

Capacitores



Objetivos

- Familiarizar-se com a construção básica de um capacitor e com os fatores que afetam a sua capacidade de armazenar carga em suas placas.
- Ser capaz de determinar a resposta transitória (que varia no tempo) de um circuito capacitivo e de representar em um gráfico as tensões e as correntes resultantes.
- Compreender o impacto da combinação de capacitores em série e em paralelo e aprender a ler os dados da placa de identificação.
- Desenvolver a familiaridade com o uso dos métodos computacionais para analisar circuitos com elementos capacitivos.

10.1 INTRODUÇÃO

Até esse ponto, o resistor foi o componente de circuito que apareceu em nossa análise. Neste capítulo, introduziremos o **capacitor**, que tem um impacto significativo sobre os tipos de circuitos que você será capaz de projetar e analisar. Assim como o resistor, ele é um dispositivo de dois terminais, mas suas características são totalmente diferentes daquelas de um resistor. Na realidade, *o capacitor exhibe suas verdadeiras características somente quando ocorre uma mudança na tensão ou na corrente do circuito*. Toda a potência fornecida a um resistor é dissipada na forma de calor. Um capacitor ideal, entretanto, armazena a energia que lhe é fornecida em uma forma que pode ser retornada ao sistema.

Apesar da construção básica dos capacitores ser realmente bastante simples, ela é um componente que abre a porta para todos os tipos de aplicações práticas, desde *touchpads* a sofisticados sistemas de controle. Algumas aplicações serão introduzidas e discutidas em detalhes mais adiante neste capítulo.

10.2 O CAMPO ELÉTRICO

Lembre-se de que vimos no estudo do Capítulo 2 que existe uma força de atração ou repulsão entre dois

corpos carregados. Agora, examinaremos esse fenômeno de forma mais detalhada, considerando o campo elétrico que existe na região em torno de qualquer corpo carregado. Esse campo elétrico é representado pelas **linhas de campo**, que serão traçadas para indicar a intensidade do campo elétrico em qualquer ponto em torno do corpo carregado. Quanto maior a densidade das linhas de campo, mais intenso o campo elétrico. Na Figura 10.1, por exemplo, a intensidade do campo elétrico é maior na posição *a* que na posição *b*, porque as linhas de campo são mais densas em *a* que em *b*. Isto é, o mesmo número de linhas de fluxo passa através de cada região, mas a área A_1 é muito menor

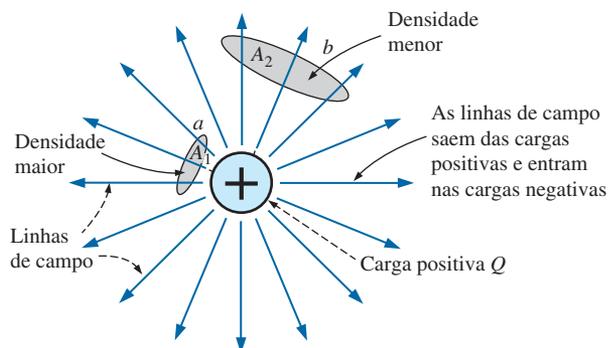


Figura 10.1 Distribuição das linhas de campo em torno de uma carga positiva isolada.

que a área A_2 . O símbolo usado para representar o campo elétrico é a letra grega ψ (psi). O fluxo por unidade de área (densidade de fluxo) será representado pela letra maiúscula D e definido por:

$$D = \frac{\Psi}{A} \quad (\text{fluxo/unidade área}) \quad (10.1)$$

Quanto maior a carga Q em coulombs, maior o número de linhas de campo por unidade de área, independentemente do meio em que ela se encontra. Uma carga com o dobro do valor produzirá o dobro de linhas de campo por unidade de área. Portanto, podemos igualar as duas grandezas:

$$\psi \equiv Q \quad (\text{coulombs, C}) \quad (10.2)$$

Por definição, a **intensidade do campo elétrico** (designada pela letra \mathcal{E}) em um ponto é a força que atua em uma carga unitária positiva nesse ponto; ou seja,

$$\mathcal{E} = \frac{F}{Q} \quad (\text{newtons/coulomb, N/C}) \quad (10.3)$$

Na Figura 10.2, a força exercida sobre uma carga positiva unitária (1 coulomb) por uma carga Q , situada a r metros de distância, pode ser determinada pela **lei de Coulomb** (Equação 2.1) como mostramos a seguir:

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = k \frac{Q(1 \text{ C})}{r^2} = \frac{kQ}{r^2} \quad (k = 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2)$$

Substituindo o resultado na Equação 10.3 para uma carga positiva unitária, resulta em:

$$\mathcal{E} = \frac{F}{Q} = \frac{kQ/r^2}{1/C}$$

e

$$\mathcal{E} = \frac{kQ}{r^2} \quad (\text{N/C}) \quad (10.4)$$

O resultado revela claramente que a intensidade do campo elétrico está diretamente relacionada ao tamanho da carga Q . Quanto maior a carga Q , maior a intensidade do campo elétrico sobre uma carga unitária nas proximidades. Entretanto, a distância é um termo ao quadrado no denominador. O resultado é que, quanto maior a distância

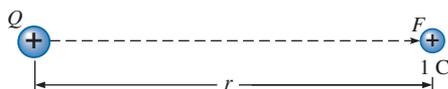


Figura 10.2 Determinação da força sobre uma carga unitária a r metros de uma carga Q de polaridades similar.

da carga Q , menor a intensidade do campo elétrico, o que ocorre de forma drástica devido ao termo ao quadrado. Na Figura 10.1, a intensidade do campo elétrico na região A_2 é, portanto, significativamente menor que na região A_1 .

Para duas cargas de polaridades opostas e de mesmo valor absoluto, a distribuição do fluxo se assemelha àquela que aparece na Figura 10.3. Em geral,

as linhas de campo sempre se dirigem de um corpo positivamente carregado para um corpo negativamente carregado, sempre começam ou terminam perpendicularmente às superfícies carregadas e nunca se interceptam.

Observe na Figura 10.3(a) que as linhas de força estabelecem o padrão mais direto possível da carga positiva para a negativa. Elas são distribuídas uniformemente e têm a distância mais curta entre as duas cargas na horizontal. Esse padrão é um resultado direto do fato de que linhas de força buscam estabelecer o caminho mais curto de um corpo carregado para o outro. O resultado é uma pressão natural para que estejam à distância mais próxima possível. Se dois corpos da mesma polaridade estão próximos um do outro, como mostra a Figura 10.3(b), o resultado é diretamente oposto. As linhas de força tendem a estabelecer um efeito separador entre os dois, com uma ação repulsiva que cresce na medida em que as duas cargas são aproximadas uma da outra.

10.3 CAPACITÂNCIA

Até esse ponto, consideramos apenas as distribuições esféricas isoladas de cargas positivas e negativas, mas a análise pode ser estendida a superfícies carregadas de qualquer formato e tamanho. Na Figura 10.4, por exemplo, duas placas paralelas feitas de um material como o

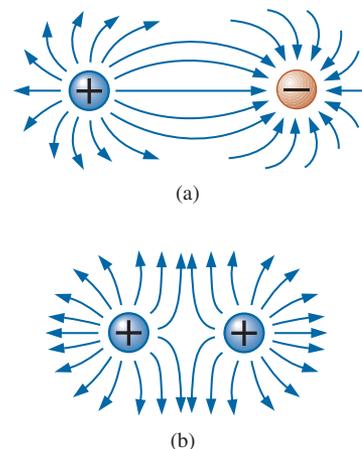


Figura 10.3 Distribuição de linhas de campo: (a) cargas de tipos opostos; (b) cargas de mesmo tipo.

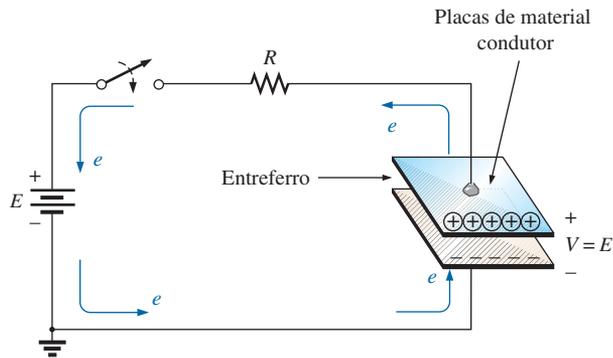


Figura 10.4 Circuito simples de carga com duas placas.

alumínio (o metal mais comumente usado na construção de capacitores) estão conectadas a uma bateria por meio de um resistor e de uma chave. Se as placas estiverem inicialmente descarregadas e a chave estiver aberta, nenhuma carga, positiva ou negativa, será encontrada nelas. Entretanto, no momento em que a chave é fechada, os elétrons são atraídos da placa superior para o terminal positivo da bateria, passando pelo resistor. Ocorrerá, inicialmente, um surto de corrente limitada pelo valor da resistência presente. A intensidade dessa corrente diminuirá, conforme demonstramos na próxima seção. Isso produz uma carga positiva na placa superior. Os elétrons são repelidos pelo terminal negativo em direção à placa inferior pelo condutor inferior, com a mesma velocidade com que eles são atraídos pelo terminal positivo da bateria. Essa transferência de elétrons continua até que a diferença de potencial entre as placas seja exatamente igual à tensão da bateria. O resultado final é uma carga positiva na placa superior e uma carga negativa na placa inferior, muito semelhantes sob vários aspectos às cargas esféricas da Figura 10.3(a).

Antes de continuar, é importante observar que o fluxo inteiro de carga se dá através da bateria e do resistor, e não pela região entre as placas. Em todos os sentidos da definição, *há um circuito aberto entre as placas do capacitor.*

Esse elemento, constituído apenas por duas placas condutoras paralelas separadas por um material isolante (nesse caso, o ar), é denominado **capacitor**.

Capacitância é uma medida da quantidade de carga que o capacitor pode armazenar em suas placas; em outras palavras, é sua capacidade de armazenamento.

Além disso,

quanto mais alta a capacitância de um capacitor, maior a quantidade de carga armazenada nas placas para a mesma tensão aplicada.

A unidade de medida aplicada aos capacitores é o farad (F), em homenagem ao cientista inglês Michael Faraday, que fez importantes pesquisas nesse campo (Figura 10.5). Em particular,

um capacitor possui uma capacitância de 1 farad se uma carga de 1 coulomb ($6,242 \times 10^{18}$ elétrons) for depositada em suas placas por uma diferença de potencial de 1 volt entre elas.

O farad, entretanto, é geralmente uma medida de capacitância grande demais para a maioria das aplicações práticas; assim, o microfarad (10^{-6}) ou o picofarad (10^{-12}) são mais comumente encontrados.

A relação que conecta a tensão aplicada, a carga nas placas e o nível de capacitância é definida pela equação a seguir:

$$C = \frac{Q}{V} \quad \begin{array}{l} C = \text{farads (F)} \\ Q = \text{coulombs (C)} \\ V = \text{volts (V)} \end{array} \quad (10.5)$$

A Equação 10.5 revela que, para uma tensão (V), quanto maior a carga (Q) nas placas (no numerador da equação), mais alto o nível de capacitância (C).

Se escrevemos a equação na forma:

$$Q = CV \quad (\text{coulombs, C}) \quad (10.6)$$



Figura 10.5 Michael Faraday.

Cortesia de Smithsonian Institute Library

Inglês (Londres)

(1791-1867) Químico e Físico Experimental.

Doutor honoris causa pela Oxford University, em 1832.

Cientista experimental sem nunca ter recebido educação formal, começou sua carreira de pesquisador como técnico de laboratório do Royal Institute, em Londres. Interessado no estudo da interação entre campos elétricos e magnéticos, descobriu a *indução eletromagnética*, demonstrando que efeitos elétricos podem ser gerados a partir de um campo magnético (origem do gerador como conhecemos hoje em dia). Descobriu também as *correntes autoinduzidas* e introduziu os conceitos de *linhas e campos de força magnética*. Recebeu mais de cem prêmios acadêmicos e científicos, e se tornou membro da Royal Society em 1824 ainda jovem, aos 32 anos.

torna-se óbvio através da relação de produto que quanto mais alta a capacitância (C) ou tensão aplicada (V), maior a carga nas placas.

EXEMPLO 10.1

- a) Se $82,4 \times 10^{14}$ elétrons são depositados sobre a placa negativa de um capacitor por uma tensão aplicada de 60 V, calcule a capacitância do capacitor.
- b) Se 40 V são aplicados através de um capacitor de 470 μF , calcule a carga nas placas.

Soluções:

- a) Primeiro calcule o número de coulombs de carga, como a seguir:

$$82,4 \times 10^{14} \text{ elétrons} \left(\frac{1 \text{ C}}{6,242 \times 10^{18} \text{ elétrons}} \right) = 1,32 \text{ mC}$$

e então

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{1,32 \text{ mC}}{60 \text{ V}} = 22 \mu\text{F} \quad (\text{valor padrão})$$

- b) Aplicando a Equação 10.6, temos:

$$Q = CV = (470 \mu\text{F})(40 \text{ V}) = 18,8 \text{ mC}$$

Uma vista em corte das placas paralelas na Figura 10.4 aparece na Figura 10.6(a). Observe o **efeito de borda** que ocorre na medida em que as linhas de campo que se originam nos pontos mais distantes da placa negativa se direcionam para completar a conexão. Esse efeito de borda, que tem o poder de reduzir a capacitância líquida,

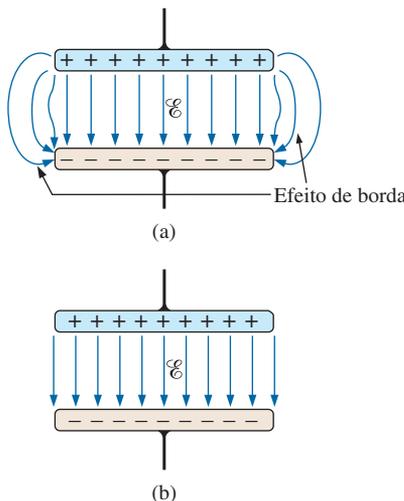


Figura 10.6 Distribuição das linhas de campo na região entre as placas de um capacitor: (a) inclusão do efeito de borda; (b) ideal.

pode ser ignorado na maioria das aplicações. Idealmente, e de maneira que presumiremos a distribuição de linhas de campo neste livro, ela aparecerá como mostra a Figura 10.6(b), em que todas as linhas de campo são uniformemente distribuídas e não ocorre o ‘efeito de borda’.

A **intensidade do campo elétrico** entre as placas é determinada pela tensão através das placas e pela distância entre as placas, como vemos a seguir:

$$\mathcal{E} = \frac{V}{d} \quad \begin{matrix} \mathcal{E} = \text{volts/m (V/m)} \\ V = \text{volts (V)} \\ d = \text{meters (m)} \end{matrix} \quad (10.7)$$

Observe que a distância entre as placas é medida em metros, não se usam centímetros nem polegadas.

A equação para a intensidade do campo elétrico é determinada por dois fatores, apenas: *tensão aplicada e distância entre as placas*. A carga nas placas, o tamanho do capacitor e o material da placa não aparecem na equação.

Muitos valores de capacitância podem ser obtidos do mesmo par de placas paralelas inserindo certos materiais isolantes entre elas. Na Figura 10.7, foi colocado um material isolante entre duas placas paralelas submetidas a uma diferença de potencial de V volts.

Como o material é isolante, os elétrons não conseguem deixar seus átomos e migrar para a placa positiva. As partículas positivas (prótons) e negativas (elétrons) de cada átomo se deslocam, entretanto (como mostra a Figura 10.7(a)) para formar *dipolos*.

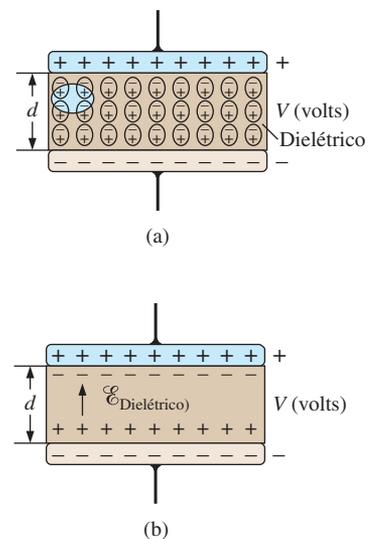


Figura 10.7 Efeito dielétrico sobre a distribuição do campo na região entre as placas de um capacitor: (a) alinhamento dos dipolos no dielétrico; (b) componentes do campo elétrico entre as placas de um capacitor na presença de um dielétrico.

Quando os dipolos se alinham, como na Figura 10.7(a), o material está *polarizado*. Um exame mais minucioso do interior desse material polarizado indica que as partículas negativas e positivas dos dipolos adjacentes se cancelam (observe a região sombreada na Figura 10.7(a)). Mas as cargas positivas na superfície mais próxima da placa negativa do capacitor e as cargas negativas na superfície mais próxima da placa positiva do capacitor não se cancelam, o que resulta no aparecimento de um campo elétrico no interior do isolante ($\mathcal{E}_{\text{dielétrico}}$; Figura 10.7 (b)).

Na Figura 10.8(a), duas placas são separadas por um espaço de ar e têm camadas de carga nas placas como estabelecido pela tensão aplicada e pela distância entre as placas. A intensidade do campo elétrico é \mathcal{E}_1 , como define a Equação 10.7. Na Figura 10.8(b), uma fatia de mica é introduzida, a qual, através de um alinhamento de células dentro do dielétrico, estabelece um campo elétrico \mathcal{E}_2 que se opõe ao campo elétrico \mathcal{E}_1 . O efeito é tentar reduzir a intensidade do campo elétrico entre as placas. No entanto, a Equação 10.7 afirma que a intensidade do campo elétrico *tem de ser* o valor estabelecido pela tensão aplicada e pela distância entre as placas. Essa condição é mantida por meio da colocação de mais carga nas placas, aumentando a intensidade do campo elétrico entre as placas até um nível que cancela o campo elétrico oposto introduzido pela lâmina de mica. O resultado líquido é um aumento da carga nas placas e um aumento no nível de capacitância como estabelece a Equação 10.5.

Diferentes materiais colocados entre placas estabelecem diferentes quantidades de carga adicional nas placas. Todos, entretanto, têm de ser isolantes e têm de poder estabelecer um campo elétrico no interior da estrutura. Uma lista de materiais comuns aparece na Tabela 10.1,

Tabela 10.1 Permissividade relativa (constante dielétrica) ϵ_r de várias substâncias dielétricas.

Dielétrico	ϵ_r (valores médios)
Vácuo	1,0
Ar	1,0006
Teflon®	2,0
Papel parafinado	2,5
Borracha	3,0
Polistireno	3,0
Óleo	4,0
Mica	5,0
Porcelana	6,0
Baquelite®	7,0
Óxido de alumínio	7
Vidro	7,5
Óxido de tântalo	30
Cerâmica	20 – 7.500
Titanato de bário e estrôncio (cerâmica)	7.500,0

e o ar é usado como referência com um índice 1.¹ Todos esses materiais são chamados de **dielétricos**; ‘di’ para *oposição*, ‘elétrico’ para *campo elétrico*. O símbolo ϵ_r na Tabela 10.1 é chamado de **permissividade relativa** (ou **constante dielétrica**). O termo **permissividade** é aplicado como uma medida de quão facilmente um material ‘permite’ o estabelecimento de um campo elétrico em seu meio. A permissividade relativa compara a permissividade de um material com aquela do ar. Por exemplo, a Tabela 10.1 revela que a mica, com uma permissividade relativa de 5, ‘permite’ o estabelecimento de um campo elétrico de oposição no material cinco vezes melhor do que no ar.

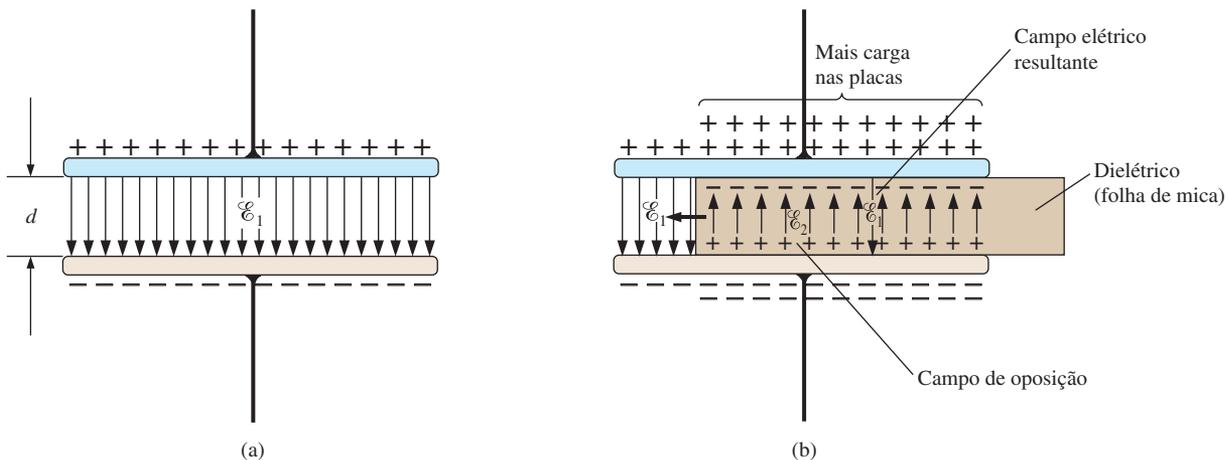


Figura 10.8 Demonstração do efeito da inserção de um dielétrico entre as placas de um capacitor: (a) capacitor de ar; (b) dielétrico sendo inserido.

¹ Apesar de haver uma diferença nas características dielétricas entre o ar e o vácuo, ela é tão pequena que o ar é comumente usado como o nível de referência.

Observe o material cerâmico na parte de baixo da tabela que possui uma permissividade relativa de 7.500; uma permissividade relativa que o torna um dielétrico muito especial na manufatura de capacitores.

Definindo ϵ_o como a permissividade do ar, definimos a permissividade relativa de um material com uma permissividade ϵ por:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_o} \quad (\text{adimensional}) \quad (10.8)$$

Observe que ϵ_r (como mencionado previamente) é frequentemente chamado de **constante dielétrica**, e é uma quantidade adimensional por se tratar de uma razão de quantidades similares. Entretanto, a permissividade tem as unidades de farads/metro (F/m), e é $8,85 \times 10^{-12}$ F/m para o ar. Apesar de a permissividade relativa para o ar que respiramos ser listada como 1,006, o valor de 1 é normalmente usado para a permissividade relativa do ar.

Para todo dielétrico há um potencial que, se aplicado através de seus terminais, romperá os elos dentro dele e fará com que a corrente flua pelo dielétrico. A tensão necessária por comprimento unitário é um indicativo da sua **rigidez dielétrica**, e é chamada de **tensão de ruptura**. Quando a ruptura ocorre, o capacitor tem características muito similares àquelas de um condutor. Um exemplo típico de ruptura dielétrica é o raio, que ocorre quando o potencial entre uma nuvem e a terra é tão alto que uma carga pode passar de uma para outra através da atmosfera (o dielétrico). A rigidez dielétrica média para vários dielétricos é apresentada em volts/mil na Tabela 10.2 (1 mil = 1/1.000 polegadas).

Tabela 10.2 Rigidez dielétrica de alguns materiais dielétricos.

Dielétrico	Rigidez dielétrica (valor médio) em volts/mil
Ar	75
Titanato de bário e estrôncio (cerâmica)	75
Cerâmica	75–1.000
Porcelana	200
Óleo	400
Baquelite®	400
Borracha	700
Papel parafinado	1.300
Teflon®	1.500
Vidro	3.000
Mica	5.000

Um dos parâmetros importantes de um capacitor é a **tensão de trabalho máxima**. Ela define a tensão máxima que pode ser estabelecida através do capacitor em uma base contínua sem danificá-lo e sem modificar suas características. Para a maioria dos capacitores, é a rigidez dielétrica que define a tensão de trabalho máxima.

10.4 CAPACITORES

Construção do capacitor

Agora estamos cientes dos componentes básicos de um capacitor: placas condutivas, separação e dielétrico. No entanto, uma questão permanece: como todos esses fatores interagem para determinar a capacitância de um capacitor? *Placas maiores* permitem um aumento da área para o armazenamento da carga, de maneira que a área das placas deve estar no numerador da equação definidora. *Quanto menor a distância entre as placas*, maior a capacitância, de maneira que esse fator deve aparecer no denominador da equação. Por fim, tendo em vista que *níveis mais altos de permissividade* resultam em níveis mais altos de capacitância, o fator ϵ deve aparecer no numerador da equação definidora.

O resultado é a equação geral para capacitância a seguir:

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad \begin{matrix} C = \text{farads (F)} \\ \epsilon = \text{permissividade} \\ A = \text{m}^2 \\ d = \text{m} \end{matrix} \quad (10.9)$$

Se substituirmos a Equação 10.8 pela permissividade do material, obteremos a equação para a capacitância a seguir:

$$C = \epsilon_o \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (\text{farads, F}) \quad (10.10)$$

ou se substituirmos o valor conhecido para a permissividade do ar, obteremos a equação útil a seguir:

$$C = 8,85 \times 10^{-12} \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (\text{farads, F}) \quad (10.11)$$

É importante observar na Equação 10.11 que a área das placas (na realidade, a área de apenas uma placa) está em metros quadrados (m^2); a distância entre as placas é medida em metros; e o valor numérico de ϵ_r é simplesmente tirado da Tabela 10.1.

Você deve estar ciente também de que a maioria dos capacitores está na faixa do μF , nF ou pF , não na de 1 F ou mais. Um capacitor de 1 F pode ser tão grande quanto uma lanterna comum, exigindo que a armação para o sistema seja bastante grande. A maioria dos capacitores

usados em sistemas eletrônicos é do tamanho da unha de um polegar, ou menor.

Se formarmos a razão da equação para a capacitância de um capacitor com um dielétrico específico com aquela do mesmo capacitor, tendo o ar como o dielétrico, teremos a equação a seguir:

$$\frac{C = \epsilon \frac{A}{d}}{C_o = \epsilon_o \frac{A}{d}} \Rightarrow \frac{C}{C_o} = \frac{\epsilon}{\epsilon_o} = \epsilon_r$$

e

$C = \epsilon_r C_o$

(10.12)

O resultado é que

a capacitância de um capacitor com um dielétrico que tem uma permissividade relativa de ϵ_r é ϵ_r vezes a capacitância ao se usar o ar como dielétrico.

Os exemplos a seguir reexaminam os conceitos e as equações recém-apresentadas.

EXEMPLO 10.2

Na Figura 10.9, se cada capacitor de ar na coluna esquerda é modificado para o tipo que aparece na coluna da direita, calcule o novo nível de capacitância. Os outros fatores permanecem os mesmos, apesar de cada mudança.

Soluções

a) Na Figura 10.9(a), a área aumentou por um fator de três, proporcionando mais espaço para o armazenamento da carga em cada placa. Tendo em vista que a área aparece no numerador da equação de capacitância, a capacitância aumenta por um fator de três. Isto é,

$$C = 3(C_o) = 3(5 \mu F) = 15 \mu F$$

b) Na Figura 10.9(b), a área permaneceu a mesma, mas a distância entre as placas foi aumentada por um fator de dois. O aumento da distância reduz o nível de capacitância, de maneira que a capacitância resultante é metade do que ela era antes. Isto é,

$$C = \frac{1}{2}(0,1 \mu F) = 0,05 \mu F$$

c) Na Figura 10.9(c), a área e a distância entre as placas foram mantidas, mas um dielétrico de papel parafinado (encerado) foi adicionado entre as placas. Tendo em vista que a permissividade aparece no numerador da equação de capacitância, a capacitância aumenta por um fator determinado pela permissividade relativa. Isto é,

$$C = \epsilon_r C_o = 2,5(20 \mu F) = 50 \mu F$$

d) Na Figura 10.9(d), uma série de mudanças está acontecendo ao mesmo tempo. Entretanto, solucionar o problema é simplesmente uma questão de determinar se a mudança aumenta ou diminui a capacitância e, então, colocar o fator multiplicador no numerador ou no denominador da equação. O aumento da área por um fator de quatro produz um multiplicador de quatro no numerador, como mostra a equação a seguir. Reduzir a distância por um fator de 1/8 aumentará a capacitância por seu inverso, ou por um fator de oito. Inserir o dielétrico de mica aumenta a capacitância por um fator de cinco. O resultado é:

$$C = (5) \frac{4}{(1/8)} (C_o) = 160 (1000 \text{ pF}) = 0,16 \mu F$$

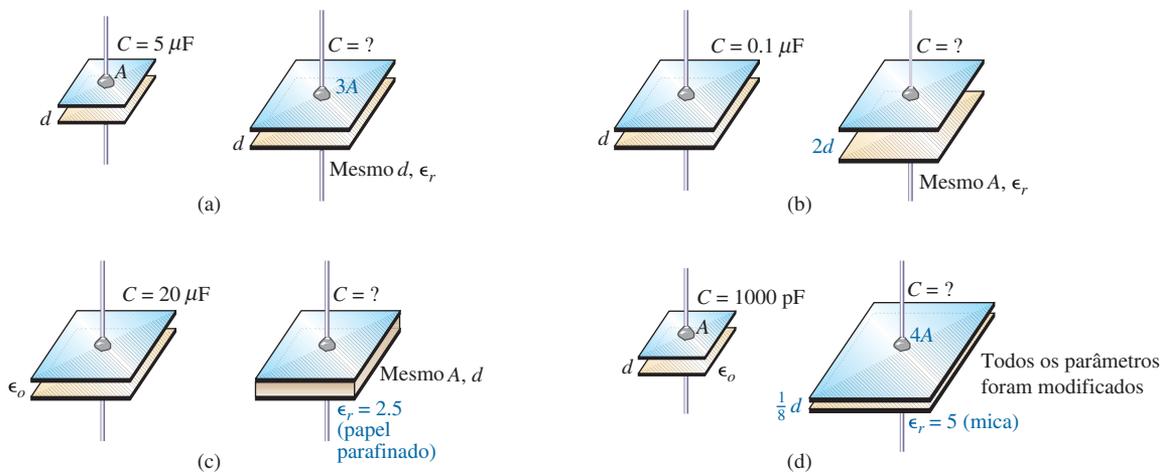


Figura 10.9 Exemplo 10.2.

No exemplo a seguir, as dimensões de um capacitor de ar são fornecidas, e a capacitância deve ser determinada. O exemplo enfatiza a importância de conhecer as unidades de cada fator da equação. A não conversão em um conjunto apropriado de unidades provavelmente produzirá um resultado sem sentido, mesmo que a equação apropriada tenha sido usada e a matemática tenha sido executada de maneira correta.

EXEMPLO 10.3

Considerando o capacitor na Figura 10.10:

- a) Calcule a capacitância.
- b) Calcule a intensidade do campo elétrico entre as placas para o caso de 48 V serem aplicados entre elas.
- c) Calcule a carga em cada placa.

Soluções:

- a) Primeiro, a área e a distância entre as placas têm de ser convertidas para o sistema SI, como exige a Equação 10.11:

$$d = \frac{1}{32} \text{ pol.} \left(\frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ pol.}} \right) = 0,794 \text{ mm}$$

$$e \quad A = (2 \text{ pol.}) (2 \text{ pol.}) \left(\frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ pol.}} \right) \left(\frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ pol.}} \right) = 2,581 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Equação 10.11:

$$C = 8,85 \times 10^{-12} \epsilon_r \frac{A}{d} = 8,85 \times 10^{-12} (1) \frac{(2,581 \times 10^{-3} \text{ m}^2)}{0,794 \text{ mm}} = \mathbf{28,8 \text{ pF}}$$

- b) O campo elétrico entre as placas é determinado pela Equação 10.7:

$$\mathcal{E} = \frac{V}{d} = \frac{48 \text{ V}}{0,794 \text{ mm}} = \mathbf{60,5 \text{ kV/m}}$$

- c) A carga nas placas é determinada pela Equação 10.6:

$$Q = CV = (28,8 \text{ pF})(48 \text{ V}) = \mathbf{1,38 \text{ nC}}$$

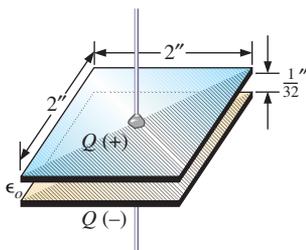


Figura 10.10 Capacitor de ar para o Exemplo 10.3.

No exemplo a seguir, vamos inserir um dielétrico cerâmico entre as placas do capacitor de ar na Figura 10.10 e ver como ele afeta o nível de capacitância, o campo elétrico e a carga nas placas.

