paralelo de capacitores é *maior* do que a capacitância de qualquer capacitor individual da combinação. A capacitância equivalente de uma combinação em série de capacitores é *menor* do que a capacitância individual de qualquer capacitor do arranjo.

EXEMPLO 30.8 Um circuito com capacitor

Determine a carga e a diferença de potencial através de cada um dos três capacitores da **FIGURA 30.27**.

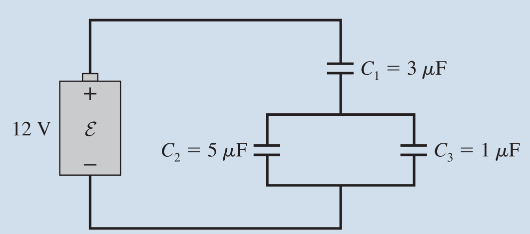


FIGURA 30.27 Um circuito com capacitor.

MODELO Considere que a bateria seja ideal, com $\Delta V_{bat} = \mathcal{E} = 12$ V. Use os resultados obtidos para capacitores ligados em parelelo e em série.

RESOLUÇÃO Os três capacitores não estão em paralelo e nem em série. Mas podemos analisá-los a partir dos pequenos arranjos em que se encontram. Um método útil de *análise de circuitos* é, primeiro, combinar os elementes até chegar a um único elemento equivalente e, então, reverter o processo e calcular os valores para cada elemento. A **FIGURA 30.28** mostra a análise desse circuito. Note que redesenhamos o circuito após cada passo. A capacitância equivalente dos capacitores em série de 3 μF e de 6 μF é determinada por

$$C_{eq} = \left(\frac{1}{3}\,\mu\text{F} + \frac{1}{6}\,\mu\text{F}\right)^{-1} = \left(\frac{2}{6} + \frac{1}{6}\right)^{-1}\mu\text{F} = 2\ \mu\text{F}$$

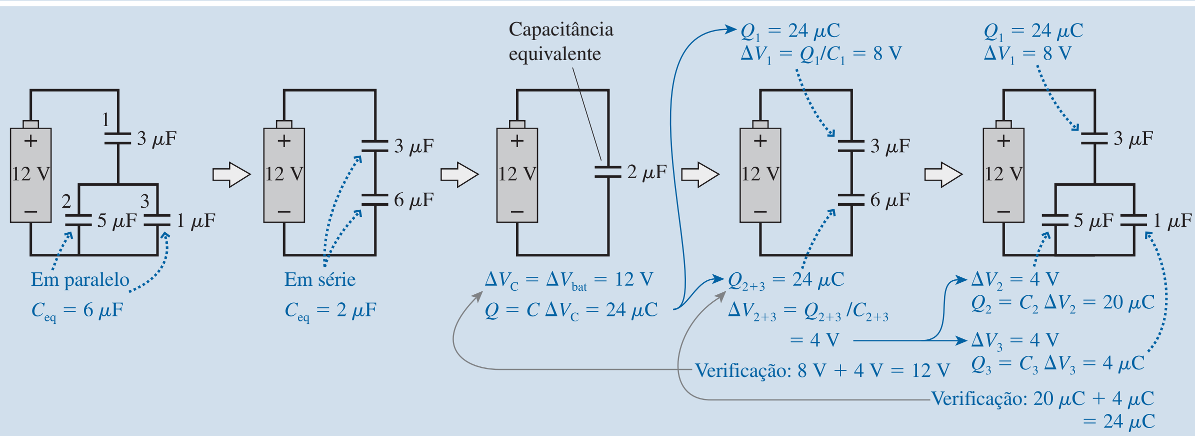


FIGURA 30.28 Analisando o circuito capacitor.

Uma vez que tenhamos determinado a capacitância equivalente correspondente, obtemos $\Delta V_C = \Delta V_{bat} = 12$ V e $Q = C\Delta V_C = 24\ \mu$C. Agora, podemos inverter o sentido. Todos os capacitores em série têm a mesma carga, portanto a carga de C_1 e a de C_{2+3} é $\pm 24\ \mu$C. Isso é suficiente para determinarmos que $\Delta V_1 = 8$ V e $\Delta V_{2+3} = 4$ V. Todos os capacitores em paralelo se encontram sob a mesma diferença de potencial; logo, $\Delta V_2 = \Delta V_3 = 4$ V. Isso é o bastante para determinarmos que $Q_2 = 20\ \mu$C e $Q_3 = 4\ \mu$C. A carga e a diferença de potencial, através de cada um dos três capacitores são mostradas no passo final da Figura 30.28.

AVALIAÇÃO Note que tivemos de efetuar duas importantes verificações de consistência interna. $\Delta V_1 + \Delta V_{2+3} = 8\text{ V} + 4\text{ V}$, constituindo os 12 V que determinamos para o capacitor equivalente de 2 μF. Então, $Q_2 + Q_3 = 20\ \mu\text{C} + 4\ \mu\text{C}$, constituindo os 24 μC que encontramos para o capacitor equivalente de 6 μF. Faremos muito mais análises desse tipo de circuito no próximo capítulo, todavia é importante observar, agora, que a análise de circuito se torna quase infalível *se* você efetuar essas verificações de consistência interna.

Encerra aqui o trecho do livro disponibilizado para esta Unidade de Aprendizagem. Na Biblioteca Virtual da Instituição, você encontra a obra na íntegra.