

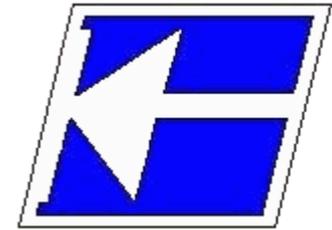
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina



Departamento Acadêmico de Eletrônica

CST em Eletrônica Industrial

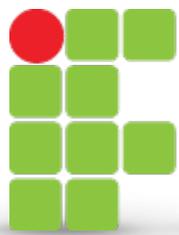
Circuitos Elétricos I



Capacitores

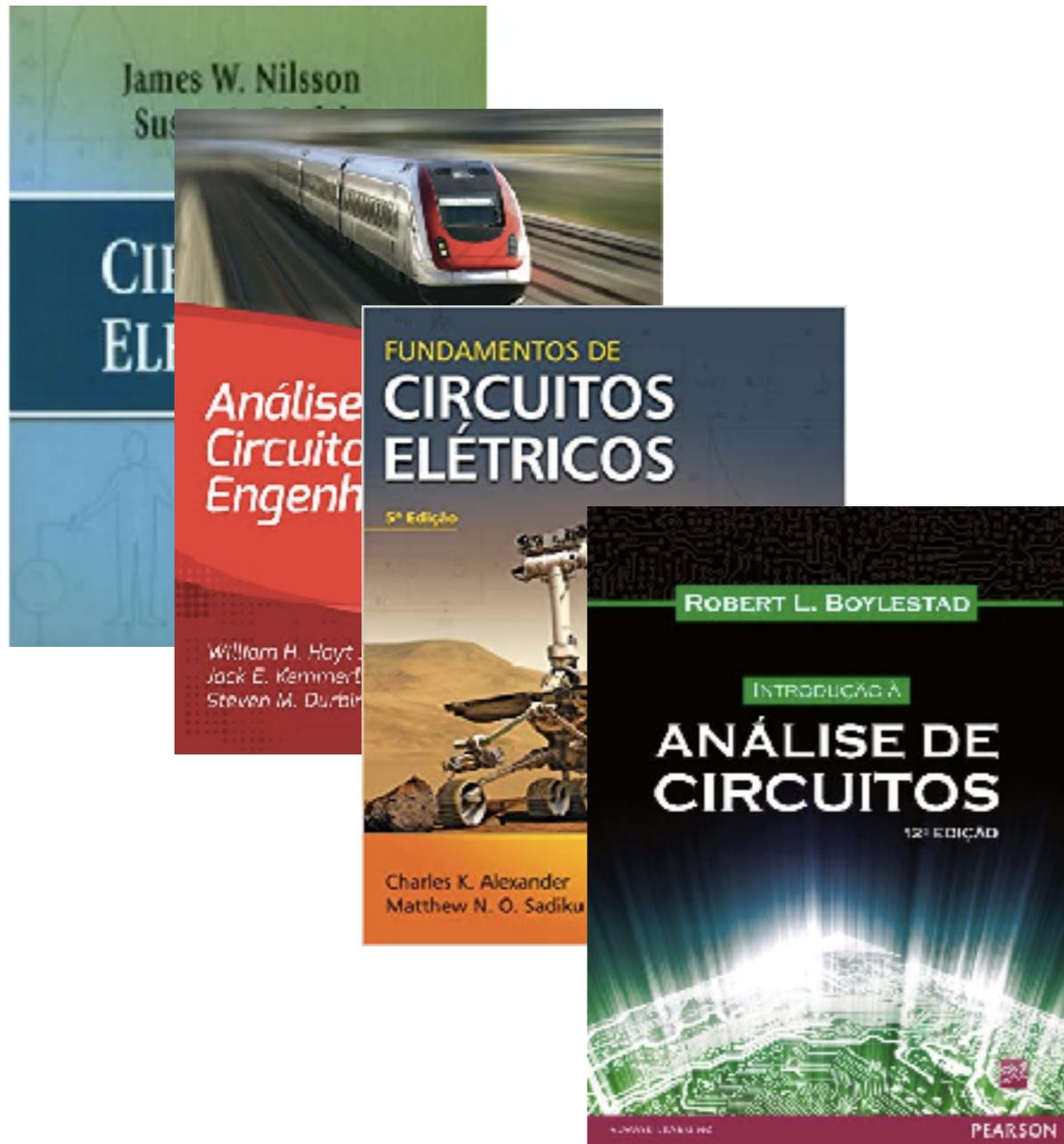
Prof. Clovis Antonio Petry.

Florianópolis, maio de 2020.



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

Biografia para Esta Aula



www.ProfessorPetry.com.br



Disciplina

Plano de Ensino (2009/1)

Baixe o plano de ensino da disciplina:

Data das avaliações

- Primeira avaliação =
- Segunda avaliação =
- Terceira avaliação =
- Quarta avaliação =
- Seminário =

Notas da disciplina

Acesse aqui:

Dúvidas, entre em contato: petry@cefetsc.edu.br

| Aulas | Notas de Aula | Apresentações | Complementos |
|-------|---------------|----------------------------|--------------|
| 00 | | Apresentação da disciplina | |
| 01 | | | |
| 02 | | | |
| 03 | | | |
| 04 | | | |
| 05 | | | |
| 06 | | | |
| 07 | | | |
| 08 | | | |
| 09 | | | |
| 10 | | | |
| 11 | | | |
| 12 | | | |
| 13 | | | |
| 14 | | | |
| 15 | | | |
| 16 | | | |

Listas de exercícios

Avaliações anteriores

Nesta Aula

Introdução

Campo elétrico

Capacitância

Capacitores

Tipos de capacitores

Não-idealidades de capacitores

Medidas de capacitores

Transitórios em circuitos capacitivos

Associação de capacitores

Introdução

Objetivos de estudar capacitores:

- 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.

Introdução

Objetivos de estudar capacitores:

- O capacitor 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.



Campo Elétrico

Campo elétrico:

- 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.

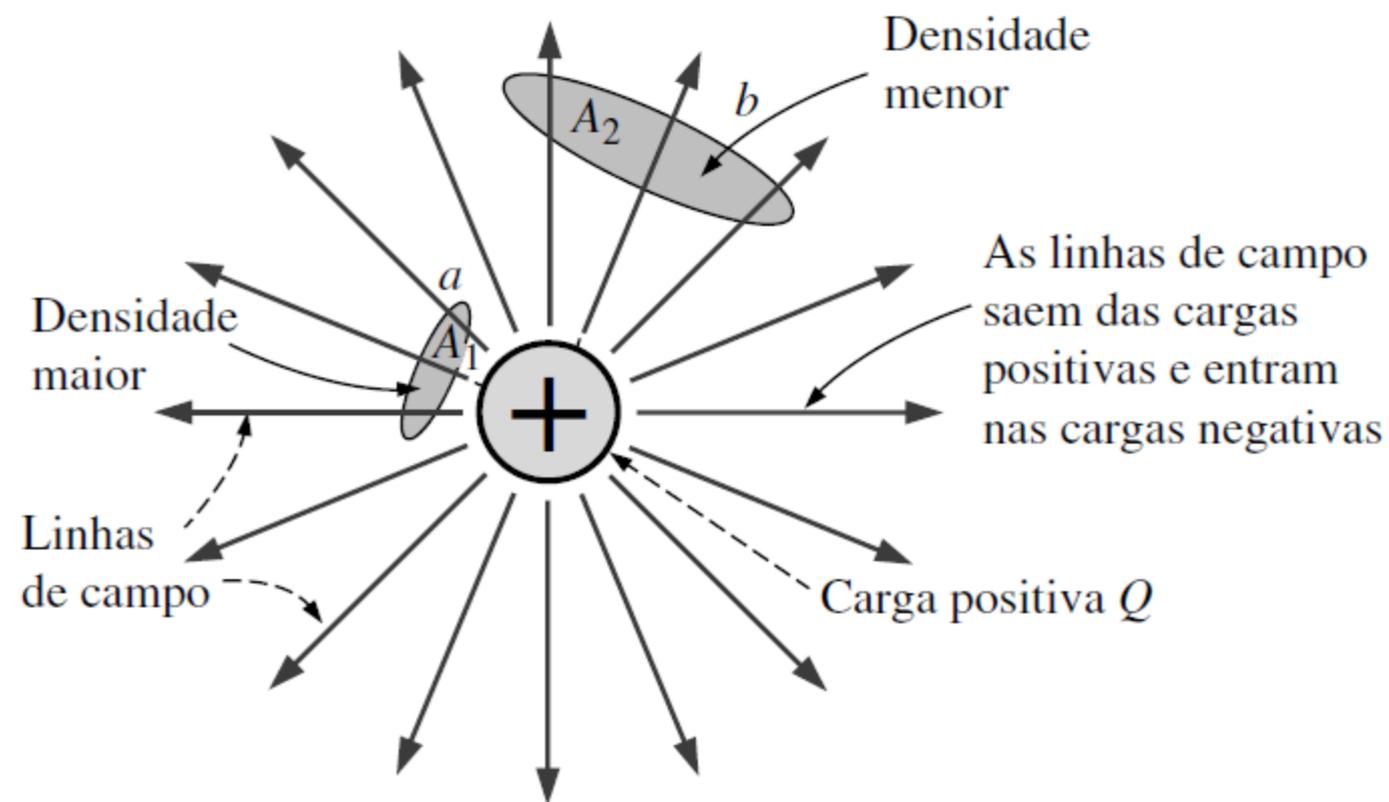


Figura 10.1 Distribuição das linhas de campo em torno de uma carga positiva isolada.

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

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

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

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

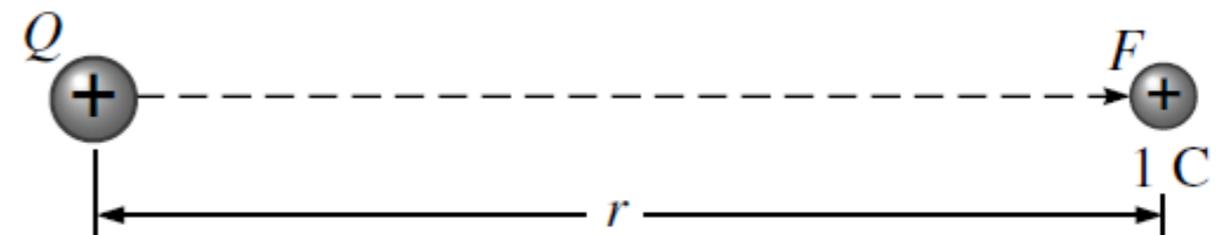


Figura 10.2 Determinação da força sobre uma carga unitária a r metros de uma carga Q de polaridades similar.

Campo Elétrico

Campo elétrico:

- 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.

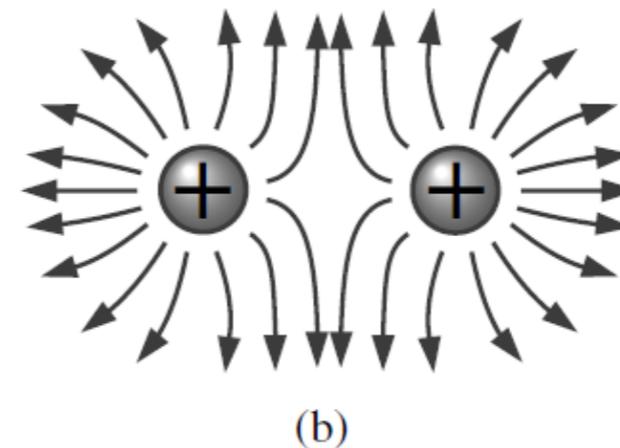
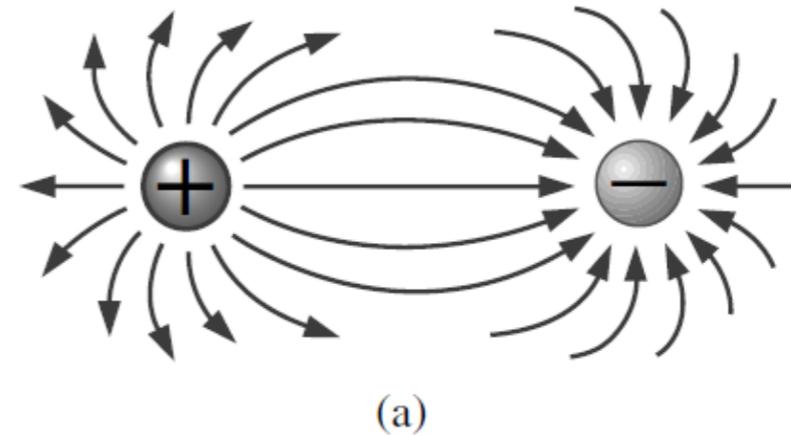


Figura 10.3 Distribuição de linhas de campo: (a) cargas de tipos opostos; (b) cargas de mesmo tipo.

Capacitância

Capacitância:

- 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.

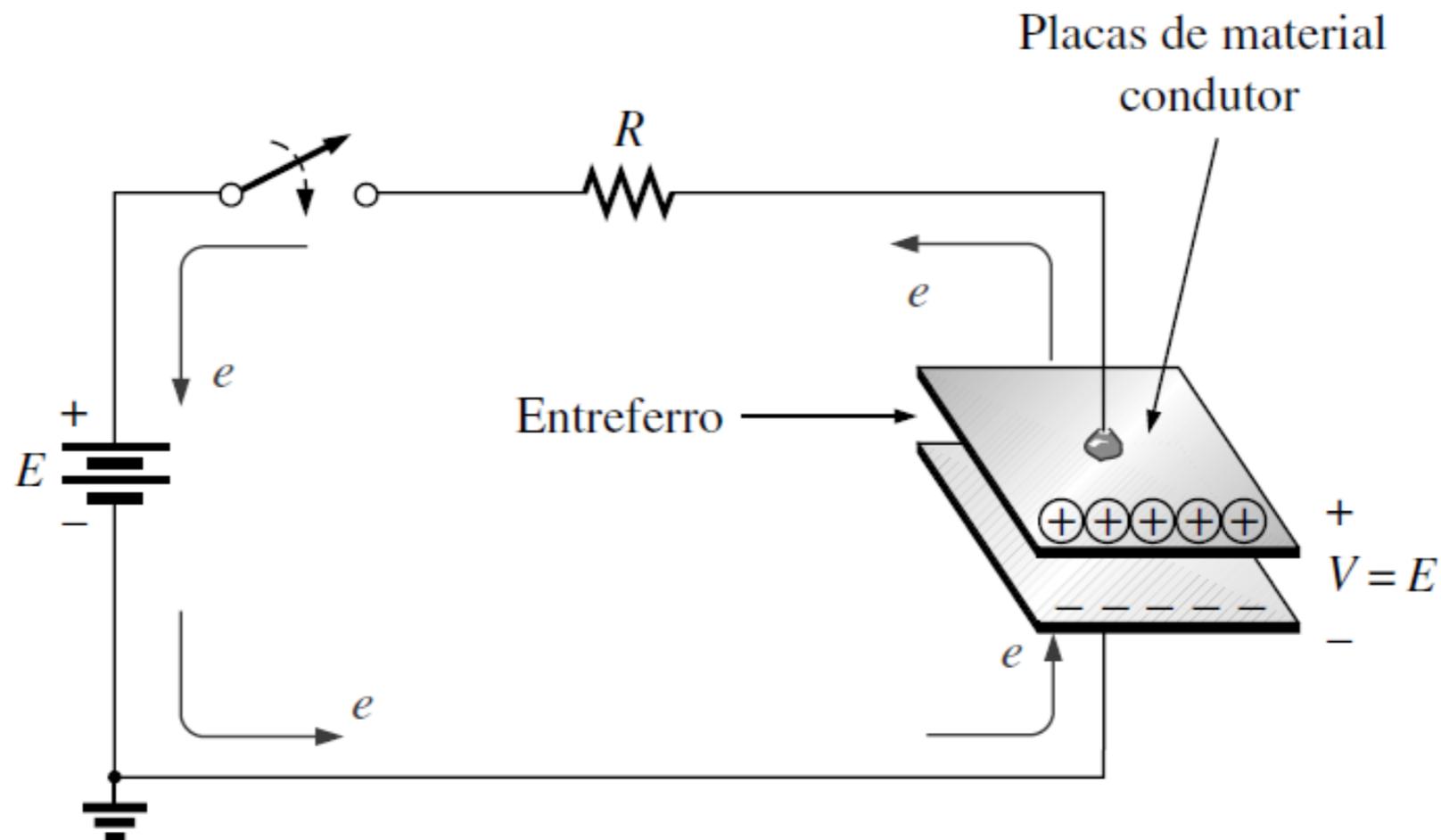


Figura 10.4 Circuito simples de carga com duas placas.