EXEMPLO 10.4

- a) Insira um dielétrico cerâmico com um ϵ_r de 250 entre as placas do capacitor na Figura 10.10. Então, determine o novo nível de capacitância. Compare seus resultados com a solução no Exemplo 10.3.
- b) Calcule a intensidade do campo elétrico resultante entre as placas e compare a sua resposta com o resultado no Exemplo 10.3.
- c) Determine a carga em cada uma das placas e compare sua resposta com o resultado no Exemplo 10.3.

Soluções:

- a) Considerando a Equação 10.12, o novo nível de capacitância é

$$C = \epsilon_r C_o = (250)(28,8 \text{ pF}) = \mathbf{7200 \text{ pF} = 7,2 \text{ nF} = 0,0072 \text{ }\mu\text{F}}$$

que é *significativamente mais alto* que o nível no Exemplo 10.3.

$$b) \quad \mathcal{E} = \frac{V}{d} = \frac{48 \text{ V}}{0,794 \text{ mm}} = \mathbf{60,5 \text{ kV/m}}$$

Tendo em vista que a tensão aplicada e a distância entre as placas não mudaram, *o campo elétrico entre as placas permanece o mesmo*.

$$c) \quad Q = CV = (7200 \text{ pF})(48 \text{ V}) = \mathbf{345,6 \text{ nC} = 0,35 \text{ }\mu\text{C}}$$

Agora sabemos que a inserção de um dielétrico entre as placas aumenta a quantidade de carga armazenada nas placas. No Exemplo 10.4, tendo em vista que a permissividade relativa aumentou por um fator de 250, a carga nas placas *aumentou pela mesma quantidade*.

EXEMPLO 10.5

Calcule a tensão máxima que pode ser aplicada através do capacitor no Exemplo 10.4 se a rigidez dielétrica for 80 V/mil.

Solução:

$$d = \frac{1}{32} \text{ pol.} \left(\frac{1000 \text{ mils}}{1 \text{ pol.}} \right) = 31,25 \text{ mils}$$

$$e \quad V_{\text{máx}} = 31,25 \text{ mils} \left(\frac{80 \text{ V}}{\text{míl}} \right) = \mathbf{2,5 \text{ kV}}$$

apesar de a tensão de trabalho fornecida poder ser de apenas 2 kV para prover uma margem de segurança.

Tipos de capacitores

Capacitores, assim como os resistores, podem ser classificados em duas categorias: **fixos** e **variáveis**. O símbolo para o capacitor fixo aparece na Figura 10.11(a). Observe que o lado curvo é normalmente conectado ao terra ou ao ponto de potencial CC mais baixo. O símbolo para capacitores variáveis aparece na Figura 10.11(b).

Capacitores fixos. Capacitores do tipo fixo estão disponíveis em todos formatos e tamanhos. Entretanto,

em geral, para o mesmo tipo de construção e dielétrico, quanto maior a capacitância exigida, maior o tamanho físico do capacitor.

Na Figura 10.12(a), o capacitor eletrolítico de 10.000 μF é significativamente maior que o capacitor de 1 μF . Entretanto, ele certamente não é 10.000 vezes maior. Para o tipo de filme de poliéster da Figura 10.12(b), o capacitor de 2,2 μF é significativamente maior que o capacitor de 0,01 μF , mas, novamente, ele não é 220 vezes maior. O capacitor de tântalo de 22 μF da Figura 10.12(c) é, mais ou menos, 6 vezes maior do que o capacitor de 1,5 μF , mesmo que o nível de capacitância seja mais ou menos 15 vezes maior. É particularmente interessante observar que devido à diferença no dielétrico e na construção, o capacitor de tântalo de 22 μF é significativamente menor que o capacitor de filme de poliéster de 2,2 μF e muito menor que 1/5 do tamanho do capacitor eletrolítico de 100 μF . O capacitor eletrolítico relativamente grande de 10.000 μF é normalmente usado para aplicações de alta potência, como nas fontes de potência e em grandes sistemas de alto-falantes. Todos os outros podem aparecer em qualquer sistema eletrônico comercial.

O aumento no tamanho se deve fundamentalmente ao efeito da área e da espessura do dielétrico sobre o nível de capacitância. Há uma série de maneiras de aumentar a área sem deixar o capacitor grande demais. Uma é dispor as placas e o dielétrico em faixas longas e estreitas, e então formar um rolo com eles, como mostra a Figura 10.13(a). O dielétrico (lembre-se de que ele tem as características de um isolante) entre as faixas condutivas assegura que as faixas nunca se toquem. É claro, o dielétrico tem de ser do tipo que pode ser enrolado sem se romper. Dependendo

de como os materiais estão enrolados, o capacitor pode ter um formato cilíndrico ou retangular como uma caixa.

Outro método popular é empilhar as placas no dielétrico, como mostra a Figura 10.13(b). A área é agora um múltiplo do número de camadas dielétricas. Essa construção é popularmente usada para capacitores menores. Um terceiro método é usar o dielétrico para estabelecer o formato do corpo (um cilindro na Figura 10.13(c)). Então, simplesmente inserir uma haste para a placa positiva e revestir a superfície do cilindro para formar a placa negativa, como mostra a Figura 10.13(c). Apesar de as 'placas' resultantes não serem as mesmas em área de construção ou em superfície, o efeito é proporcionar uma grande área de superfície para armazenamento (a densidade das linhas de campo elétricas será diferente nas duas 'placas'), apesar de o fator de distância resultante poder ser maior que o desejado. Usar um dielétrico com um ϵ_r alto, entretanto, compensa pela distância aumentada entre as placas.

Há outras variações desses métodos para aumentar o fator de área, mas os três representados na Figura 10.13 são os mais populares.

O próximo fator controlável é a distância entre as placas. Esse fator, entretanto, é muito sensível a quão fino o dielétrico pode ser produzido, com preocupações naturais, pois a tensão de trabalho (a tensão de ruptura) cai na medida em que o espaço diminui. Alguns dos dielétricos



Figura 10.11 Símbolos para o capacitor: (a) fixos; (b) variáveis.

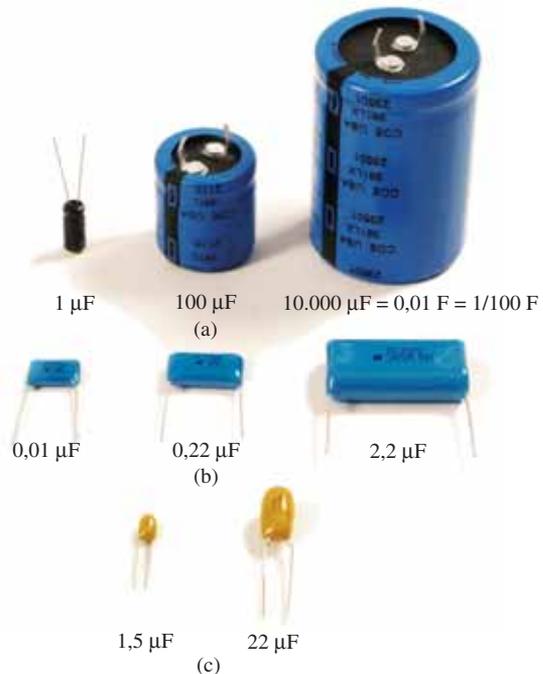


Figura 10.12 Demonstração de que, em geral, para cada tipo de construção, o tamanho de um capacitor aumenta com o valor de capacitância: (a) eletrolítico; (b) filme de poliéster; (c) tântalo.

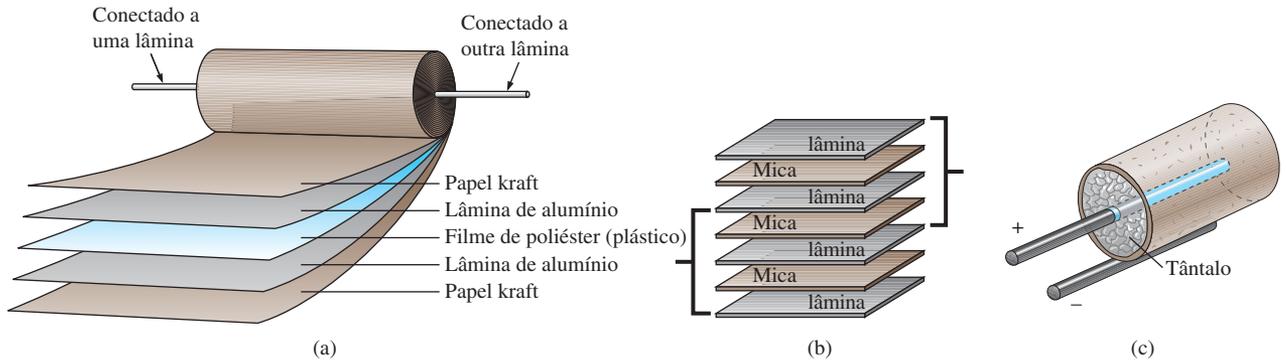


Figura 10.13 Três maneiras de aumentar a área de um capacitor: (a) por enrolamento; (b) por empilhamento; (c) por inserção.

mais finos são apenas revestimentos de óxido em uma das superfícies condutivas (placas). Um material de poliéster muito fino, como o Mylar®, o Teflon® ou mesmo papel com um revestimento de parafina, fornece uma lâmina fina de material que pode ser facilmente enrolada para áreas ampliadas. Materiais como a mica e alguns materiais cerâmicos podem ser produzidos finos até certo ponto antes de se fragmentarem ou se romperem sob estresse.

O último fator é o dielétrico, para o qual há uma ampla gama de possibilidades. Entretanto, os fatores a seguir têm uma grande influência sobre qual dielétrico é usado:

- O nível de capacitância desejado.
- O tamanho resultante.
- As possibilidades para enrolar, empilhar, entre outras.
- Sensibilidade à temperatura.
- Tensão de trabalho.

A faixa de permissividades relativas é enorme, como mostra a Tabela 10.2, mas todos os fatores listados acima têm de ser considerados no processo de construção.

Em geral, os capacitores fixos mais comuns são eletrolítico, filme, poliéster, lâmina, cerâmica, mica, imersão e óleo.

Os **capacitores eletrolíticos** na Figura 10.14 são normalmente fáceis de identificar por seu formato e pelo fato de contarem com informações impressas no invólucro (apesar de existirem eletrolíticos disponíveis de aplicação especial que não são polarizados). Poucos capacitores têm informações impressas no invólucro, mas aqueles que têm devem estar conectados com o terminal negativo conectado ao terra ou ao ponto de potencial mais baixo. As informações impressas usadas com frequência para indicar o terminal positivo ou a placa incluem +, □ e Δ. Em geral, capacitores eletrolíticos oferecem alguns dos valores de capacitância mais altos disponíveis, apesar de seus níveis de tensão de trabalho serem limitados. Valores típicos variam de 0,1 μF a 15.000 μF, com tensões de trabalho de 5 V a 450 V. A construção básica usa o processo de enrolamento visto na Figura 10.13(a), na qual um rolo de folha de alumínio é revestido de um lado com óxido de alumínio — o alumínio sendo a placa positiva e o óxido o dielétrico. Uma camada de papel ou de gaze saturada com um eletrólito (solução ou pasta que forma o meio condutor entre os eletrodos do capacitor) é colocada sobre o revestimento de óxido de alumínio da placa positiva. Outra camada de alumínio sem o revestimento de óxido

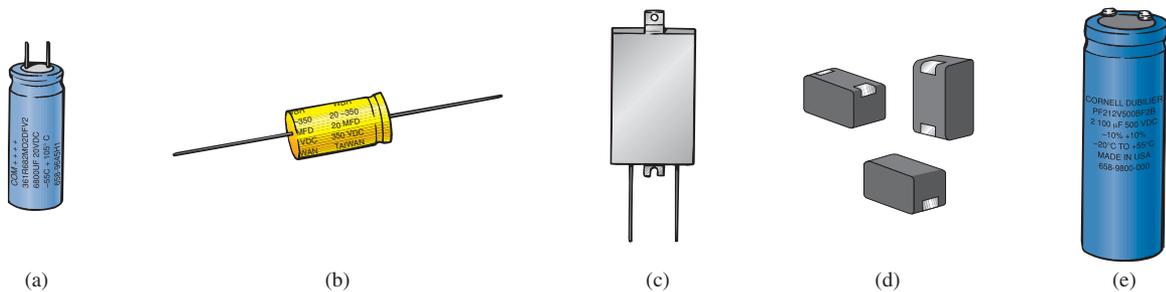


Figura 10.14 Vários tipos de capacitores eletrolíticos: (a) terminais radiais em miniatura; (b) terminais axiais; (c) encapsulamento chato; (d) montagem em superfície; (e) terminais de aparafusar.

é então colocada sobre essa camada para assumir o papel da placa negativa. Na maioria dos casos, a placa negativa está conectada diretamente ao recipiente de alumínio, o qual então serve como terminal negativo para as conexões externas. Devido ao tamanho do rolo da lâmina de alumínio, o tamanho como um todo do capacitor eletrolítico é maior que a maioria.

Capacitores de filme, poliéster, lâmina, polipropileno ou Teflon® usam um processo de enrolamento ou empilhamento para aumentar a área de superfície, como mostra a Figura 10.15. O formato resultante pode ser arredondado ou retangular, com terminais radiais ou axiais. A faixa típica para tais capacitores é 100 pF a 10 µF, com unidades disponíveis de até 100 µF. O nome da unidade define o tipo de dielétrico empregado. Tensões de trabalho podem variar de alguns poucos volts a 2.000 V, dependendo do tipo de unidade.

Capacitores cerâmicos (frequentemente chamados de **capacitores de disco**) usam um dielétrico de cerâmica, como mostra a Figura 10.16(a), para utilizar os excelentes valores ϵ_r e altas tensões de trabalho associadas a uma série de materiais cerâmicos. O empilhamento também pode ser aplicado para aumentar a área de superfície. Um exemplo de uma variação de disco aparece na Figura 10.16(b). Capacitores de cerâmica tipicamente variam em

valor de 10 pF a 0,047 µF, com altas tensões de trabalho que podem chegar a 10 kV.

Capacitores de mica usam um dielétrico de mica que pode ser monolítico (chip único) ou empilhado. O tamanho relativamente pequeno dos capacitores de chip de mica monolíticos é demonstrado na Figura 10.17(a), com sua colocação mostrada na Figura 10.17(b). Uma série de capacitores de papel de mica de alta tensão é mostrada na Figura 10.17(c). Capacitores de mica tipicamente variam em valor de 2 pF a muitos microfarads, com tensões de trabalho de até 20 kV.

Capacitores imersos são produzidos ao se imergir o dielétrico (tântalo ou mica) em um condutor derretido para formar uma fina camada condutiva sobre o dielétrico. Devido à presença de um eletrólito no processo de manufatura, capacitores de tântalo imersos exigem uma informação impressa de polaridade para assegurar que a placa positiva esteja sempre em um potencial mais alto que a placa negativa, como mostra a Figura 10.18(a). Uma série de sinais positivos pequenos é tipicamente aplicada ao invólucro próximo do fio positivo. Um grupo de capacitores imersos de mica, não polarizados é mostrado na Figura 10.18(b). Eles tipicamente variam em valor de 0,1 µF a 680 µF, mas com tensões de trabalho mais baixas variando entre 6 e 50 V.

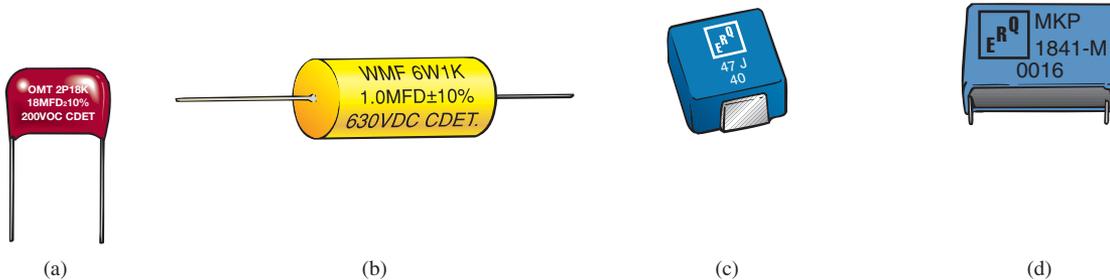


Figura 10.15 (a) Terminal radial de poliéster de filme/lâmina; (b) terminal axial de filme de poliéster metalizado; (c) filme de poliéster de montagem em superfície; (d) terminal radial, filme de polipropileno.

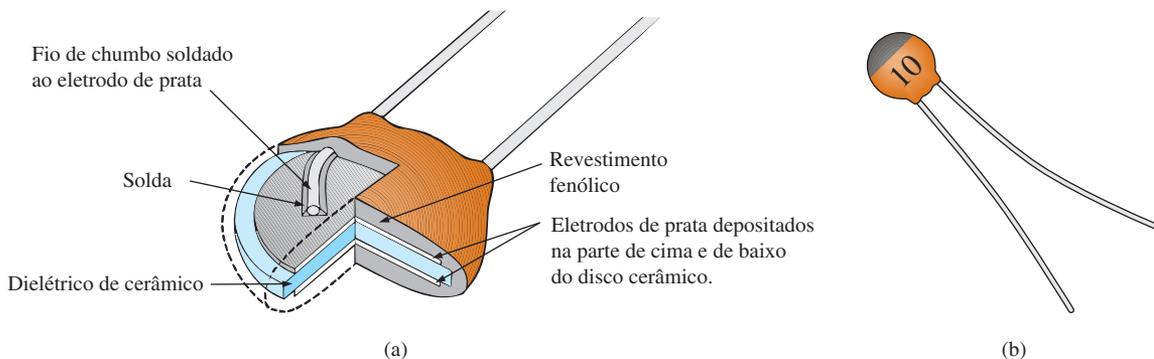


Figura 10.16 Capacitor (disco) de cerâmica: (a) construção; (b) aparência.

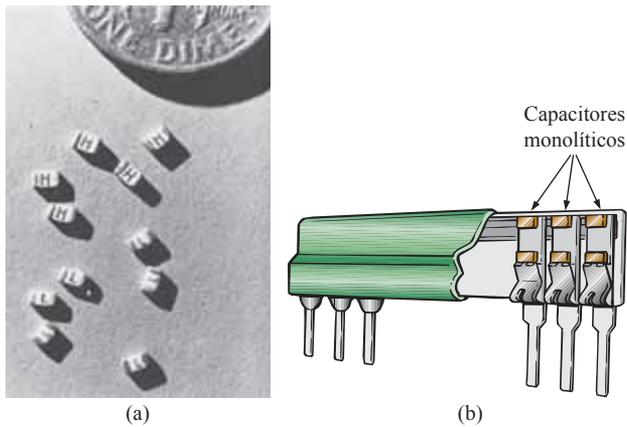


Figura 10.17 Capacitores de mica: (a) e (b) chips monolíticos de montagem de superfície; (c) capacitores de papel de mica de temperatura/alta tensão. [(a) e (b) cortesia da Vishay Intertechnology, Inc.; (c) cortesia da Customs Electronics, Inc.]

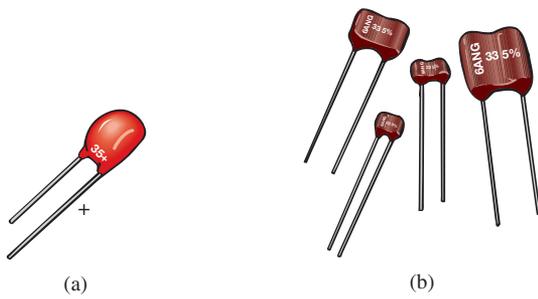


Figura 10.18 Capacitores imersos: (a) tântalo polarizado; (b) mica não polarizada.



Figura 10.19 Capacitor de amortecedor em invólucro oval metálico, preenchido com óleo (o amortecedor remove picos de tensão indesejados).

A maioria dos **capacitores de óleo** como os que aparecem na Figura 10.19 são usados em aplicações industriais como soldagem, linhas de suprimento de alta tensão, proteção contra surtos e correção do fator de potência (Capítulo 19). Eles podem fornecer níveis de capacitância que vão de $0,001 \mu\text{F}$ até $10.000 \mu\text{F}$, com tensões de trabalho de até 150 kV. Internamente, há uma série de placas paralelas imersas em um banho de óleo ou material impregnado em óleo (o dielétrico).

Capacitores variáveis. Todos os parâmetros na Equação 10.11 podem ser modificados até certo ponto para criar um **capacitor variável**. Por exemplo, na Figura 10.20(a), a capacitância do capacitor de ar variável é modificada girando-se o eixo na extremidade da unidade. Ao girar o eixo, você controla a quantidade de área comum entre as placas: quanto menor a área comum, mais baixa a capacitância. Na Figura 10.20(b), temos um **capacitor de ajuste (trimmer) de ar** muito menor. Ele funciona sob

o mesmo princípio, mas as pás rotativas estão totalmente escondidas dentro da estrutura. Na Figura 10.20(c), o **capacitor de ajuste (trimmer) de cerâmica** permite uma capacitância variável ao modificar a área comum, como mostramos anteriormente, ou ao aplicar pressão sobre a placa de cerâmica para reduzir a distância entre as placas.

Corrente de fuga e ESR (resistência em série equivalente)

Gostariamos de pensar nos capacitores como elementos ideais, mas, infelizmente, esse não é o caso. Há uma resistência CC que aparece como R_s no modelo equivalente da Figura 10.21 por causa da resistência introduzida por contatos, fios, ou pela placa ou por materiais da lâmina. Além disso, até agora, presumimos que as características isolantes dos dielétricos evitam qualquer fluxo de carga entre as placas, a não ser que a tensão de ruptura seja excedida. Na realidade, entretanto, os dielétricos não são

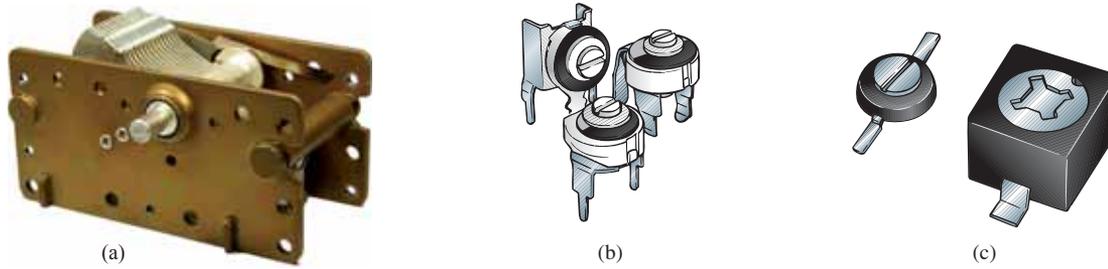


Figura 10.20 Capacitores variáveis: (a) ar; (b) trimmer de ar; (c) trimmer de compressão dielétrico cerâmico. [(a) cortesia de Ralf Siemieniec/Shutterstock.]

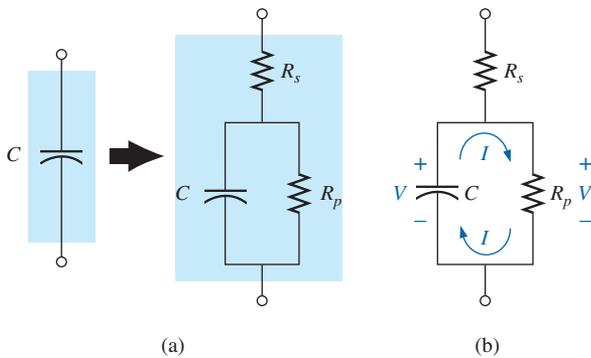


Figura 10.21 Corrente de fuga: (a) incluindo a resistência de fuga no modelo equivalente para um capacitor; (b) descarga interna de um capacitor devido à corrente de fuga.

isolantes perfeitos, e trazem consigo alguns elétrons livres em suas estruturas atômicas.

Quando uma tensão é aplicada através de um capacitor, uma **corrente de fuga** é estabelecida entre as placas. Essa corrente é normalmente tão pequena que pode ser ignorada na aplicação sob investigação. A disponibilidade de elétrons livres para dar suporte ao fluxo de corrente é representada por um grande resistor em paralelo R_p no circuito equivalente para um capacitor, como mostra a Figura 10.21(a). Se aplicarmos 10 V através de um capacitor com uma resistência interna de 1.000 M Ω , a corrente será de 0,01 μA , um nível que pode ser ignorado na maioria das aplicações.

O problema real associado com correntes de fuga não fica evidente até você exigir que os capacitores permaneçam carregados por longos períodos de tempo. Como mostra a Figura 10.21(b), a tensão ($V = Q/C$) através de um capacitor carregado também aparece através da resistência de fuga em paralelo, e estabelece uma corrente de descarga através do resistor. Com o tempo, o capacitor é totalmente descarregado. Capacitores como o eletrolítico que têm altas correntes de fuga (a resistência de fuga de 0,5 M Ω é típica) normalmente têm uma vida de prateleira limitada devido a essa característica de descarga interna.

Capacitores de cerâmica, tântalo e mica tipicamente têm uma vida de prateleira ilimitada por causa das resistências de fuga que passam de 1.000 M Ω . Capacitores de filme fino tem níveis mais baixos de resistências de fuga que resultam em alguma preocupação a respeito da vida de prateleira.

Há outra quantidade importante a ser estabelecida quando definimos o equivalente capacitivo completo: a **resistência em série equivalente (ESR — equivalent series resistance)**. Trata-se de uma quantidade de tal importância para o projeto de chaveamento e de fontes de potência linear que ela possui um peso igual ao nível de capacitância real. Trata-se de uma característica sensível à frequência que será examinada no Capítulo 14, após o conceito de resposta de frequência ter sido introduzido em detalhes. Como o nome deixou implícito, ela é incluída no modelo equivalente para o capacitor como um resistor em série que inclui todos os fatores dissipáveis em um capacitor real que vai além apenas da resistência CC.

Efeitos de temperatura: ppm

Todo capacitor é sensível à temperatura, e tem o nível de capacitância da placa de identificação especificado para temperatura ambiente. Dependendo do tipo de dielétrico, aumentar ou reduzir temperaturas pode causar uma queda ou um aumento na capacitância. Se a temperatura é uma preocupação na aplicação em particular, o fabricante fornecerá um diagrama de temperatura como mostra a Figura 10.22, ou uma especificação **ppm/°C** (partes por milhão por grau Celsius) para o capacitor. Observe na Figura 10.20 a variação de 0 por cento do valor nominal (placa de identificação) a 25°C (temperatura ambiente). A 0°C (congelando), ele caiu 20 por cento, enquanto a 100°C (o ponto de ebulição da água), ele caiu 70 por cento — um fator a ser considerado em algumas aplicações.

Como exemplo da utilização do nível ppm, considere um capacitor de 100 μF com um **coeficiente de temperatura** ou **ppm** de $-150 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$. É importante observar o sinal negativo à frente do valor ppm porque ele revela que a capacitância vai cair com o aumento na temperatura.

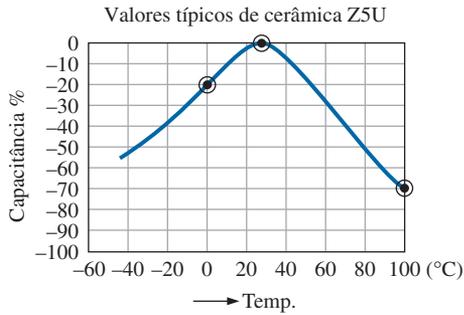


Figura 10.22 Variação do valor do capacitor com a temperatura.

É preciso um momento para realmente compreender um termo como *partes por milhão*. Na forma de equação, 150 partes por milhão pode ser escrito como:

$$-\frac{150}{1.000.000} \times$$

Se multiplicamos esse termo pelo valor do capacitor, podemos obter a mudança na capacitância para cada mudança de 1°C na temperatura. Isto é,

$$-\frac{150}{1.000.000} (100 \mu\text{F})/^{\circ}\text{C} = -0,015 \mu\text{F}/^{\circ}\text{C} \\ = -15.000 \text{ pF}/^{\circ}\text{C}$$

Se a temperatura subir 25°C, a capacitância diminuirá em:

$$-\frac{15.000 \text{ pF}}{^{\circ}\text{C}} (25^{\circ}\text{C}) = -0,38 \mu\text{F}$$

o que mudaria o nível de capacitância para:

$$100 \mu\text{F} - 0,38 \mu\text{F} = 99,62 \mu\text{F}$$

Rotulagem de capacitores

Em razão do tamanho reduzido de alguns capacitores, vários esquemas de impressão de informações foram adotados para fornecer os níveis de capacitância, tolerância e, se possível, tensão de trabalho. Em geral, entretanto, como destacado anteriormente, *o tamanho do capacitor é o primeiro indicativo do seu valor*. Na realidade, a maioria dos esquemas de impressão de informações não indica se o capacitor está em μF ou pF . Presume-se que você possa fazer esse julgamento apenas pelo tamanho. As unidades menores estão tipicamente em pF , e as unidades maiores em μF . A não ser que indicado por um **n** ou **N**, a maioria das unidades não são fornecidas em nF . Em unidades μF maiores, o valor pode ser, com frequência, impresso no

invólucro com a tolerância e a tensão de trabalho. Entretanto, unidades menores precisam usar alguma forma de abreviação como mostra a Figura 10.23. Para unidades muito pequenas como aquelas na Figura 10.23(a) com apenas dois números, o valor é reconhecido imediatamente como pF , com o **K** como um indicador de um nível de tolerância de ± 10 por cento. Muito frequentemente o **K** é lido como um multiplicador de 10^3 , e a capacitância é lida como 20.000 pF ou 20 nF em vez do verdadeiro 20 pF .

Para a unidade na Figura 10.23(b), havia espaço para um **n** minúsculo como representante de um multiplicador de 10^{-9} , resultando em um valor de 200 nF . Para evitar uma confusão desnecessária, as letras usadas para tolerância não incluem **N**, **U**, ou **P**, de maneira que a presença de qualquer uma dessas letras na forma maiúscula ou minúscula normalmente se refere ao nível do multiplicador. O **J** que aparece na unidade da Figura 10.23(b) representa um nível de tolerância de ± 5 por cento. Para o capacitor na Figura 10.23(c), os primeiros dois números representam o valor numérico do capacitor, enquanto o terceiro número é a potência do multiplicador (ou número de zeros a serem adicionados aos dois primeiros números). A questão então é se as unidades são μF ou pF . Com o 223 representando um número de 22.000, as unidades certamente não serão μF , pois a unidade é pequena demais para uma capacitância tão grande. Trata-se de um capacitor de $22.000 \text{ pF} = 22 \text{ nF}$. O **F** representa um nível de tolerância de ± 1 por cento. Multiplicadores de 0,01 usam um 8 para o terceiro dígito, enquanto multiplicadores de 0,1 usam um 9. O capacitor na Figura 10.23(d) é um capacitor de $33 \times 0,1 = 3,3 \mu\text{F}$ com uma tolerância de ± 20 por cento, como definido pela letra maiúscula **M**. A capacitância não é $3,3 \text{ pF}$ porque a unidade é grande demais; novamente, o fator do tamanho ajuda bastante no momento de fazer um julgamento a respeito do nível de capacitância. Também deve ser observado que **MFD** é às vezes usado para simbolizar microfarads.

Medidas e testes

A capacitância de um capacitor pode ser lida diretamente usando um medidor como o Medidor LCR Univer-

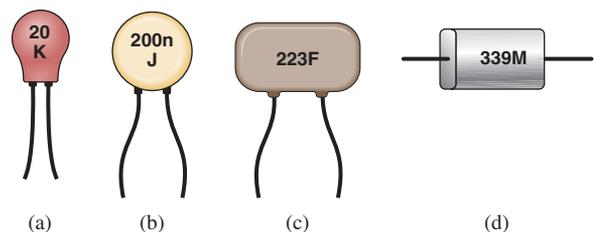


Figura 10.23 Vários esquemas de impressão de informações para capacitores pequenos.

sal visto na Figura 10.24. Se você configurar o medidor em C para capacitância, ele vai automaticamente escolher a unidade mais apropriada de medida para o elemento, isto é, F, μF , nF ou pF. Observe as informações impressas de polaridade no medidor para capacitores que têm uma polaridade específica.

A melhor checagem é dada por um medidor como o que aparece na Figura 10.24. Entretanto, se ele está indisponível, um ohmímetro pode ser usado para determinar se o dielétrico ainda está em boas condições de funcionamento ou se ele se deteriorou devido à idade ou ao uso (especialmente no caso do papel e dos eletrolíticos). Na medida em que o dielétrico deixa de funcionar adequadamente, as qualidades isolantes do material diminuem até o ponto em que a resistência entre as placas cai para um nível relativamente baixo. Para usar um ohmímetro, certifique-se de que o capacitor esteja totalmente descarregado colocando um fio diretamente através dos seus terminais. Então, conecte o medidor (prestando atenção nas polaridades, se a unidade estiver polarizada), como mostra a Figura 10.25, e observe se a resistência caiu para um valor relativamente baixo (0 até alguns kilohms). Se assim for, o capacitor deve ser descartado. Você pode descobrir que a leitura muda quando o medidor é conectado pela primeira vez. Essa mudança se deve à carga do capacitor pela fonte interna do ohmímetro. Com o tempo, o capacitor se torna estável, e a leitura correta pode ser observada. Tipicamente, ele deve parar no nível mais alto nas escalas de megohms ou indicar OL em um medidor digital.