Capacitância

Capacitância:

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

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

C = farads (F)

Q = coulombs (C)

V = volts (V)

Capacitância

Capacitância:

- 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.

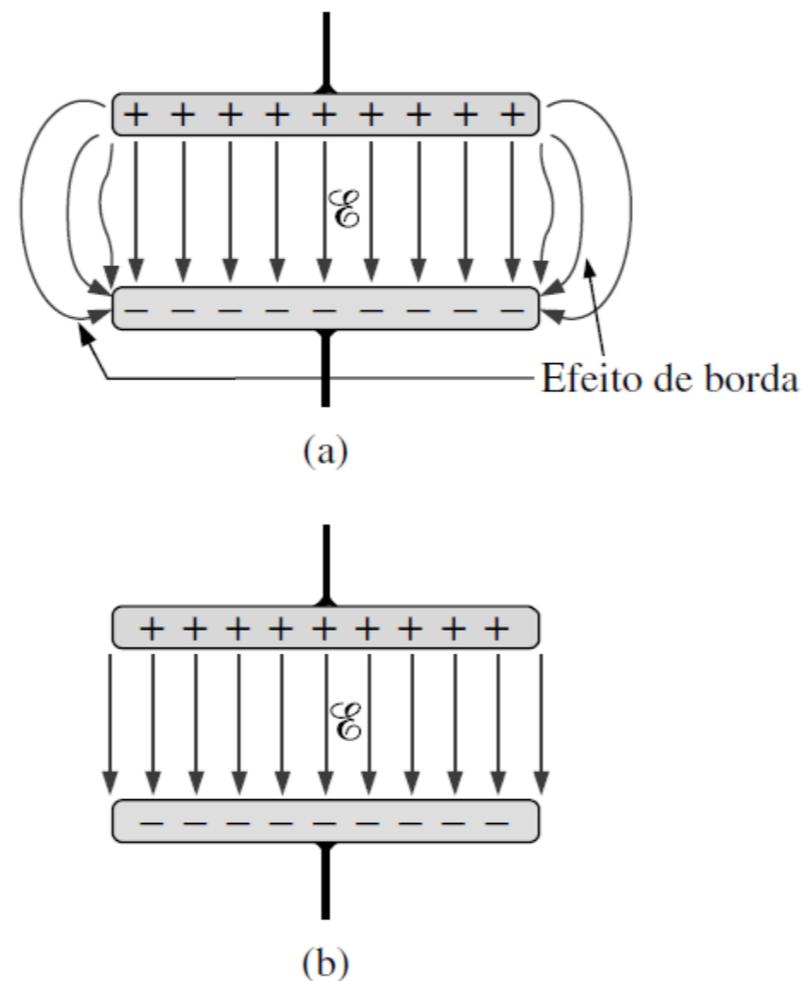


Figura 10.6 Distribuição das linhas de campo na região entre as placas de um capacitor: (a) inclusão do efeito de borda; (b) ideal.

Capacitância

Capacitância:

- 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:

$$\mathcal{E} = \frac{V}{d}$$

$$\mathcal{E} = \text{volts/m (V/m)}$$

$$V = \text{volts (V)}$$

$$d = \text{meters (m)}$$

Capacitância

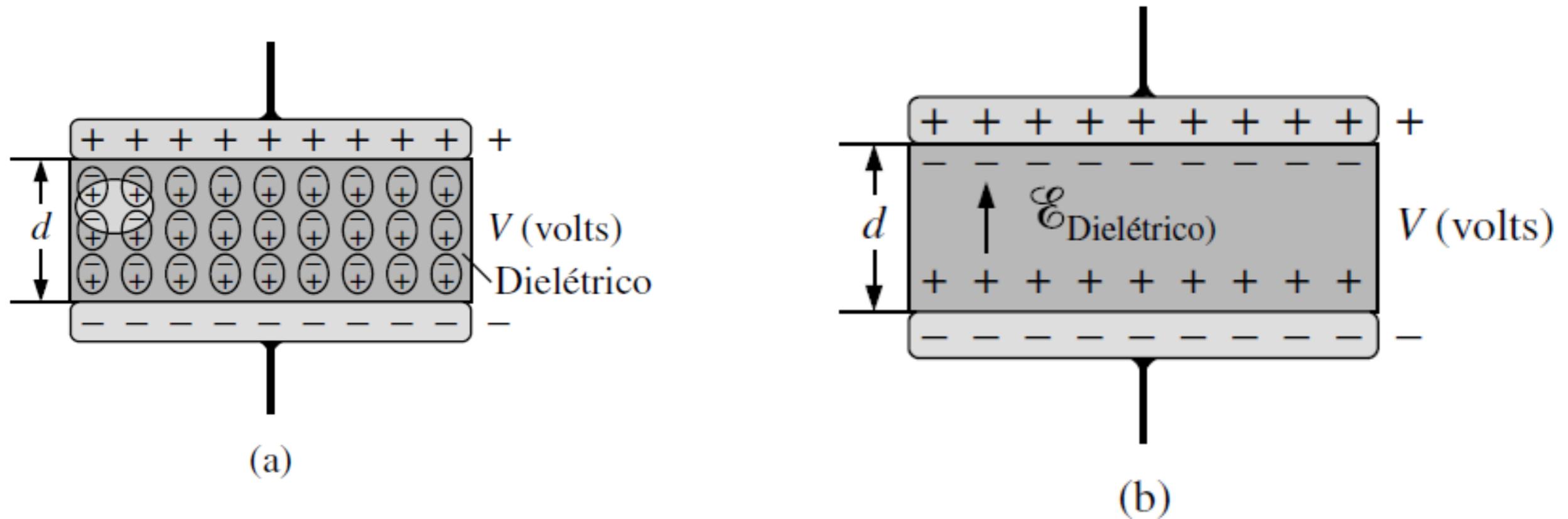


Figura 10.7 Efeito dielétrico sobre a distribuição do campo na região entre as placas de um capacitor: (a) alinhamento dos dipolos no dielétrico; (b) componentes do campo elétrico entre as placas de um capacitor na presença de um dielétrico.

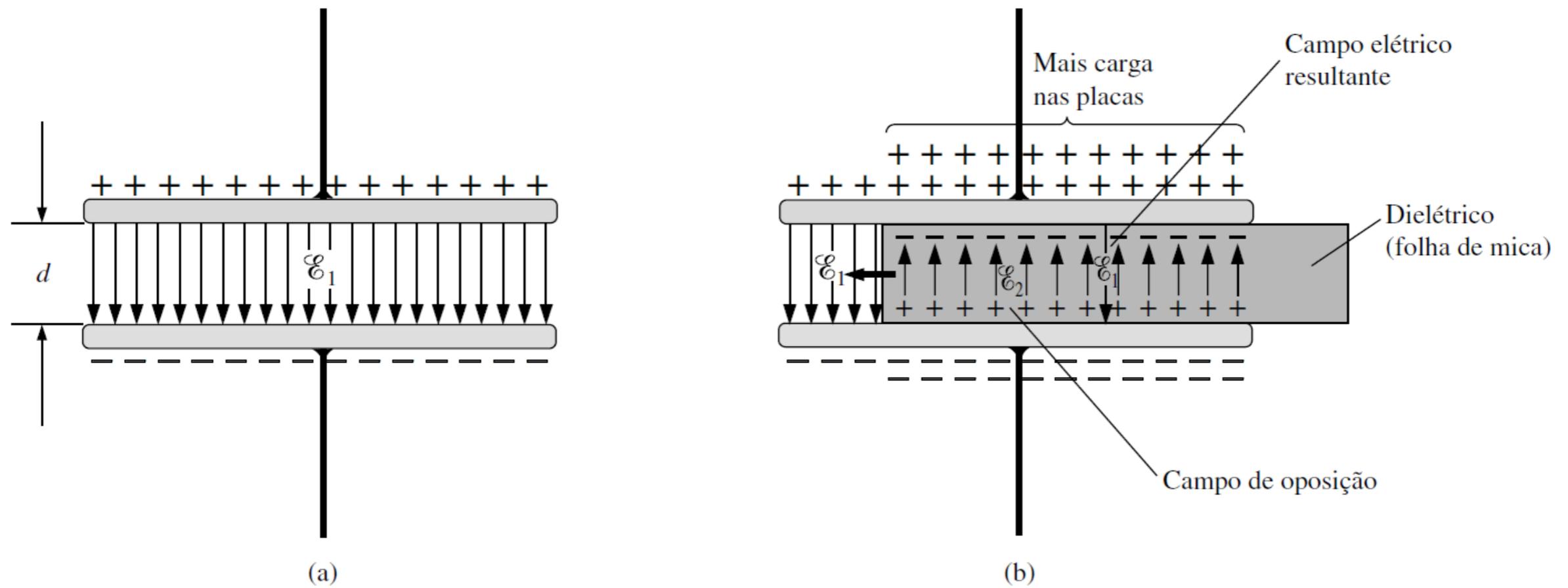


Figura 10.8 Demonstração do efeito da inserção de um dielétrico entre as placas de um capacitor: (a) capacitor de ar; (b) dielétrico sendo inserido.

Capacitância

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

| 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 |

Capacitância

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 |

Capacitores

Construção de capacitores:

- Os componentes básicos de um capacitor são: placas condutivas, separação e dielétrico.
- 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 numerador 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.

$$C = \epsilon \frac{A}{d}$$

$C =$ farads (F)
 $\epsilon =$ permissividade
 $A = \text{m}^2$
 $d = \text{m}$

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

$$\epsilon_o = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F} / \text{m}$$

Capacitores

$$a) C = 3 \cdot C_o = 3 \cdot 5\mu = 15\mu F$$

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

$$c) C = C_r \cdot C_o = 2,5 \cdot 20\mu = 50\mu F$$

$$c) C = \frac{5 \cdot 4}{1/8} \cdot C_o = 160 \cdot 1000 p = 0,16\mu F$$

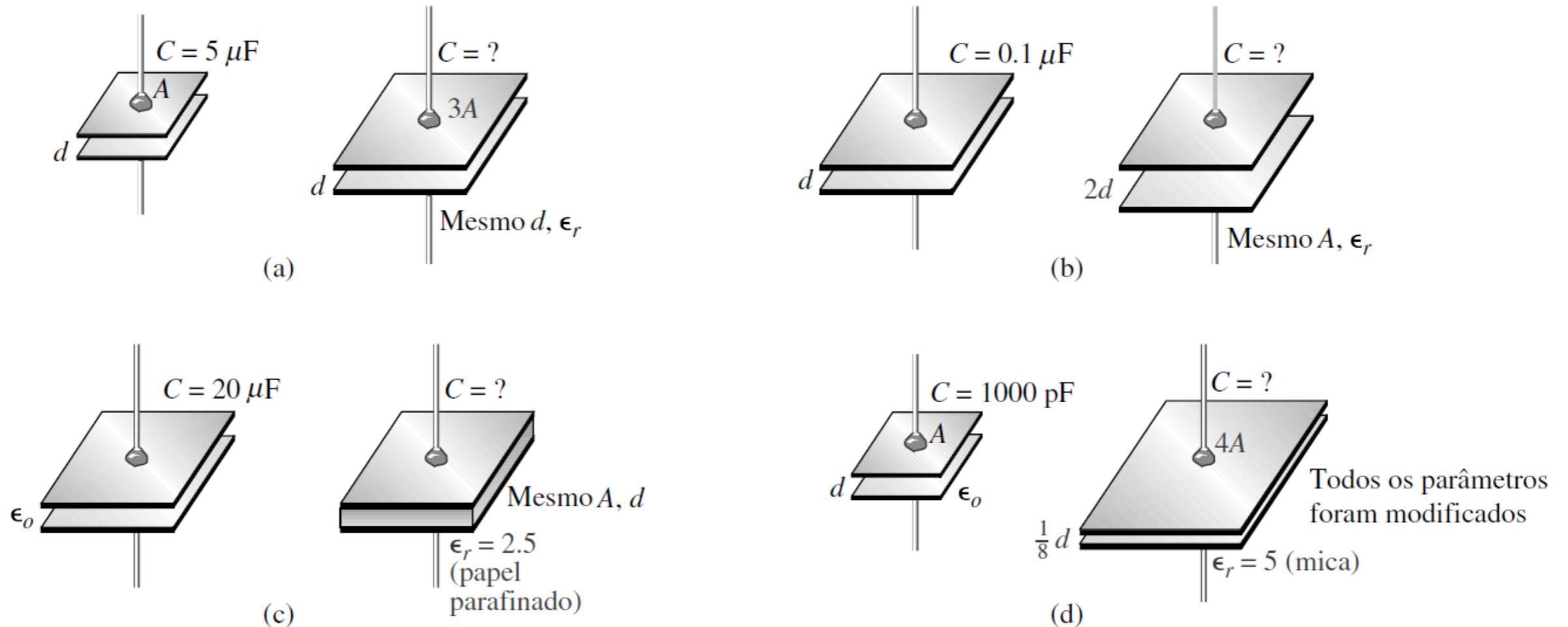


Figura 10.9 Exemplo 10.2.