Esse teste do ohmímetro não abrange todos os capacitores, pois alguns deles exibem características de avaria somente quando uma grande tensão é aplicada. O teste, entretanto, ajuda a isolar os capacitores nos quais o dielétrico deteriorou-se.



Figura 10.24 Medidor digital da capacitância. (Cortesia de oksana2010/Shutterstock.)

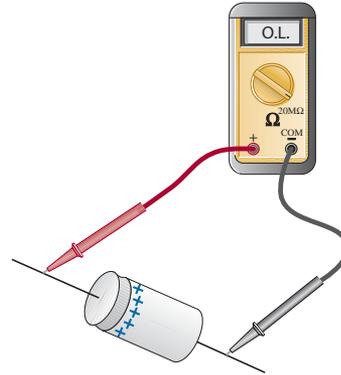


Figura 10.25 Teste do dielétrico de um capacitor eletrolítico.

Valores-padrão de capacitores

Os capacitores mais comuns usam os mesmos multiplicadores numéricos encontrados nos resistores.

A vasta maioria está disponível com tolerâncias 5, 10 e 20 por cento. Entretanto, existem capacitores com tolerâncias de 1, 2 ou 3 por cento, se você estiver disposto a pagar o preço que se cobra por eles. Valores típicos incluem 0,1 μF , 0,15 μF , 0,22 μF , 0,33 μF , 0,47 μF e 0,68 μF ; e 1 μF , 1,5 μF , 2,2 μF , 3,3 μF , 4,7 μF , 6,8 μF ; e 10 pF, 22 pF, 33 pF, 100 pF, e assim por diante.

10.5 TRANSITÓRIOS EM CIRCUITOS CAPACITIVOS: FASE DE CARGA

A colocação de carga nas placas de um capacitor não ocorre de maneira instantânea. Em vez disso, ela ocorre através de um período de tempo determinado pelos componentes do circuito. A fase de carga — a fase durante a qual a carga é depositada nas placas — pode ser descrita analisando a resposta do circuito em série simples visto na Figura 10.4. O circuito foi redesenhado na Figura 10.26 com o símbolo para um capacitor fixo.

Você deve se lembrar de que no instante em que fechamos a chave, a bateria começa a remover elétrons da placa superior e depositá-los na placa inferior, resultando em uma carga positiva na placa superior e uma carga negativa na placa inferior. A transferência de elétrons é muito rápida, inicialmente, ficando mais lenta à medida que a tensão entre os terminais do capacitor se aproxima da tensão da bateria. Eventualmente, quando a tensão entre os terminais do capacitor se iguala à tensão da bateria, cessa o movimento de elétrons. Nesse momento, as placas terão uma carga dada por $Q = CV_C = CE$. Esse período de tempo durante o qual a carga está sendo depositada nas placas é chamado de **período transitório** — um período de tempo

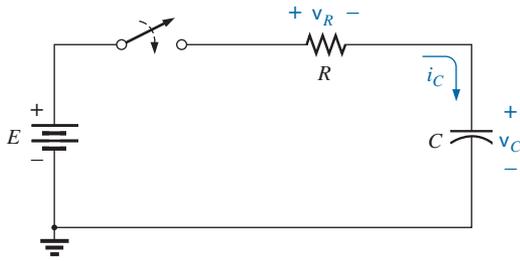


Figura 10.26 Circuito simples para carregar um capacitor.

em que a tensão ou a corrente muda de um nível de estado estacionário para outro.

Tendo em vista que a tensão entre as placas está diretamente relacionada à carga nas placas por $V = Q/C$, uma representação gráfica da tensão através do capacitor terá o mesmo formato que uma representação gráfica da carga nas placas com o tempo. Como mostra a Figura 10.27, a tensão através do capacitor é zero volt quando a chave está fechada ($t = 0$ s). Ela então aumenta muito rapidamente em um primeiro momento, tendo em vista que a carga está sendo depositada a uma velocidade alta. Na medida em que o tempo passa, a carga é depositada a uma velocidade mais baixa, e a mudança na tensão diminui. A tensão continua a crescer, mas a uma velocidade

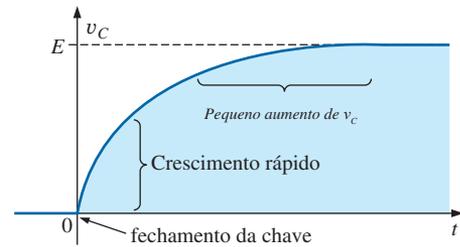


Figura 10.27 v_C durante a fase da carga.

muito mais baixa. Eventualmente, na medida em que a tensão entre as placas se aproxima da tensão aplicada, a taxa de carga é muito baixa, até que finalmente a tensão entre as placas passa a ser igual à tensão aplicada; a fase transitória terminou.

Felizmente, a forma de onda na Figura 10.27 do início ao fim pode ser descrita usando a função matemática e^{-x} . Trata-se de uma função exponencial que diminui com o tempo, como mostra a Figura 10.28. Se substituirmos zero por x , obteremos e^{-0} , o que por definição é igual a 1, como mostram a Tabela 10.3 e o gráfico na Figura 10.28. A Tabela 10.3 revela que, na medida em que x aumenta, a função e^{-x} diminui em valor absoluto até que ela esteja muito próxima de zero após $x = 5$. Como podemos observar na Tabela 10.3, o fator exponencial $e^1 = e = 2,71828$.

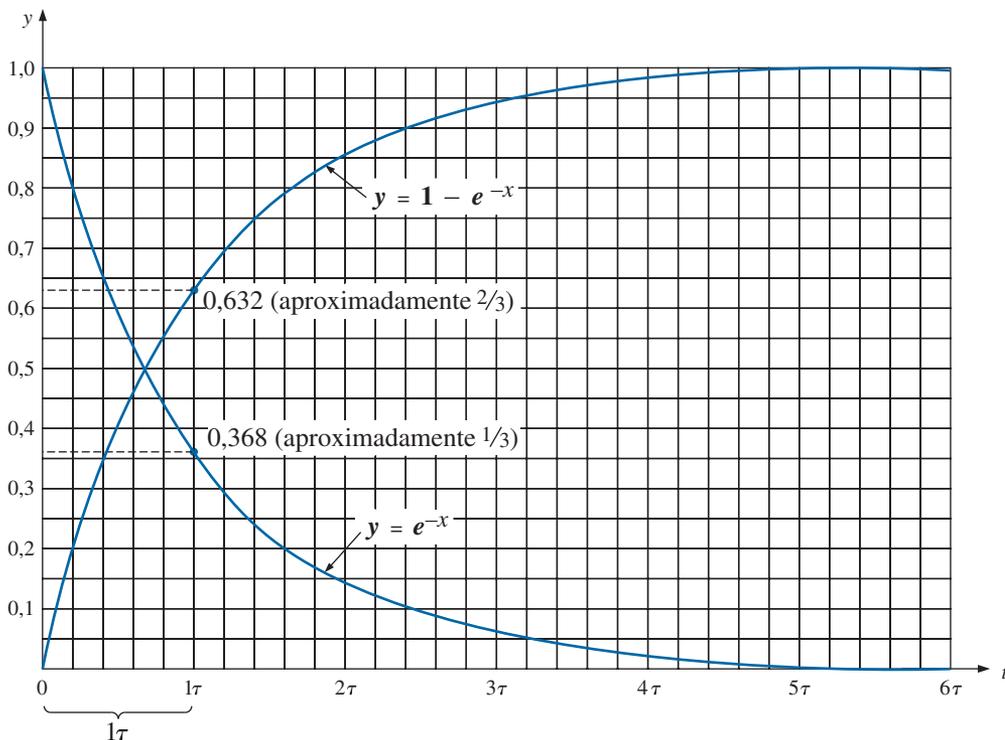


Figura 10.28 Gráfico universal da constante de tempo.

Tabela 10.3 Valores selecionados para e^{-x} .

$x = 0$	$e^{-x} = e^{-0} = \frac{1}{e^0} = \frac{1}{1} = 1$
$x = 1$	$e^{-1} = \frac{1}{e} = \frac{1}{2,71828...} = 0,3679$
$x = 2$	$e^{-2} = \frac{1}{e^2} = 0,1353$
$x = 5$	$e^{-5} = \frac{1}{e^5} = 0,00674$
$x = 10$	$e^{-10} = \frac{1}{e^{10}} = 0,0000454$
$x = 100$	$e^{-100} = \frac{1}{e^{100}} = 3,72 \times 10^{-44}$

Um gráfico de $1 - e^{-x}$ também é fornecido na Figura 10.28, tendo em vista que ele é um componente da tensão v_C na Figura 10.27. Quando e^{-x} é igual 1, $1 - e^{-x}$ é zero, como mostra a Figura 10.28, e quando e^{-x} diminui em valor absoluto, $1 - e^{-x}$ aproxima-se de 1, como mostra a mesma figura.

Você pode se perguntar como essa função pode nos ajudar se ela diminui com o tempo e a curva para a tensão através do capacitor aumenta com o tempo. Simplesmente colocamos o exponencial na forma matemática apropriada, como mostramos a seguir:

$$v_C = E(1 - e^{-t/\tau})_{\text{carga}} \quad (\text{volts, V}) \quad (10.13)$$

Primeiro, observe na Equação 10.13 que a tensão v_C é escrita em *itálico minúsculo (não maiúsculo)* para destacar que ela é uma função que vai mudar com o tempo; ela não é uma constante. O expoente da função exponencial não é mais apenas x , ele é agora o tempo (t) dividido por uma constante τ , a letra grega *tau*. A quantidade τ é definida por:

$$\tau = RC \quad (\text{tempo, s}) \quad (10.14)$$

O fator τ , chamado de **constante de tempo** do circuito, tem as unidades de tempo, como mostramos a seguir usando algumas das equações básicas introduzidas anteriormente neste livro:

$$\tau = RC = \left(\frac{V}{I}\right)\left(\frac{Q}{V}\right) = \left(\frac{\cancel{V}}{\cancel{Q}/t}\right)\left(\frac{Q}{\cancel{V}}\right) = t \text{ (segundos)}$$

Uma representação gráfica da Equação 10.13 resulta na curva da Figura 10.29, cujo formato é precisamente o mesmo daquele na Figura 10.27.

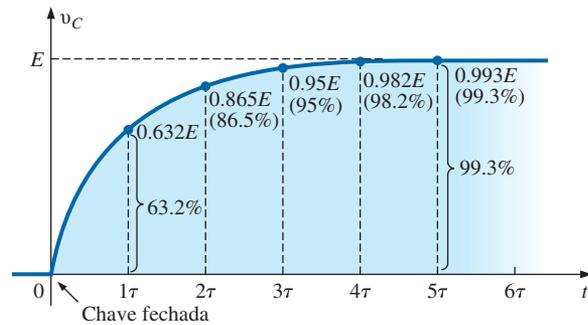


Figura 10.29 Plotando a equação $v_C = E(1 - e^{-t/\tau})$ versus o tempo.

Na Equação 10.13, se substituirmos $t = 0$ s, veremos que:

$$e^{-t/\tau} = e^{-0/\tau} = e^{-0} = \frac{1}{e^0} = \frac{1}{1} = 1$$

$$v_C = E(1 - e^{-t/\tau}) = E(1 - 1) = \mathbf{0 \text{ V}}$$

como vemos no gráfico na Figura 10.29.

É importante perceber nesse ponto que o gráfico na Figura 10.29 não está simplesmente em função do tempo, mas em função de τ , a constante de tempo do circuito. Se quisermos saber a tensão entre as placas após uma constante de tempo, simplesmente introduzimos $t = 1\tau$ na Equação 10.13. O resultado será:

$$e^{-t/\tau} = e^{-1\tau/\tau} = e^{-1} \cong 0,368$$

$$v_C = E(1 - e^{-t/\tau}) = E(1 - 0,368) = \mathbf{0,632E}$$

como mostra a Figura 10.29.

Em $t = 2\tau$

$$e^{-t/\tau} = e^{-2\tau/\tau} = e^{-2} \cong 0,135$$

$$v_C = E(1 - e^{-t/\tau}) = E(1 - 0,135) \cong \mathbf{0,865E}$$

como mostra a Figura 10.29.

Na medida em que o número de constantes de tempo aumenta, a tensão através do capacitor realmente se aproxima da tensão aplicada.

Em $t = 5\tau$

$$e^{-t/\tau} = e^{-5\tau/\tau} = e^{-5} \cong 0,007$$

$$v_C = E(1 - e^{-t/\tau}) = E(1 - 0,007) = \mathbf{0,993E} \cong E$$

Na realidade, podemos concluir, a partir dos resultados recém-obtidos, que

a tensão através de um capacitor em um circuito CC é essencialmente igual à tensão aplicada após cinco constantes de tempo da fase de carga.

Ou, em termos mais gerais,

a fase transitória ou de carga de um capacitor essencialmente terminou após cinco constantes de tempo.

É realmente muito bom que a mesma função exponencial possa ser usada para representar graficamente a corrente do capacitor em função do tempo. Quando a chave é fechada primeiro, o fluxo de carga ou de corrente salta muito rapidamente para um valor limitado pela tensão aplicada e pela resistência do circuito, como mostra a Figura 10.30. Então, a taxa de depósito e, consequentemente, a corrente, diminui muito rapidamente, até que, eventualmente, a carga não seja depositada nas placas e a corrente caia a zero ampères.

A equação para a corrente é

$$i_C = \frac{E}{R} e^{-t/\tau} \text{ carga (ampères, A)} \quad (10.15)$$

Na Figura 10.26, a corrente (fluxo convencional) tem o sentido mostrado tendo em vista que os elétrons fluem na direção oposta.

Em $t = 0$ s,

$$e^{-t/\tau} = e^{-0} = 1$$

$$i_C = \frac{E}{R} e^{-t/\tau} = \frac{E}{R} (1) = \frac{E}{R}$$

Em $t = 1\tau$

$$e^{-t/\tau} = e^{-1} \cong 0,368$$

$$i_C = \frac{E}{R} e^{-t/\tau} = \frac{E}{R} (0,368) = 0,368 \frac{E}{R}$$

Em geral, a Figura 10.30 revela claramente que

a corrente de um circuito CC capacitivo é essencialmente zero ampère após cinco constantes de tempo da fase de carga terem passado.

Também é importante reconhecer que

durante a fase de carga, a principal mudança na tensão e na corrente ocorre durante a primeira constante de tempo.

A tensão através do capacitor chega a de 63,2 por cento (em torno de 2/3) do seu valor final, enquanto a corrente cai para 36,8 por cento (em torno de 1/3) do seu valor de pico. Durante a próxima constante de tempo, a tensão aumenta somente em torno de 23,3 por cento, enquanto a corrente cai para 13,5 por cento. A primeira constante de tempo é, portanto, um momento muito dramático para os parâmetros de mudança. Entre a quarta e a quinta constantes de tempo, a tensão aumenta somente em torno de 1,2 por cento, enquanto a corrente cai para menos de 1 por cento do seu valor de pico.

Retornando às figuras 10.29 e 10.30, observe que quando a tensão através do capacitor alcança a tensão aplicada E , a corrente cai para zero ampère, como analisa a Figura 10.31. Essas condições combinam com aquelas de um circuito aberto, permitindo a seguinte conclusão:

Um capacitor pode ser substituído por um circuito aberto equivalente assim que a fase de carga em um circuito CC tiver passado.

Essa conclusão será particularmente útil na análise de circuitos CC que estiveram ligados por um longo período de tempo ou que passaram pela fase transitória que normalmente ocorre quando um sistema é ligado pela primeira vez.

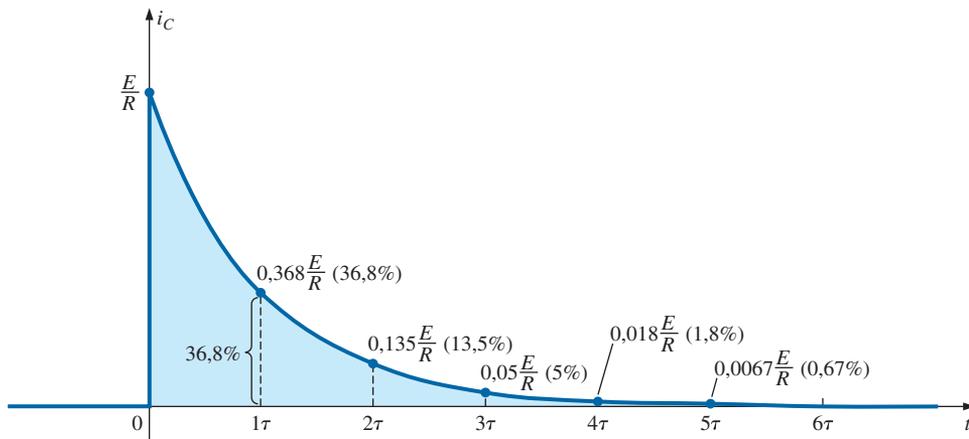


Figura 10.30 Plotando a equação $i_C = \frac{E}{R} e^{-t/\tau}$ versus o tempo (t).

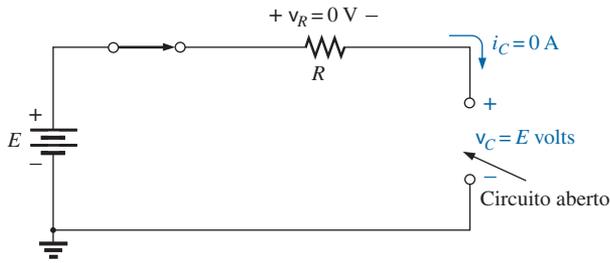


Figura 10.31 Demonstração de que um capacitor tem as características de um circuito aberto após a fase de carga ter passado.

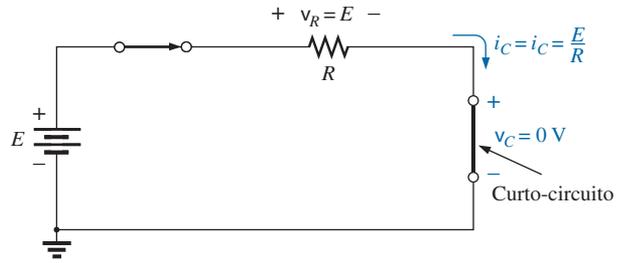


Figura 10.32 Exibição do curto-circuito equivalente para o capacitor que ocorre quando a chave é fechada pela primeira vez.

Uma conclusão similar pode ser alcançada se considerarmos o instante em que a chave é fechada no circuito na Figura 10.26. Recorrendo às figuras 10.29 e 10.30 novamente, descobrimos que a corrente está no seu valor de pico em $t = 0$, enquanto a tensão através do capacitor é 0 V, como mostra o circuito equivalente na Figura 10.32. O resultado é que

um capacitor tem as características de um curto-circuito equivalente no instante em que a chave é fechada em um circuito R-C em série sem carga.

Na Equação 10.13, a constante de tempo τ terá sempre algum valor, porque sempre haverá uma resistência presente em um circuito capacitivo. Em alguns casos, o valor de τ pode ser muito pequeno, mas cinco vezes àquele valor de τ ; não importa quão pequeno seja, ele sempre tem de existir, e não pode ser zero. O resultado é a conclusão muito importante a seguir:

A tensão através de um capacitor não pode mudar instantaneamente.

Na realidade, podemos dizer que a capacitância de um circuito é uma medida de quanto ele vai se opor a uma mudança na tensão em um circuito. Quanto maior a capacitância, maior a constante de tempo, e mais tempo levará a tensão através do capacitor para alcançar o valor aplicado. Isso pode vir a ser muito útil quando para-raios e supressores de surtos são projetados para proteger equipamentos de surtos de alta tensão inesperados.

Tendo em vista que o resistor e o capacitor na Figura 10.26 estão em série, a corrente através do resistor é a mesma que aquela associada ao capacitor. A tensão através do resistor pode ser determinada usando a lei de Ohm da seguinte maneira:

$$v_R = i_R R = i_C R$$

de maneira que

$$v_R = \left(\frac{E}{R} e^{-t/\tau} \right) R$$

e $v_R = E e^{-t/\tau}$ carga (volts, V) (10.16)

Um gráfico da tensão como mostra a Figura 10.33 tem o mesmo formato que aquele para a corrente, porque eles são relacionados pela constante R . Observe, entretan-

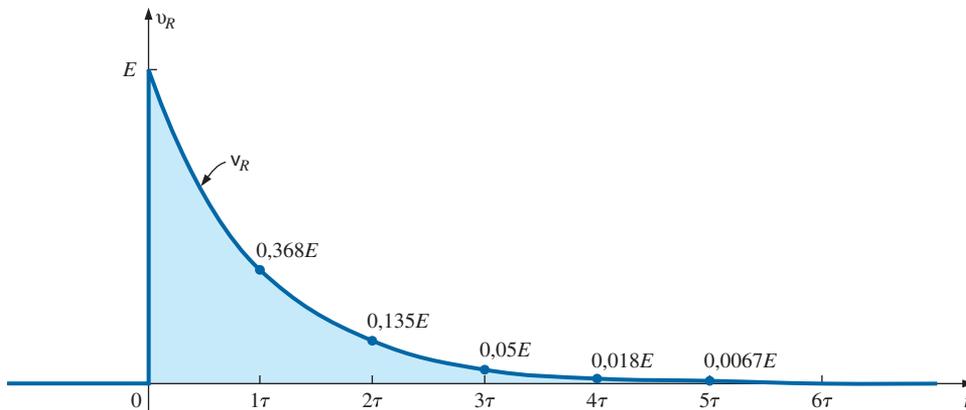


Figura 10.33 Gráfico da equação $v_R = E e^{-t/\tau}$ em função do tempo (t).

to, que a tensão através do resistor começa a um nível de E volts, pois a tensão através do capacitor é zero volt e a lei de Kirchhoff para tensões tem sempre de ser satisfeita. Quando o capacitor alcança a tensão aplicada, a tensão através do resistor tem de cair para zero volt pela mesma razão. Nunca se esqueça de que:

A lei de Kirchhoff para tensões é aplicável a qualquer instante no tempo para qualquer tipo de tensão em qualquer tipo de circuito.

Uso da calculadora para solucionar funções exponenciais

Antes de examinar um exemplo, primeiro discutiremos o uso da calculadora TI-89 com funções exponenciais. O processo é na realidade bastante simples para um número como $e^{-1,2}$. Apenas selecione a tecla da 2ª função (diamante), seguida pela função e^x . Então, insira o sinal de (-) do teclado numérico (e não das funções matemáticas), e insira o número 1,2 seguido por ENTER para obter o resultado de 0,301, como mostra a Figura 10.34. O uso do programa de software Mathcad é demonstrado em um exemplo posterior.

EXEMPLO 10.6

Considerando o circuito na Figura 10.35:

- Calcule a expressão matemática para o comportamento transitório de v_C , i_C e v_R se a chave está fechada em $t = 0$ s.
- Faça um gráfico da forma de onda de v_C em função da constante de tempo do circuito.
- Faça um gráfico da forma de onda de v_C em função do tempo.

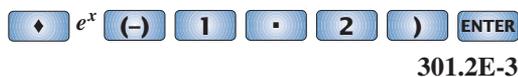


Figura 10.34 Teclas da calculadora usadas para determinar $e^{-1,2}$.

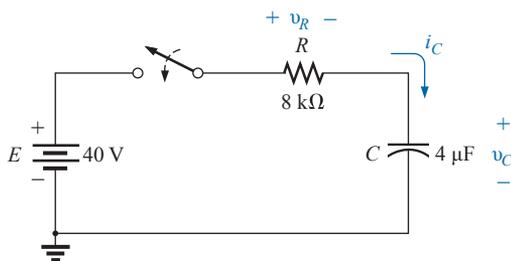


Figura 10.35 Circuito transitório para o Exemplo 10.6.

- Faça um gráfico das formas de onda i_C e v_R em função da constante de tempo do circuito.
- Qual é o valor de v_C em $t = 20$ ms?
- Na prática, quanto tempo tem de passar antes que possamos presumir que a fase de carga terminou?
- Depois de a fase de carga ter passado, quanta carga foi encontrada nas placas?
- Se o capacitor tem uma resistência de fuga de $10.000 \text{ M}\Omega$, qual é a corrente de fuga inicial? Assim que o capacitor for separado do circuito, quanto tempo ele levará para se descarregar totalmente, presumindo uma taxa de descarga linear (invariável).

Soluções:

- A constante de tempo do circuito é:

$$\tau = RC = (8 \text{ k}\Omega) (4 \text{ }\mu\text{F}) = 32 \text{ ms}$$

o que resulta nas equações matemáticas a seguir:

$$v_C = E(1 - e^{-t/\tau}) = 40 \text{ V}(1 - e^{-t/32 \text{ ms}})$$

$$i_C = \frac{E}{R} e^{-t/\tau} = \frac{40 \text{ V}}{8 \text{ k}\Omega} e^{-t/32 \text{ ms}} = 5 \text{ mA} e^{-t/32 \text{ ms}}$$

$$v_R = E e^{-t/\tau} = 40 \text{ V} e^{-t/32 \text{ ms}}$$

- O gráfico resultante aparece na Figura 10.36.
- A escala horizontal será agora contra o tempo em vez das constantes de tempo, como mostra a Figura 10.37. Os pontos do gráfico na Figura 10.37 foram tirados da Figura 10.36.
- Ambos os gráficos aparecem na Figura 10.38.
- A substituição do tempo $t = 20$ ms resulta no seguinte para a parte exponencial da equação:

$$e^{t/\tau} = e^{-20 \text{ ms}/32 \text{ ms}} = e^{-0,625} = 0,535$$

(usando uma calculadora)

de maneira que

$$v_C = 40 \text{ V}(1 - e^{-t/32 \text{ ms}}) = 40 \text{ V} (1 - 0,535)$$

$$= (40 \text{ V})(0,465) = 18,6 \text{ V}$$

(como se verifica na Figura 10.37)

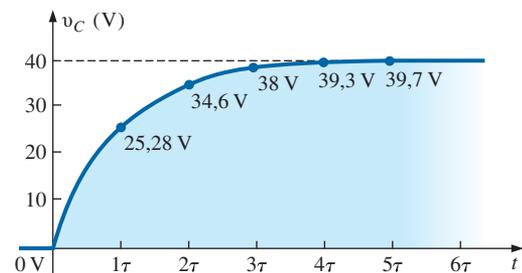


Figura 10.36 v_C em função do tempo para o circuito de carga na Figura 10.35.

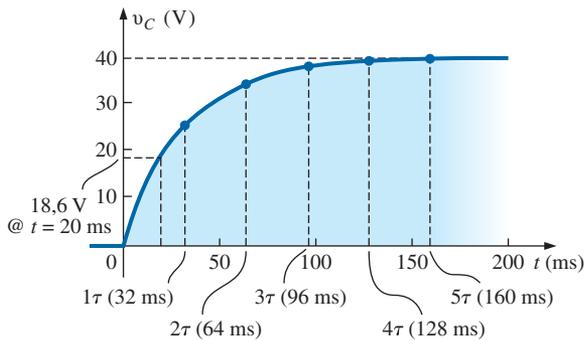


Figura 10.37 Gráfico da forma de onda na Figura 10.36 em função do tempo (t).

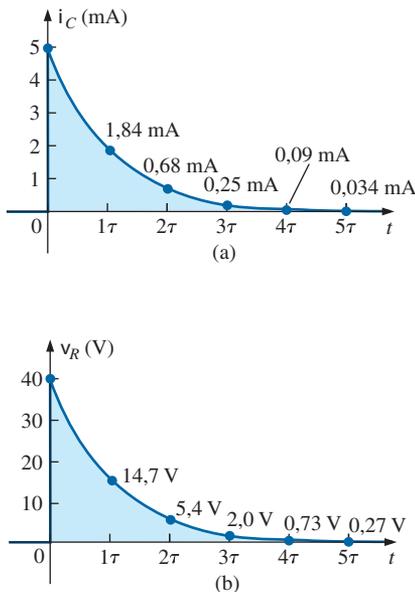


Figura 10.38 \$i_C\$ e \$v_R\$ para o circuito de carga na Figura 10.36.

f) Presumindo uma carga plena em cinco constantes de tempo, temos:

$$5\tau = 5(32\text{ ms}) = \mathbf{160\text{ ms} = 0,16\text{ s}}$$

g) Usando a Equação 10.6, temos:

$$Q = CV = (4\text{ }\mu\text{F})(40\text{ V}) = \mathbf{160\text{ }\mu\text{C}}$$

h) Usando a lei de Ohm, temos:

$$I_{\text{fuga}} = \frac{40\text{ V}}{10.000\text{ M}\Omega} = 4\text{ nA}$$

Finalmente, a equação básica \$I = Q/t\$ resulta em:

$$t = \frac{Q}{I} = \frac{160\text{ }\mu\text{C}}{4\text{ nA}}$$

$$= (40.000\text{ s}) \left(\frac{1\text{ min}}{60\text{ s}} \right) \left(\frac{1\text{ h}}{60\text{ min}} \right) = \mathbf{11,11\text{ h}}$$

10.6 TRANSITÓRIOS EM CIRCUITOS CAPACITIVOS: FASE DE DESCARGA

Agora, investigaremos como descarregar um capacitor enquanto exercemos controle sobre o tempo de descarga. Você pode, é claro, colocar um fio diretamente através de um capacitor para descarregá-lo muito rapidamente e, possivelmente, causar uma centelha visível. Para grandes capacitores como os encontrados em aparelhos de televisão, esse procedimento não deve ser executado devido às altas tensões envolvidas; a não ser, é claro, que você tenha prática.

Na Figura 10.39(a), um segundo contato para a chave foi adicionado ao circuito na Figura 10.26 para permitir uma descarga controlada do capacitor. Com a chave na posição 1, temos o circuito de carga descrito na última seção. Após a fase de carga plena, se movermos a chave para a posição 2, o capacitor pode ser descarregado através do circuito resultante na Figura 10.39(b). Na Figura 10.39(b), a tensão através do capacitor aparece diretamente através do resistor para estabelecer uma corrente de descarga. Inicialmente, a corrente salta para um valor relativamente alto; então, ela começa a cair. Ela cai com o tempo, pois a carga está deixando as placas do capacitor, o que por sua

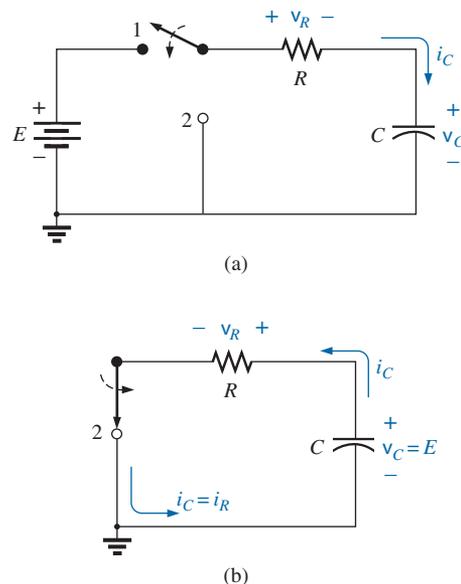


Figura 10.39 (a) Circuito de carga; (b) configuração de descarga.

vez reduz a tensão através do capacitor e, desse modo, a tensão através do resistor e a corrente resultante.

Antes de examinar as formas de onda para cada quantidade de interesse, observe que a corrente i_C tem agora o sentido inverso daquele mostrado na Figura 10.39(b). Como mostram as partes (a) e (b) na Figura 10.39, a tensão através do capacitor não inverte a polaridade, mas a corrente inverte o sentido. Mostraremos as reversões nos gráficos resultantes desenhando as formas de onda nas regiões negativas do gráfico. Em todas as formas de onda, observe que todas as expressões matemáticas usam o mesmo fator e^{-x} que aparece na fase de carga.

Para a tensão através do capacitor que está diminuindo com o tempo, a expressão matemática é:

$$v_C = Ee^{-t/\tau} \quad \text{descarga} \quad (10.17)$$

Para esse circuito, a constante de tempo τ é definida pela mesma equação que foi usada na fase de carga. Isto é,

$$\tau = RC \quad \text{descarga} \quad (10.18)$$

Tendo em vista que a corrente diminui com o tempo, ela terá um formato similar:

$$i_C = \frac{E}{R}e^{-t/\tau} \quad \text{descarga} \quad (10.19)$$

Para a configuração na Figura 10.39(b), tendo em vista que $v_R = v_C$ (em paralelo), a equação para a tensão v_R tem o mesmo formato:

$$v_R = Ee^{-t/\tau} \quad \text{descarga} \quad (10.20)$$

A descarga completa vai ocorrer, para todos os fins práticos, em cinco constantes de tempo. Se a chave é movida entre os terminais 1 e 2 a cada cinco constantes de tempo, as formas de onda na Figura 10.40 resultarão em v_C , i_C e v_R . Para cada curva, os sentidos de corrente e de polaridades da tensão são como definem as configurações na Figura 10.39. Observe, como destacamos anteriormente, que a corrente inverte a direção durante a fase de descarga.