Capacitores

$$d = \frac{1}{32} \text{ pol} = 0,794 \text{ mm}$$

$$A = 2 \text{ pol} \cdot 2 \text{ pol} = 2,581 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

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

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

$$Q = C \cdot V = 28,8 \text{ p} \cdot 48 = 1,38 \text{ nC}$$

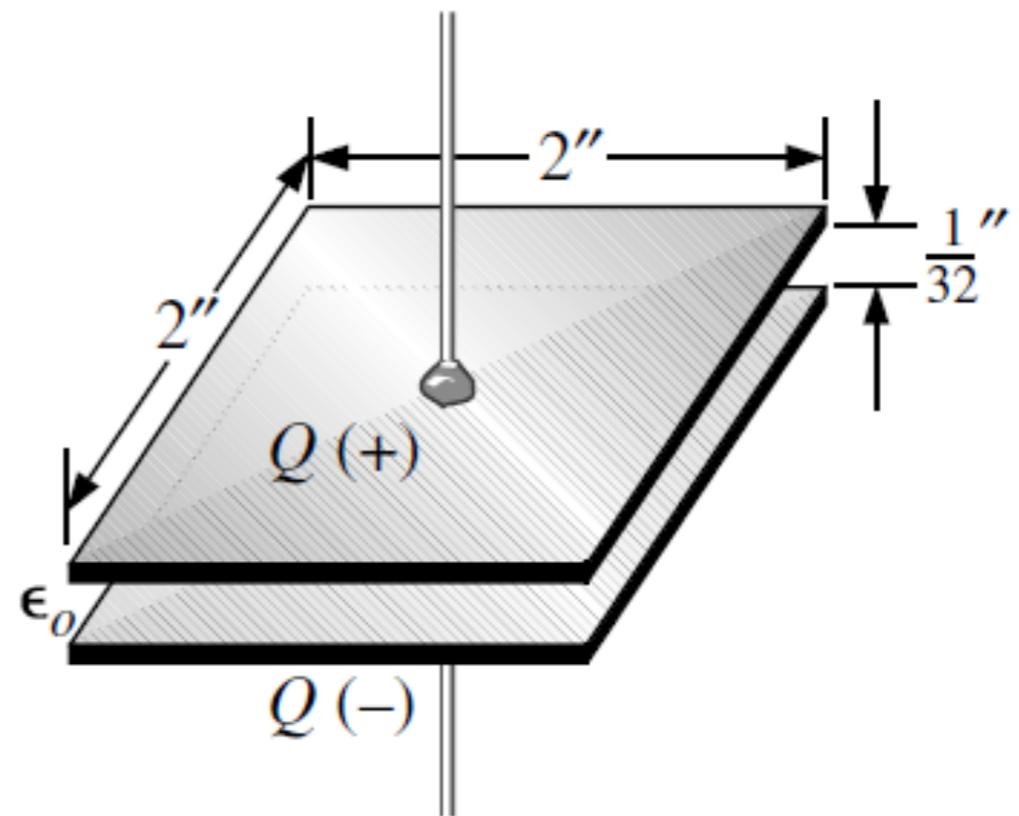


Figura 10.10 Capacitor de ar para o Exemplo 10.3.

Tipos de Capacitores

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 abaixo.



(a)



(b)

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

Tipos de Capacitores

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.

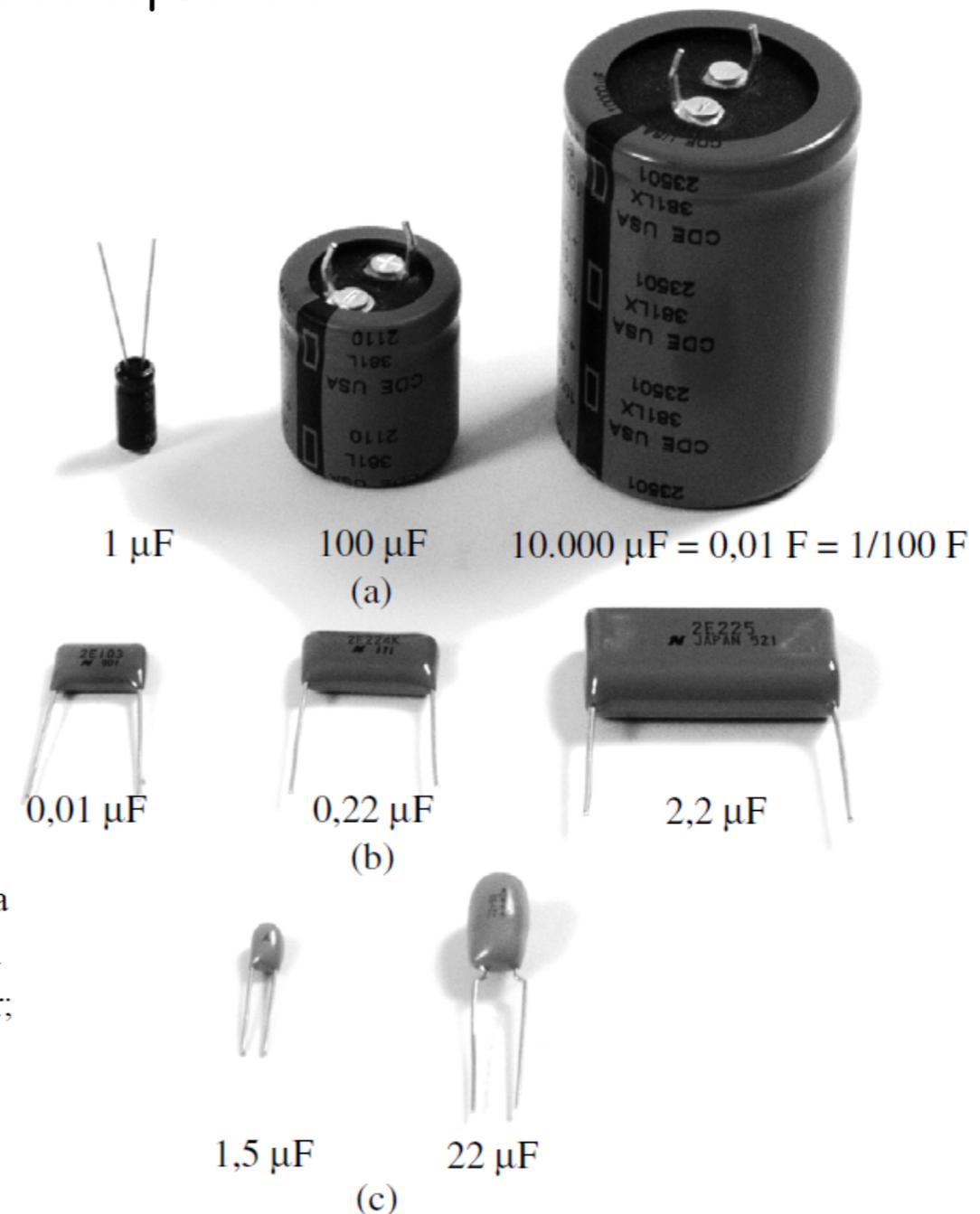


Figura 10.12 Demonstração de que, em geral, para cada tipo de construção, o tamanho de um capacitor aumenta com o valor de capacitância: (a) eletrolítico; (b) filme de poliéster; (c) tântalo.

Tipos de Capacitores

Capacitores fixos.

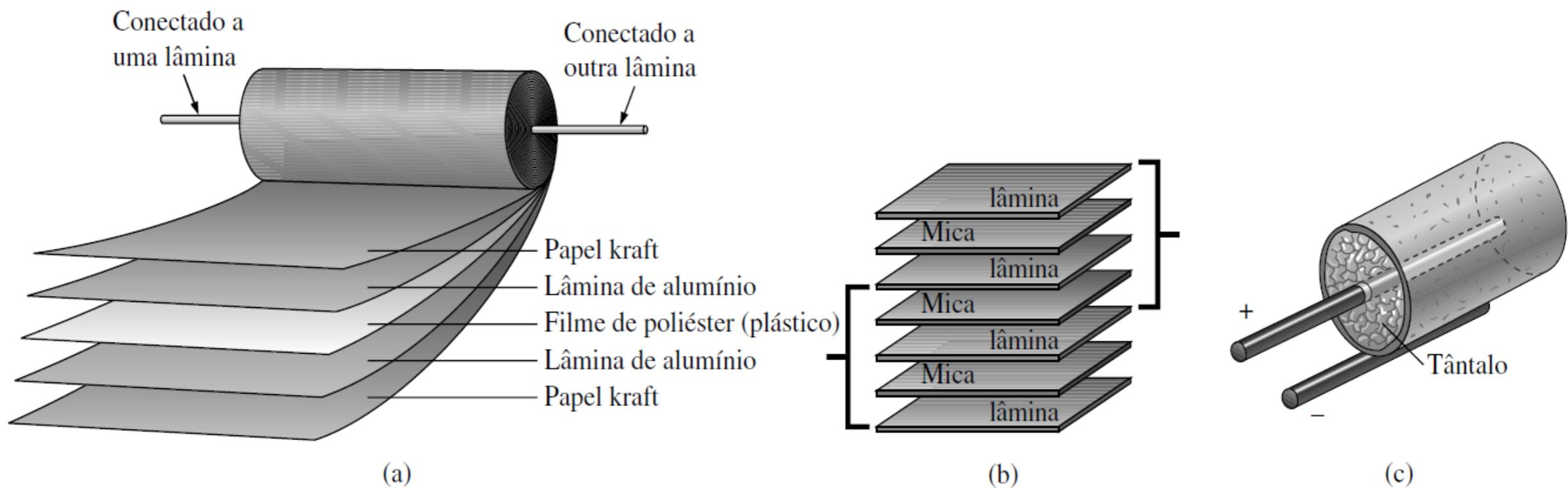


Figura 10.13 Três maneiras de aumentar a área de um capacitor: (a) por enrolamento; (b) por empilhamento; (c) por inserção.

Tipos de Capacitores

Capacitores fixos.

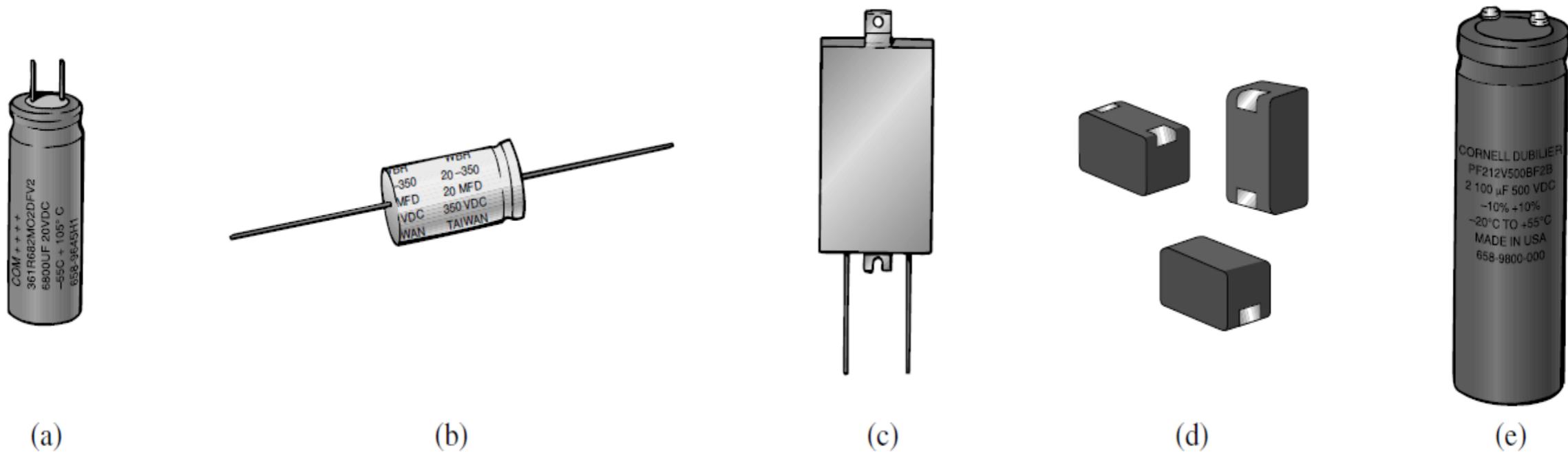


Figura 10.14 Vários tipos de capacitores eletrolíticos: (a) terminais radiais em miniatura; (b) terminais axiais; (c) encapsulamento chato; (d) montagem em superfície; (e) terminais de aparafusar.

Tipos de Capacitores

Capacitores fixos.

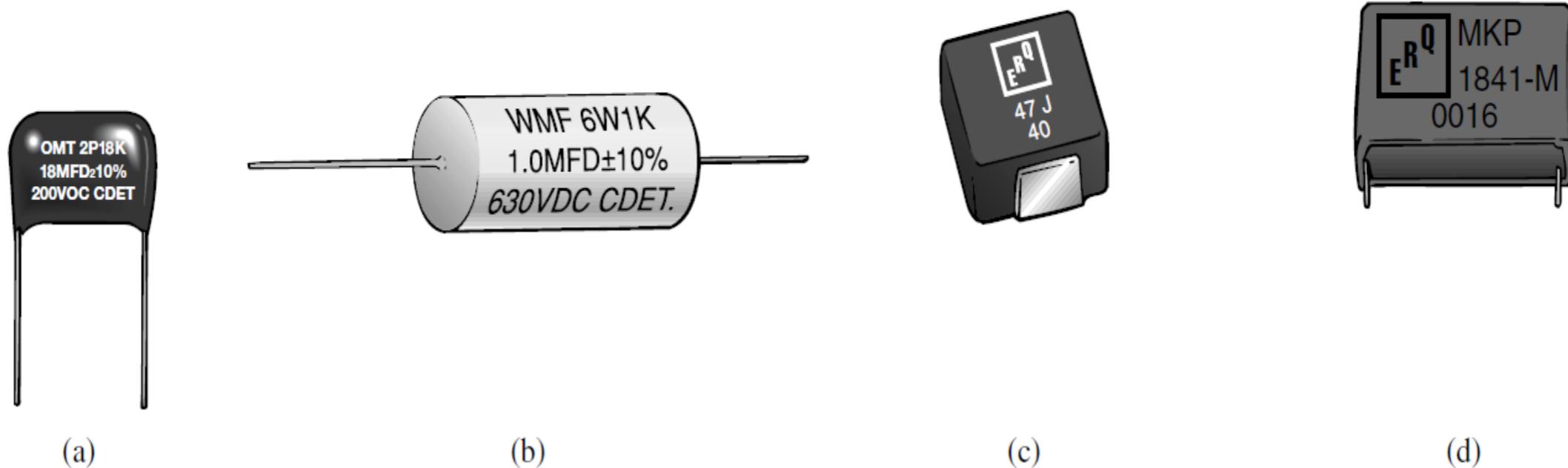


Figura 10.15 (a) Terminal radial de poliéster de filme/lâmina; (b) terminal axial de filme de poliéster metalizado; (c) filme de poliéster de montagem em superfície; (d) terminal radial, filme de polipropileno.

Tipos de Capacitores

Capacitores fixos.