A taxa de descarga não tem de ser igual à taxa de carga se um arranjo de chaveamento diferente for usado. Na realidade, o Exemplo 10.8 demonstrará como mudar a taxa de descarga.

EXEMPLO 10.7

Usando os valores no Exemplo 10.6, represente graficamente as formas de onda para v_C e i_C em razão do chaveamento entre os contatos 1 e 2 na Figura 10.39 a cada cinco constantes de tempo.

Solução:

A constante de tempo é a mesma para as fases de carga e descarga. Isto é,

$$\tau = RC = (8 \text{ k}\Omega)(4 \text{ }\mu\text{F}) = 32 \text{ ms}$$

Para a fase de descarga, as equações são

$$v_C = Ee^{-t/\tau} = 40 \text{ V}e^{-t/32 \text{ ms}}$$

$$i_C = -\frac{E}{R}e^{-t/\tau} = \frac{40 \text{ V}}{8 \text{ k}\Omega}e^{-t/32 \text{ ms}} = -5 \text{ mA}e^{-t/32 \text{ ms}}$$

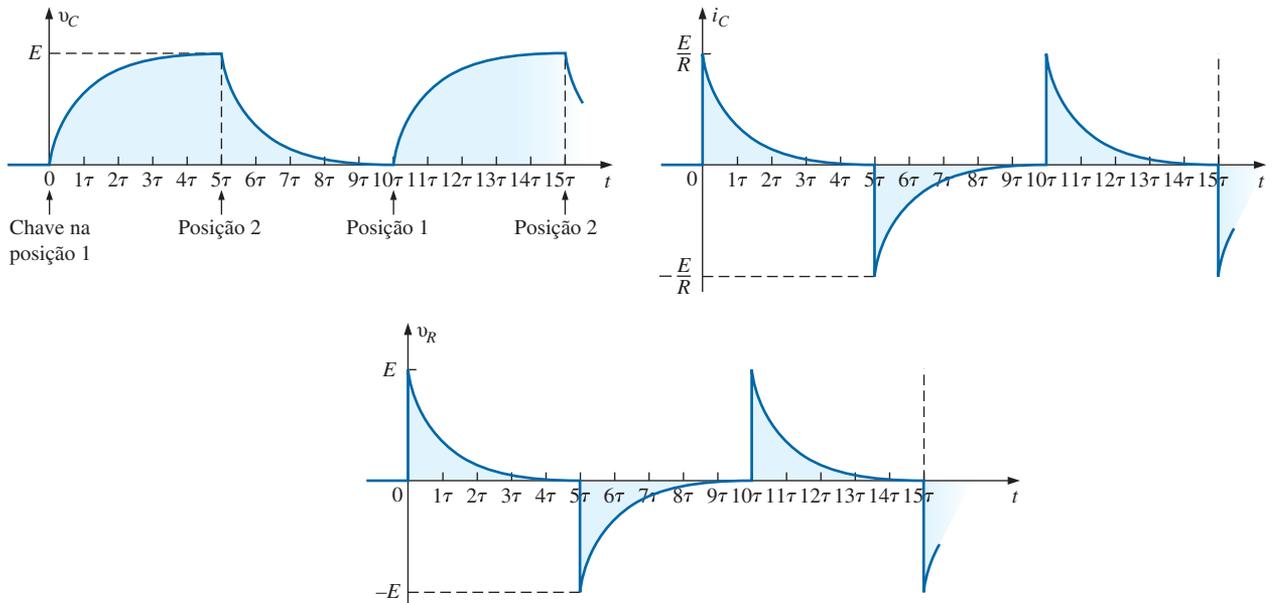


Figura 10.40 v_C , i_C e v_R para chaveamento 5τ entre contatos na Figura. 10.39(a).

$$v_R = v_C = 40 \text{ V} e^{-t/32 \text{ ms}}$$

Um gráfico contínuo para as fases de carga e descarga aparece na Figura 10.41.

O efeito de τ sobre a resposta

No Exemplo 10.7, se o valor de τ fosse modificado mudando-se a resistência, o capacitor, ou ambos, as formas de onda resultantes pareceriam ser as mesmas, pois elas foram representadas graficamente em função

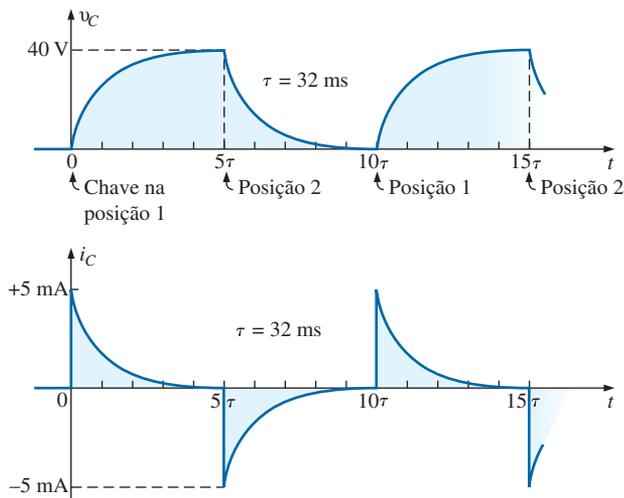


Figura 10.41 v_C e i_C para o circuito na Figura 10.39(a) com os valores no Exemplo 10.6.

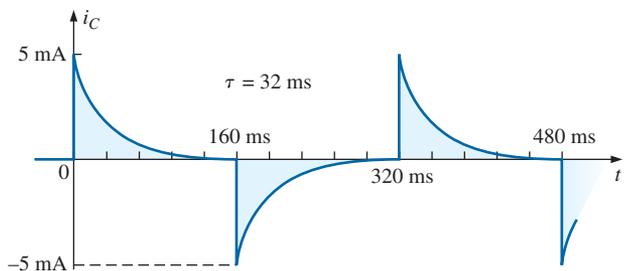
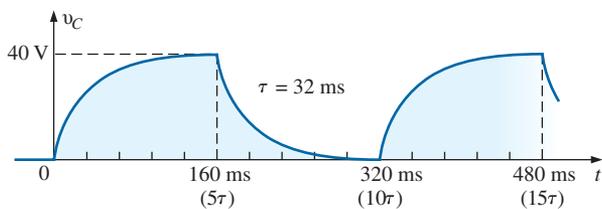
da constante de tempo do circuito. Se elas tivessem sido representadas graficamente em função do tempo, poderia haver uma mudança dramática na aparência dos gráficos resultantes. Na realidade, em um osciloscópio, instrumento projetado para exibir esse tipo de forma de onda, os gráficos são esboçados em função do tempo, e a mudança será imediatamente aparente. Na Figura 10.42(a), as formas de onda na Figura 10.41 para v_C e i_C foram representadas graficamente em função do tempo. Na Figura 10.42(b), a capacitância foi reduzida para $1 \mu\text{F}$, o que reduz a constante de tempo para 8 ms . Observe o efeito dramático sobre a aparência da forma de onda.

Para um circuito de resistência fixa, o efeito de aumentar a capacitância é claramente demonstrado na Figura 10.43. Quanto maior a capacitância e, por conseguinte, a constante de tempo, mais tempo o capacitor levará para ser carregado — há mais carga para ser armazenada. O mesmo efeito pode ser criado mantendo a capacitância constante e aumentando a resistência, mas agora o tempo mais longo se deve às correntes mais baixas que são um resultado da resistência mais alta.

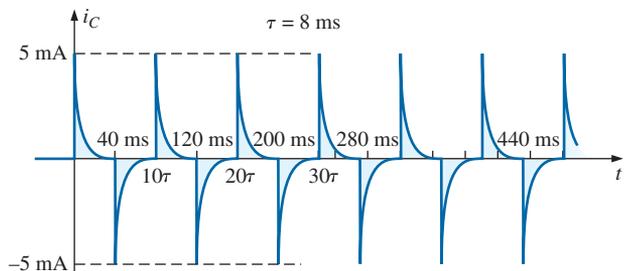
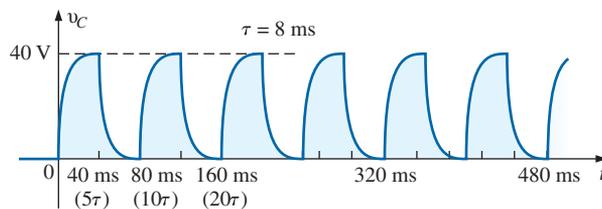
EXEMPLO 10.8

Considerando o circuito na Figura 10.44:

- Calcule as expressões matemáticas para o comportamento transitório da tensão v_C e da corrente i_C se o capacitor estava inicialmente descarregado e a chave for colocada na posição 1 em $t = 0\text{s}$.



(a)



(b)

Figura 10.42 Representação gráfica v_C e i_C em função do tempo em ms: (a) $\tau = 32 \text{ ms}$; (b) $\tau = 8 \text{ ms}$.

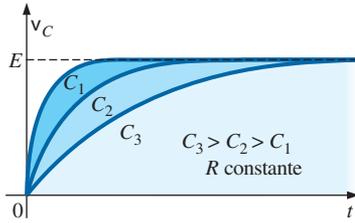


Figura 10.43 Efeito do aumento dos valores de C (com R constante) sobre a curva de carga para v_C .

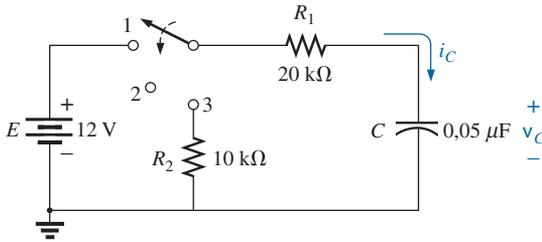


Figura 10.44 Circuito analisado no Exemplo 10.8.

- b) Calcule as expressões matemáticas para a tensão v_C e para a corrente i_C se a chave é movida para a posição 2 em $t = 10$ ms. (Presuma que a resistência de fuga do capacitor seja de infinitos ohms; isto é, não há corrente de fuga.)
- c) Calcule as expressões matemáticas para a tensão v_C e para a corrente i_C se a chave é colocada na posição 3 em $t = 20$ ms.
- d) Faça um gráfico das formas de onda obtidas nas partes (a)–(c) no mesmo eixo de tempo usando as polaridades definidas na Figura 10.44.

Soluções:

a) Fase de carga:

$$\tau = R_1 C = (20 \text{ k}\Omega)(0,05 \text{ }\mu\text{F}) = 1 \text{ ms}$$

$$v_C = E(1 - e^{-t/\tau}) = 12 \text{ V}(1 - e^{-t/1 \text{ ms}})$$

$$i_C = \frac{E}{R_1} e^{-t/\tau} = \frac{12 \text{ V}}{20 \text{ k}\Omega} e^{-t/1 \text{ ms}} = 0,6 \text{ mA} e^{-t/1 \text{ ms}}$$

b) Fase de armazenamento: em 10 ms, um período de tempo igual a 10τ passou, permitindo o pressuposto de que o capacitor está totalmente carregado. Tendo em vista que $R_{\text{fuga}} = \infty \Omega$, o capacitor manterá a sua carga infinitamente. O resultado é que tanto v_C quanto i_C permanecerão com um valor fixo:

$$v_C = 12 \text{ V}$$

$$i_C = 0 \text{ A}$$

c) Fase de descarga (usando-se 20 ms como o novo $t = 0$ s para as equações):

A nova constante de tempo é

$$\tau' = RC = (R_1 + R_2)C$$

$$= (20 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega)(0,05 \text{ }\mu\text{F}) = 1,5 \text{ ms}$$

$$v_C = Ee^{-t/\tau'} = 12 \text{ V}e^{-t/1,5 \text{ ms}}$$

$$i_C = -\frac{E}{R} e^{-t/\tau'} = -\frac{E}{R_1 + R_2} e^{-t/\tau'}$$

$$= -\frac{12 \text{ V}}{20 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega} e^{-t/1,5 \text{ ms}} = -0,4 \text{ mA} e^{-t/1,5 \text{ ms}}$$

d) Veja a Figura 10.45.

EXEMPLO 10.9

Considerando o circuito na Figura 10.46:

- a) Determine a expressão matemática para o comportamento transitório da tensão através do capacitor se a chave é colocada na posição 1 em $t = 0$ s.
- b) Determine a expressão matemática para o comportamento transitório da tensão através do capacitor se a chave é movida para a posição 2 em $t = 1\tau$.
- c) Represente graficamente a forma de onda resultante para a tensão v_C conforme determinam as partes (a) e (b).
- d) Repita as partes (a)–(c) para a corrente i_C .

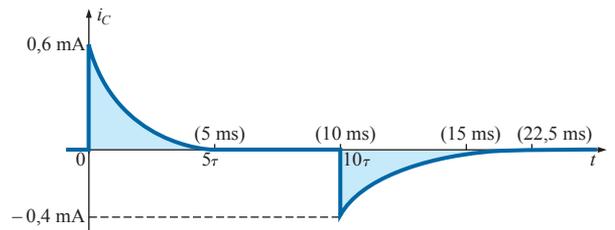
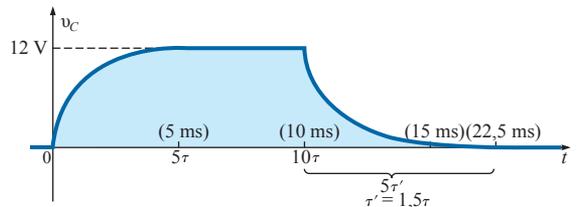


Figura 10.45 v_C e i_C para o circuito na Figura 10.44.

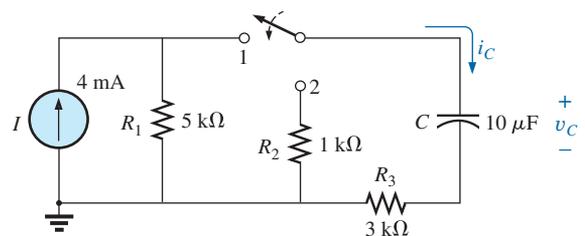


Figura 10.46 Circuito a ser analisado no Exemplo 10.9.

Soluções:

a) A conversão da fonte de corrente em uma fonte de tensão resulta na configuração na Figura 10.47 para a fase de carga.

Para a conversão da fonte

$$E = IR = (4 \text{ mA})(5 \text{ k}\Omega) = 20 \text{ V}$$

e $R_s = R_p = 5 \text{ k}\Omega$

$$\tau = RC = (R_1 + R_3)C = (5 \text{ k}\Omega + 3 \text{ k}\Omega)(10 \mu\text{F}) = 80 \text{ ms}$$

$$v_C = E(1 - e^{-t/\tau}) = 20 \text{ V}(1 - e^{-t/80 \text{ ms}})$$

b) Com a chave na posição 2, o circuito aparece como mostra a Figura 10.48. A tensão em 1τ pode ser encontrada usando o fato de que a tensão é 63,2

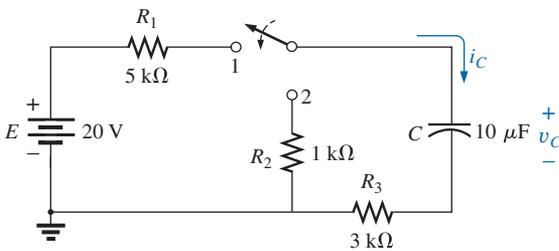


Figura 10.47 Fase de carga para o circuito na Figura 10.46.

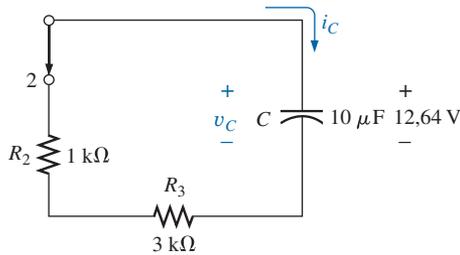


Figura 10.48 Circuito na Figura 10.47 quando a chave é movida para a posição 2 em $t = 1\tau$.

por cento do seu valor final de 20 V, de maneira que $0,632(20 \text{ V}) = 12,64 \text{ V}$. Alternativamente, você pode substituir na equação derivada como fizemos a seguir:

$$e^{-t/\tau} = e^{-\tau/\tau} = e^{-1} = 0,368$$

e
$$v_C = 20 \text{ V}(1 - e^{-t/80 \text{ ms}}) = 20 \text{ V}(1 - 0,368) = (20 \text{ V})(0,632) = 12,64 \text{ V}$$

Usando essa tensão como ponto de partida e fazendo a substituição na equação de descarga, temos:

$$\tau' = RC = (R_2 + R_3)C = (1 \text{ k}\Omega + 3 \text{ k}\Omega)(10 \mu\text{F}) = 40 \text{ ms}$$

$$v_C = Ee^{-t/\tau'} = 12,64 \text{ V}e^{-t/40 \text{ ms}}$$

c) Veja a Figura 10.49.

d) A equação de carga para a corrente é:

$$i_C = \frac{E}{R} e^{-t/\tau} = \frac{E}{R_1 + R_3} e^{-t/\tau} = \frac{20 \text{ V}}{8 \text{ k}\Omega} e^{-t/80 \text{ ms}} = 2,5 \text{ mA}e^{-t/80 \text{ ms}}$$

o que, a $t = 80 \text{ ms}$, resulta em

$$i_C = 2,5 \text{ mA}e^{-80 \text{ ms}/80 \text{ ms}} = 2,5 \text{ mA}e^{-1} = (2,5 \text{ mA})(0,368) = 0,92 \text{ mA}$$

Quando a chave é movida para a posição 2, os 12,64 V através do capacitor aparecem através do resistor para estabelecer uma corrente de $12,64 \text{ V}/4 \text{ k}\Omega = 3,16 \text{ mA}$. Substituindo na equação de descarga com $V_i = 12,64 \text{ V}$ e $\tau' = 40 \text{ ms}$, temos:

$$i_C = -\frac{V_i}{R_2 + R_3} e^{-t/\tau'} = -\frac{12,64 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega + 3 \text{ k}\Omega} e^{-t/40 \text{ ms}} = -\frac{12,64 \text{ V}}{4 \text{ k}\Omega} e^{-t/40 \text{ ms}} = -3,16 \text{ mA}e^{-t/40 \text{ ms}}$$

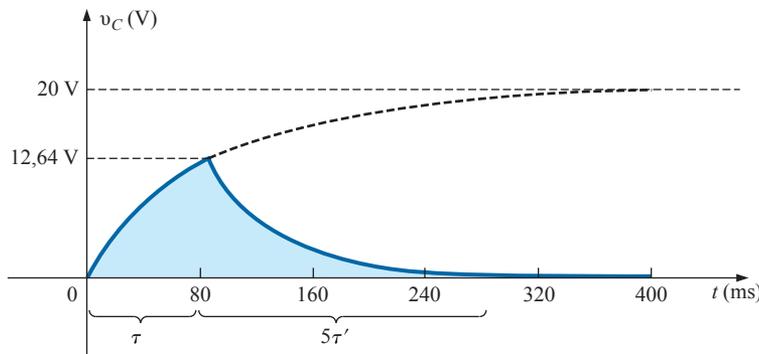


Figura 10.49 v_C para o circuito na Figura 10.47.

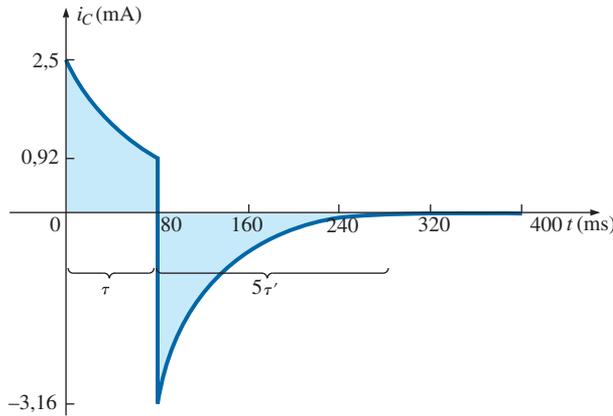


Figura 10.50 i_C para o circuito na Figura 10.47.

A equação tem um sinal de menos porque o sentido da corrente de descarga é oposto àquele definido para a corrente na Figura 10.48. O gráfico resultante aparece na Figura 10.50.

10.7 VALORES INICIAIS

Em todos os exemplos examinados nas seções anteriores, o capacitor estava descarregado até que a chave fosse fechada. Examinaremos agora o efeito de uma carga inicial e, conseqüentemente, de uma tensão ($V = Q/C$) entre as placas no instante em que a chave é fechada. A tensão entre os terminais do capacitor nesse instante é chamada de **valor inicial**, como mostra a forma de onda geral vista na Figura 10.51.

Uma vez que a chave é fechada, começa a fase transitória, que só termina, para todos os efeitos práticos, após cinco constantes de tempo. A região de valores relativamente fixos e que se segue à resposta transitória é denominada **estado estacionário** ou regime permanente, e o valor da tensão nessa região é denominado **valor estacionário** ou **valor final**. O valor estacionário é determinado simplesmente pela substituição do capacitor por um circuito

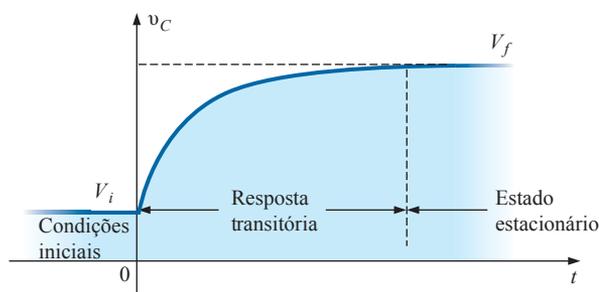


Figura 10.51 Regiões associadas a uma resposta transitória.

aberto equivalente e pela determinação da tensão entre as placas. Usando a equação para o transitório apresentada na seção anterior, uma equação para v_C pode ser escrita considerando todo o intervalo de tempo da Figura 10.51. Ou seja, para o período transitório, a tensão aumenta de V_i (previamente 0 V) para um valor final de V_f . Portanto,

$$v_C = E(1 - e^{-t/\tau}) = (V_f - V_i)(1 - e^{-t/\tau})$$

Adicionando o valor inicial de V_i à equação, temos:

$$v_C = V_i + (V_f - V_i)(1 - e^{-t/\tau})$$

Entretanto, multiplicando e reagrupando os termos, temos:

$$v_C = V_i + V_f - V_f e^{-t/\tau} - V_i + V_i e^{-t/\tau} = V_f - V_f e^{-t/\tau} + V_i e^{-t/\tau}$$

Chegamos a:

$$v_C = V_f + (V_i - V_f)e^{-t/\tau} \tag{10.21}$$

Agora que a equação foi desenvolvida, é importante reconhecer que:

A Equação 10.21 é uma equação universal para a resposta transitória de um capacitor.

Isto é, ela pode ser usada independentemente do capacitor ter ou não um valor inicial. Se o valor inicial for 0 V como era em todos os exemplos anteriores, simplesmente estabeleça V_i igual a zero na equação, e a equação desejada será obtida. O valor final é a tensão através do capacitor quando o circuito aberto equivalente é substituído.

EXEMPLO 10.10

O capacitor visto na Figura 10.52 tem uma tensão inicial de 4 V.

- a) Determine a expressão matemática para a tensão entre os terminais do capacitor uma vez que a chave é fechada.

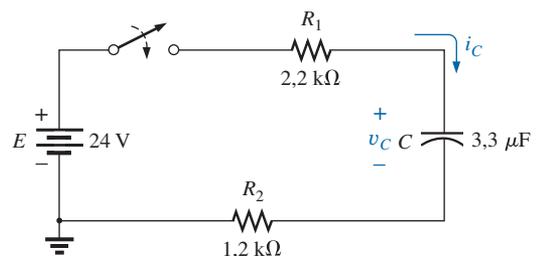


Figura 10.52 Exemplo 10.10.

- b) Determine a expressão matemática para a corrente durante o período transitório.
- c) Faça um esboço das formas de onda da tensão e da corrente, desde o valor inicial até o final.

Soluções:

- a) Substituindo o capacitor por um circuito aberto, verificamos que a tensão final v_C é 24 V. A constante de tempo é determinada por:

$$\begin{aligned} \tau &= (R_1 + R_2)C \\ &= (2,2 \text{ k}\Omega + 1,2 \text{ k}\Omega) (3,3 \text{ }\mu\text{F}) = 11,22 \text{ ms} \\ \text{com } 5\tau &= 56,1 \text{ ms} \end{aligned}$$

Usando a Equação 10.21, temos:

$$\begin{aligned} v_C &= V_f + (V_i - V_f)e^{-t/\tau} \\ &= 24 \text{ V} + (4 \text{ V} - 24 \text{ V})e^{-t/11,22 \text{ ms}} \\ \text{e } v_C &= 24 \text{ V} - 20 \text{ V}e^{-t/11,22 \text{ ms}} \end{aligned}$$

- b) Como a tensão entre os terminais do capacitor é constante, 4 V, antes de fechar a chave, a corrente (cujo valor depende apenas da variação de tensão no capacitor) deve ter um valor inicial zero. No instante em que a chave é fechada, a tensão entre os terminais do capacitor não pode mudar instantaneamente, de modo que a tensão entre os terminais dos elementos resistivos nesse instante é igual à tensão aplicada menos a tensão inicial entre os terminais do capacitor. A corrente de pico resultante é:

$$\begin{aligned} I_m &= \frac{E - V_C}{R_1 + R_2} = \frac{24 \text{ V} - 4 \text{ V}}{2,2 \text{ k}\Omega + 1,2 \text{ k}\Omega} = \frac{20 \text{ V}}{3,4 \text{ k}\Omega} \\ &= 5,88 \text{ mA} \end{aligned}$$

A corrente então cairá (com a mesma constante de tempo que a tensão v_C) para zero porque o capacitor está se aproximando do estado que equivale a um circuito aberto.

A equação para i_C é, portanto,

$$i_C = 5,88 \text{ mA}e^{-t/11,22 \text{ ms}}$$

- c) Veja a Figura 10.53. Os valores inicial e final da tensão foram desenhados primeiro, e depois incluímos a resposta transitória entre esses valores. No caso da corrente, a forma de onda começa e termina em zero; seu sinal depende do sentido escolhido para i_C na Figura 10.52.

Testaremos agora a validade da equação para v_C , substituindo $t = 0$ s para representar o instante em que a chave é fechada.

$$\begin{aligned} e^{-t/\tau} &= e^{-0} = 1 \\ \text{e } v_C &= 24 \text{ V} - 20 \text{ V}e^{t/\tau} = 24 \text{ V} - 20 \text{ V} = 4 \text{ V} \end{aligned}$$

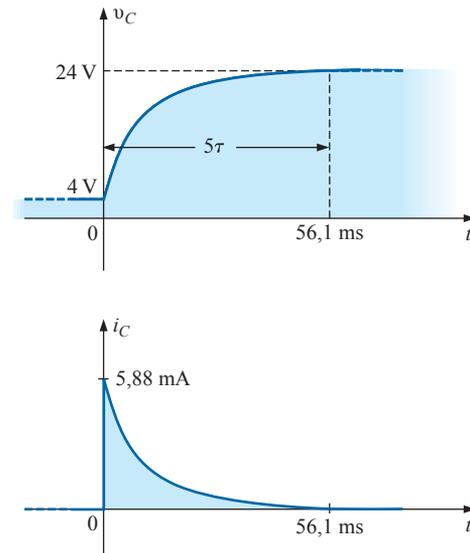


Figura 10.53 v_C e i_C para o circuito mostrado na Figura 10.52.

Quando: $t > 5\tau$,

$$\begin{aligned} e^{-t/\tau} &\cong 0 \\ \text{e } v_C &= 24 \text{ V} - 20 \text{ V}e^{t/\tau} = 24 \text{ V} - 0 \text{ V} = 24 \text{ V} \end{aligned}$$

A Equação 10.21 também pode ser aplicada na fase de descarga utilizando os níveis corretos de V_i e V_f .

Para o padrão de descarga na Figura 10.54, $V_f = 0$ V, e a Equação 10.21 se transforma em:

$$v_C = V_f + (V_i - V_f) e^{-t/\tau} = 0 \text{ V} + (V_i - 0 \text{ V})e^{-t/\tau}$$

$$\text{e } v_C = V_i e^{-t/\tau} \quad \text{descarga} \quad (10.22)$$

Substituindo $V_i = E$ volts, temos a Equação 10.17.

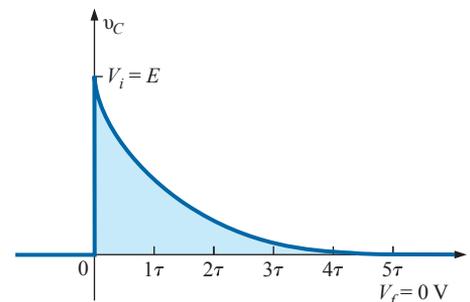


Figura 10.54 Definição dos parâmetros na Equação 10.21 para a fase de descarga.

10.8 VALORES INSTANTÂNEOS

Em certas ocasiões, é necessário determinar a tensão ou a corrente em um instante particular que não seja um múltiplo de τ , como ocorreu nas seções anteriores. Por exemplo, se:

$$v_C = 20 \text{ V}(1 - e^{-(t/2 \text{ ms})})$$

pode ser necessário saber o valor de v_C em $t = 5 \text{ ms}$, o que não corresponde a um múltiplo de t . A Figura 10.28 mostra que $(1 - e^{-t/\tau})$ é aproximadamente 0,93 em $t = 5 \text{ ms} = 2,5\tau$, o que nos dá $v_C = 20(0,93) = 18,6 \text{ V}$. É possível obter uma precisão maior se substituirmos $v = 5 \text{ ms}$ na equação e calcularmos v_C usando uma calculadora ou uma tabela para determinar o valor de $e^{-2,5}$. Assim,

$$\begin{aligned} v_C &= 20 \text{ V}(1 - e^{-5 \text{ ms}/2 \text{ ms}}) = (20 \text{ V})(1 - e^{-2,5}) \\ &= (20 \text{ V})(1 - 0,082) = (20 \text{ V})(0,918) = \mathbf{18,36 \text{ V}} \end{aligned}$$

Os resultados estão próximos, mas raramente se consegue uma precisão além de décimos com o uso da Figura 10.29. O método anterior pode ser aplicado a qualquer uma das equações apresentadas neste capítulo e para qualquer valor de tensão.

Também existem ocasiões em que precisamos conhecer o tempo necessário para atingir determinada tensão ou corrente. O método é um pouco complicado pelo uso de logaritmos naturais (\log_e ou \ln), mas as calculadoras atuais estão equipadas para realizar tais operações com facilidade.

Por exemplo, solucionando para t na equação:

$$v_C = V_f + (V_i - V_f)e^{-t/\tau}$$

temos

$$t = \tau(\log_e) \frac{(V_i - V_f)}{(v_C - V_f)} \quad (10.23)$$

Por exemplo, suponha que:

$$v_C = 20 \text{ V}(1 - e^{-t/2 \text{ ms}})$$

e o tempo t para alcançar 10 V é desejado. Tendo em vista que $V_i = 0 \text{ V}$ e $V_f = 20 \text{ V}$, temos:

$$\begin{aligned} t &= \tau(\log_e) \frac{(V_i - V_f)}{(v_C - V_f)} = (2 \text{ ms})(\log_e) \frac{(0 \text{ V} - 20 \text{ V})}{(10 \text{ V} - 20 \text{ V})} \\ &= (2 \text{ ms}) \left[\log_e \left(\frac{-20 \text{ V}}{-10 \text{ V}} \right) \right] = (2 \text{ ms})(\log_e 2) \\ &= (2 \text{ ms})(0,693) = \mathbf{1,386 \text{ ms}} \end{aligned}$$

As teclas a serem acionadas na calculadora TI-89 aparecem na Figura 10.55.

Para a equação de descarga,

$$v_C = Ee^{-t/\tau} = V_i(e^{-t/\tau}) \quad \text{com } V_f = 0 \text{ V}$$

Usando a Equação 10.23, temos:

$$t = \tau(\log_e) \frac{(V_i - V_f)}{(v_C - V_f)} = \tau(\log_e) \frac{(V_i - 0 \text{ V})}{(v_C - 0 \text{ V})}$$

$$e \quad t = \tau \log_e \frac{V_i}{v_C} \quad (10.24)$$

Para a equação atual:

$$i_C = \frac{E}{R} e^{-t/\tau} \quad I_i = \frac{E}{R} \quad I_f = 0 \text{ A}$$

$$e \quad t = \log_e \frac{I_i}{i_C} \quad (10.25)$$

10.9 EQUIVALENTE DE THÉVENIN: $\tau = R_{Th}C$

Surgirão situações em que o circuito não terá a forma simples vista na Figura 10.26. Então, será necessário primeiro determinar o circuito equivalente de Thévenin do circuito externo ao capacitor. Assim, E_{Th} será então a tensão da fonte E das equações 10.13 a 10.25, e R_{Th} será a resistência R . A constante de tempo será $\tau = R_{Th}C$.

EXEMPLO 10.11

Considerando o circuito da Figura 10.56:

- Determine a expressão matemática para o comportamento transitório da tensão v_C e da corrente i_C em função do tempo após o fechamento da chave (posição 1 em $t = 0 \text{ s}$).
- Determine a expressão matemática para a tensão v_C e a corrente i_C em função do tempo se a chave for colocada na posição 2 em $t = 9 \text{ ms}$.
- Desenhe as formas de onda de tensão e de corrente para os itens (a) e (b) no mesmo eixo.

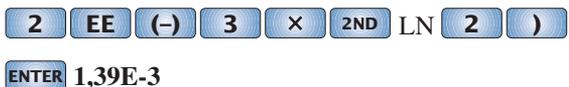


Figura 10.55 Teclas a serem acionadas para determinar $(2 \text{ ms})(\log_e 2)$ usando a calculadora TI-89.

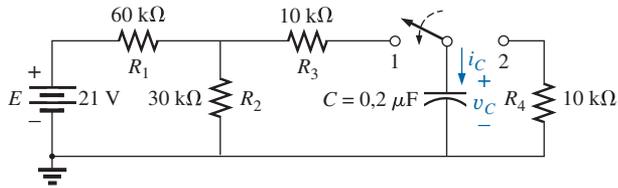


Figura 10.56 Exemplo 10.11.

Soluções:

a) Aplicando o teorema de Thévenin ao capacitor de 0,2 μF, obtemos o circuito visto na Figura 10.57:

$$R_{Th} = R_1 \parallel R_2 + R_3 = \frac{(60 \text{ k}\Omega)(30 \text{ k}\Omega)}{90 \text{ k}\Omega} + 10 \text{ k}\Omega$$

$$= 20 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega = 30 \text{ k}\Omega$$

$$E_{Th} = \frac{R_2 E}{R_2 + R_1} = \frac{(30 \text{ k}\Omega)(21 \text{ V})}{30 \text{ k}\Omega + 60 \text{ k}\Omega} = \frac{1}{3}(21 \text{ V}) = 7 \text{ V}$$

O circuito equivalente de Thévenin com o capacitor recolocado no circuito aparece na Figura 10.58.

Usando a Equação 10.21 com $V_f = E_{Th}$ e $V_i = 0 \text{ V}$, temos:

$$v_C = V_f + (V_i - V_f)e^{-t/\tau}$$

que resulta em $v_C = E_{Th} + (0 \text{ V} - E_{Th})e^{-t/\tau}$

ou $v_C = E_{Th}(1 - e^{-t/\tau})$

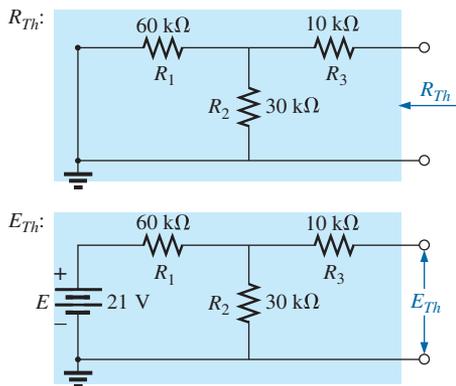


Figura 10.57 Aplicação do teorema de Thévenin ao circuito da Figura 10.56.

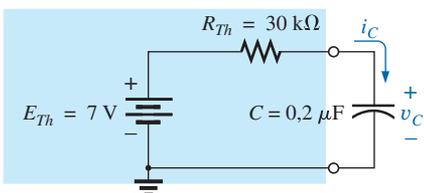


Figura 10.58 Substituição do circuito da Figura 10.56 pelo circuito equivalente de Thévenin.

com: $\tau = RC = (30 \text{ k}\Omega)(0,2 \text{ }\mu\text{F}) = 6 \text{ ms}$
de forma que: $v_C = 7 \text{ V}(1 - e^{-t/6 \text{ ms}})$

Para a corrente i_C :

$$i_C = \frac{E_{Th}}{R} e^{-t/RC} = \frac{7 \text{ V}}{30 \text{ k}\Omega} e^{-t/6 \text{ ms}}$$

$$= 0,23 \text{ mA} e^{-t/6 \text{ ms}}$$

b) Em $t = 9 \text{ ms}$,

$$v_C = E_{Th}(1 - e^{-t/\tau}) = 7 \text{ V}(1 - e^{-9 \text{ ms}/6 \text{ ms}})$$

$$= (7 \text{ V})(1 - e^{-1,5}) = (7 \text{ V})(1 - 0,223)$$

$$= (7 \text{ V})(0,777) = 5,44 \text{ V}$$

e $i_C = \frac{E_{Th}}{R} e^{-t/\tau} = 0,23 \text{ mA} e^{-1,5}$

$$= (0,23 \times 10^{-3})(0,223) = 0,052 \times 10^{-3}$$

$$= 0,05 \text{ mA}$$

Usando a Equação 10.21 com $V_f = 0 \text{ V}$ e $V_i = 5,44 \text{ V}$, temos:

$$v_C = V_f + (V_i - V_f)e^{-t'/\tau'}$$

o que resulta em $v_C = 0 \text{ V} + (5,44 \text{ V} - 0 \text{ V})e^{-t'/\tau'}$
 $= 5,44 \text{ V} e^{-t'/\tau'}$

com $\tau' = R_4 C = (10 \text{ k}\Omega)(0,2 \text{ }\mu\text{F})$
 $= 2 \text{ ms}$

e $v_C = 5,44 \text{ V} e^{-t/2 \text{ ms}}$

Pela Equação 10.19,

$$I_i = \frac{5,44 \text{ V}}{10 \text{ k}\Omega} = 0,54 \text{ mA}$$

e $i_C = I_i e^{-t/\tau} = 0,54 \text{ mA} e^{-t/2 \text{ ms}}$

c) Veja a Figura 10.59.

EXEMPLO 10.12

O capacitor visto na Figura 10.60 é carregado inicialmente a 40 V. Determine a expressão matemática para v_C em função do tempo após o fechamento da chave. Desenhe o gráfico da forma de onda de v_C .

Solução:

O circuito é redesenhado na Figura 10.61.

E_{Th} :

$$E_{Th} = \frac{R_3 E}{R_3 + R_1 + R_4} = \frac{(18 \text{ k}\Omega)(120 \text{ V})}{18 \text{ k}\Omega + 7 \text{ k}\Omega + 2 \text{ k}\Omega} = 80 \text{ V}$$

R_{Th} :

$$R_{Th} = 5 \text{ k}\Omega + (18 \text{ k}\Omega) \parallel (7 \text{ k}\Omega + 2 \text{ k}\Omega)$$

$$= 5 \text{ k}\Omega + 6 \text{ k}\Omega = 11 \text{ k}\Omega$$

Portanto, $V_i = 40 \text{ V}$ e $V_f = 80 \text{ V}$

e $\tau = R_{Th} C = (11 \text{ k}\Omega)(40 \text{ }\mu\text{F}) = 0,44 \text{ s}$

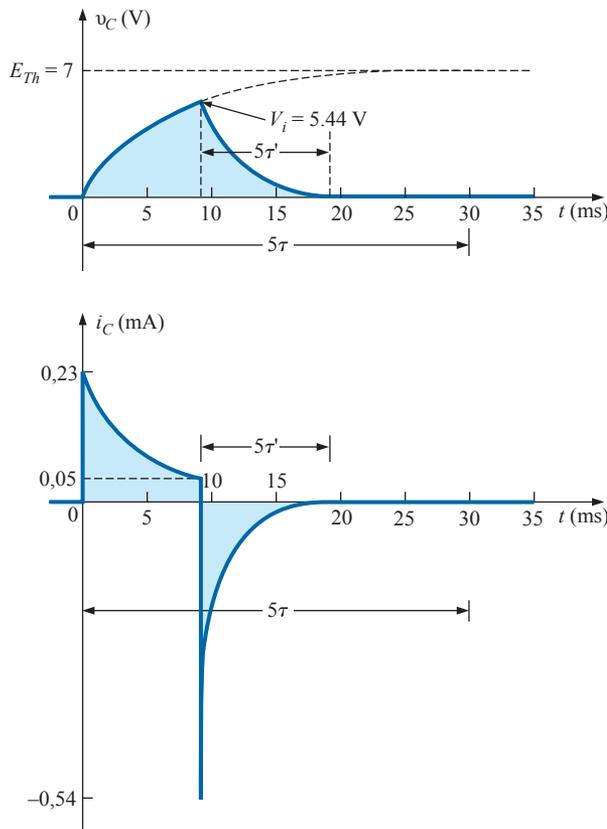


Figura 10.59 Formas de onda para o circuito da Figura 10.56.

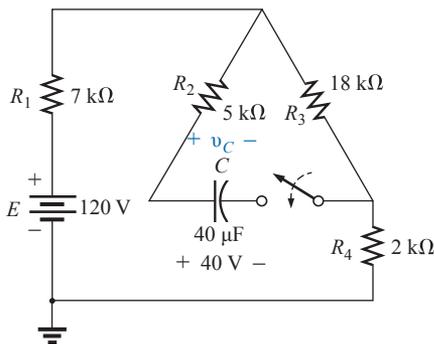


Figura 10.60 Exemplo 10.12.

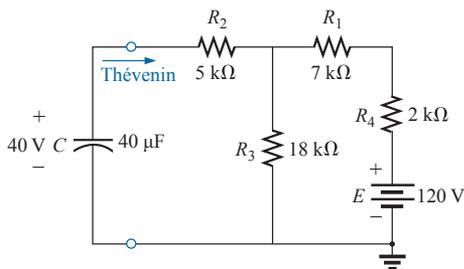


Figura 10.61 Circuito na Figura 10.60 redesenhado.

Equação 10.21: $v_C = V_f + (V_i - V_f)e^{-t/\tau}$
 $= 80 \text{ V} + (40 \text{ V} - 80 \text{ V})e^{-t/0,44 \text{ s}}$
 e $v_C = 80 \text{ V} - 40 \text{ V}e^{-t/0,44 \text{ s}}$

A forma de onda aparece como na Figura 10.62.

EXEMPLO 10.13

Para o circuito da Figura 10.63, determine a expressão matemática para a tensão v_C em função do tempo depois que a chave for fechada (em $t = 0$).

Solução:

$$R_{Th} = R_1 + R_2 = 6 \Omega + 10 \Omega = 16 \Omega$$

$$E_{Th} = V_1 + V_2 = IR_1 + 0$$

$$= (20 \times 10^{-3} \text{ A})(6 \Omega)$$

$$= 120 \times 10^{-3} \text{ V} = 0,12 \text{ V}$$

e $\tau = R_{Th}C = (16 \Omega)(500 \times 10^{-6} \text{ F})$
 $= 8 \text{ ms}$

de forma que $v_C = 0,12 \text{ V}(1 - e^{-t/8 \text{ ms}})$

10.10 A CORRENTE i_C

Há uma relação muito especial entre a corrente de um capacitor e a tensão através dele. Para o resistor, ela é definida pela lei de Ohm: $i_R = v_R/R$. A corrente e a tensão através do resistor são relacionadas por uma constante R — uma relação linear direta muito simples. Para o capacitor, trata-se da relação mais complexa definida por:

$$i_C = C \frac{dv_C}{dt} \tag{10.26}$$

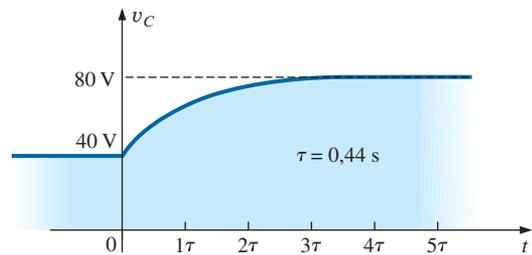


Figura 10.62 v_C para o circuito na Figura 10.60.

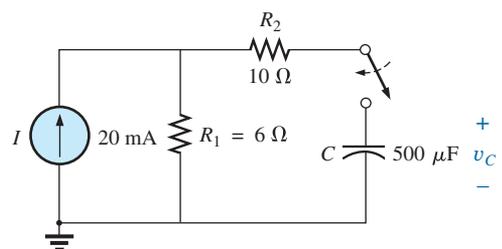


Figura 10.63 Exemplo 10.13.

O fator C revela que quanto mais alta a capacitância, maior a corrente resultante. Intuitivamente, essa relação faz sentido, pois níveis de capacitância mais altos resultam em níveis maiores de carga armazenada, proporcionando uma fonte para níveis de corrente maiores. O segundo termo dv_C/dt é sensível à taxa de variação de v_C com o tempo. A função dv_C/dt é chamada de **derivada** (cálculo) da tensão v_C em relação ao tempo t . Quanto mais rapidamente v_C varia com o tempo, maior será o fator dv_C/dt e maior será a corrente resultante i_C . É por essa razão que a corrente salta para seu E/R máximo em um circuito de carga no instante em que a chave é fechada. Nesse instante, se você olhar para a curva de carga para v_C , a tensão estará *variando* na sua taxa mais alta. Na medida em que ela se aproxima do seu valor final, a taxa de variação diminui, e, como confirmado pela Equação 10.26, o nível de corrente cai.

Preste bem atenção na frase a seguir:

A corrente capacitiva está diretamente relacionada à taxa de variação da tensão através do capacitor, não aos níveis de tensão envolvidos.

Por exemplo, a corrente de um capacitor será maior quando a tensão variar de 1 a 10 V em 1 ms do que quando ela variar de 10 a 100 V em 1 s; na realidade, ela será 100 vezes maior.

Se a tensão deixa de variar com o tempo, então:

$$\frac{dv_C}{dt} = 0$$

e

$$i_C = C \frac{dv_C}{dt} = C(0) = 0 \text{ A}$$

Para entender melhor a Equação 10.26, calcularemos a **corrente média** associada ao capacitor para várias tensões entre seus terminais. A corrente média é definida pela equação:

$$i_{C\text{méd}} = C \frac{\Delta v_C}{\Delta t} \tag{10.27}$$

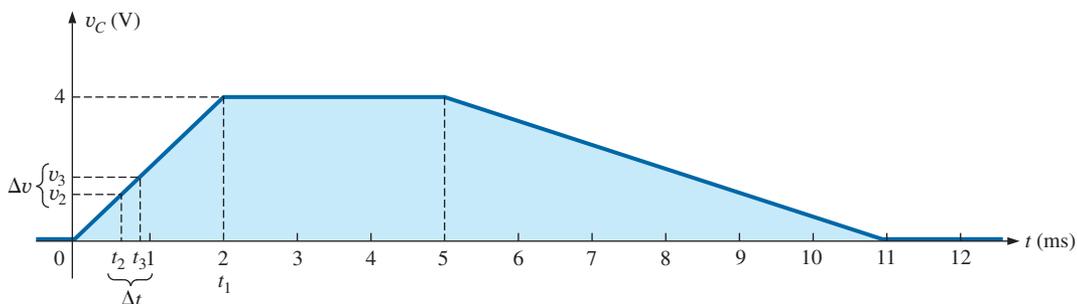


Figura 10.64 v_C para o Exemplo 10.14.

onde Δ indica uma variação finita (mensurável) da carga, da tensão ou do tempo. A corrente instantânea pode ser calculada a partir da Equação 10.27, tornando Δt infinitamente pequeno, ou seja,

$$i_{C\text{inst}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} C \frac{\Delta v_C}{\Delta t} = C \frac{dv_C}{dt}$$

No exemplo a seguir, será considerada a variação da tensão, Δv_C , para cada inclinação da forma de onda da tensão. Se a tensão aumenta com o tempo, a corrente média é dada pela variação de tensão dividida pela variação do tempo, com sinal positivo. Se a tensão diminui com o tempo, a corrente média é obtida da mesma forma, mas com sinal negativo.

EXEMPLO 10.14

Desenhe a forma de onda da corrente média se a tensão entre os terminais de um capacitor de 2 μF varia de acordo com o gráfico da Figura 10.64.

Soluções:

- a) De 0 a 2 ms, em que a tensão aumenta linearmente de 0 a 4 V, sendo a variação de tensão $\Delta v = 4 \text{ V} - 0 = 4 \text{ V}$ (com sinal positivo, já que a tensão aumenta com o tempo). O intervalo de tempo é $\Delta t = 2 \text{ ms} - 0 = 2 \text{ ms}$, e:

$$i_{C\text{méd}} = C \frac{\Delta v_C}{\Delta t} = (2 \times 10^{-6} \text{ F}) \left(\frac{4 \text{ V}}{2 \times 10^{-3} \text{ s}} \right) = 4 \times 10^{-3} \text{ A} = \mathbf{4 \text{ mA}}$$

- b) De 2 a 5 ms, a tensão permanece constante em 4 V; a variação de tensão é $\Delta v = 0$. A variação de tempo é $\Delta t = 3 \text{ ms}$, e:

$$i_{C\text{méd}} = C \frac{\Delta v_C}{\Delta t} = C \frac{0}{\Delta t} = \mathbf{0 \text{ mA}}$$

- c) De 5 a 11 ms, a tensão diminui de 4 para 0 V. A variação de tensão é $\Delta v = 0 \text{ V} - 4 \text{ V} = -4 \text{ V}$ (com sinal

negativo, já que a tensão diminui com o tempo). A variação de tempo é $\Delta t = 11 \text{ ms} - 5 \text{ ms} = 6 \text{ ms}$, e

$$i_{C_{\text{av}}} = C \frac{\Delta v_C}{\Delta t} = -(2 \times 10^{-6} \text{ F}) \left(\frac{4 \text{ V}}{6 \times 10^{-3} \text{ s}} \right) = -1,33 \times 10^{-3} \text{ A} = -1,33 \text{ mA}$$

- d) De 11 ms em diante, a tensão permanece constante em 0 V e $\Delta v = 0$, logo $i_{C_{\text{méd}}} = 0 \text{ mA}$. A forma de onda da corrente média, relativa à tensão especificada, é mostrada na Figura 10.65.

Observe, no Exemplo 10.14, que, em geral, quanto maior a inclinação da curva da tensão em função do tempo, maior a corrente, e quando a tensão não varia, a corrente é nula. Além disso, o valor médio é igual ao valor instantâneo em qualquer ponto ao longo da inclinação para o qual o valor médio foi determinado. Por exemplo, se o intervalo Δt for reduzido de $0 \rightarrow t_1$ para $t_2 - t_3$, como resalta a Figura 10.64, o valor de $\Delta v / \Delta t$ ainda será o mesmo. Na realidade, não importa quão pequeno seja o intervalo Δt , a inclinação será a mesma e, portanto, a corrente $i_{C_{\text{méd}}}$ terá o mesmo valor. Se considerarmos o limite quando $\Delta t \rightarrow 0$, a inclinação continuará a mesma e, portanto, $i_{C_{\text{méd}}} = i_{C_{\text{inst}}}$ para qualquer instante entre 0 e t_1 . O mesmo pode ser dito a respeito de qualquer intervalo da forma de onda da tensão que tenha uma inclinação constante.

Uma conclusão importante que podemos tirar dessa discussão é que não é o valor da tensão aplicada a um capacitor que determina a corrente e, sim, a rapidez com que a tensão *varia*. Uma tensão constante de 10.000 V pode não produzir (no caso ideal) um fluxo de carga (corrente), mas uma variação de 1 V em um curto período de tempo pode dar origem a uma corrente significativa.

O método descrito se aplica somente a formas de onda constituídas por segmentos lineares. No caso de forma de onda não linear, um método de cálculo (diferenciação) tem de ser empregado.

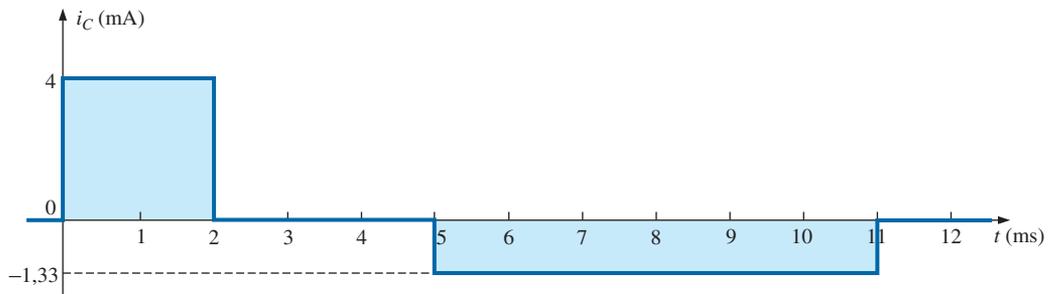


Figura 10.65 Corrente i_C resultante para tensão vista na Figura 10.64.

10.11 CAPACITORES EM SÉRIE E EM PARALELO

Os capacitores, assim como os resistores, podem ser conectados em série e em paralelo. Um aumento nos valores de capacitância pode ser conseguido conectando os capacitores em paralelo, enquanto uma diminuição é obtida conectando-os em série.

No caso de capacitores conectados em série, a carga é a mesma em todos os capacitores (veja a Figura 10.66):

$$Q_T = Q_1 = Q_2 = Q_3 \tag{10.28}$$

Aplicando a lei de Kirchhoff para tensões ao longo da malha, temos:

$$E = V_1 + V_2 + V_3$$

Entretanto, $V = \frac{Q}{C}$

de forma que $\frac{Q_T}{C_T} = \frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2} + \frac{Q_3}{C_3}$

Usando a Equação 10.28 e dividindo os dois lados por Q , temos:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \tag{10.29}$$

que é semelhante à equação para o cálculo da resistência total de um circuito resistivo paralelo. A capacitância total de dois capacitores em série é dada por:

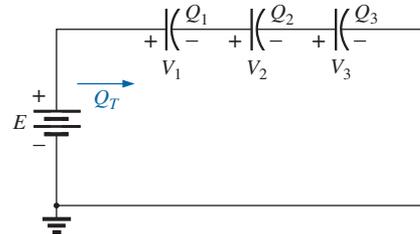


Figura 10.66 Capacitores em série.

$$C_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (10.30)$$

A tensão entre os terminais de cada um dos capacitores vistos na Figura 10.66 pode ser determinada reconhecendo, primeiramente, que:

$$Q_T = Q_1$$

ou

$$C_T E = C_1 V_1$$

Explicitando V_1 , temos $V_1 = \frac{C_T E}{C_1}$

e substituindo C_T por seu valor, temos:

$$V_1 = \left(\frac{1/C_1}{1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3} \right) E \quad (10.31)$$

Para cada um dos capacitores do circuito teremos uma equação similar.

No caso de capacitores em paralelo (Figura 10.67), a tensão é a mesma entre os terminais de todos os capacitores, e a carga total é a soma das cargas dos capacitores:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (10.32)$$

Entretanto, $Q = CV$

Portanto, $C_T E = C_1 V_1 = C_2 V_2 = C_3 V_3$

mas $E = V_1 = V_2 = V_3$

Assim, $C_T = C_1 + C_2 + C_3 \quad (10.33)$

que é semelhante à equação que usamos para calcular a resistência total de um circuito resistivo em série.

EXEMPLO 10.15

Considerando o circuito da Figura 10.68:

- a) Determine a capacitância total.
- b) Determine a carga em cada placa.
- c) Calcule a tensão entre os terminais de cada capacitor.

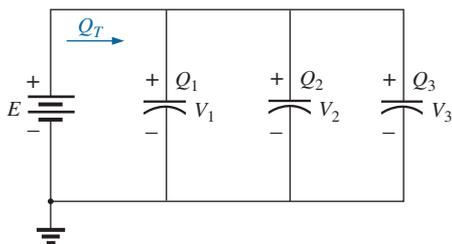


Figura 10.67 Capacitores em paralelo.

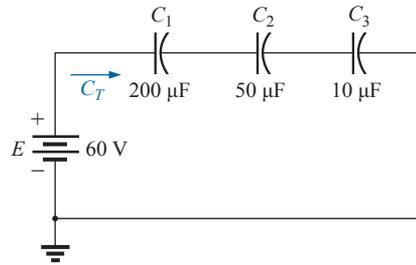


Figura 10.68 Exemplo 10.15.

Soluções:

a) $\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$

$$= \frac{1}{200 \times 10^{-6} \text{ F}} + \frac{1}{50 \times 10^{-6} \text{ F}} + \frac{1}{10 \times 10^{-6} \text{ F}}$$

$$= 0,005 \times 10^6 + 0,02 \times 10^6 + 0,1 \times 10^6$$

$$= 0,125 \times 10^6$$

e $C_T = \frac{1}{0,125 \times 10^6} = 8 \mu\text{F}$

b) $Q_T = Q_1 = Q_2 = Q_3$

$$= C_T E = (8 \times 10^{-6} \text{ F})(60 \text{ V}) = 480 \mu\text{C}$$

c) $V_1 = \frac{Q_1}{C_1} = \frac{480 \times 10^{-6} \text{ C}}{200 \times 10^{-6} \text{ F}} = 2,4 \text{ V}$

$$V_2 = \frac{Q_2}{C_2} = \frac{480 \times 10^{-6} \text{ C}}{50 \times 10^{-6} \text{ F}} = 9,6 \text{ V}$$

$$V_3 = \frac{Q_3}{C_3} = \frac{480 \times 10^{-6} \text{ C}}{10 \times 10^{-6} \text{ F}} = 48,0 \text{ V}$$

e $E = V_1 + V_2 + V_3 = 2,4 \text{ V} + 9,6 \text{ V} + 48 \text{ V} = 60 \text{ V}$ (confere)

EXEMPLO 10.16

Considerando o circuito da Figura 10.69:

- a) Determine a capacitância total.
- b) Determine a carga em cada placa.
- c) Calcule a carga total.

Soluções:

a) $C_T = C_1 + C_2 + C_3 = 800 \mu\text{F} + 60 \mu\text{F} + 1200 \mu\text{F}$

$$= 2.060 \mu\text{F}$$

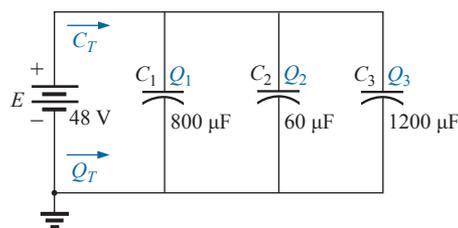


Figura 10.69 Exemplo 10.16.

- b) $Q_1 = C_1 E = (800 \times 10^{-6} \text{ F})(48 \text{ V}) = \mathbf{38,4 \text{ mC}}$;
 $Q_2 = C_2 E = (60 \times 10^{-6} \text{ F})(48 \text{ V}) = \mathbf{2,88 \text{ mC}}$;
 $Q_3 = C_3 E = (1200 \times 10^{-6} \text{ F})(48 \text{ V}) = \mathbf{57,6 \text{ mC}}$
- c) $Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 38,4 \text{ mC} + 2,88 \text{ mC} + 57,6 \text{ mC}$
 $= \mathbf{98,88 \text{ mC}}$

EXEMPLO 10.17

Determine a tensão entre os terminais e a carga de cada capacitor do circuito da Figura 10.70.

Solução:

$$C'_T = C_2 + C_3 = 4 \mu\text{F} + 2 \mu\text{F} = 6 \mu\text{F}$$

$$C_T = \frac{C_1 C'_T}{C_1 + C'_T} = \frac{(3 \mu\text{F})(6 \mu\text{F})}{3 \mu + 6 \mu\text{F}} = 2 \mu\text{F}$$

$$Q_T = C_T E = (2 \times 10^{-6} \text{ F})(120 \text{ V}) = \mathbf{240 \mu\text{C}}$$

O circuito equivalente (veja a Figura 10.71) tem:

$$Q_T = Q_1 = Q'_T$$

e, portanto, $Q_1 = \mathbf{240 \mu\text{C}}$

e $V_1 = \frac{Q_1}{C_1} = \frac{240 \times 10^{-6} \text{ C}}{3 \times 10^{-6} \text{ F}} = \mathbf{80 \text{ V}}$

$$Q'_T = 240 \mu\text{C}$$

Portanto, $V'_T = \frac{Q'_T}{C'_T} = \frac{240 \times 10^{-6} \text{ C}}{6 \times 10^{-6} \text{ F}} = \mathbf{40 \text{ V}}$

e $Q_2 = C_2 V'_T = (4 \times 10^{-6} \text{ F})(40 \text{ V}) = \mathbf{160 \mu\text{C}}$
 $Q_3 = C_3 V'_T = (2 \times 10^{-6} \text{ F})(40 \text{ V}) = \mathbf{80 \mu\text{C}}$

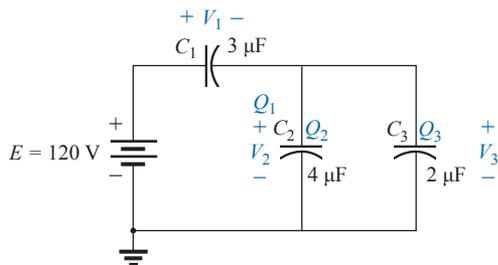


Figura 10.70 Exemplo 10.17.

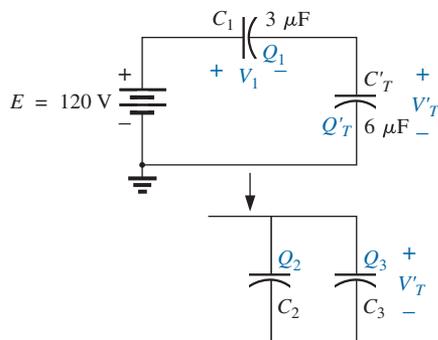


Figura 10.71 Circuito equivalente ao da Figura 10.70.

EXEMPLO 10.18

Determine a tensão entre os terminais e a carga do capacitor C_1 visto na Figura 10.72 após estar totalmente carregado.

Solução:

Conforme discutido anteriormente, o capacitor se comporta efetivamente como um circuito aberto em corrente contínua após estar totalmente carregado (veja a Figura 10.73). Portanto,

$$V_C = \frac{(8 \Omega)(24 \text{ V})}{4 \Omega + 8 \Omega} = \mathbf{16 \text{ V}}$$

$$Q_1 = C_1 V_C = (20 \times 10^{-6} \text{ F})(16 \text{ V}) = \mathbf{320 \mu\text{C}}$$

EXEMPLO 10.19

Determine as tensões entre os terminais e as cargas dos capacitores do circuito da Figura 10.74(a) após todos terem atingido o valor final de carga. Veja a Figura 10.74 (b). Temos:

Solução:

$$V_{C_2} = \frac{(7 \Omega)(72 \text{ V})}{7 \Omega + 2 \Omega} = \mathbf{56 \text{ V}}$$

$$V_{C_1} = \frac{(2 \Omega)(72 \text{ V})}{2 \Omega + 7 \Omega} = \mathbf{16 \text{ V}}$$

$$Q_1 = C_1 V_{C_1} = (2 \times 10^{-6} \text{ F})(16 \text{ V}) = \mathbf{32 \mu\text{C}}$$

$$Q_2 = C_2 V_{C_2} = (3 \times 10^{-6} \text{ F})(56 \text{ V}) = \mathbf{168 \mu\text{C}}$$

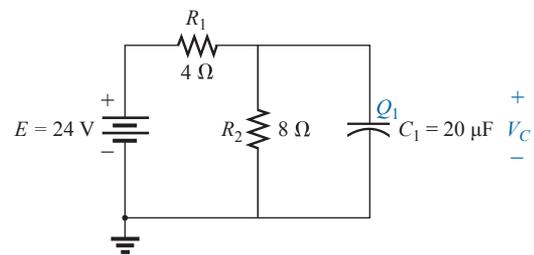


Figura 10.72 Exemplo 10.18.

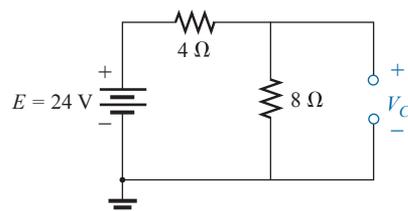


Figura 10.73 Determinação do valor final (estado estacionário) de v_C .