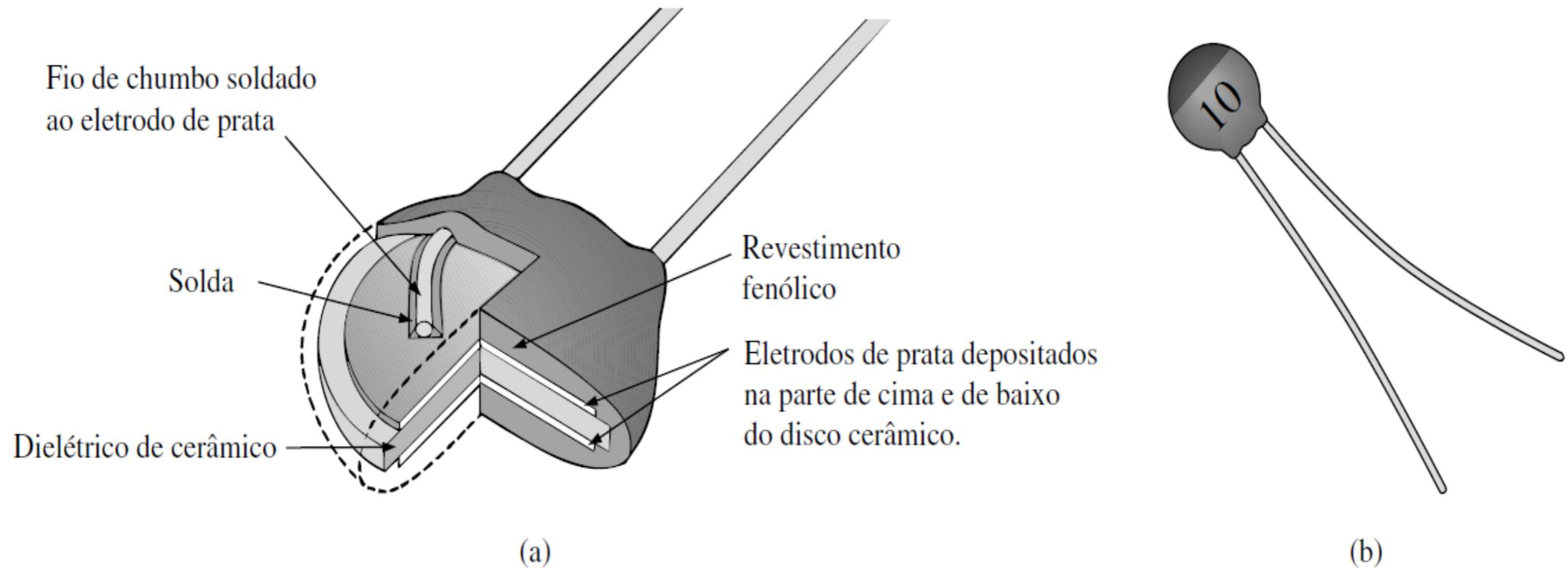


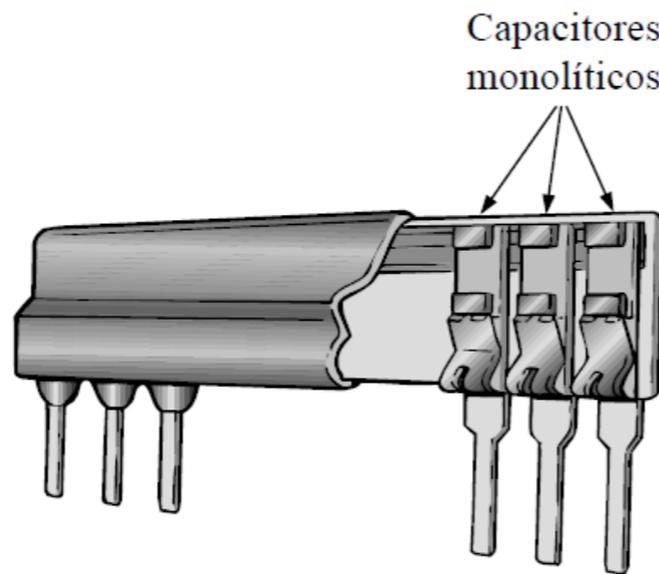
Figura 10.16 Capacitor (disco) de cerâmica: (a) construção; (b) aparência.

Tipos de Capacitores

Capacitores fixos.



(a)



(b)



(c)

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.]

Tipos de Capacitores

Capacitores fixos.



(a)



(b)

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).

Tipos de Capacitores

Capacitores fixos.



Tipos de Capacitores

Capacitores fixos.



Tipos de Capacitores

Capacitores fixos - Super capacitores.

The New K2 3.0V/3000F Cell



Tipos de Capacitores

Capacitores variáveis:

- Todos os parâmetros na equação abaixo podem ser modificados até certo ponto para criar um capacitor variável.
- Por exemplo, na figura abaixo, a capacitância do capacitor de ar variável é modificada girando-se o eixo na extremidade da unidade.

$$C = \epsilon \frac{A}{d}$$

C = farads (F)

ϵ = permissividade

A = m²

d = m

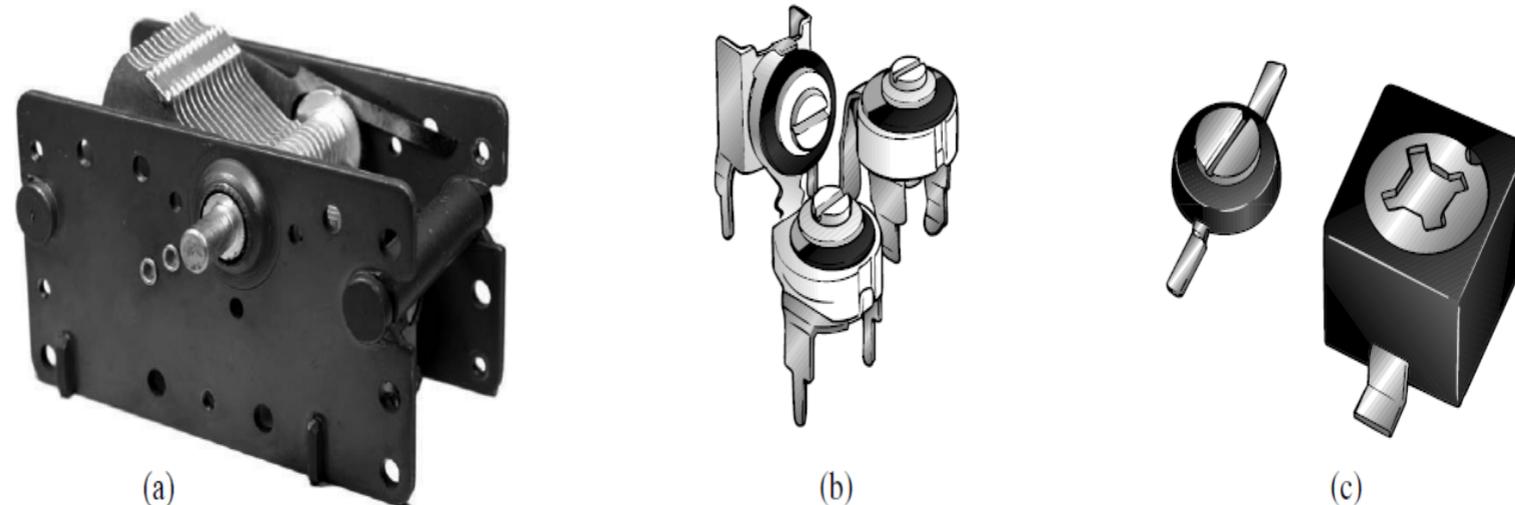


Figura 10.20 Capacitores variáveis: (a) ar; (b) trimmer de ar; (c) trimmer de compressão dielétrico cerâmico. [(a) cortesia de Ralf Siemieniec/Shutterstock.]

Não-Idealidades de Capacitores

Corrente de fuga e resistência série equivalente:

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

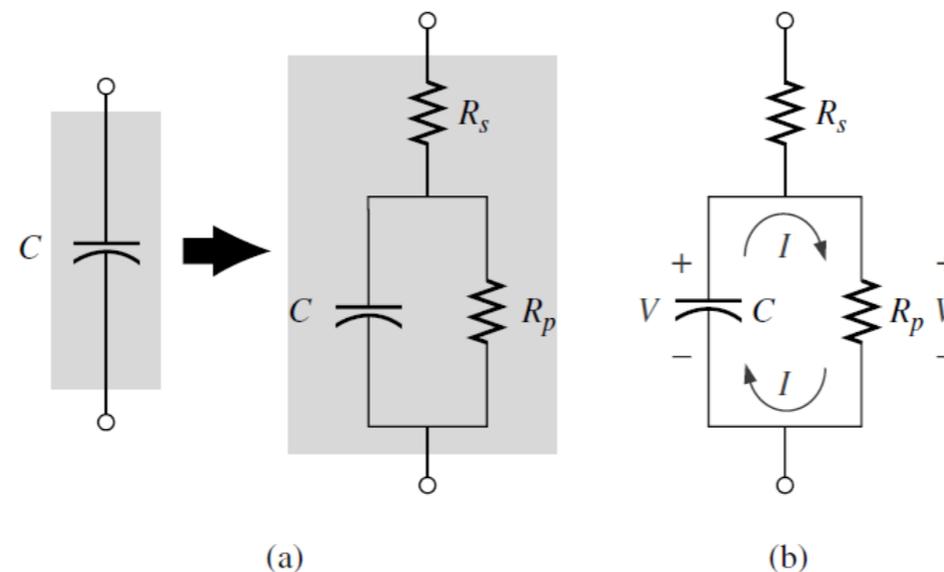


Figura 10.21 Corrente de fuga: (a) incluindo a resistência de fuga no modelo equivalente para um capacitor; (b) descarga interna de um capacitor devido à corrente de fuga.

Não-Idealidades de Capacitores

Efeitos da 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 abaixo, ou uma especificação ppm/°C (partes por milhão por grau Celsius) para o capacitor.

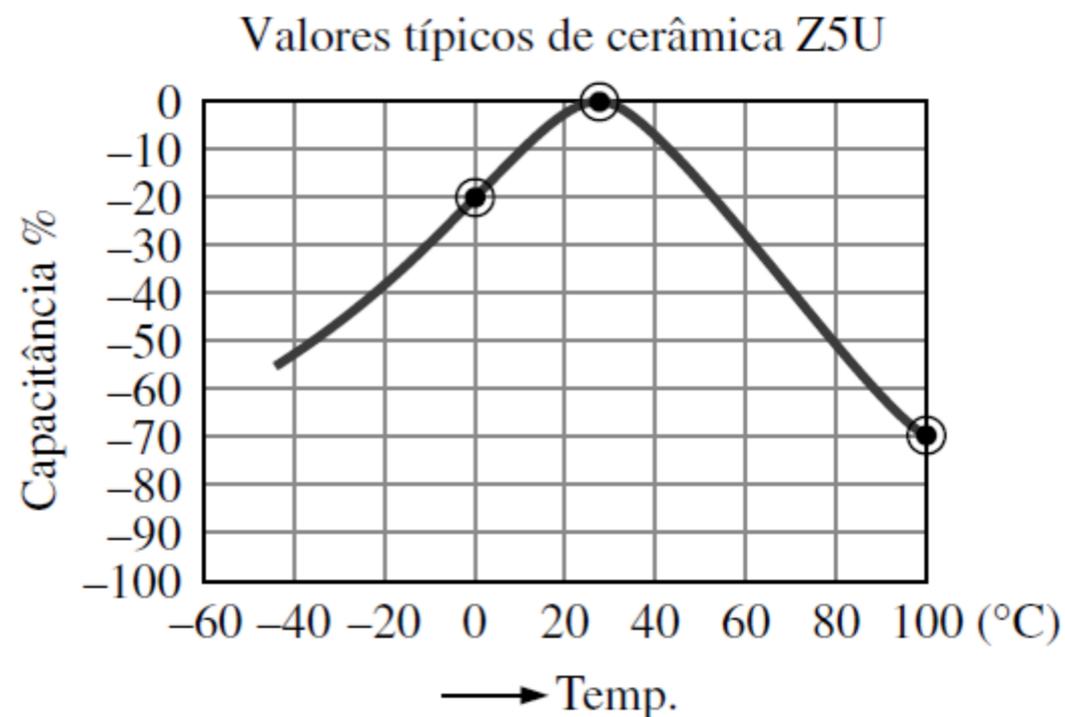


Figura 10.22 Variação do valor do capacitor com a temperatura.

Rotulagem de Capacitores

Identificação das características do capacitor:

- 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.

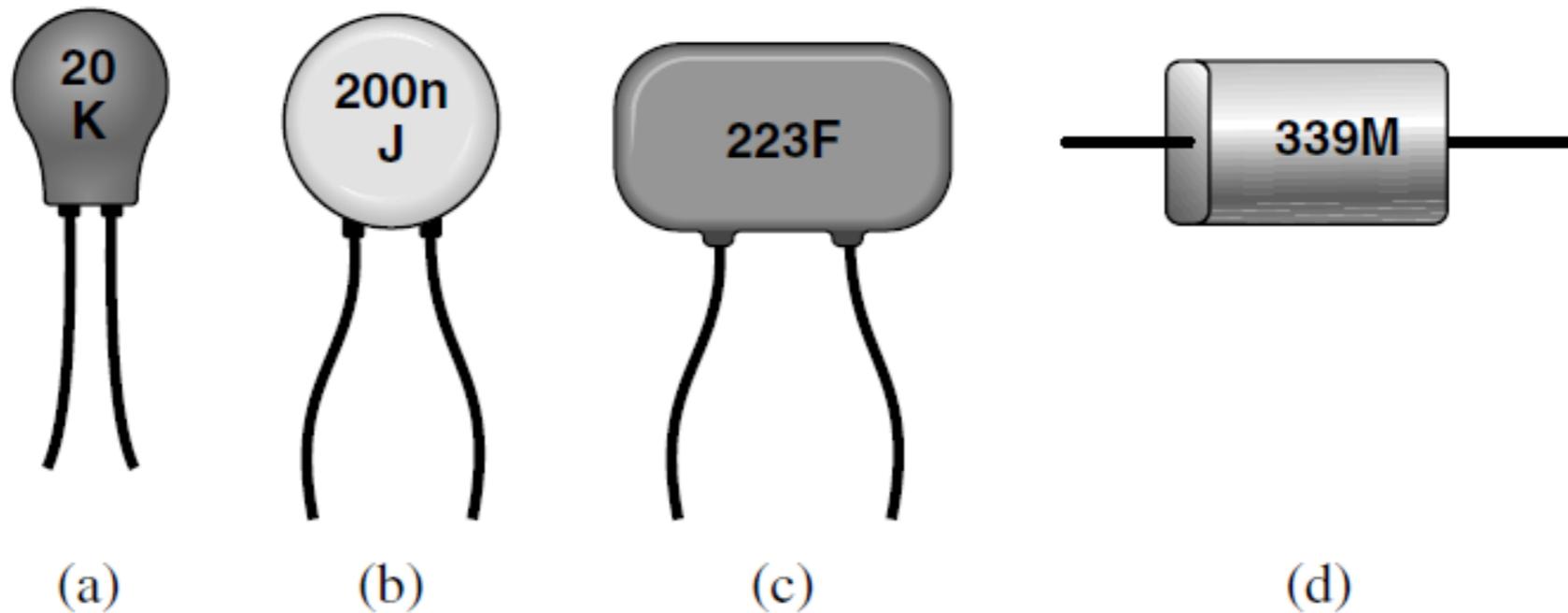


Figura 10.23 Vários esquemas de impressão de informações para capacitores pequenos.

Medidas de Capacitores

Medidas e testes:

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



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

Medidas de Capacitores

Medidas e testes.

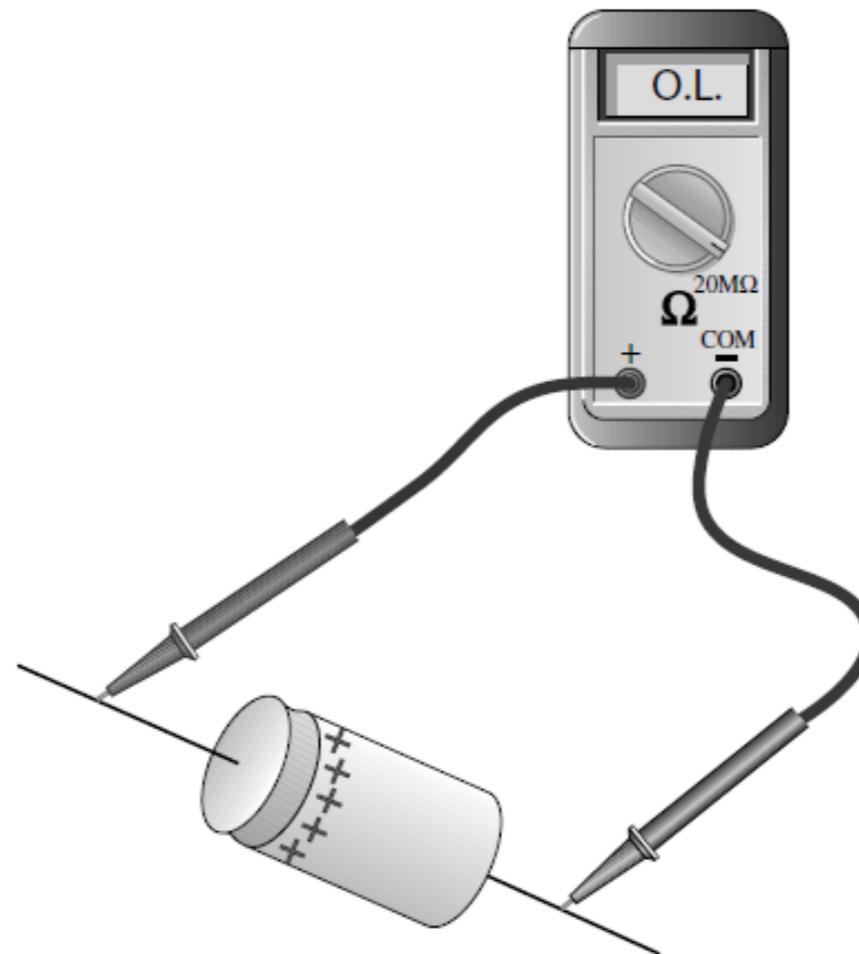
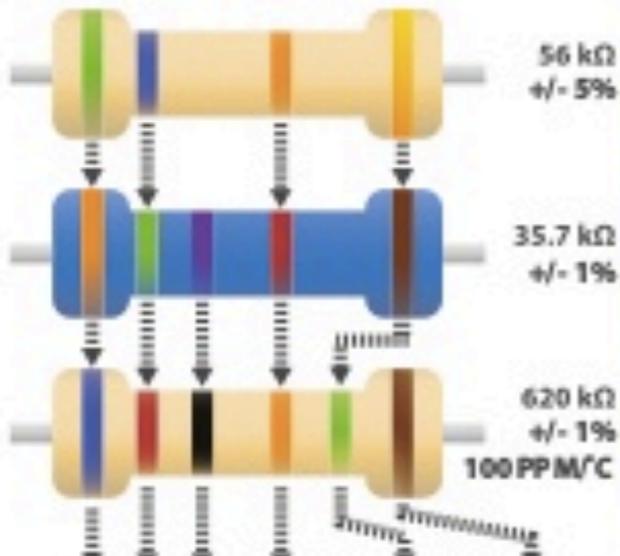


Figura 10.25 Teste do dielétrico de um capacitor eletrolítico.

Valores de Capacitores

Código de Colores



| Dígitos | x Ω | Tolerancia % | PPM/°C |
|---------|--------|--------------|--------|
| 0 0 0 | x1 | | |
| 1 1 1 | x10 | +/- 1% | 100 |
| 2 2 2 | x100 | +/- 2% | 50 |
| 3 3 3 | x1 k | | 15 |
| 4 4 4 | x10 k | | 25 |
| 5 5 5 | x100 k | +/- 0.5% | |
| 6 6 6 | x1 M | +/- 0.25% | 10 |
| 7 7 7 | x10 M | +/- 0.1% | 5 |
| 8 8 8 | | +/- 0.05% | 1 |
| 9 9 9 | | | |
| | x0.1 | +/- 5% | |
| | x0.01 | +/- 10% | |

Valores Comerciales de Resistencias**

| | 10% | 5% | 2% | 1% | | 10% | 5% | 2% | 1% |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 330 | 330 | 316 | 309 | 309 |
| | 110 | 105 | 102 | 102 | | 360 | 348 | 348 | 348 |
| | 120 | 110 | 107 | 107 | | 390 | 383 | 383 | 383 |
| 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 430 | 430 | 422 | 422 | 422 |
| | 130 | 127 | 124 | 124 | | 470 | 464 | 464 | 464 |
| | 150 | 133 | 130 | 130 | | 510 | 511 | 511 | 511 |
| 150 | 150 | 147 | 147 | 147 | 560 | 560 | 562 | 562 | 562 |
| | 160 | 154 | 150 | 150 | | 590 | 619 | 619 | 619 |
| | 180 | 162 | 158 | 158 | | 680 | 681 | 681 | 681 |
| 180 | 180 | 178 | 174 | 174 | 820 | 820 | 825 | 825 | 825 |
| | 200 | 187 | 187 | 187 | | 910 | 909 | 909 | 909 |
| | 220 | 196 | 192 | 192 | | | | | |
| 220 | 220 | 215 | 210 | 210 | | | | | |
| | 240 | 226 | 221 | 221 | | | | | |
| | 270 | 237 | 232 | 232 | | | | | |
| 270 | 270 | 249 | 243 | 243 | | | | | |
| | 300 | 261 | 255 | 255 | | | | | |
| | | 274 | 267 | 267 | | | | | |
| | 287 | 279 | 279 | 279 | | | | | |
| | 301 | 287 | 287 | 287 | | | | | |
| | | 301 | 301 | 301 | | | | | |

Resistencias de Montaje Superficial



Primer Dígito: 1
Segundo Dígito: 0
Multiplicador: 4

$10 \times 10^4 = 100000 \Omega$
 $100000 \Omega = 100 \text{ k}\Omega$

Capacitores



Primer Dígito: 2
Segundo Dígito: 2
Multiplicador: 4

$22 \times 10^4 \text{ pF} = 220000 \text{ pF}$
 $220000 \text{ pF} = 220 \text{ nF} = 0.22 \mu\text{F}$

Valores Comerciales de Capacitores

| | 1 | 1 | 1 | 1 |
|----|------|------|------|------|
| pF | 1 | 1.2 | 1.5 | 1.8 |
| | 2.2 | 2.7 | 3.3 | 3.9 |
| | 4.7 | 5.6 | 6.8 | 8.2 |
| | 10 | 12 | 15 | 18 |
| | 22 | 27 | 33 | 39 |
| | 47 | 56 | 68 | 82 |
| | 100 | 120 | 150 | 180 |
| | 220 | 270 | 330 | 390 |
| | 470 | 560 | 680 | 820 |
| | 1000 | 1200 | 1500 | 1800 |
| nF | 1 | 1.2 | 1.5 | 1.8 |
| | 2.2 | 2.7 | 3.3 | 3.9 |
| | 4.7 | 5.6 | 6.8 | 8.2 |
| | 10 | 12 | 15 | 18 |
| | 22 | 27 | 33 | 39 |
| | 47 | 56 | 68 | 82 |
| | 100 | 120 | 150 | 180 |
| | 220 | 270 | 330 | 390 |
| | 470 | 560 | 680 | 820 |
| | 1000 | 1200 | 1500 | 1800 |
| μF | 1 | 1.2 | 1.5 | 1.8 |
| | 2.2 | 2.7 | 3.3 | 3.9 |
| | 4.7 | 5.6 | 6.8 | 8.2 |
| | 10 | 12 | 15 | 18 |
| | 22 | 27 | 33 | 39 |
| | 47 | 56 | 68 | 82 |
| | 100 | 120 | 150 | 180 |
| | 220 | 270 | 330 | 390 |
| | 470 | 560 | 680 | 820 |
| | 1000 | 1200 | 1500 | 1800 |

**Los valores de las resistencias existen en múltiplos de 0.01, 0.1, 1, 10, 100, 1000, 10000 y 100000 llegando como máximo a 10 MΩ

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.

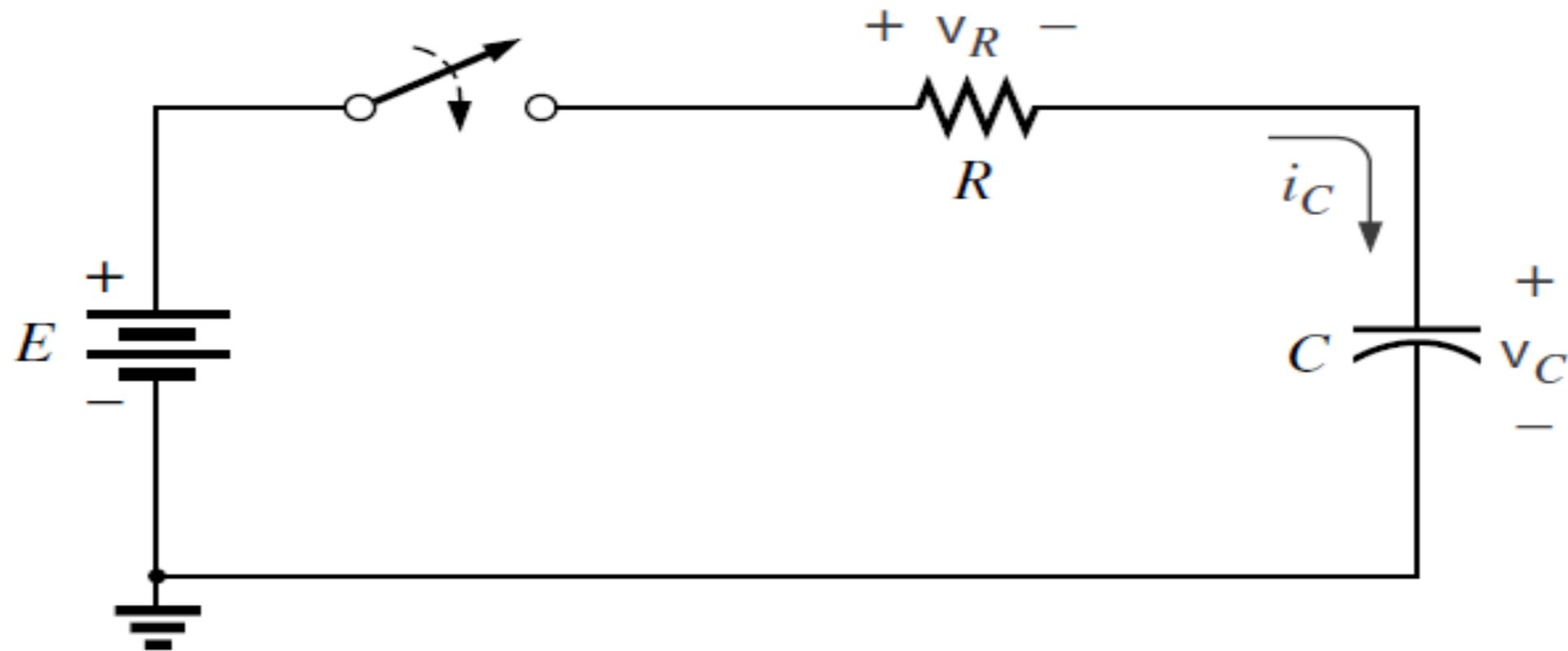


Figura 10.26 Circuito simples para carregar um capacitor.

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Fase de carga.

$$v_C = E \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

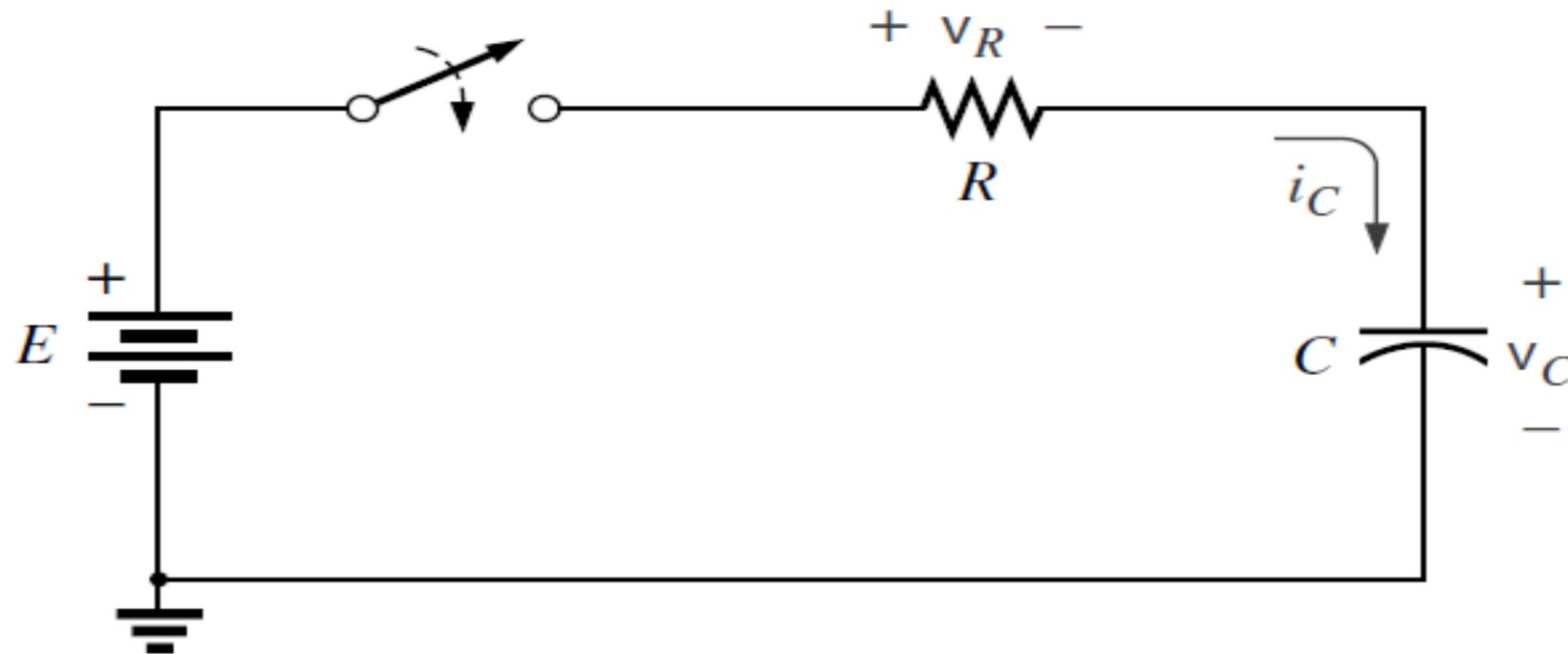


Figura 10.26 Circuito simples para carregar um capacitor.

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.