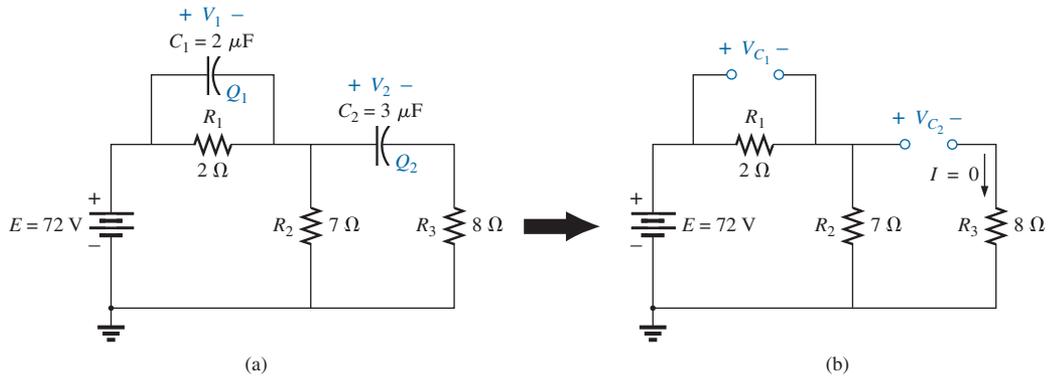


Figura 10.74 Exemplo 10.19.

10.12 ENERGIA ARMAZENADA EM UM CAPACITOR

O capacitor ideal não dissipa a energia que lhe é fornecida, mas a armazena na forma de campo elétrico entre as superfícies condutoras. A Figura 10.75 mostra a variação de tensão, corrente e potência com o tempo associadas a um capacitor durante a fase de carga. A curva da potência pode ser obtida para cada instante calculando o produto da tensão pela corrente nesse mesmo instante. A energia armazenada no capacitor está representada pela região sombreada abaixo da curva da potência. Usando cálculo integral, podemos determinar a área sob a curva. O resultado é o seguinte:

$$W_C = \frac{1}{2} CE^2$$

Em geral:
$$W_C = \frac{1}{2} CV^2 \tag{10.34}$$

onde V é a tensão entre os terminais do capacitor no estado estacionário. Em termos de Q e C ,

$$W_C = \frac{1}{2} C \left(\frac{Q}{C} \right)^2$$

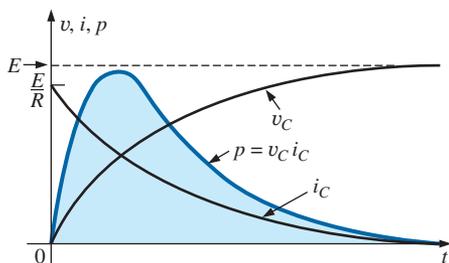


Figura 10.75 Gráfico da potência fornecida a um elemento capacitivo durante a fase transitória.

ou

$$W_C = \frac{Q^2}{2C} \tag{10.35}$$

EXEMPLO 10.20

Para o circuito mostrado na Figura 10.74(a), determine a energia armazenada em cada capacitor.

Solução:

Para C_1 ,

$$\begin{aligned} W_C &= \frac{1}{2} CV^2 \\ &= \frac{1}{2} (2 \times 10^{-6} \text{ F})(16 \text{ V})^2 = (1 \times 10^{-6})(256) \\ &= \mathbf{256 \mu\text{J}} \end{aligned}$$

Para C_2 ,

$$\begin{aligned} W_C &= \frac{1}{2} CV^2 \\ &= \frac{1}{2} (3 \times 10^{-6} \text{ F})(56 \text{ V})^2 = (1,5 \times 10^{-6})(3136) \\ &= \mathbf{4704 \mu\text{J}} \end{aligned}$$

Devido ao termo quadrático, observe a diferença na energia armazenada em função de uma tensão maior.

10.13 CAPACITÂNCIAS PARASITAS

Além dos capacitores discutidos até agora neste capítulo, existem as **capacitâncias parasitas** resultantes da existência de duas superfícies condutoras relativamente próximas. Dois fios condutores no mesmo circuito apresentam um efeito capacitivo, como mostra a Figura 10.76(a). Nos circuitos eletrônicos, existem capacitâncias entre as superfícies de condução de um transistor, como ilustra a Figura 10.76(b). No Capítulo 11, discutiremos

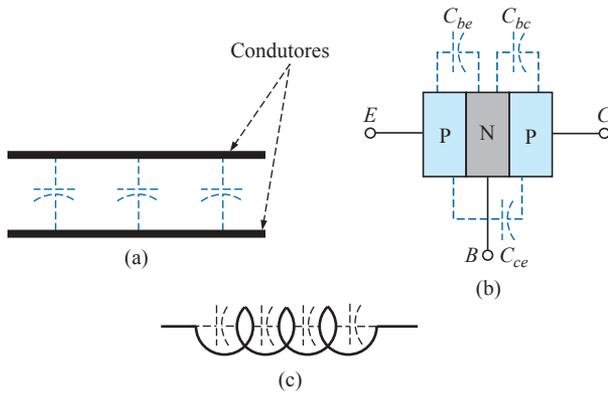


Figura 10.76 Exemplos de capacitâncias parasitas.

outro componente denominado *indutor*, que apresenta efeitos capacitivos entre suas espirais (veja a Figura 10.76(c)). As capacitâncias parasitas podem causar sérios problemas se não forem consideradas cuidadosamente no projeto do circuito.

10.14 APLICAÇÕES

Essa seção inclui uma descrição do funcionamento de *touchpads* e de uma das câmeras descartáveis mais baratas e populares que há hoje em dia, assim como uma discussão do uso de capacitores em filtros de linha (protetores de surto de tensão) que são utilizados na maioria das residências e nas empresas. Outros exemplos do uso de capacitores aparecem no Capítulo 11.



Figura 10.77 Touchpad de um laptop.

Touchpad

O *touchpad* no computador da Figura 10.77 é usado para controlar a posição do ponteiro na tela do computador, fornecendo um elo entre a posição de um dedo no *touchpad* com uma posição na tela. Há duas abordagens gerais para fornecer essa ligação: **sensibilidade de capacitância** e **sensibilidade de condutância**. A sensibilidade de capacitância depende da carga carregada pelo corpo humano, enquanto a sensibilidade de condutância exige somente que uma pressão seja aplicada a uma posição em particular no *touchpad*. Em outras palavras, o uso de luvas ou um lápis não funcionará com a sensibilidade de capacitância, mas é efetivo com a sensibilidade de condutância.

Há dois métodos comumente empregados para o teste de capacitância. Um é chamado de **método de matriz**, e o outro é chamado de **método de derivação capacitiva**. O método de matriz exige dois conjuntos de condutores em paralelo separados por um dielétrico que sejam perpendiculares um ao outro, como mostra a Figura 10.78. Dois conjuntos de fios perpendiculares são necessários para permitir a determinação da localização do ponto no plano bidimensional, um para o deslocamento horizontal e

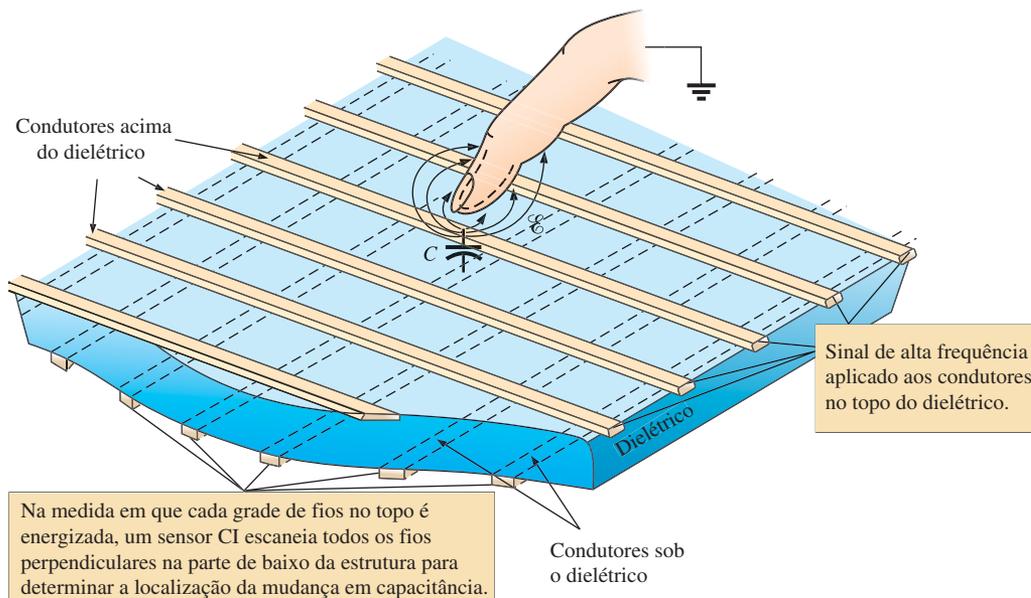


Figura 10.78 Método da matriz para sensibilidade capacitiva em um *touchpad*.

o outro para o deslocamento vertical. O resultado, quando olhamos para o *touchpad*, é uma grade bidimensional com pontos de interseção ou nós. Sua operação exige a aplicação de um sinal de alta frequência que permitirá o monitoramento da capacitância entre cada conjunto de fios em cada interseção, como mostra a Figura 10.78, que usa CIs conectados a cada conjunto de fios. Quando um dedo se aproxima de uma interseção em particular, a carga no dedo mudará a distribuição do campo naquele ponto, atraindo algumas das linhas de campo para longe da interseção. Alguns gostam de pensar que o dedo aplica um **terra virtual** no ponto, como mostra a figura. Lembre-se da discussão na Seção 10.3: qualquer mudança na intensidade do campo elétrico para um capacitor fixo (como a inserção de um dielétrico entre as placas de um capacitor) mudará a carga nas placas e o nível de capacitância determinado por $C = Q/V$. A mudança na capacitância na interseção será notada pelos CIs. Essa mudança na capacitância pode então ser traduzida por um **conversor de capacitância para digital (CDC — capacitance to digital converter)** e usada para definir a localização na tela. Experimentos recentes descobriram que esse tipo de sensibilidade é mais eficiente com um toque suave e delicado no *touchpad* em vez de uma pressão dura e firme.

O método de derivação capacitiva assume uma abordagem totalmente diferente. Em vez de estabelecer uma grade, um sensor é usado para detectar mudanças nos níveis capacitivos. A construção básica de um dispositivo analógico aparece na Figura 10.79. O sensor tem um transmissor e um receptor, ambos construídos em plataformas de placas de circuitos impressas (PCI) separadas por uma cobertura plástica sobre o transmissor para evitar o contato com o dedo. Quando o sinal de excitação de 250 kHz é aplicado à plataforma do transmissor, um campo elétrico é estabelecido entre o transmissor e o receptor, com um forte efeito de borda sobre a superfície do sensor. Se um dedo, com sua carga negativa, for trazido para perto da

superfície do transmissor, ele distorcerá o efeito de borda ao atrair parte do campo elétrico, como mostra a figura. A mudança resultante na força total do campo afetará o nível de carga nas placas do sensor e, portanto, a capacitância entre o transmissor e o receptor. Isso será detectado pelo sensor e fornecerá a posição vertical ou horizontal do contato. A mudança resultante ocorre apenas na ordem dos femtofarads, em comparação com os picofarads para o sensor, mas mesmo assim é o suficiente para ser detectado pelo sensor. A mudança em capacitância é detectada por um conversor capacitor para digital de 16 bits Σ - Δ , e os resultados são enviados ao controlador, e dele para o sistema ao qual o sensor está conectado. O termo *derivação* vem do fato de que parte do campo elétrico é ‘derivada’ para longe do sensor. Os próprios sensores podem ser feitos de muitos formatos e tamanhos diferentes. Para aplicações como o botão circular de um elevador, o padrão circular da Figura 10.80(a) pode ser aplicado, enquanto para um controle de deslizamento, ele pode aparecer como mostra a Figura 10.80(b). Em cada caso, a excitação é aplicada às linhas vermelhas e às regiões, e o nível de capacitância medido pelas linhas C_{IN} e regiões. Em outras palavras, um campo é estabelecido entre as linhas em todo padrão, e tocar os *pads* em qualquer área revelará uma mudança em capacitância. Para um *touchpad* de computador, o número de entradas C_{IN} exigidas é uma por linha e uma por coluna para fornecer a localização em um espaço bidimensional.

O último método a ser descrito é o método de sensibilidade de condutância. Basicamente, ele emprega duas superfícies condutoras metálicas finas separadas por um espaço bem fino. A superfície de cima é normalmente flexível, enquanto a de baixo é fixa e revestida com uma camada de pequenos bicos condutivos. Quando a superfície de cima é tocada, ela toca um bico da superfície de baixo, fazendo com que a condutância entre as duas superfícies aumente dramaticamente naquele local. Essa mudança em condutância é então detectada pelos CIs em

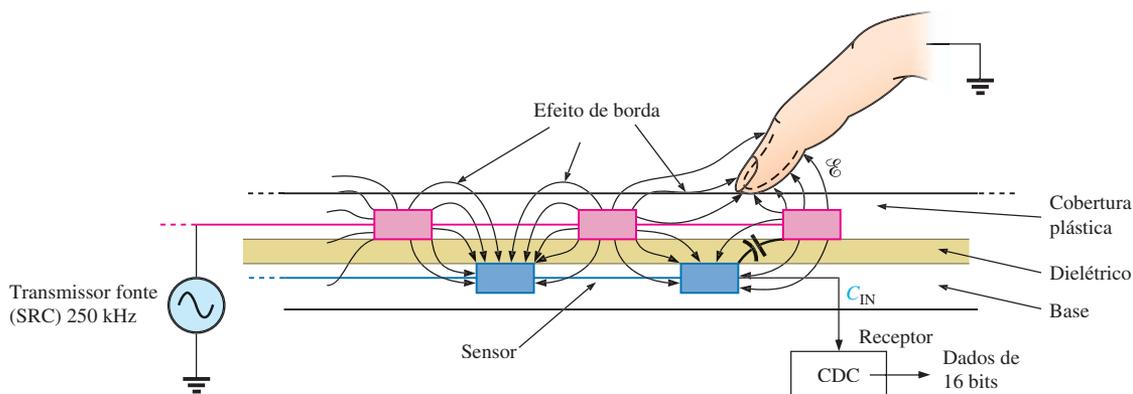


Figura 10.79 Método de derivação capacitiva.

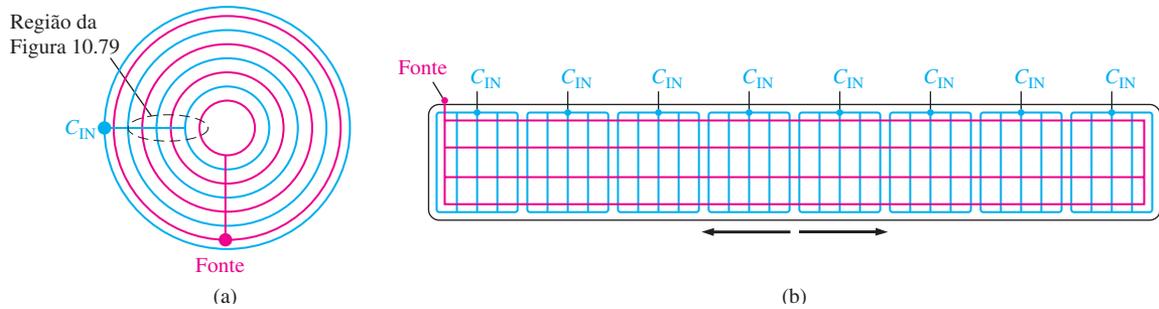


Figura 10.80 Sensores de derivação capacitiva: (a) parte de baixo, (b) fatia.

cada lado da grade, e a localização é determinada para uso no estabelecimento da posição na tela do computador. Esse tipo de *mousepad* permite o uso de uma caneta, lápis ou outro instrumento não condutivo para estabelecer a localização na tela, o que é útil em situações nas quais você talvez tenha de usar luvas continuamente ou precise usar dispositivos de indicação não condutivos devido a questões ambientais.

Lâmpada de flash

O circuito básico de acionamento do flash de uma câmera popular de baixo custo vista na Figura 10.81 é mostrado na Figura 10.82, e a aparência física do circuito aparece na Figura 10.83. As denominações mostradas nessa figura identificam as partes principais do projeto e alguns componentes individuais. Os principais componentes do circuito eletrônico incluem um capacitor eletrolítico polarizado de 160 $\mu\text{F}/330\text{ V}$ que armazena a carga necessária para a lâmpada do flash, uma lâmpada de flash que gera a luminosidade necessária, uma bateria CC de 1,5 V, um circuito chopper para gerar uma tensão CC acima de 300 V e um circuito de disparo para estabelecer alguns milhares de volts durante um curto período de tempo para acionar a lâmpada do flash. Existe um capacitor de 22 nF



Figura 10.81 Câmera fotográfica com flash: aparência externa.

no circuito de disparo, como mostram as figuras 10.82 e 10.83, e um terceiro capacitor de 470 pF no oscilador de alta frequência do circuito chopper. Observe, em particular, que o tamanho de cada capacitor está diretamente relacionado ao valor de sua capacitância. Certamente, há interesse em saber como uma única fonte de energia de apenas 1,5 V CC pode ser convertida em uma fonte de alguns milhares de volts (mesmo que por um curto intervalo de tempo) para disparar a lâmpada do flash. Na realidade, essa pequena e simples bateria tem potência suficiente para girar todo o filme na câmera. Tenha sempre em mente que a energia está relacionada à potência e ao tempo por $W = Pt = (VI)t$. Ou seja, um alto valor de tensão pode ser gerado por um valor definido de energia contanto que os parâmetros I e t sejam suficientemente pequenos.

Quando usar a câmera pela primeira vez, é necessário acionar diretamente o botão do flash, na parte frontal da câmera, e aguardar até que a lâmpada indicadora de flash acenda. Assim que o botão do flash é acionado, toda a tensão de 1,5 V da bateria CC é aplicada ao circuito eletrônico (uma variedade de circuitos podem realizar a mesma função) que gera uma onda alternada de frequência muito alta (com alta velocidade de repetição), como mostra a Figura 10.83. O transformador de alta frequência, então, elevará significativamente o valor da tensão gerada passando a um sistema de retificação de meia onda (apresentado em capítulos anteriores), resultando em uma tensão CC de aproximadamente 300 V que carrega o capacitor de 160 μF (conforme determina a equação $Q = CV$). Uma vez que o capacitor atingiu essa tensão, o terminal assinalado como ‘sensor’ na Figura 10.82 retorna uma informação para o oscilador, que é desligado até que a tensão CC de saída atinja um valor abaixo de um valor de limiar. Quando o capacitor estiver completamente carregado, a lâmpada neon, em paralelo com o capacitor, acenderá (identificada como ‘lâmpada indicadora de flash’) indicando que a câmera está pronta para ser usada. Todo o circuito, desde a bateria de 1,5 V até a tensão de 300 V, é denominado *conversor CC-CC*. A denominação *circuito chopper* (circuito ‘seg-

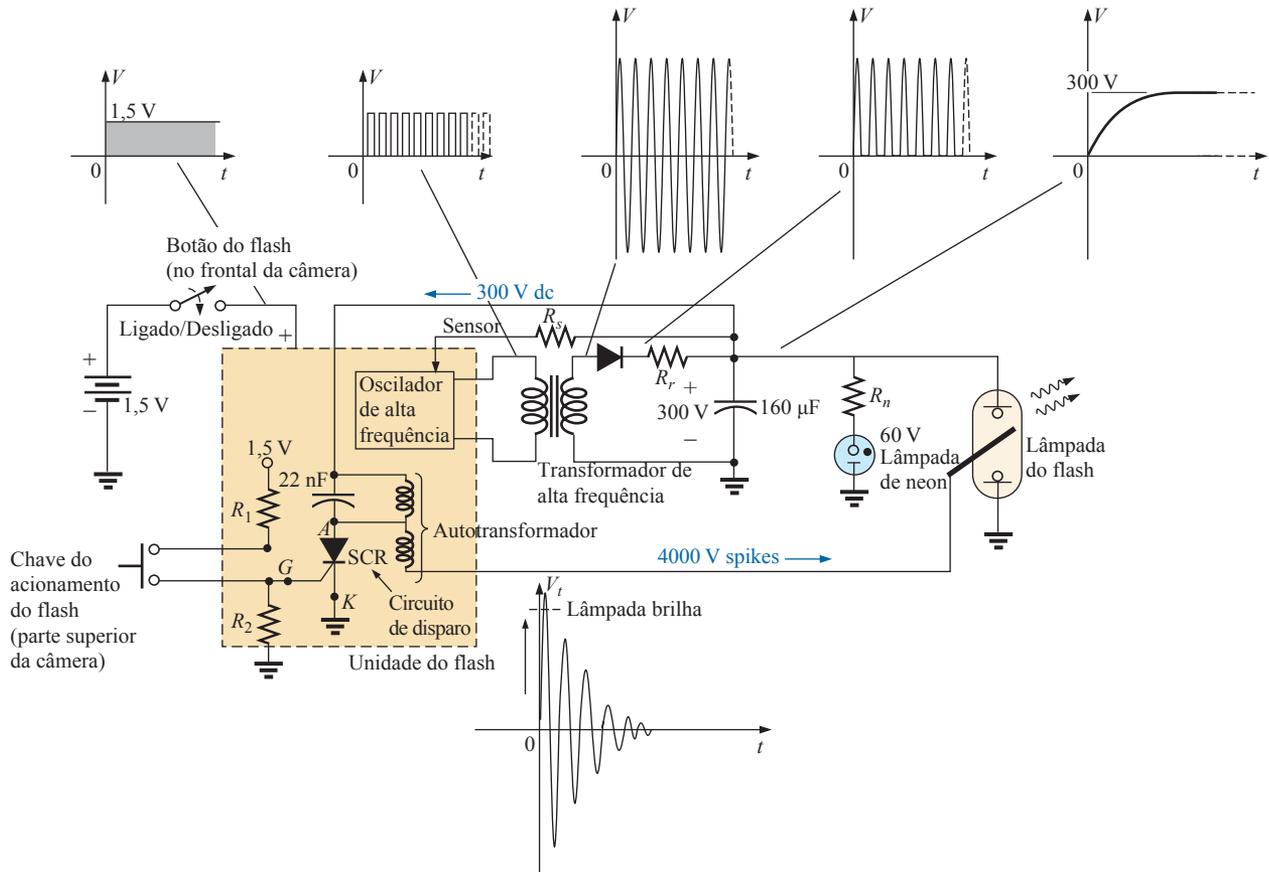


Figura 10.82 Flash de uma câmera fotográfica: circuito básico.

mentador’) vem do fato de que uma tensão CC de 1,5 V foi ‘segmentada’, passando a apresentar uma variação de valores em uma frequência muito alta de modo que o transformador possa desempenhar a sua função.

Embora a câmera possa usar uma lâmpada neon de 60 V, e estando essa em série com um resistor R_n , há necessidade de uma tensão de 300 V entre os terminais desse ramo antes que a lâmpada neon acenda. As lâmpadas neon são construídas simplesmente de bulbos de vidro que contêm gás neon, que resiste à condução, enquanto a tensão entre seus terminais não atinge um valor suficientemente alto. Ela não possui filamentos que aquecem como uma lâmpada incandescente, mas um meio gasoso. No caso de câmeras novas, a primeira operação de carga pode levar de 12 a 15 s. Outros ciclos subsequentes de carga podem levar de 7 a 8 s porque o capacitor ainda terá alguma carga residual em suas placas. Se a unidade do flash não for usada, a lâmpada neon drenará uma corrente de microampères a partir da fonte tensão CC de 300 V. À medida que a tensão entre os terminais da lâmpada neon cai, ela atinge um ponto em que se apaga. No caso da unidade mostrada na Figura 10.81, leva cerca de 15 minutos até que a lâmpada neon se apague. Uma vez apagada, a lâmpada neon não

mais drenará a carga do capacitor, e a tensão nos terminais do capacitor se manterá constante. Entretanto, o capacitor se descarregará em razão da própria corrente de fuga, e a tensão final cairá a valores muito baixos. O processo de descarga é muito rápido quando a unidade do flash é usada, fazendo com que a tensão entre os terminais do capacitor caia rapidamente ($V = Q/C$) e, por meio da conexão de realimentação do sinal do sensor, faz com que o oscilador seja ativado novamente e recarregue o capacitor. Você já deve ter notado que, quando se usa uma câmera desse tipo, uma vez que uma operação de carga tenha sido feita, não há necessidade de acionar o botão de carga entre as fotos; isso é feito automaticamente. Entretanto, se a câmera não for utilizada por um longo período de tempo, o botão de carga deve ser desligado novamente; mas pode-se notar que o tempo de carga será de apenas 3 ou 4 s devido à carga residual nas placas do capacitor.

A tensão de 300 V entre os terminais do capacitor é suficiente para acionar a lâmpada do flash. O circuito adicional, denominado *circuito de disparo*, tem de ser incorporado para gerar alguns milhares de volts necessários para disparar a lâmpada de flash. A alta tensão resultante é a razão pela qual existe um aviso de CUIDADO (CAU-

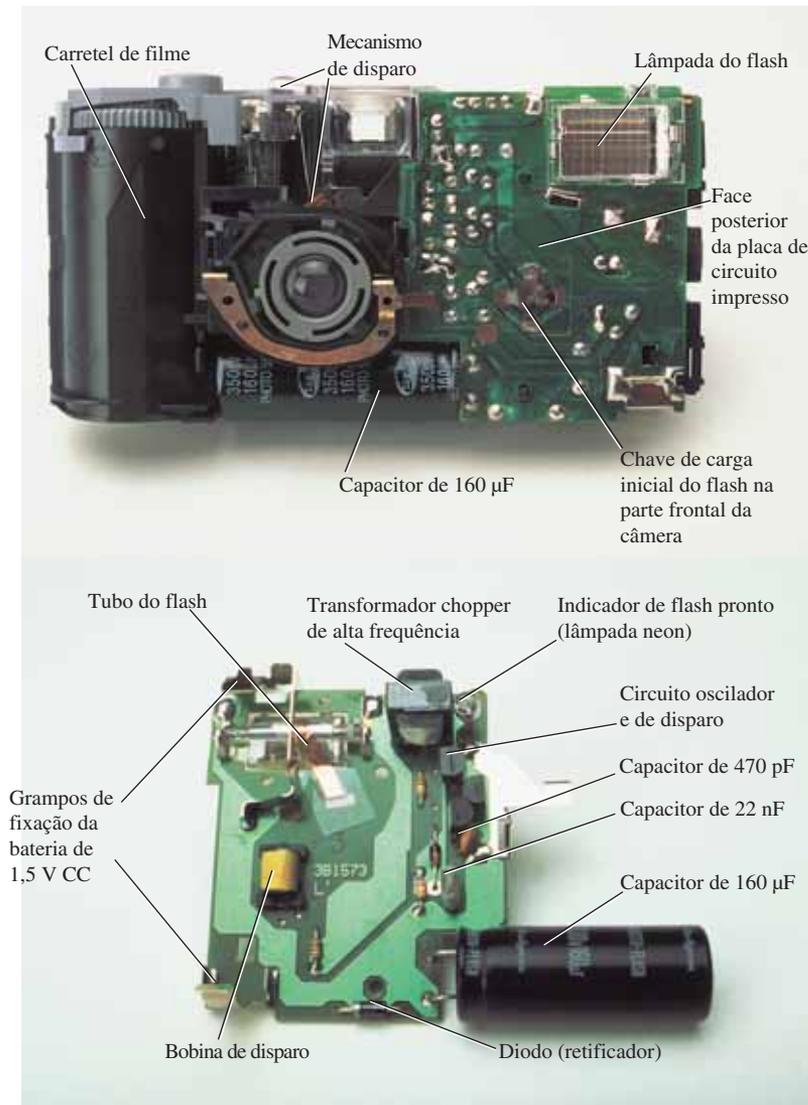


Figura 10.83 Flash de uma câmera fotográfica: construção interna.

TION) em todas as câmeras, que é relativo às tensões altas geradas internamente e à possibilidade de choque elétrico caso a câmera seja aberta.

Os milhares de volts necessários para disparar a lâmpada do flash requerem uma discussão que necessitaria apresentar elementos e conceitos que estão além do nível de abordagem deste livro. Entretanto, essa descrição depende desse fato, e deve ser abordada de maneira simples por se tratar de um primeiro contato com uma das interessantes possibilidades disponíveis de aplicação que envolve um grande número de componentes diferentes. Quando a chave do flash, na parte inferior esquerda da Figura 10.82, é fechada, estabelece uma conexão entre os resistores R_1 e R_2 . Por meio de um divisor de tensão, uma tensão CC aparece no terminal denominado ‘de porta’ (G — *gate*) do SCR (retificador controlado de silício — dispositivo

cujos estado de condução é controlado por uma tensão no terminal da porta). Essa tensão CC coloca o SCR no estado ligado (on) e estabelece um caminho de baixíssima resistência (semelhante a um curto-circuito) entre os seus terminais anodo (A) e catodo (K). Nesse ponto, o capacitor de disparo, que está conectado diretamente à tensão de 300 V, fica em paralelo com o capacitor, carregando rapidamente até uma tensão de 300 V, porque agora tem um caminho direto de baixa resistência para GND através do SCR. Uma vez alcançados os 300 V, a corrente de carga nessa parte do circuito cai para zero e o SCR ‘se abre’ (desliga) novamente, já que ele é um dispositivo que precisa de uma mínima corrente estacionária no circuito do anodo para mantê-lo ligado. Assim, o capacitor que está em paralelo com a bobina (agora sem conexão com GND através do SCR) com uma tensão de 300 V começa a se

descarregar rapidamente através da bobina, porque a única resistência no circuito que afeta a constante de tempo é a resistência da bobina em paralelo. Como consequência disso, ocorre uma rápida variação na corrente através da bobina, gerando uma alta tensão entre os terminais da bobina, cuja justificativa é apresentada no Capítulo 11.

Quando a tensão no capacitor cai para zero volt, a corrente através da bobina também será zero, mas um campo magnético intenso foi estabelecido em torno dela. Esse forte campo magnético diminuirá rapidamente, estabelecendo uma corrente no circuito em paralelo que o capacitor recarrega. Essa contínua troca de energia entre os dois componentes de armazenamento continua por um período de tempo, que depende da resistência do circuito. Quanto maior a resistência, menor o período de oscilação da tensão na saída. A ação de retorno da energia para o outro elemento é a base do efeito denominado *flyback*, usado frequentemente para gerar altas tensões CC tal como a que é necessária em aparelhos de TV. Na Figura 10.82, vemos que a bobina de disparo está conectada diretamente a uma segunda bobina, formando um autotransformador (um transformador com uma das extremidades das bobinas interconectadas). Por meio da ação do transformador, a alta tensão gerada entre os terminais da bobina de disparo é bastante aumentada, resultando em uma tensão de 4.000 V necessária para disparar a lâmpada de flash. Observe na Figura 10.83 que os 4.000 V são aplicados em uma malha que, na realidade, está na superfície do tubo de vidro da lâmpada de flash (não está conectado internamente ou em contato com os gases). Quando a tensão de disparo é aplicada, ela excita os gases na lâmpada, provocando uma corrente muito alta dentro dela durante um curto período de tempo, produzindo o brilho luminoso desejado. A corrente na lâmpada é fornecida pelo capacitor de 160 μF , em função da carga armazenada, que é consumida muito rapidamente. A tensão no capacitor cai muito rapidamente, a lâmpada do flash apaga e o processo de carga começa novamente. Se esse processo completo não ocorrer de forma rápida, a lâmpada pode se queimar após uma única utilização.

Filtro de linha (protetor contra surto)

Nos últimos anos, temos nos familiarizado com o filtro de linha como um dispositivo de segurança para nossos computadores, TVs, aparelhos de DVD e outros instrumentos sensíveis a surtos de tensão. Além da proteção dos equipamentos contra surtos inesperados de tensão e de corrente, as unidades de proteção de maior qualidade também filtram (removem) interferência eletromagnética (EMI — *electromagnetic interference*) e interferência de radiofrequência (RFI — *radio-frequency interference*). A interferência eletromagnética envolve qualquer distúrbio

indesejado na rede elétrica, estabelecido por qualquer combinação de efeitos eletromagnéticos, como os que são gerados por motores na rede elétrica, equipamentos de potência nos arredores emitindo sinais captados pela rede elétrica que funciona como uma antena, entre outros. A interferência de radiofrequência inclui todos os sinais no ar na faixa de áudio e em frequências além dessa que podem também ser captados pela rede elétrica interna ou externa à residência.

A unidade mostrada na Figura 10.84 tem todas as características de projeto esperadas de um bom filtro de linha. A Figura 10.84 mostra que esse modelo pode operar com uma potência drenada por seis tomadas e que ele é preparado para proteção de FAX/MODEM. Observe também que ele tem um LED (diodo emissor de luz), que mostra se existe uma falha na rede elétrica ou se ela está OK, e também um disjuntor para rearmar o sistema. Além disso, quando o protetor de surto atua, uma luz vermelha acende na chave liga/desliga.