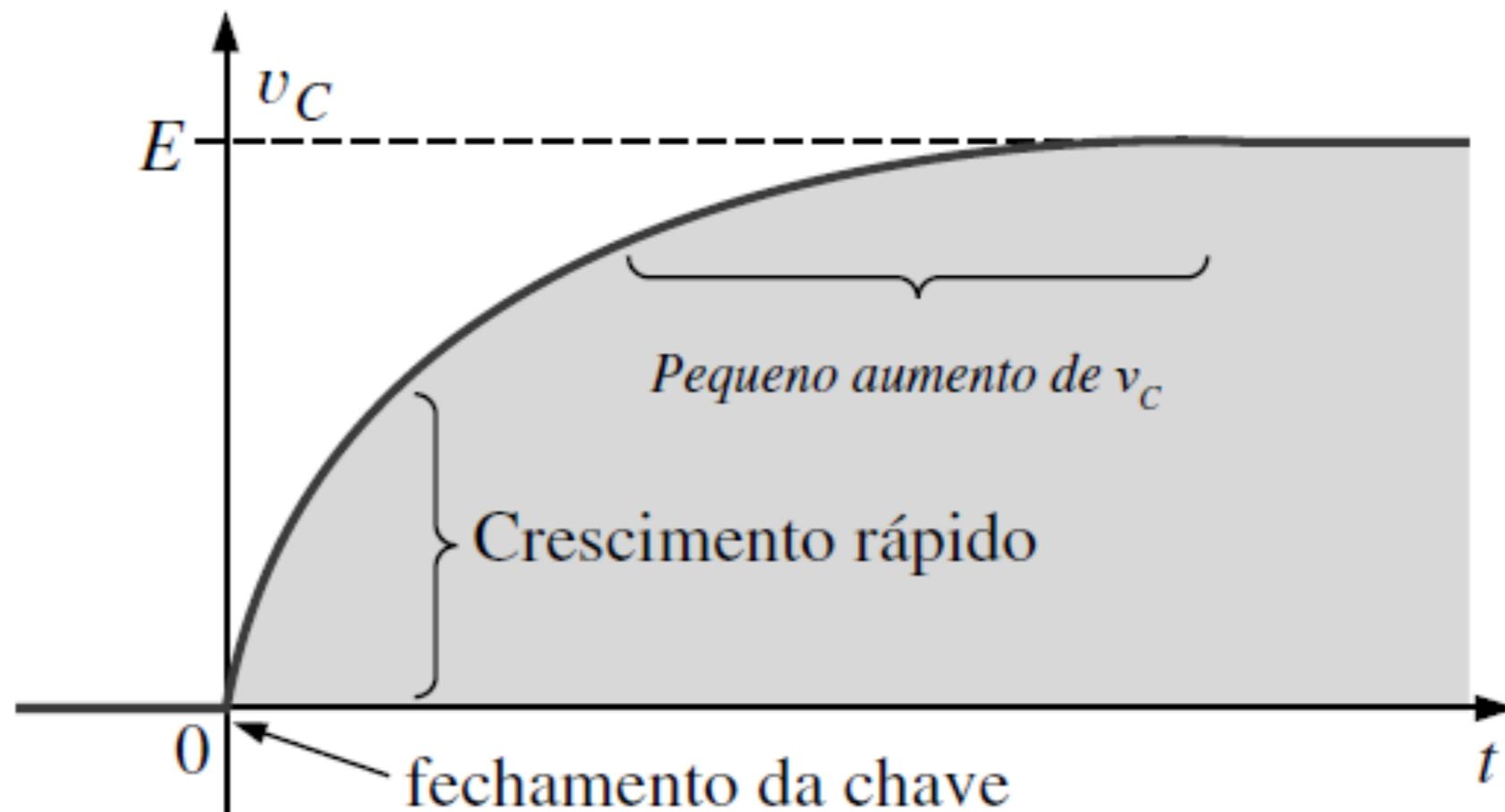


Figura 10.27 v_C durante a fase da carga.

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Fase de carga.

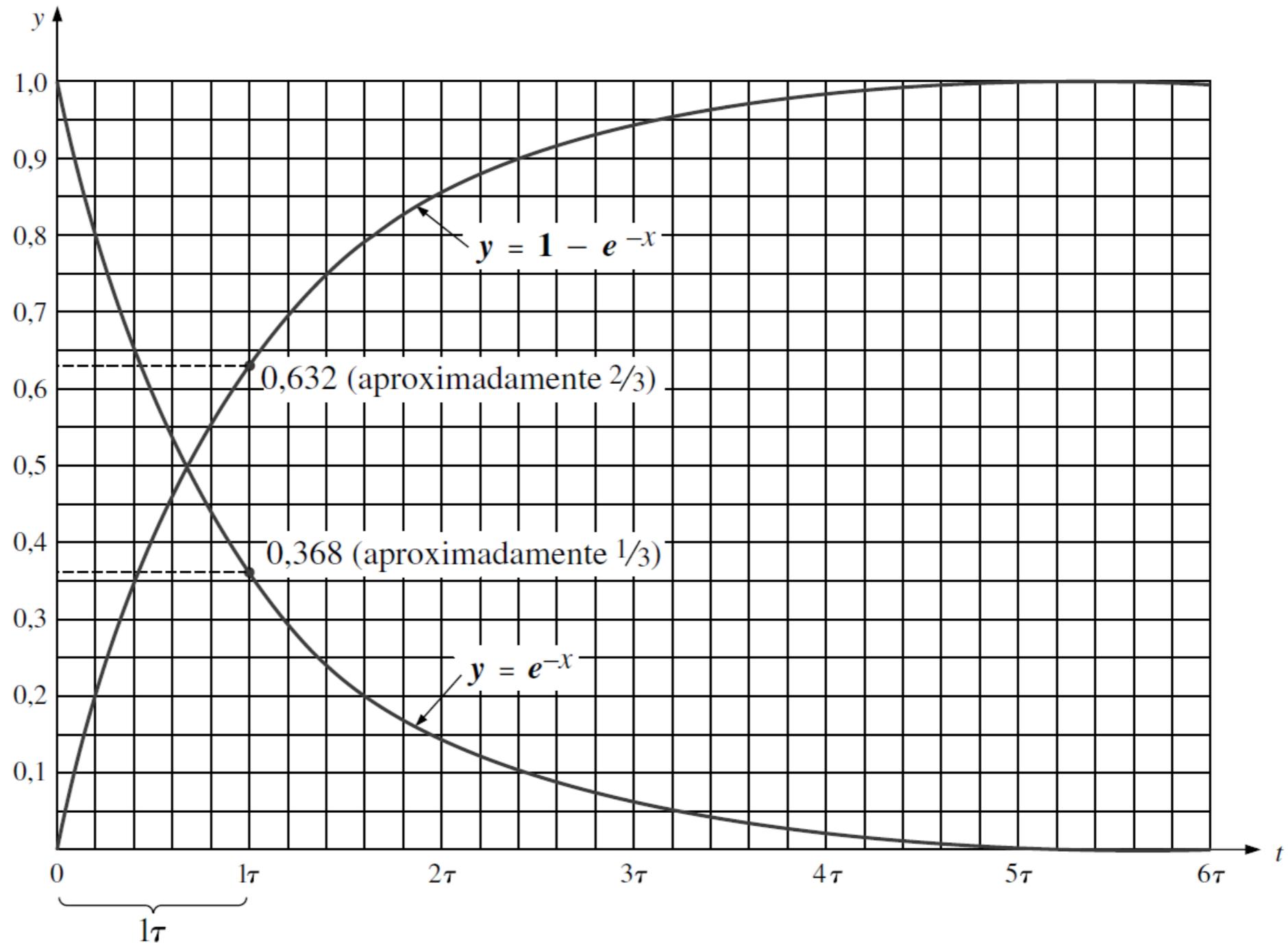


Figura 10.28 Gráfico universal da constante de tempo.

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Fase de carga.

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

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

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Fase de carga:

- 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:

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

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Fase de carga.

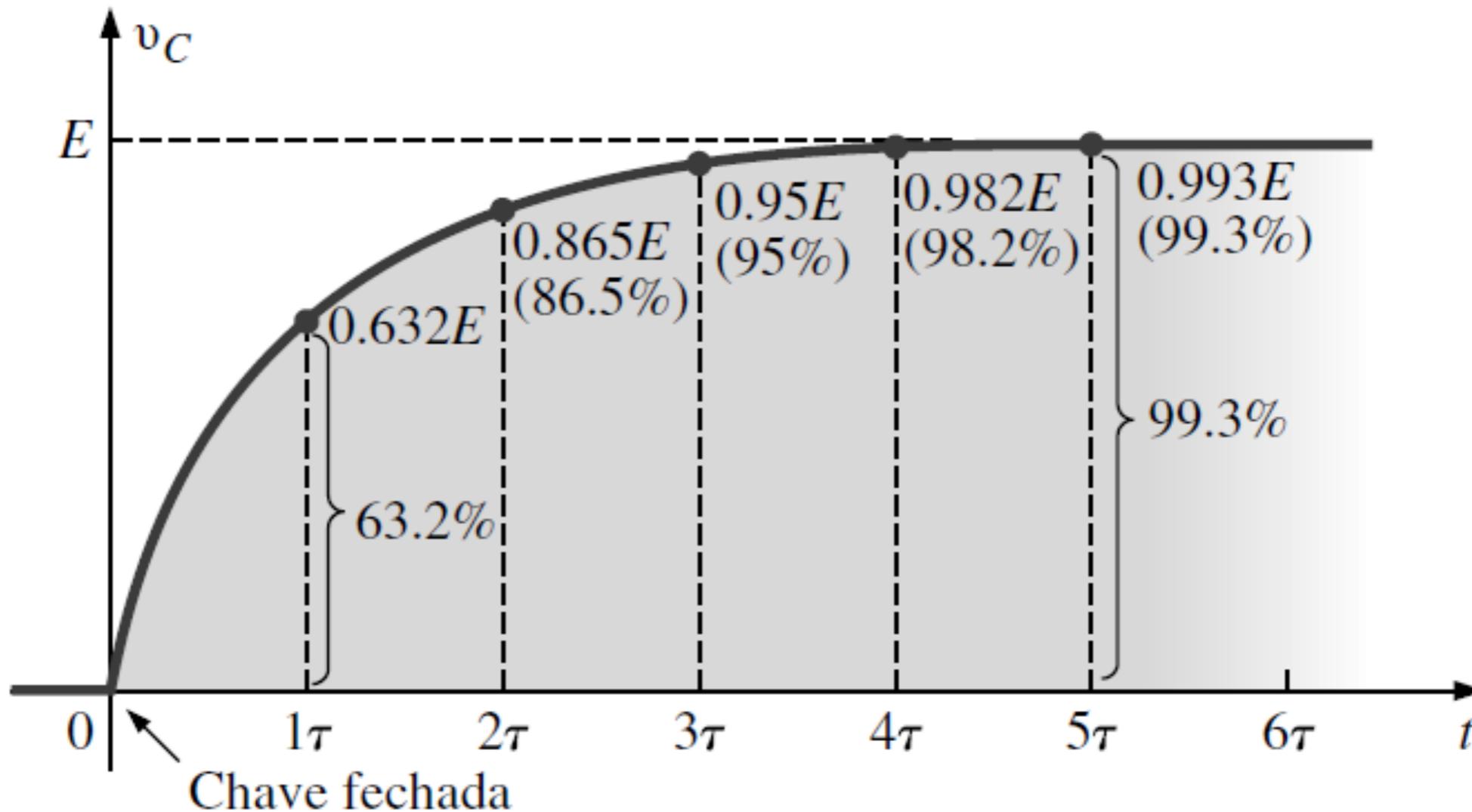


Figura 10.29 Plotando a equação $v_C = E(1 - e^{-t/\tau})$ versus o tempo.

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Fase de carga.

$$i_C = \frac{E}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

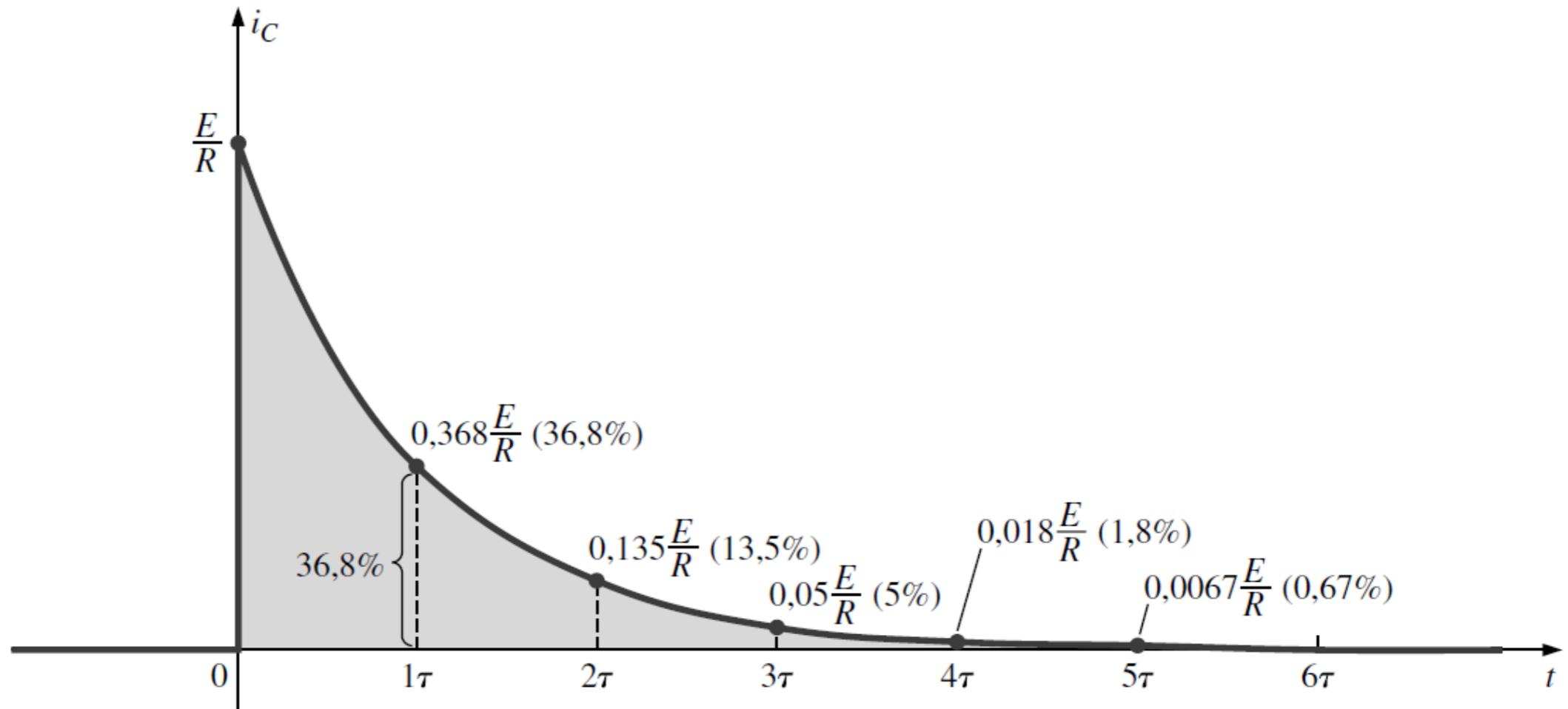


Figura 10.30 Plotando a equação $i_C = \frac{E}{R} e^{-t/\tau}$ versus o tempo (t).

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Fase de carga.

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

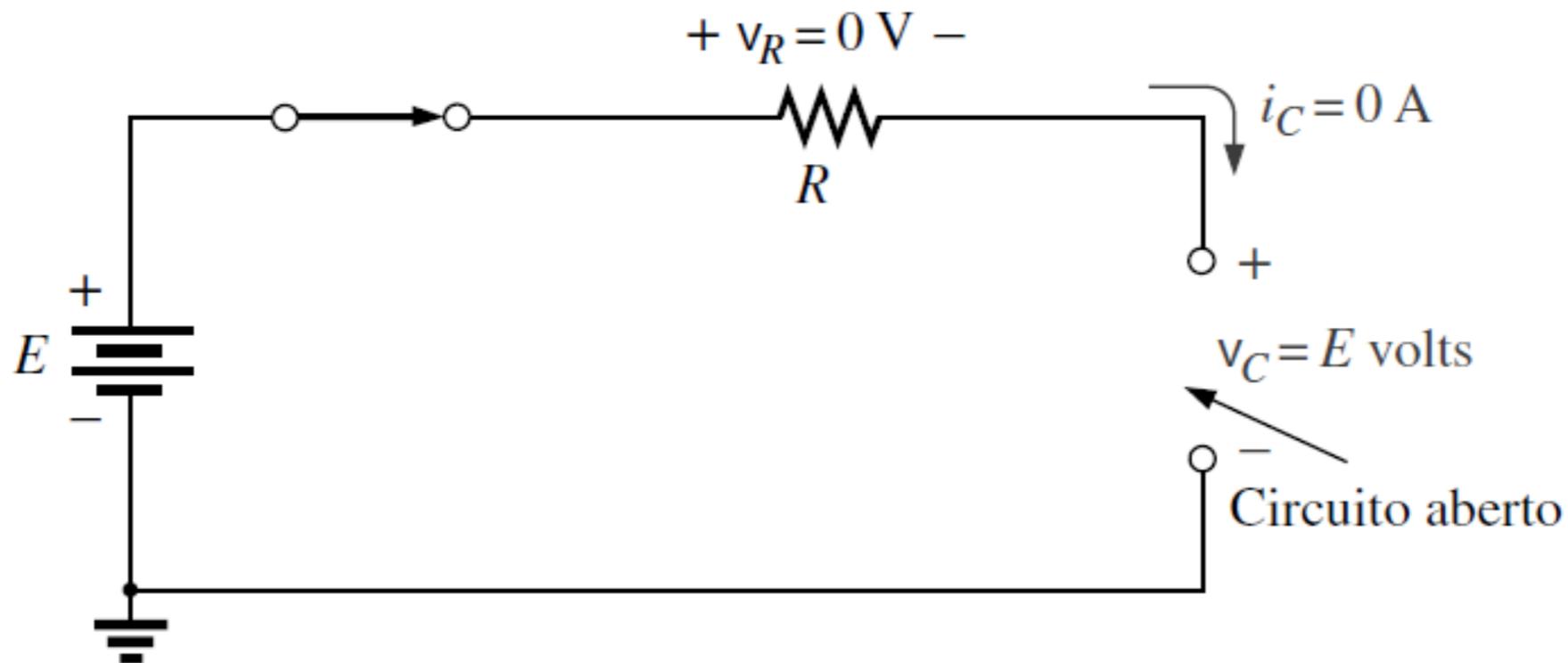


Figura 10.31 Demonstração de que um capacitor tem as características de um circuito aberto após a fase de carga ter passado.

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Fase de carga.

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.

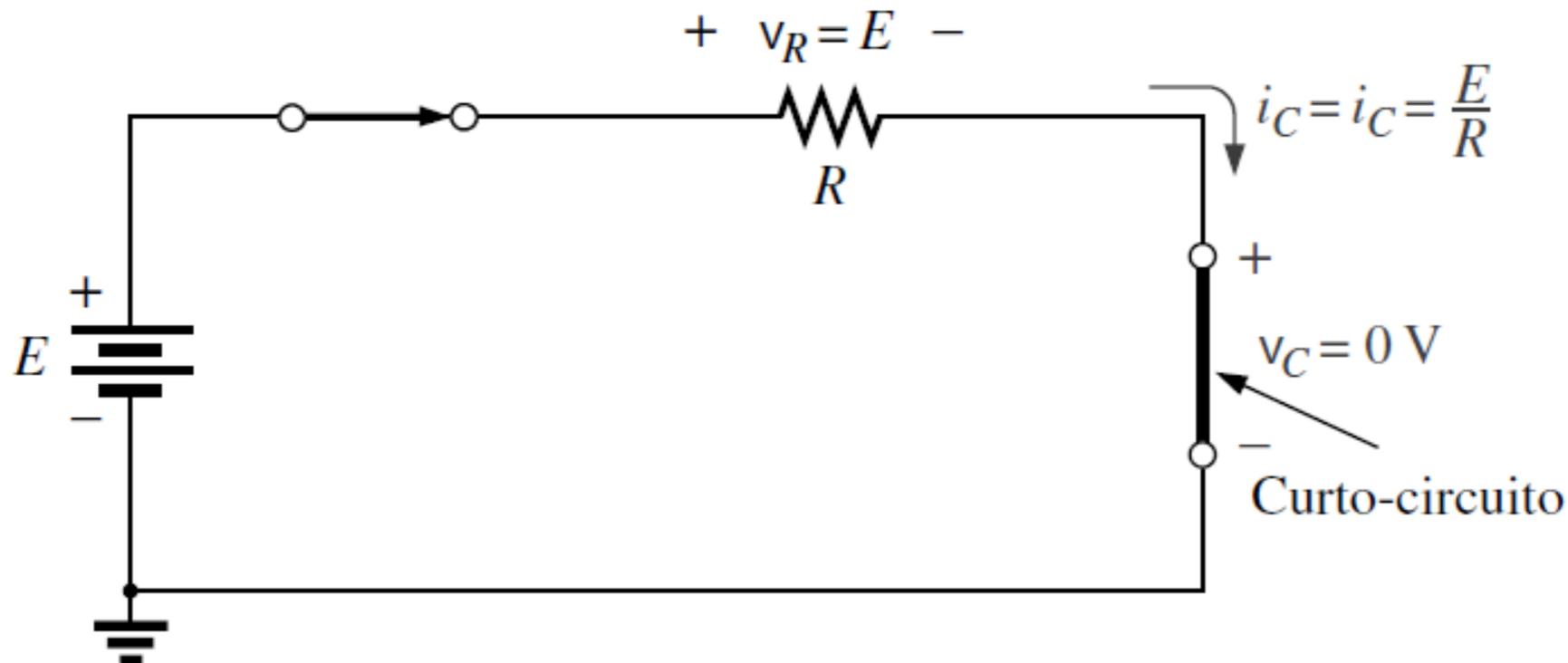


Figura 10.32 Exibição do curto-circuito equivalente para o capacitor que ocorre quando a chave é fechada pela primeira vez.

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Fase de carga.

$$i_R = i_C = \frac{E}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$v_R = R \cdot i_C = R \cdot \frac{E}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

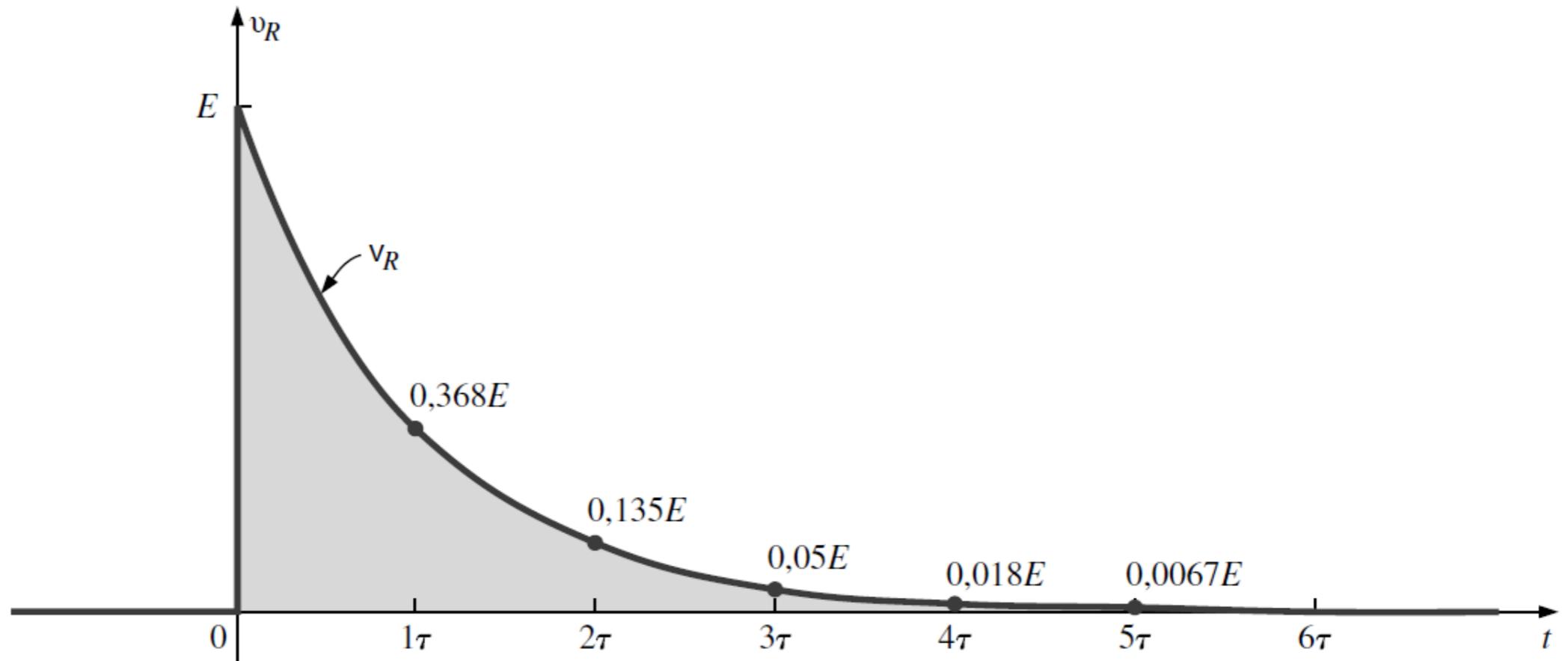


Figura 10.33 Gráfico da equação $v_R = E e^{-t/\tau}$ em função do tempo (t).

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Fase de carga.

$$\tau = R \cdot C = 8k \cdot 4\mu = 32ms$$

$$v_C = E \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = 40 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{32m}}\right) V$$

$$i_C = i_R = \frac{E}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{40}{8k} \cdot e^{-\frac{t}{32m}} = 5 \cdot e^{-\frac{t}{32m}} mA$$

$$v_R = E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = 40 \cdot e^{-\frac{t}{32m}} V$$

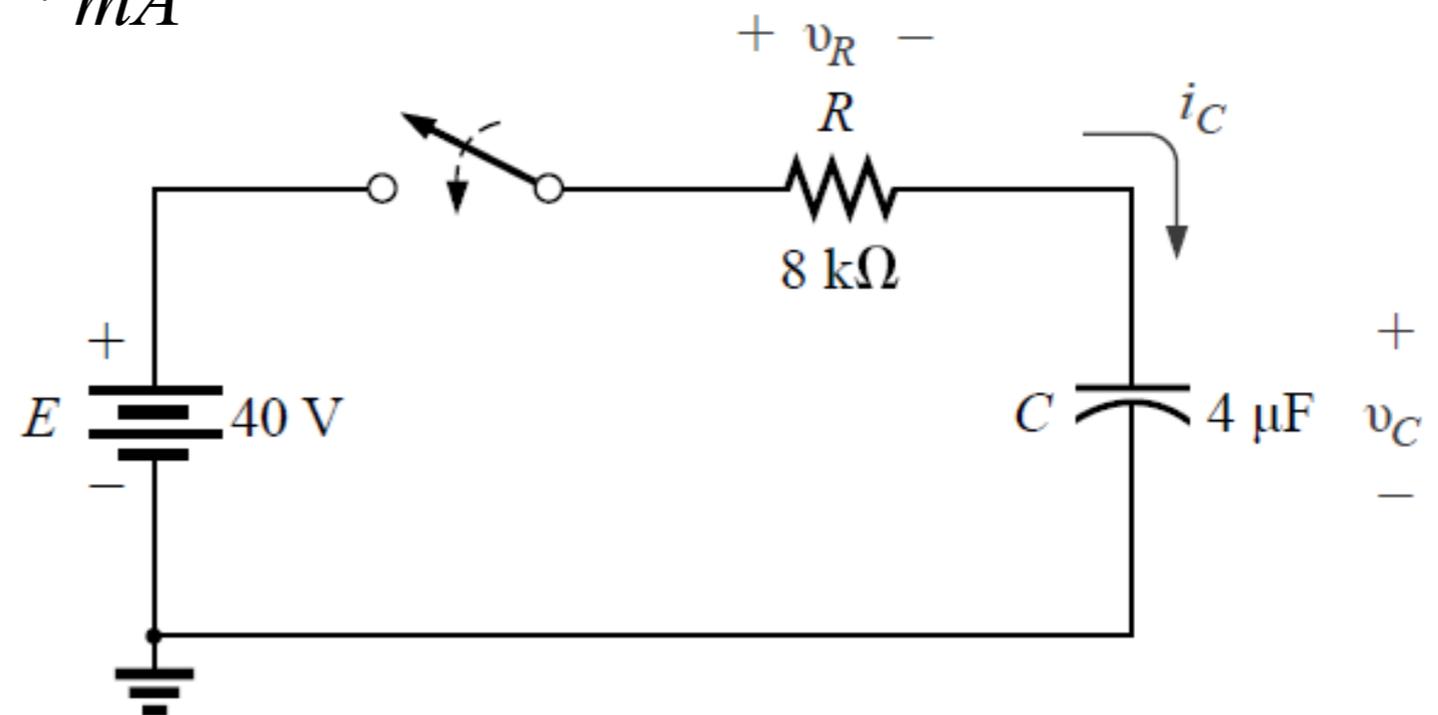


Figura 10.35 Circuito transitório para o Exemplo 10.6.

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Fase de carga.

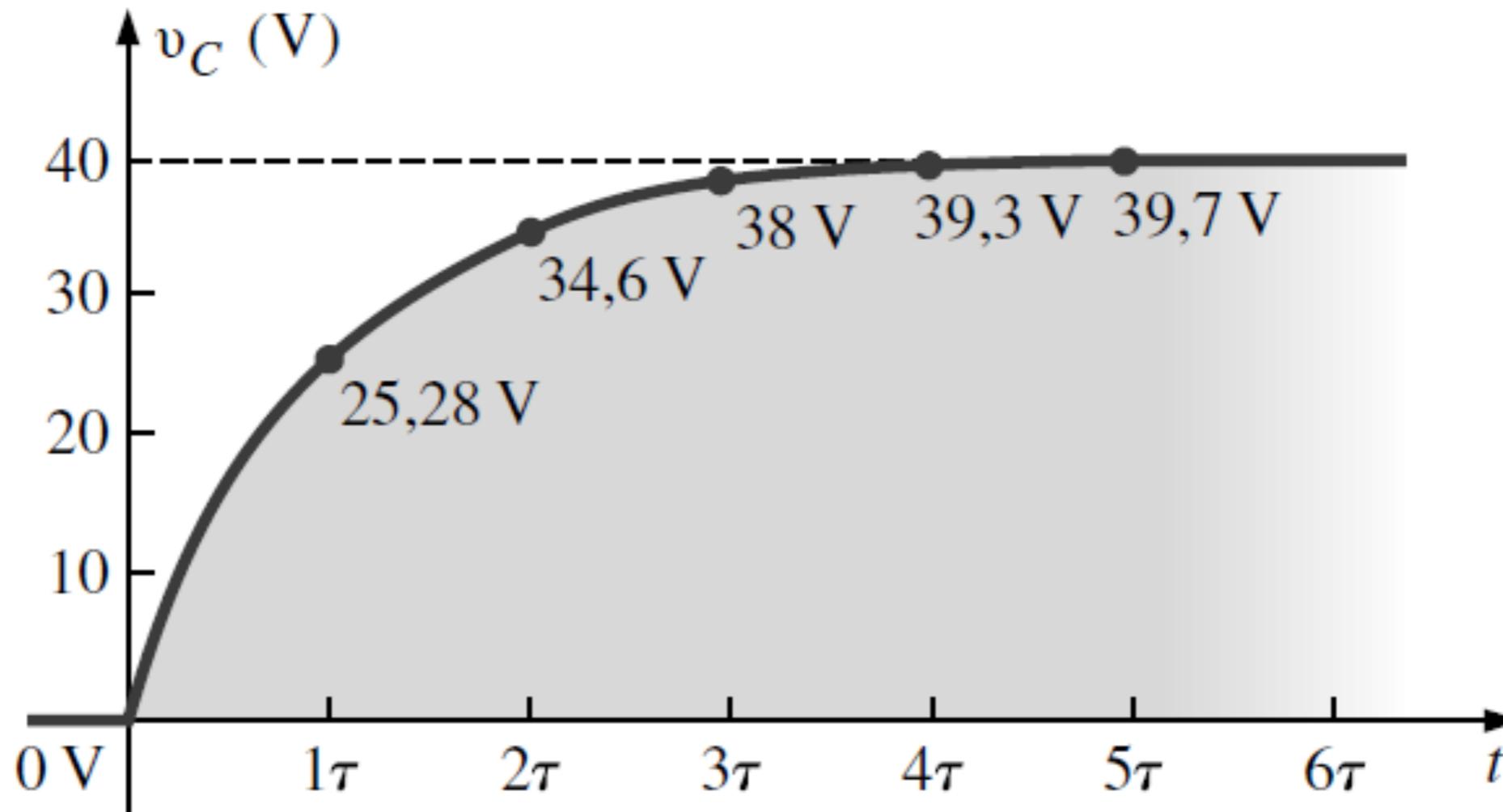


Figura 10.36 v_C em função do tempo para o circuito de carga na Figura 10.35.