O diagrama esquemático da Figura 10.85 não mostra todos os detalhes do projeto, porém, nele constam os principais componentes que aparecem na maioria dos bons filtros de linha. Primeiro, observe a foto na Figura 10.86 que mostra que as tomadas estão conectadas em paralelo, com uma barra de terra sendo usada para estabelecer uma conexão de terra para todas as tomadas. A placa de circuito foi virada para que os componentes fossem mostrados; dessa maneira serão necessários alguns ajustes para recolocar a placa no lugar. A linha 'viva' ou fio 'quente' está conectada diretamente ao disjuntor. O outro terminal do disjuntor está conectado ao outro lado da placa de circuito. Todos os discos grandes que se vê no circuito são capacitores de 2 nF (nem todos foram incluídos na Figura 10.86 com a finalidade de dar maior clareza ao desenho).



Figura 10.84 Filtro de linha: aparência externa.

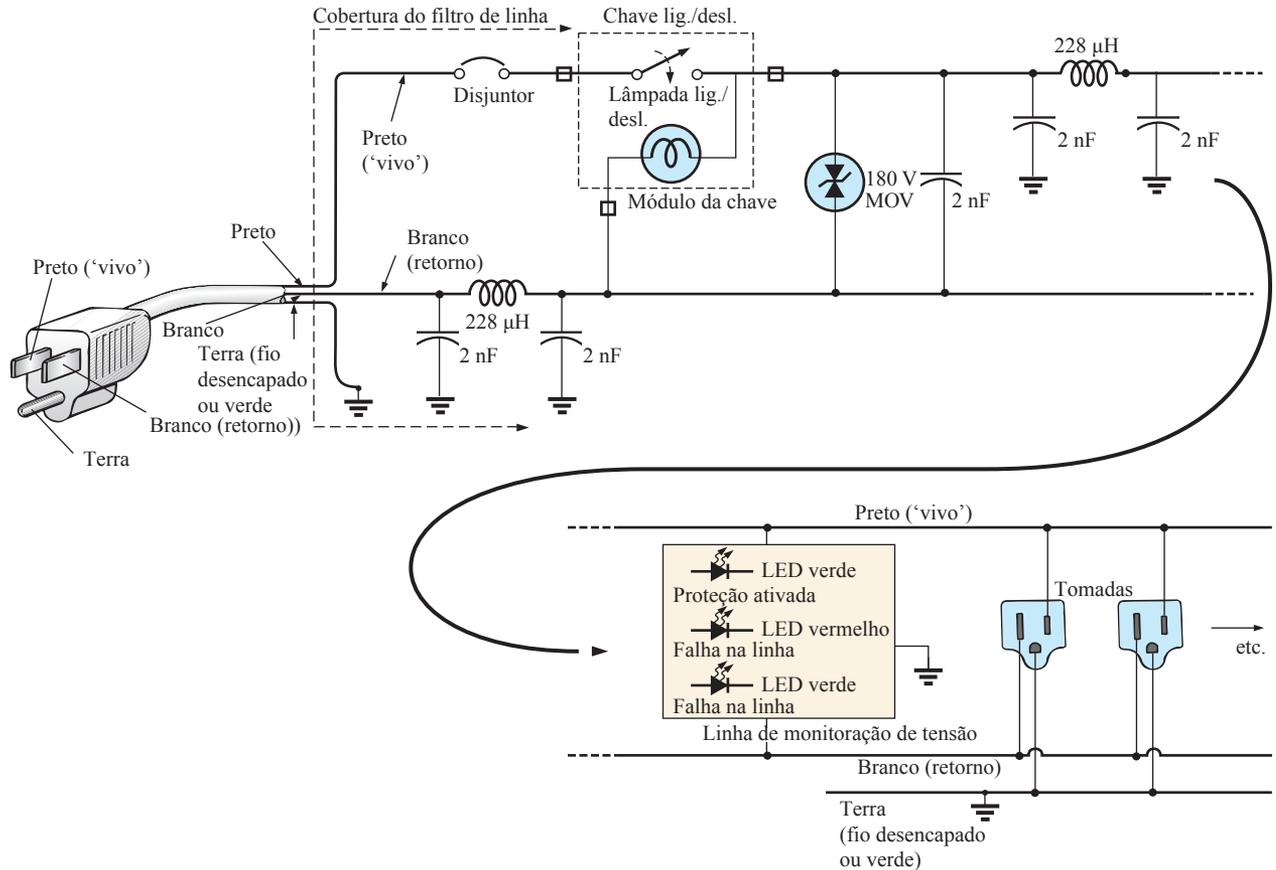


Figura 10.85 Filtro de linha: esquema elétrico.

Existem vários capacitores para desempenhar todas as funções necessárias. Por exemplo, existem capacitores da fase para o retorno (do fio de cima para o fio do meio), da fase para o terra (do fio de cima para o terra) e do retorno para o terra (do fio do meio para o terra). Cada um tem duas funções. A primeira função, e a mais óbvia, é evitar que qualquer *spike* de tensão, que pode vir da rede elétrica devido a efeitos externos como relâmpago, alcance o equipamento conectado na unidade. Lembre-se de que foi estudado neste capítulo que a tensão entre os terminais de um capacitor não muda rapidamente. Portanto, o capacitor evita que a tensão da fase para o neutro sofra uma alteração muito rápida, sendo que qualquer *spike* que vier pela linha encontrará um ponto que proporcionará uma queda de tensão. Dessa maneira, os aparelhos estarão bem protegidos contra surtos.

A segunda função requer algum conhecimento da reação dos capacitores a diferentes frequências, e será discutida mais detalhadamente nos capítulos posteriores. Por enquanto, é suficiente dizer que os capacitores apresentam impedâncias diferentes para frequências diferentes, e, por isso, evitam frequências indesejadas como as que estão associadas às interferências eletromagnéticas e de

radiofrequência, desde que afetem a operação de unidades conectadas ao filtro de linha. O capacitor de 1 µF, de formato retangular e próximo ao centro da placa, está conectado diretamente na rede elétrica para absorver a maior parte de um grande *spike* de tensão que vier pela rede elétrica. O seu tamanho maior deixa evidente que ele foi projetado para absorver o maior nível de energia que pode ocorrer com uma tensão maior — com uma corrente significativa por um período de tempo que pode exceder alguns milissegundos.

O dispositivo maior, na forma de um toroide no centro da placa de circuito, visto na Figura 10.86, tem duas bobinas (Capítulo 11) de 228 µH que aparecem na fase e no neutro vistos na Figura 10.85. Essas bobinas, assim como os capacitores, têm dupla finalidade: bloquear *spikes* de corrente que vêm pela rede elétrica e bloquear frequências relativas a interferências eletromagnéticas e de radiofrequência recebidas pelos sistemas conectados. No próximo capítulo, veremos que as bobinas funcionam como ‘choques’ para variações rápidas de corrente; ou seja, a corrente em uma bobina não pode sofrer variações instantâneas. Com o aumento das frequências, como as que estão associadas às interferências eletromagnéticas e

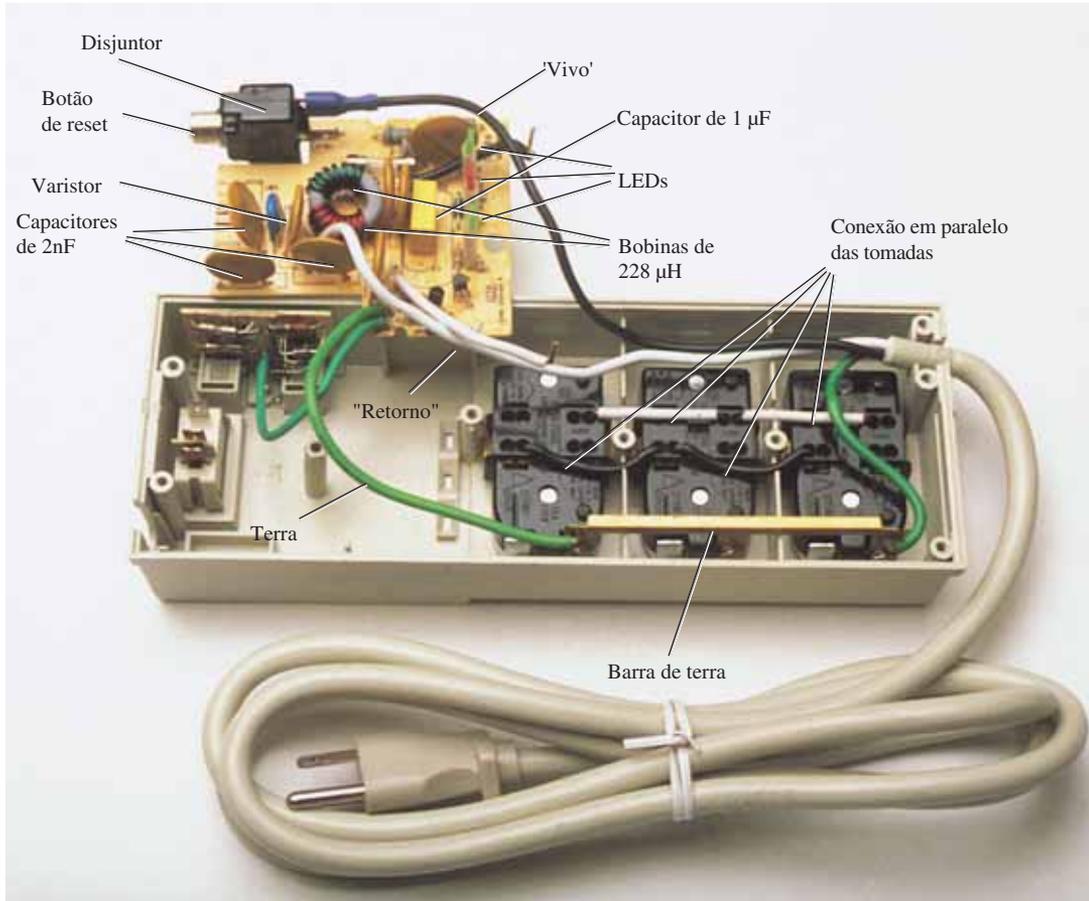


Figura 10.86 Filtro de linha: construção interna.

de radiofrequência, a reatância de uma bobina aumenta, absorvendo o sinal indesejado em vez de deixá-lo passar. O uso do choque tanto na fase quanto no neutro faz com que o circuito de filtragem esteja balanceado em relação ao terra. Em resumo, os capacitores, em um filtro de linha, têm o efeito de oferecer um *caminho secundário* para os distúrbios, enquanto os indutores os *bloqueiam*.

O componente no formato de um disco entre dois capacitores e próximo do disjuntor é um varistor (MOV — *metal-oxide varistor*), que é o coração da maioria dos filtros de linha. Ele é um dispositivo eletrônico cujas características variam em função da tensão aplicada entre seus terminais. Para uma faixa normal de tensão na rede elétrica, a resistência entre seus terminais é suficientemente grande, e ela pode ser considerada um circuito aberto, e a sua presença pode ser ignorada. Entretanto, se a tensão for muito grande, suas características mudarão de uma resistência de grande valor para uma de pequeno valor que, essencialmente, pode ser considerada um curto-circuito. Essa variação da resistência com a tensão aplicada é a razão do nome *varistor*. Na América do Norte, em que a tensão da rede elétrica é 120 V, os varistores são de 180

V ou mais. A razão da diferença de 60 V é que o valor de 120 V é um valor eficaz a níveis de tensão CC, enquanto a forma de onda para uma tensão de qualquer tomada de 120 V tem um valor de pico de cerca de 170 V. Esse é mais um parâmetro importante que será abordado no Capítulo 13.

Olhando o símbolo do varistor, mostrado na Figura 10.86, pode-se ver que ele tem uma seta em cada sentido, mostrando que o varistor é bidirecional e que bloqueará tensões com qualquer uma das polaridades. Portanto, em geral, em condições normais de operação, a presença do varistor pode ser ignorada; mas, se um grande *spike* de tensão vier pela rede elétrica, e se ele exceder a especificação do varistor, ele atuará como um curto entre os condutores da rede elétrica, protegendo os circuitos conectados. Isso representa um avanço mais significativo do que simplesmente colocar um fusível na rede elétrica porque, sendo o varistor sensível à tensão, ele pode reagir de maneira muito mais rápida que um fusível, além de apresentar suas características de baixa resistência por apenas um curto período de tempo. Quando termina o *spike*, o varistor retorna à sua característica normal de circuito aberto. Caso deseje saber para onde o *spike* vai, já que a carga é

protegida por um curto-circuito, lembre-se de que todas as fontes de distúrbios, como relâmpagos, geradores, motores indutivos (como os de condicionadores de ar, máquinas de lavar louças, máquina de serrar, entre outros) têm a sua própria ‘resistência de fonte’, e sempre há uma resistência ao longo da rede elétrica para absorver o distúrbio.

A maioria dos filtros de linha, como parte de sua propaganda, gosta de mencionar os seus níveis de absorção de energia. A especificação da unidade vista na Figura 10.84 é 1.200 J, que é na realidade uma das maiores. Lembrando que na discussão anterior sobre câmeras vimos que $W = Pt = EIt$, agora percebemos que se um *spike* de 5.000 V vier pela rede elétrica, estaremos deixando com o produto $It = W/E = 1.200 \text{ J}/5.000 \text{ V} = 240 \text{ mAs}$. Considerando uma relação linear entre todas as quantidades, o nível de energia especificado mostra que uma corrente de 100 A poderia ser mantida por $t = 240 \text{ mAs}/100 \text{ A} = 2,4 \mu\text{s}$, uma corrente de 1.000 A por $240 \mu\text{s}$ e uma corrente de 10.000 A por $24 \mu\text{s}$. Obviamente, quanto maior produto de E por I (potência), menor o valor para o tempo.

As especificações técnicas da unidade mostrada na Figura 10.84 incluem um tempo de resposta instantâneo na ordem dos picossegundos, com uma proteção para a linha telefônica de 5 ns. Essa unidade está especificada para dissipar surtos de até 6.000 V e *spikes* de corrente de 96.000 A. Ela tem uma alta relação de supressão de ruídos (80 dB; veja o Capítulo 21) em frequências de 50 kHz a 1000 MHz e uma garantia de tempo de vida (um crédito para o fabricante).

10.15 ANÁLISE COMPUTACIONAL

PSpice

Resposta RC a transitórios. Com o uso do PSpice, investigaremos a resposta aos transitórios de tensão nos terminais do capacitor no circuito mostrado na Figura 10.87. Em todos os exemplos deste livro que envolvem uma resposta a transitórios, aparece uma chave em série com a fonte como mostra a Figura 10.88(a). Quando usamos o PSpice, estabelecemos essa variação instantânea na tensão aplicando um sinal na forma de pulso como

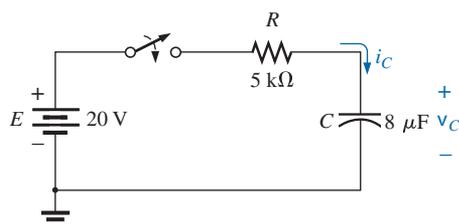


Figura 10.87 Circuito a ser analisado usando-se o PSpice.

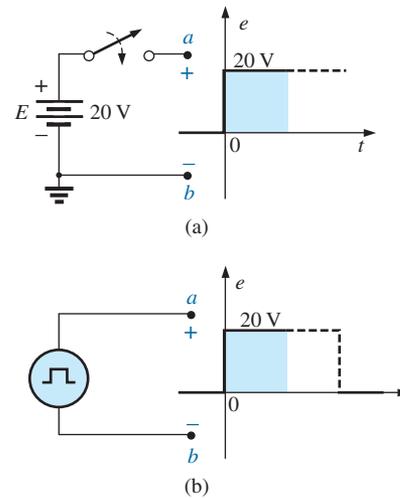


Figura 10.88 Estabelecimento de um nível de comutação de tensão CC: (a) combinação de uma chave com uma fonte de tensão CC em série; (b) opção de geração de um pulso usando-se o PSpice.

mostra a Figura 10.88(b), com uma largura de pulso (PW — *pulse width*) maior do que o período de interesse (5τ) para o circuito.

Uma fonte de pulso é obtida através da sequência: botão **Place part-Libraries-SOURCE-VPULSE-OK**. Uma vez inserida a fonte de pulso, o rótulo e todos os parâmetros podem ser ajustados com um duplo clique em cada um para obter a caixa de diálogo **Display Properties**. À medida que a lista de atributos for percorrido, serão vistos os seguintes parâmetros definidos pela Figura 10.89:

- V1** é o valor inicial.
- V2** é o nível do pulso.
- TD** é o atraso do pulso.
- TR** é o tempo de subida.
- TF** é o tempo de descida.
- PW** é a largura do pulso no nível V_2 .
- PER** é o período da forma de onda.

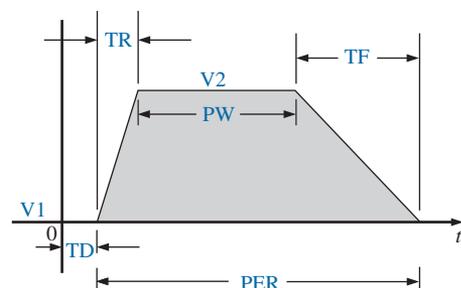


Figura 10.89 Definição dos parâmetros de VPULSE do PSpice.

Todos os parâmetros foram ajustados, como mostra o diagrama esquemático na Figura 10.90 para o circuito visto na Figura 10.87. Como um tempo de subida ou descida de 0 s é irreal do ponto de vista prático, foi escolhido 0,1 ms para cada um nesse exemplo. Além disso, como $\tau = RC = (5 \text{ k}\Omega) \times (8 \text{ }\mu\text{F}) = 20 \text{ ms}$ e $5\tau = 200 \text{ ms}$, foi selecionado um pulso com largura de 500 ms. O período foi escolhido como sendo o dobro da largura do pulso.

Vamos agora ao processo de simulação. Primeiro, acione o botão **New Simulation Profile** para obter a caixa de diálogo **New Simulation**, na qual o nome **PSpice 10-1** deve ser inserido em **Name** e, ao ativar **Create**, a caixa de diálogo será fechada. Como resultado, será aberta a caixa de diálogo **Simulation Settings-PSpice 10-1** e, na aba **Analysis**, a opção **Time Domain (Transient)** deve ser escolhida em **Analysis type**. O parâmetro **Run to time** deve ser ajustado em 200 ms, de modo que o gráfico seja traçado apenas para as primeiras cinco constantes de tempo. A opção **Start saving data after** deve ser 0 s para garantir que os dados sejam coletados imediatamente. O parâmetro **Maximum step size** deve ser 1 ms para fornecer pontos de dados suficientes para obter um bom gráfico. Clique em **OK** e estaremos prontos para ativar o botão **Run PSpice**. Como resultado, teremos um gráfico sem a curva plotada (visto não ter sido definida ainda) e um eixo x que se estende de 0 a 200 ms conforme definido anteriormente. Se o gráfico não aparecer, selecione a **Probe Window** em **Simulation Settings** para assegurar que **Display Probe Window** (com a opção **after simulation has completed**

selecionada) esteja marcada, e **Run-PSpice** novamente. Se os problemas persistirem e as mensagens de aviso não aparecerem, feche a tela selecionando o **X** no canto superior à direita e responda com um **No** para o pedido de **Save Files in Project**. Os gráficos devem aparecer então. Finalmente, se todo o resto parecer ineficiente, tente selecionar **View Simulation Results** antes da sequência **PSpice-Run**. A resposta será uma caixa de diálogo **PSpice**, indicando que a simulação não foi aplicada e os dados não estão disponíveis. Responda com um **Yes** para realizar a simulação, e o gráfico deve aparecer. Para obter uma curva referente à tensão entre os terminais do capacitor em função do tempo, siga a seguinte sequência: botão **Add Traces**-caixa de diálogo **Add Traces-V1(C)-OK**, e teremos como resultado a curva que é vista na Figura 10.91. A cor e a espessura da curva e dos eixos podem ser alteradas colocando o cursor sobre a curva e clicando com o botão direito do mouse. Aparecerá uma lista na qual deve se escolher **Properties**; em seguida, uma caixa de diálogo **Trace Properties** aparecerá, na qual a cor e a espessura da linha podem ser alteradas. Como o gráfico tem um fundo preto, um melhor contraste e uma melhor impressão são obtidos quando se seleciona o amarelo (*yellow*) e quando a linha tem a espessura vista na Figura 10.91. Em seguida, o cursor pode ser colocado sobre o eixo, e outro clique com o botão direito do mouse lhe permitirá escolher a cor amarela e uma espessura adequada para impressão. Para que se possa fazer uma comparação, parece ser apropriado plotar também o sinal em forma de pulso. Isso pode ser

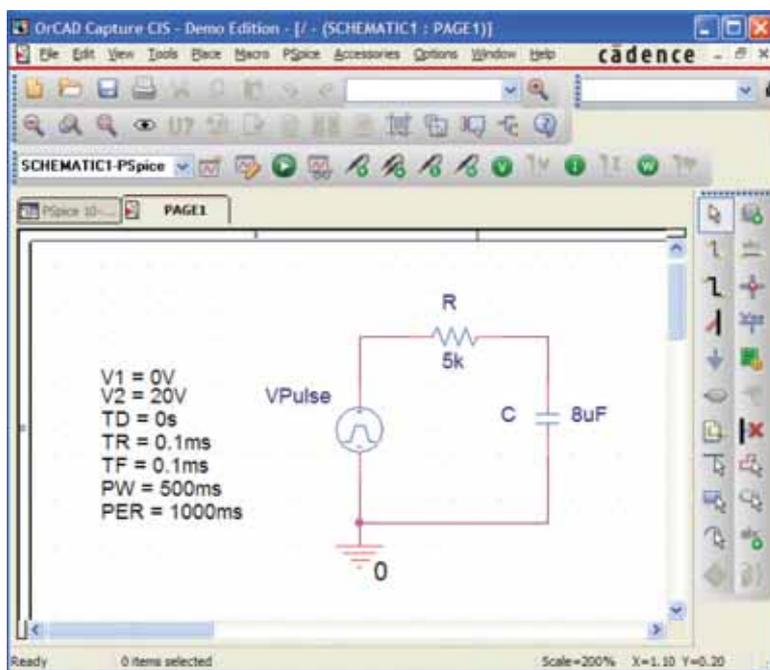


Figura 10.90 Uso do PSpice para investigar a resposta transitória de tensão no circuito R-C em série visto na Figura 10.87.

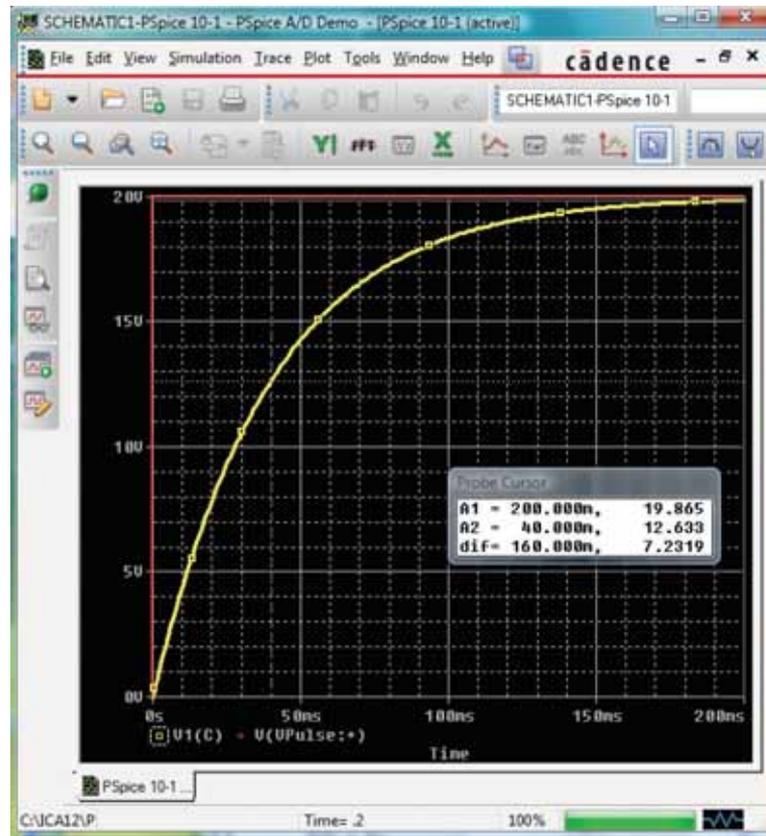


Figura 10.91 Resposta ao transitório de tensão entre os terminais do capacitor mostrado na Figura 10.87 ao se usar VPulse.

feito voltando a **Trace** e selecionando **Add Trace**, seguido por **V(Vpulse:+) e OK**. Agora, as duas formas de onda aparecem na mesma tela, como mostra a Figura 10.93. Nesse caso, a linha tem uma tonalidade avermelhada, de maneira que ela possa ser diferenciada do eixo e da outra linha. Note que o pulso segue o eixo da esquerda até a extremidade superior, e segue a linha de 20 V na tela.

Se você deseja saber o valor de um ponto de uma das curvas em qualquer instante, deve ativar o botão **Toggle cursor**. Então, clique em **VI(C)** na parte inferior esquerda da tela. Aparecerá uma caixa em torno de **VI(C)** que mostrará um espaçamento entre os pontos do cursor na tela. Isso é importante quando for usado mais de um cursor. Movendo o cursor para 200 ms, veremos que o valor (**A1**) é 19,865 V (na caixa de diálogo **Probe Cursor**), evidentemente, mostrando o quão próximo está do valor final, que é 20 V. Um segundo cursor pode ser colocado na tela usando o botão direito do mouse e, em seguida, clicando o mesmo **VI(C)** na parte inferior da tela. A caixa em torno de **VI(C)** não pode mostrar duas caixas, mas o espaçamento e a espessura das linhas da caixa mudou definitivamente. Não há nenhuma caixa em torno do símbolo **Pulse**, já que ele não foi selecionado — embora ele possa ter sido selecionado por um ou outro cursor. Se

movermos agora o segundo cursor para uma constante de tempo de 40 ms, veremos que a tensão é de 12,659 V, como mostra a caixa de diálogo **Probe Cursor**. Isso confirma o fato de que a tensão deve ser 63,2 por cento do seu valor final (20 V) em uma constante de tempo ($0,632 \times 20 \text{ V} = 12,4 \text{ V}$). Duas curvas separadas foram obtidas por meio de **Plot Add Plot to Window** e em seguida usando-se a sequência *trace* novamente.

Corrente capacitiva média. Como um exercício sobre o uso de uma fonte de pulso e para verificar nossas análises referentes à corrente média em um circuito puramente capacitivo, a descrição a seguir verificará os resultados do Exemplo 10.14. No caso da forma de onda do pulso que vemos na Figura 10.64, os parâmetros da fonte de pulso aparecem na Figura 10.92. Note que o tempo de subida agora é 2 ms, começando em 0 s, e o tempo de descida é 6 ms. O período foi ajustado em 15 ms para permitir o monitoramento da corrente após o término do pulso.

A simulação é iniciada acionando primeiro o botão **New Simulation Profile** para obter a caixa de diálogo **New Simulation**, na qual deve-se digitar **AverageIC** em **Name**. Em seguida, escolha **Create** para obter a caixa de diálogo **Simulation Settings-AverageIC**. A aba **Analysis** deve ser

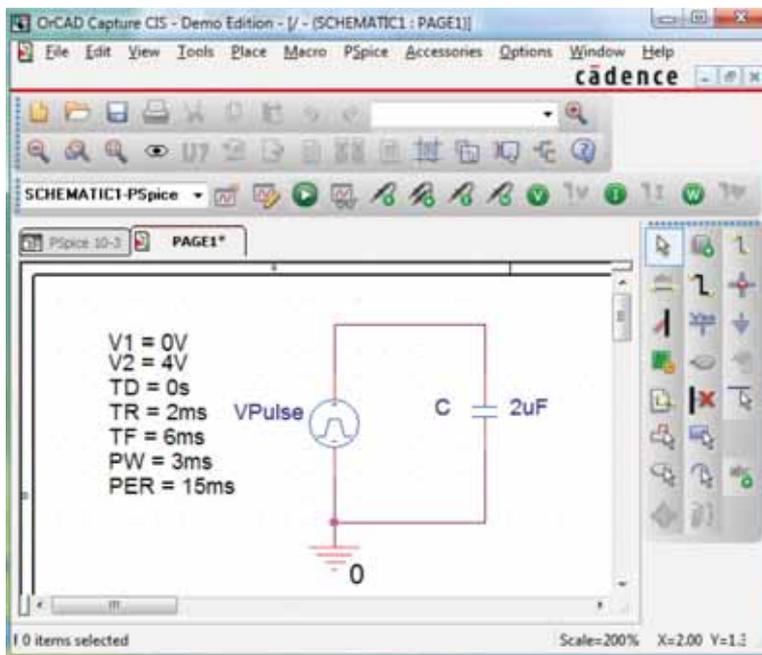


Figura 10.92 Uso do PSpice para verificar os resultados do Exemplo 10.14.

selecionada, e **Time Domain (transient)** na opção **Analysis type**. O parâmetro **Run to time** deve ser ajustado em 15 ms para cobrir o período de interesse, e o parâmetro **Start saving data after** é ajustado em 0 s para garantir que os pontos de dados comecem em 0 s. O parâmetro **Maximum step size** deve ser selecionado com o valor 15 ms/1.000 = 15 μ s para garantir 1.000 pontos de dados na curva.

Clique em **OK** e ative o botão **Run PSpice**. Uma janela aparecerá com uma escala horizontal compreendida entre 0 e 15 ms, conforme definido anteriormente. Em seguida, ative o botão **Add Trace**, e **I(C)** deve ser escolhido para aparecer abaixo de **Trace Expression**. Clique em **OK** e a curva de **I(C)** aparecerá na parte inferior da Figura 10.93. Deve-se notar nesse momento a forma de onda do pulso na

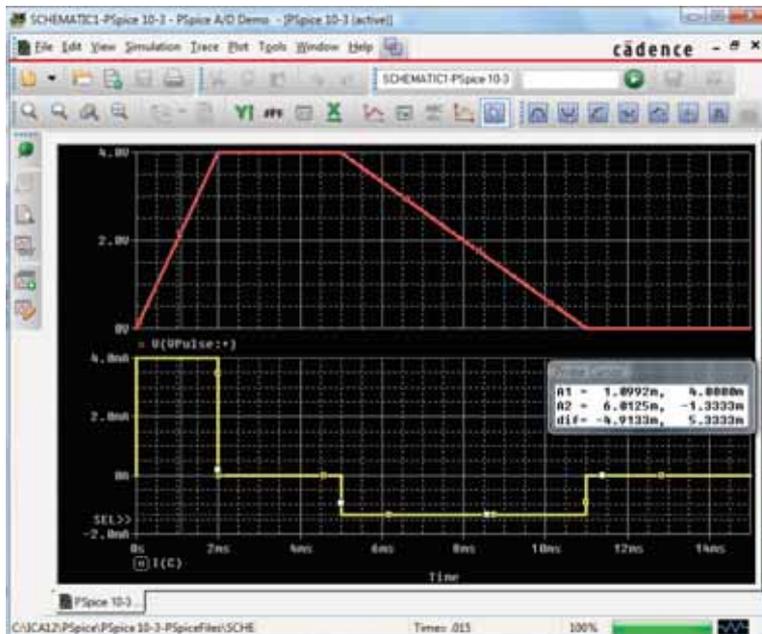


Figura 10.93 Aplicação de um pulso e a corrente resultante para o capacitor de 2 μ F visto na Figura 10.92.

mesma janela, mas como uma curva em separado. Portanto, continue com **Plot-Add Plot to Window-Trace-Add Trade- V(Vpulse: +)-OK**, e as duas curvas aparecerão como mostra a Figura 10.93.

Agora, os cursores podem ser usados para medir o valor da corrente média resultante. Primeiro, selecione a curva **I(C)** para mover a notação **SEL>>** para a curva de baixo. A **SEL>>** define qual curva para telas de múltiplas curvas está ativa. Em seguida, ative o botão **Toggle cursor** e clique com o botão esquerdo do mouse na curva **I(C)** para fazer surgir uma cruz no cursor. Ajuste o valor em 1 ms e o valor **A1** é mostrado como sendo 4 mA. Clique com

o botão direito do mouse na mesma curva e um segundo cursor aparecerá, podendo ser colocado em 6 ms obtendo como resposta $-1,33$ mA (**A2**), como esperado a partir do Exemplo 10.14. A representação gráfica para **I(C)** foi estabelecida com uma linha mais espessa clicando com o botão direito do mouse e escolhendo **Properties**. Você perceberá após usar a versão **DEMO** que ela informa que há um limite de nove arquivos que podem ser salvos sob a lista **File**. O resultado é que qualquer uso a mais da versão **DEMO** exige abrir um dos nove arquivos e deletar os conteúdos, se você quiser usar outro programa. Isto é, limpe a tela e insira o novo circuito.

PROBLEMAS

Seção 10.2 O campo elétrico

1. a) Determine a intensidade do campo elétrico em um ponto localizado a 1 m de uma carga de $4 \mu\text{C}$.
b) Determine a intensidade do campo elétrico em um ponto localizado a 1 mm [$1/1.000$ a distância da parte (a)] da mesma carga que a parte (a) e compare os resultados.
2. A intensidade de um campo elétrico é 72 newtons/Coulomb (N/C) em um ponto distante r metros de uma carga de $2 \mu\text{C}$. Determine a distância r .

Seções 10.3 e 10.4 Capacitância e capacitores

3. Determine a capacitância de um capacitor de placas paralelas se $1.200 \mu\text{C}$ de carga se acumulam em suas placas quando a tensão aplicada é de 24 V.
4. Qual é a carga que se acumula nas placas de um capacitor de $0,15 \mu\text{F}$ quando são aplicados 45 V entre seus terminais?
5. a) Determine a intensidade do campo elétrico entre as placas paralelas de um capacitor se são aplicadas 500 mV entre suas placas, que estão distantes 1 polegada uma da outra.
b) Repita a Parte (a) para uma distância de $1/100$ polegada.
c) Compare os resultados das partes (a) e (b). A diferença na intensidade do campo é significativa?
6. Um capacitor de placas paralelas de $6,8 \mu\text{F}$ possui $160 \mu\text{C}$ de carga em suas placas. Se a distância entre as placas é de 5 mm, determine a intensidade do campo elétrico entre elas.
7. Determine a capacitância de um capacitor de placas paralelas se a área de cada placa for $0,1 \text{ m}^2$ e a distância entre elas, $0,1$ polegada. O dielétrico é o ar.
8. Repita o Problema 7 supondo que o dielétrico seja papel parafinado.
9. Determine a distância em mils entre as placas de um capacitor de $2 \mu\text{F}$ se a área de cada placa for de $0,15 \text{ m}^2$ e o dielétrico for óleo de transformador.
10. A capacitância de um capacitor, cujo dielétrico é o ar, é 1.360 pF . Quando inserimos um novo dielétrico entre as placas, a capacitância aumenta para $6,8 \text{ nF}$. De que material é feito o dielétrico?
11. As placas de um capacitor de placas paralelas com um dielétrico de baquelite distam $0,2 \text{ mm}$ e possuem uma área de $0,08 \text{ m}^2$, sendo aplicados 200 V entre as placas.
a) Determine a capacitância.
b) Calcule a intensidade do campo elétrico entre as placas.
c) Determine a carga nas placas.
12. Um capacitor de ar de placas paralelas tem uma capacitância de $4,7 \mu\text{F}$. Determine a nova capacitância se:
a) A distância entre as placas é dobrada (sendo todo o resto o mesmo).
b) A área das placas é dobrada (sendo todo o resto o mesmo que para o nível $4,7 \mu\text{F}$).
c) Um dielétrico com uma permissividade relativa de 20 é inserido entre as placas (todo o resto permanece o mesmo para o nível $4,7 \mu\text{F}$).
d) Um dielétrico é inserido com uma permissividade relativa de 4, e a área é reduzida para $1/3$ e a distância para $1/4$ das suas dimensões originais.
- *13. Determine a tensão máxima que pode ser aplicada através de um capacitor de placas paralelas de 6.800 pF se a área de uma placa é $0,02 \text{ m}^2$ e o dielétrico é mica. Presuma uma relação linear entre a intensidade dielétrica e a espessura do dielétrico.
- *14. Determine a distância em micrometros entre as placas de um capacitor de mica de placas paralelas se a tensão máxima que pode ser aplicada no capacitor é 1.200 V . Presuma uma relação linear entre a força de ruptura e a espessura do dielétrico.
15. Um capacitor de $22 \mu\text{F}$ tem $-200 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ na temperatura ambiente de 20°C . Qual é a capacitância se a temperatura aumentar para 100°C , o ponto de ebulição da água?
16. Qual é a capacitância de um pequeno capacitor com uma especificação de 40 J ? Qual é a faixa de valores esperados como estabelecido pela tolerância?
17. Um capacitor de mica grande e plano tem uma especificação de 471 F . Qual é a capacitância e qual é a faixa de valores esperados garantidos pelo fabricante?
18. Um capacitor de cerâmica pequeno, plano e em forma de disco tem uma especificação de 182 K . Qual é o nível de capacitância assim e qual é a faixa esperada de valores?

SEÇÃO 10.5 Transitórios em circuitos capacitivos: fase de carga

19. Considerando o circuito da Figura 10.94, composto de valores-padrão:
 - a) Determine a constante de tempo do circuito.
 - b) Escreva a equação matemática para a tensão v_C depois que a chave é fechada.
 - c) Determine a tensão v_C depois de transcorrida uma, três e cinco constantes de tempo.
 - d) Escreva as equações para a corrente i_C e a tensão v_R .
 - e) Esboce as formas de onda de v_C e de i_C .
20. Repita o Problema 19 para $R = 1 \text{ M}\Omega$ e compare os resultados.
21. Considerando o circuito da Figura 10.95, composto de valores-padrão:
 - a) Determine a constante de tempo do circuito.
 - b) Escreva a equação matemática para a tensão v_C depois que a chave é fechada.
 - c) Determine v_C depois de uma, três e cinco constantes de tempo.
 - d) Escreva as equações para a corrente i_C e para a tensão v_{R_2} .
 - e) Esboce as formas de onda de v_C e i_C .
- *22. Considerando o circuito da Figura 10.96, composto de valores padrão:
 - a) Determine a constante de tempo do circuito.
 - b) Escreva a equação matemática para a tensão v_C depois que a chave é fechada.
 - c) Escreva a expressão matemática para a corrente i_C depois que a chave é fechada.
 - d) Esboce as formas de onda v_C e i_C .

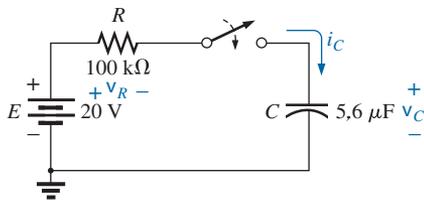


Figura 10.94 Problemas 19 e 20.

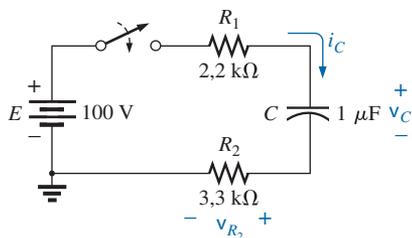


Figura 10.95 Problema 21

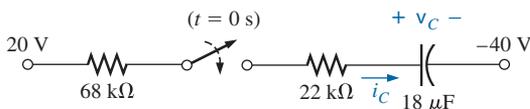


Figura 10.96 Problema 22.

23. Dada a tensão $v_C = 12 \text{ V}(1 - e^{-t/100 \mu\text{s}})$:
 - a) Qual é a constante de tempo?
 - b) Qual é a tensão em $t = 50 \mu\text{s}$?
 - c) Qual é a tensão em $t = 1 \text{ ms}$?
24. A tensão através de um capacitor de $10 \mu\text{F}$ em um circuito R - C em série é $v_C = 40 \text{ mV}(1 - e^{-t/20 \text{ ms}})$.
 - a) Na prática, quanto tempo é preciso passar para que a fase de carga seja encerrada?
 - b) Qual é a resistência do circuito?
 - c) Qual é a tensão em $t = 20 \text{ ms}$?
 - d) Qual é a tensão em 10 constantes de tempo?
 - e) Sob condições de estado estacionário, quanta carga há nas placas?
 - f) Se a resistência de fuga é $1.000 \text{ M}\Omega$, quanto tempo levará (em horas) para o capacitor descarregar se presumirmos que a taxa de descarga é constante através do período de descarga?

Seção 10.6 Transitórios em circuitos capacitivos: fase de descarga

25. Considerando o circuito R - C na Figura 10.97, composto de valores-padrão:
 - a) Determine a constante de tempo do circuito quando a chave é colocada na posição 1.
 - b) Determine a expressão matemática para a tensão entre os terminais do capacitor após a chave ter sido colocada na posição 1.
 - c) Determine a tensão v_C e a corrente i_C se a chave é colocada na posição 2 em $t = 1 \text{ s}$.
 - d) Determine a expressão matemática para a tensão v_C e a corrente i_C para a fase de descarga.
 - e) Trace as formas de onda de v_C e i_C para o intervalo de 0 até 2s de quando a chave foi colocada na posição 1.
26. Considerando o circuito da Figura 10.98, composto de valores-padrão:
 - a) Determine as expressões matemáticas para as tensões v_C e v_{R_1} e a corrente i_C depois que a chave for colocada na posição 1.
 - b) Determine as expressões matemáticas para a tensão v_C , v_{R_1} e i_C quando a chave é movida para a posição 2 em $t = 100 \text{ ms}$.
 - c) Escreva as expressões para as tensões v_C e v_{R_2} , e a corrente i_C se a chave é movida para a posição 3 em $t = 200 \text{ ms}$.
 - d) Trace as formas de onda de v_C , v_{R_2} e i_C para o período de tempo que vai de 0 a 300 ms.

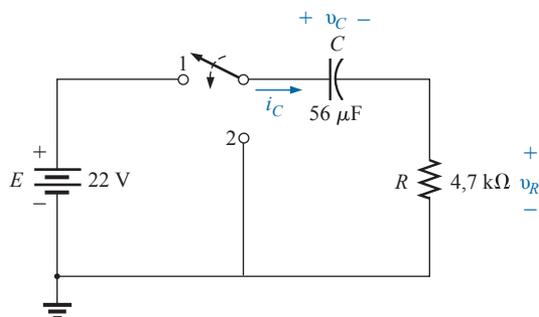


Figura 10.97 Problema 25.

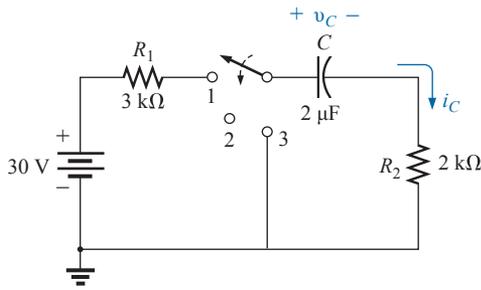


Figura 10.98 Problema 26.

- *27. Considerando o circuito na Figura 10.99, composto de valores-padrão:
- Determine as expressões matemáticas para a tensão v_C e a corrente i_C quando a chave é colocada na posição 1.
 - Determine as expressões matemáticas para a tensão v_C e a corrente i_C se a chave for colocada na posição 2 a um tempo igual a cinco constantes de tempo do circuito de carga.
 - Trace as formas de onda de v_C e i_C para um período de tempo que vá de 0 a 30 μ s.
 - Trace as formas de onda de v_R para o mesmo período que na parte (a).
28. O capacitor de 1.000 μ F na Figura 10.100 está carregado com 12 V em um automóvel. Para descarregar o capacitor antes de mais uso, um fio com uma resistência de 2 m Ω é colocado através do capacitor.
- Quanto tempo levará para descarregar o capacitor?
 - Qual o valor de pico da corrente?
 - Com base na resposta para a parte (b), uma faísca é esperada quando o contato for feito com ambas as extremidades do capacitor?

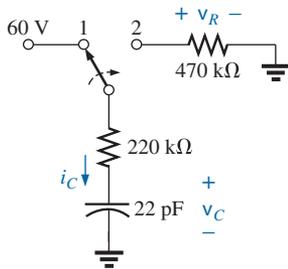


Figura 10.99 Problema 27.

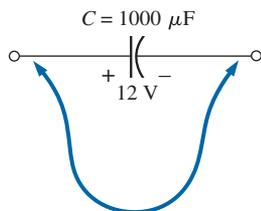


Figura 10.100 Problema 28.

Seção 10.7 Valores iniciais

29. O capacitor visto na Figura 10.101 está carregado inicialmente com 6 V, com a polaridade indicada.
- Encontre expressões matemáticas para a tensão v_C depois que a chave é fechada.
 - Escreva a expressão para a corrente i_C depois que a chave é fechada.
 - Trace os resultados das partes (a) e (b).
30. O capacitor na Figura 10.102 está inicialmente carregado com 40 V antes de a chave ser fechada. Escreva as expressões para as tensões v_C e v_R e a corrente i_C seguindo o fechamento da chave. Trace as formas de onda resultantes.
- *31. O capacitor na Figura 10.103 está inicialmente carregado com 10 V com a polaridade indicada. Escreva as expressões para a tensão v_C e a corrente i_C depois do fechamento da chave. Trace as formas de onda resultantes.
- *32. O capacitor na Figura 10.104 está inicialmente carregado com 8 V, com a polaridade mostrada.
- Determine as expressões matemáticas para a tensão v_C e a corrente i_C quando a chave é fechada.
 - Trace as formas de onda de v_C e i_C .

Seção 10.8 Valores instantâneos

33. Dada a expressão $v_C = 140 \text{ mV}(1 - e^{-t/2 \text{ ms}})$, resolva os itens a seguir.
- Determine v_C em $t = 1 \text{ ms}$.
 - Determine v_C em $t = 20 \text{ ms}$.
 - Calcule o tempo t para v_C para alcançar 100 mV.
 - Calcule o tempo t para v_C para alcançar 138 mV.

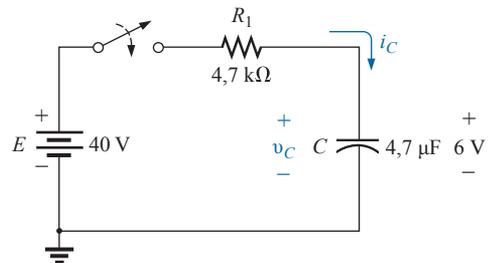


Figura 10.101 Problema 29.

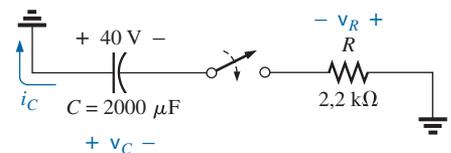


Figura 10.102 Problema 30.

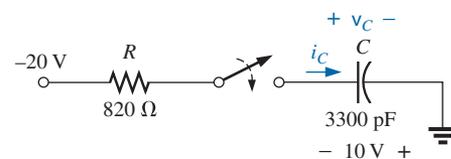


Figura 10.103 Problema 31.

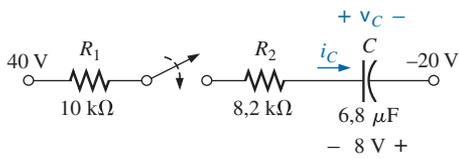


Figura 10.104 Problema 32.

34. Para o circuito do automóvel da Figura 10.105, V_L tem de ser 8 V antes de o sistema ser ativado. Se a chave é fechada em $t = 0$ s, quanto tempo levará para o sistema ser ativado?
- *35. Projete o circuito na Figura 10.106 de tal maneira que o sistema ligue 10 s após a chave ser fechada.
36. Para o circuito na Figura 10.107:
- Determine o tempo necessário para v_C alcançar 48 V depois do fechamento da chave.
 - Calcule a corrente i_C no instante $v_C = 48$ V.
 - Determine a potência fornecida pela fonte no instante $t = 2\tau$.

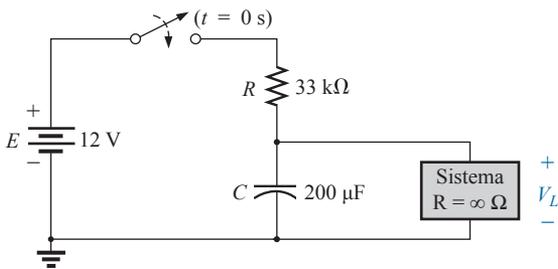


Figura 10.105 Problema 34.

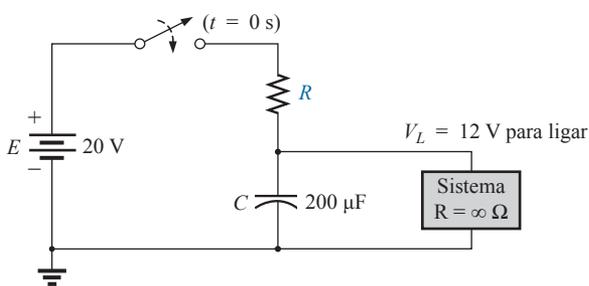


Figura 10.106 Problema 35.

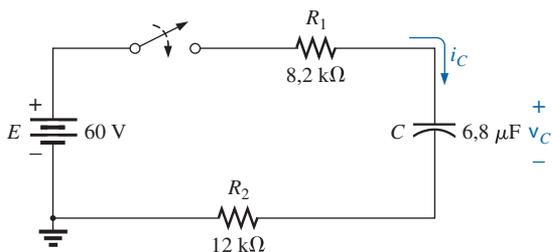


Figura 10.107 Problema 36.

37. Considerando o sistema na Figura 10.108, usando um DMM com uma resistência interna de $10 \text{ M}\Omega$ no modo voltímetro:
- Determine a leitura do voltímetro uma constante de tempo depois da chave ser fechada.
 - Calcule a corrente i_C duas constantes após a chave ser fechada.
 - Calcule quanto tempo deve passar após o fechamento da chave para que a tensão v_C seja 50 V.

Seção 10.9 Equivalente de Thévenin: $\tau = R_{Th}C$

38. Para o circuito na Figura 10.109:
- Determine as expressões matemáticas para o comportamento transitório da tensão v_C e a corrente i_C depois do fechamento da chave.
 - Trace as formas de onda de v_C e i_C .
39. O capacitor na Figura 10.110 está inicialmente carregado com 10 V, com a polaridade mostrada.
- Escreva as expressões matemáticas para a tensão v_C e a corrente i_C quando a chave for fechada.
 - Trace as formas de onda de v_C e i_C .

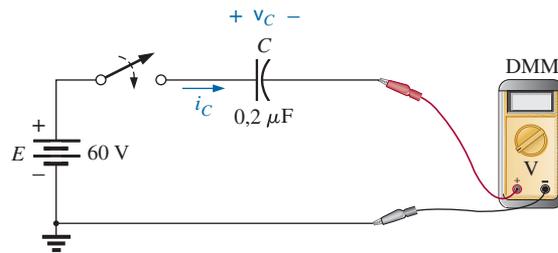


Figura 10.108 Problema 37.

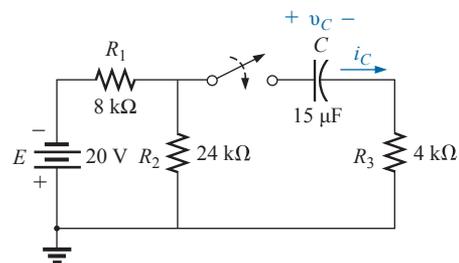


Figura 10.109 Problema 38.

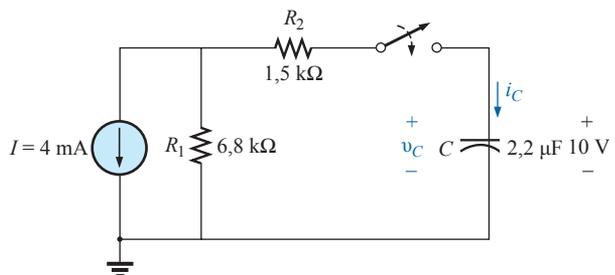


Figura 10.110 Problema 39.

40. O capacitor na Figura 10.111 está inicialmente carregado com 12 V, com a polaridade mostrada.

a) Escreva as expressões matemáticas para a tensão v_C e a corrente i_C quando a chave for fechada.

b) Trace as formas de onda de v_C e i_C .

41. Para o circuito na Figura 10.112:

a) Calcule as expressões matemáticas para o comportamento transitório da tensão v_C e a corrente i_C seguindo o fechamento da chave.

b) Trace as formas de onda de v_C e i_C .

*42. O capacitor na Figura 10.113 está inicialmente carregado com 8 V, com a polaridade mostrada.

a) Escreva as expressões matemáticas para a tensão v_C e a corrente i_C quando a chave for fechada.

b) Trace as formas de onda de v_C e i_C .

43. Para o sistema na Figura 10.114, usando um DMM com uma resistência interna de 10 MΩ no modo de voltímetro:

a) Determine a leitura do voltímetro quatro constantes de tempo depois de a chave ser fechada.

b) Calcule o tempo que tem de passar antes que i_C caia para 3 μA.

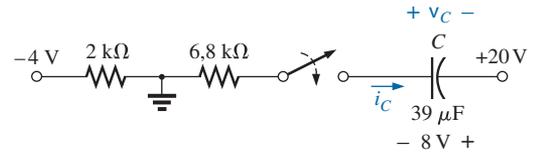


Figura 10.113 Problema 42.

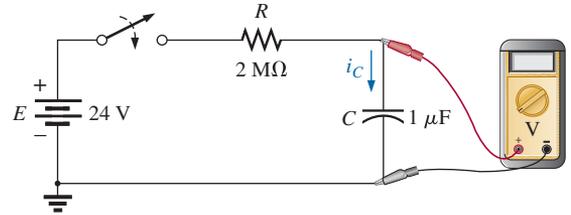


Figura 10.114 Problema 43.

c) Calcule o tempo que tem de passar depois do fechamento da chave para que a tensão através do medidor alcance 10 V.

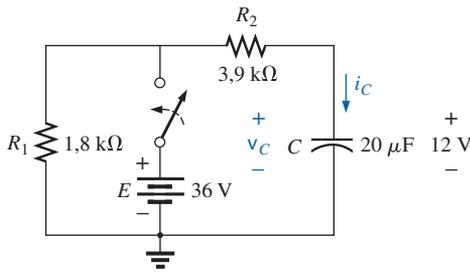


Figura 10.111 Problema 40.

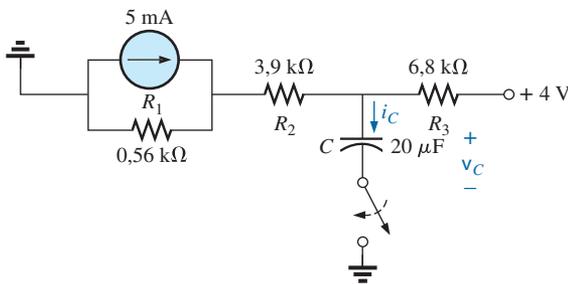


Figura 10.112 Problema 41.

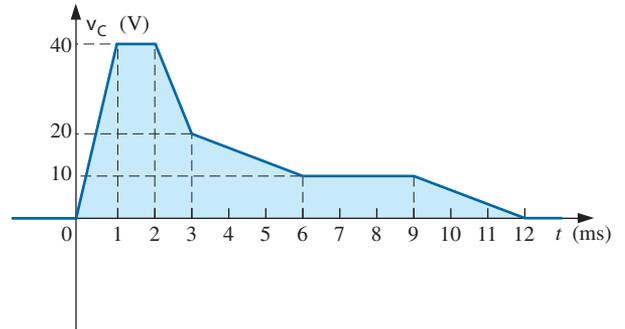


Figura 10.115 Problema 44.

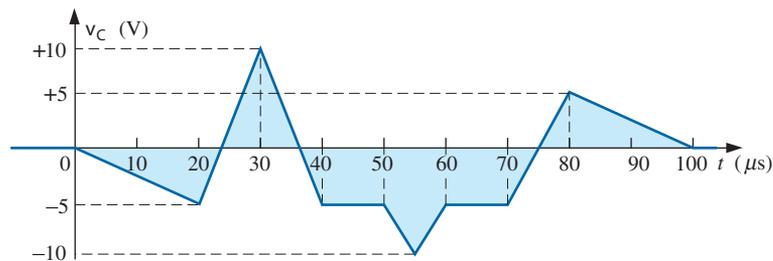


Figura 10.116 Problema 45.

Seção 10.10 A corrente i_C

44. Determine a forma de onda para a corrente média, se a tensão através do capacitor de 2 μF é como mostra a Figura 10.115.

45. Determine a forma de onda para a corrente média se a tensão através do resistor de 4,7 μF é como mostra a Figura 10.116.

46. Dada a forma de onda mostrada na Figura 10.117 para a corrente em um capacitor de $20\ \mu\text{F}$, esboce a forma de onda da tensão v_C entre os terminais do capacitor se $v_C = 0\ \text{V}$ em $t = 0\ \text{s}$.

Seção 10.11 Capacitores em série e em paralelo

- 47. Calcule a capacitância total C_T para o circuito na Figura 10.118.
- 48. Determine a capacitância total C_T para o circuito na Figura 10.119.
- 49. Determine a tensão e a carga em cada capacitor para o circuito na Figura 10.120.
- 50. Determine a tensão e a carga em cada capacitor para o circuito na Figura 10.121.
- 51. Para a configuração na Figura 10.122, determine a tensão através de cada capacitor e a carga em cada capacitor sob condições de estado estacionário.
- 52. Para a configuração na Figura 10.123, determine a tensão através de cada capacitor e a carga em cada capacitor.

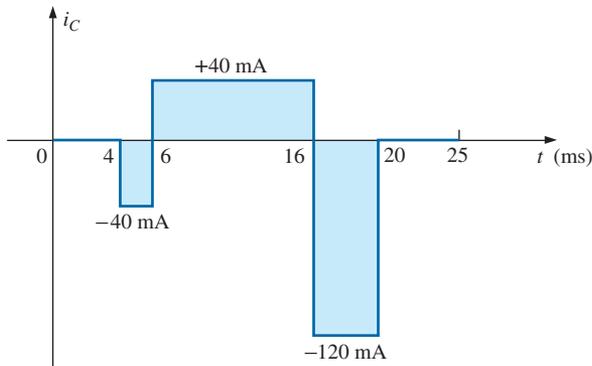


Figura 10.117 Problema 46.

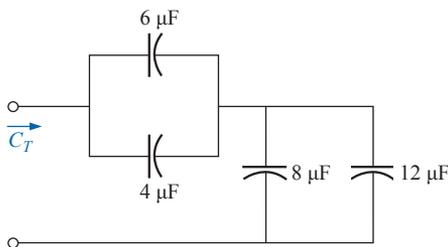


Figura 10.118 Problema 47.

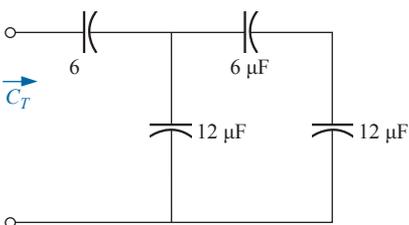


Figura 10.119 Figura 48.

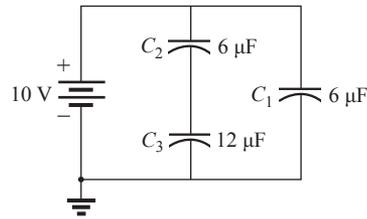


Figura 10.120 Problema 49.

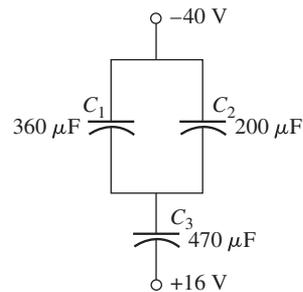


Figura 10.121 Problema 50.

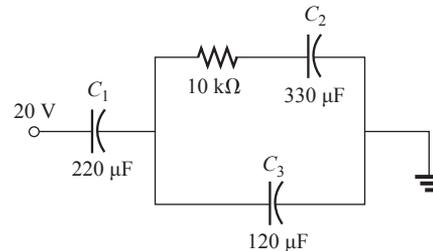


Figura 10.122 Problema 51.

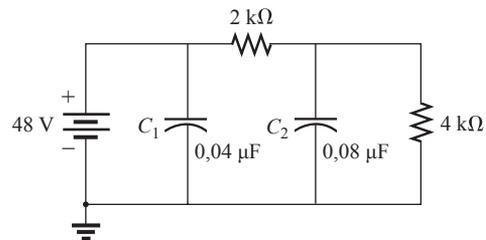


Figura 10.123 Problema 52.

Seção 10.12 Energia armazenada em um capacitor

- 53. Calcule a energia armazenada em um capacitor de $120\ \text{pF}$ com $12\ \text{V}$ entre suas placas.
- 54. Se a energia armazenada por um capacitor de $6\ \mu\text{F}$ é $1.200\ \text{J}$, determine a carga Q em suas placas.
- *55. Para o circuito na Figura 10.124, determine a energia armazenada em cada capacitor sob as condições do estado estacionário.

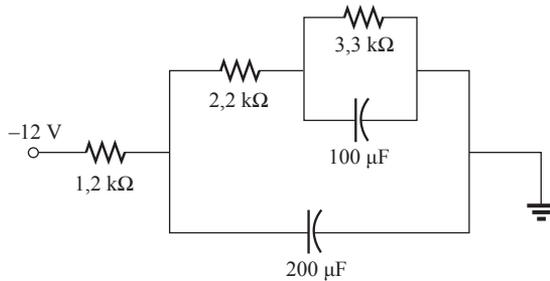


Figura 10.124 Problema 55.

- *56. Um flash eletrônico tem um capacitor de $1.000 \mu\text{F}$ que está carregado com 1000 V .
- Quanta energia está armazenada pelo capacitor?
 - Qual é a carga no capacitor?

- Quando um fotógrafo tira uma foto, o flash é acionado por $1/2.000 \text{ s}$. Qual é a corrente média através do *flashtube*?
- Calcule a potência fornecida para o *flashtube*.
- Após a foto ser tirada, o capacitor tem de ser recarregado por uma fonte de energia que fornece uma corrente máxima de 10 mA . Quanto tempo ela vai levar para carregar o capacitor?

Seção 10.15 Análise computacional

- Usando PSpice ou Multisim, verifique os resultados no Exemplo 10.6.
- Usando o operador de condição inicial, verifique os resultados no Exemplo 10.8 para a fase de carga usando PSpice ou Multisim.
- Usando PSpice ou Multisim, verifique os resultados para v_C durante a fase de carga no Exemplo 10.11.
- Usando PSpice ou Multisim, verifique os resultados no Problema 42.

GLOSSÁRIO

Capacitor: Componente elétrico que tem duas superfícies condutoras separadas por um material isolante e com a capacidade de armazenar carga elétrica nas superfícies condutoras.

Capacitância: Medida da quantidade de carga que um capacitor é capaz de armazenar; medida em farads (F).

Capacitâncias parasitas: Capacitâncias que não são determinadas no projeto, mas existem em função da proximidade de duas superfícies condutoras.

Coefficiente de temperatura: Indicativo de quanto o valor de capacitância de um capacitor vai variar em função de uma mudança na temperatura.

Constante de tempo: Período de tempo definido pelos parâmetros do circuito que define por quanto tempo o comportamento transitório da tensão ou da corrente de um capacitor vai durar.

Constante dielétrica: O mesmo que *permissividade relativa*, que aparece neste glossário.

Corrente de fuga: Corrente que resulta na descarga completa de um capacitor caso ele seja desconectado do circuito de carga por um período de tempo suficiente.

Corrente média: Corrente definida por uma variação linear (linha reta) na tensão através de um capacitor por um período específico de tempo.

Derivada: Variação instantânea em uma quantidade em um instante particular no tempo.

Dielétrico: Material isolante situado entre as placas de um capacitor que pode ter um efeito significativo na quantidade de carga armazenada nas placas de um capacitor.

Efeito de borda: Efeito estabelecido pelas linhas de fluxo que não passam diretamente de uma superfície condutora para a outra.

Intensidade de campo elétrico: Força que atua em uma unidade de carga elétrica positiva em uma região de interesse.

Lei de Coulomb: Expressão que calcula a força entre duas cargas iguais ou diferentes.

Linhas de fluxo elétrico: Linhas usadas para indicar graficamente a direção e o sentido do campo elétrico em uma determinada região.

Permissividade: Medida da facilidade com que um dielétrico permite o estabelecimento de linhas de campo no seu interior.

Permissividade relativa: Permissividade de um material comparada à do ar.

Período transitório capacitivo: Aquele período de tempo em que a tensão através de um capacitor ou a corrente de um capacitor varia, em valor, a uma taxa determinada pela constante de tempo do circuito.

Região de estado estacionário: Período de tempo definido pelo fato de que a tensão através de um capacitor alcançou um nível que, para todos os fins práticos, permanece constante.

Rigidez dielétrica: Indicativo da tensão exigida por comprimento unitário para estabelecer condução em um dielétrico.

Tensão de ruptura: O mesmo que *rigidez dielétrica*, que aparece neste glossário.

Tensão de trabalho: O limite máximo de tensão em que um capacitor pode realizar a sua função sem que seja danificado ou tenha as suas características modificadas.

Valor inicial: Tensão de estado estacionário através de um capacitor antes do período transitório ser iniciado.