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Fase de carga.

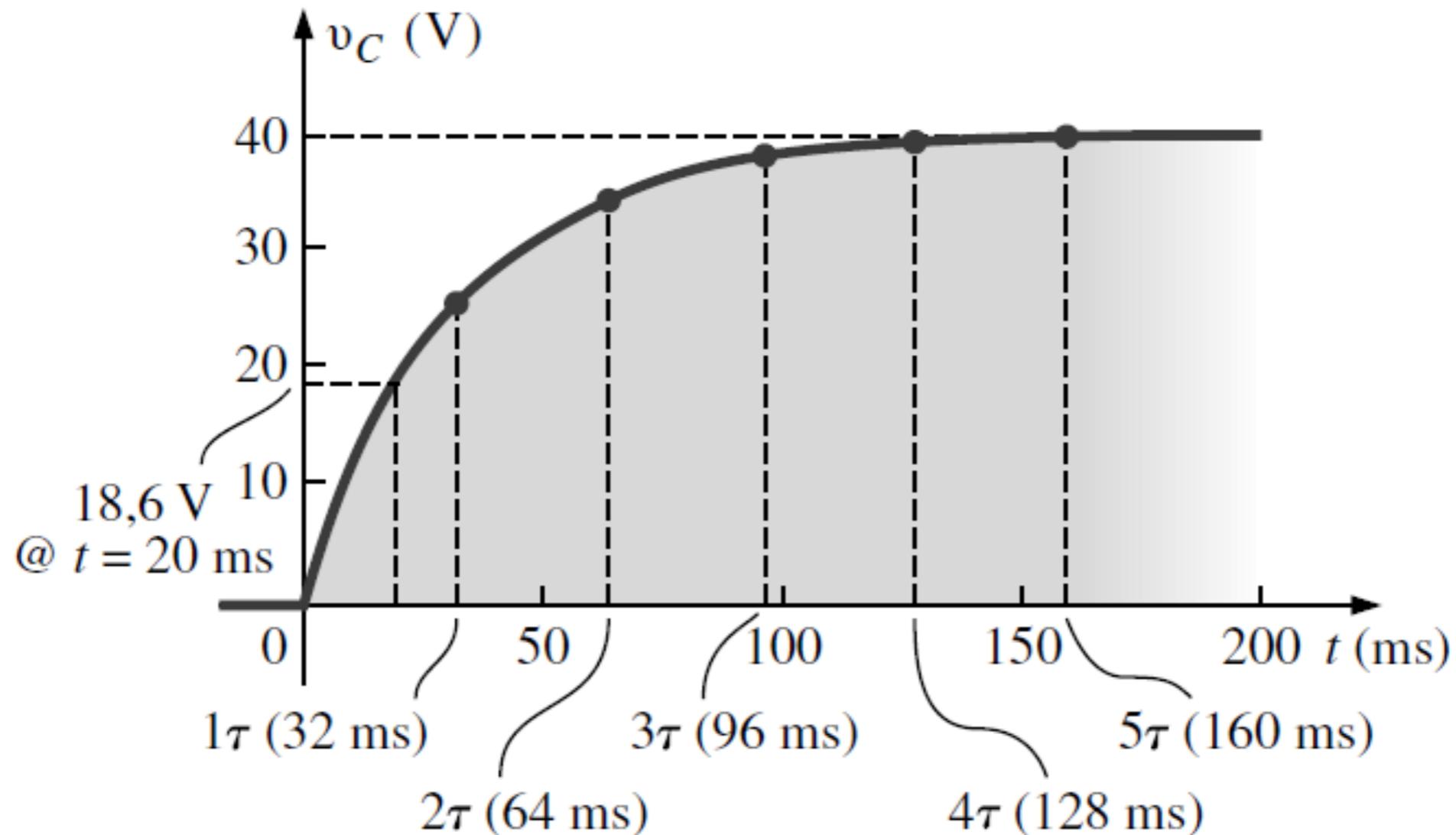
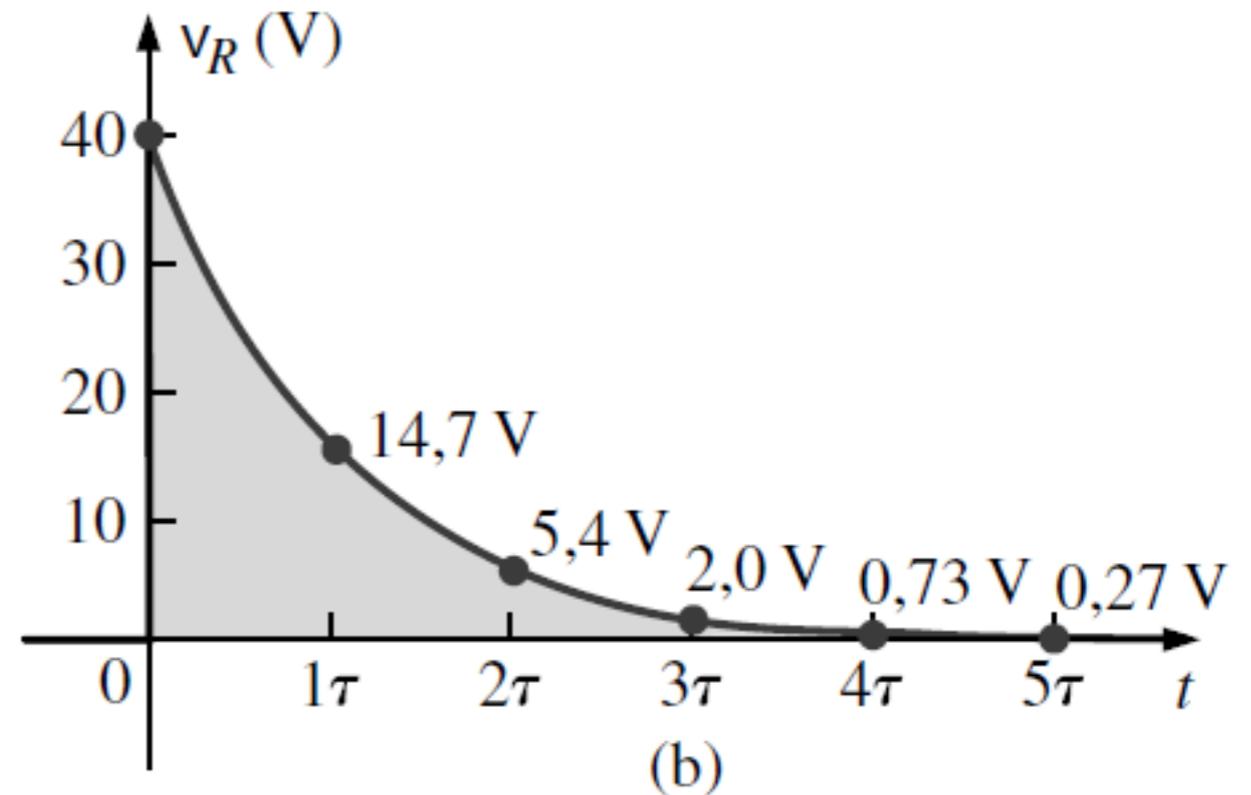
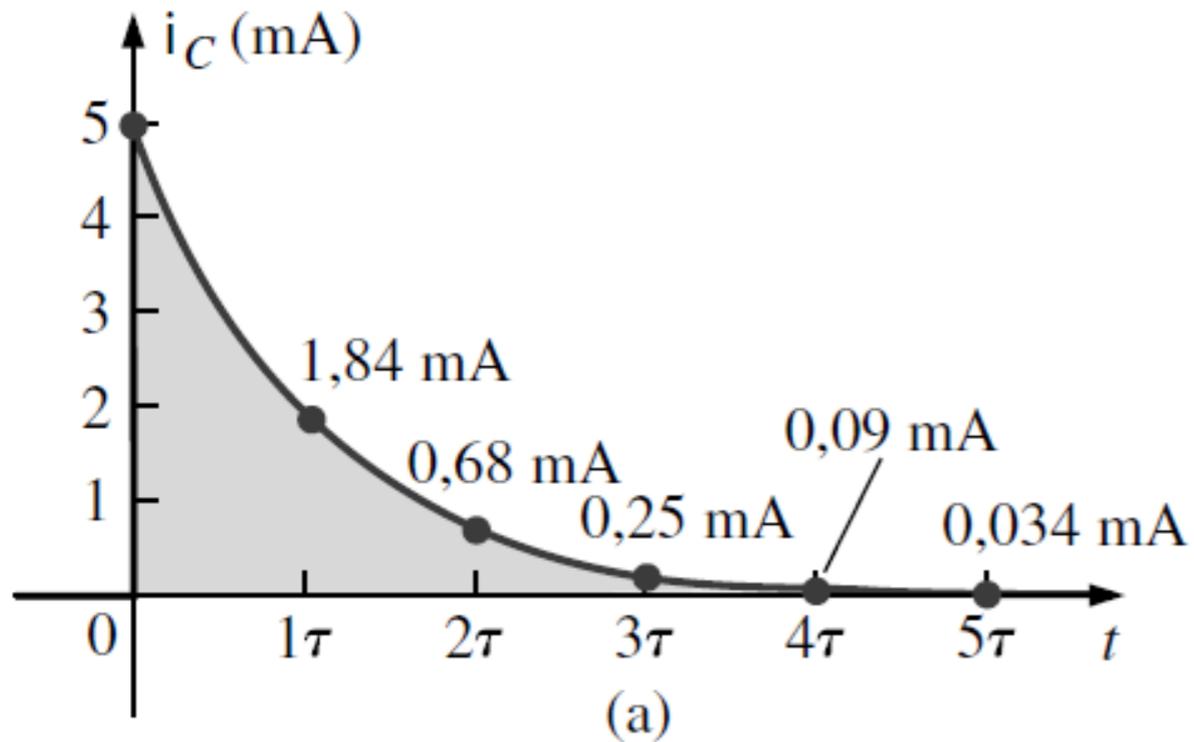


Figura 10.37 Gráfico da forma de onda na Figura 10.36 em função do tempo (t).

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Fase de carga.



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.

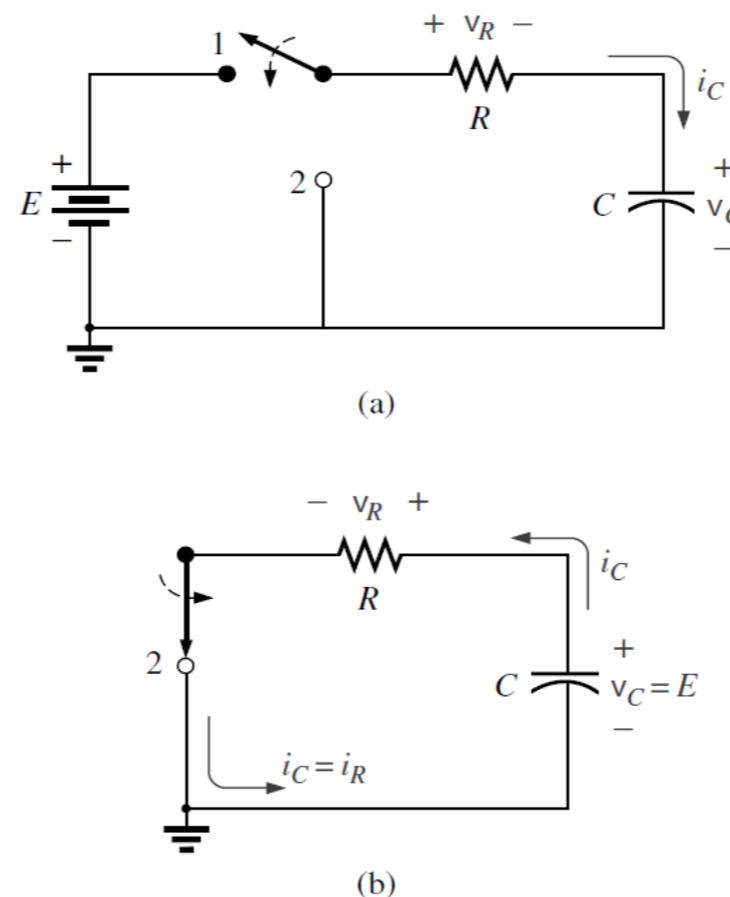


Figura 10.39 (a) Circuito de carga; (b) configuração de descarga.

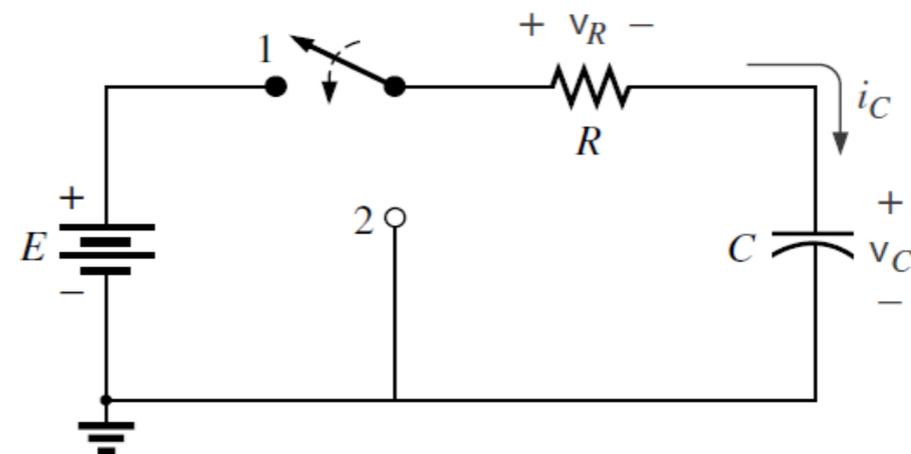
Transitórios em Circuitos Capacitivos

Fase de descarga:

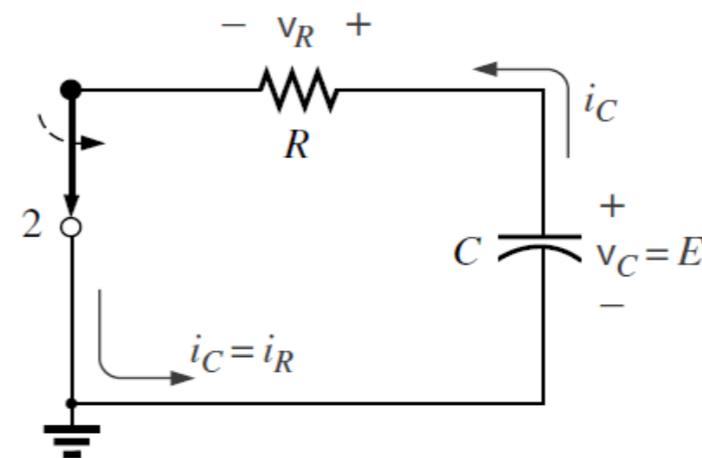
- Para a tensão através do capacitor que está diminuindo com o tempo, a expressão matemática é:

$$v_C = Ee^{-t/\tau}$$

descarga



(a)



(b)

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

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Fase de descarga.

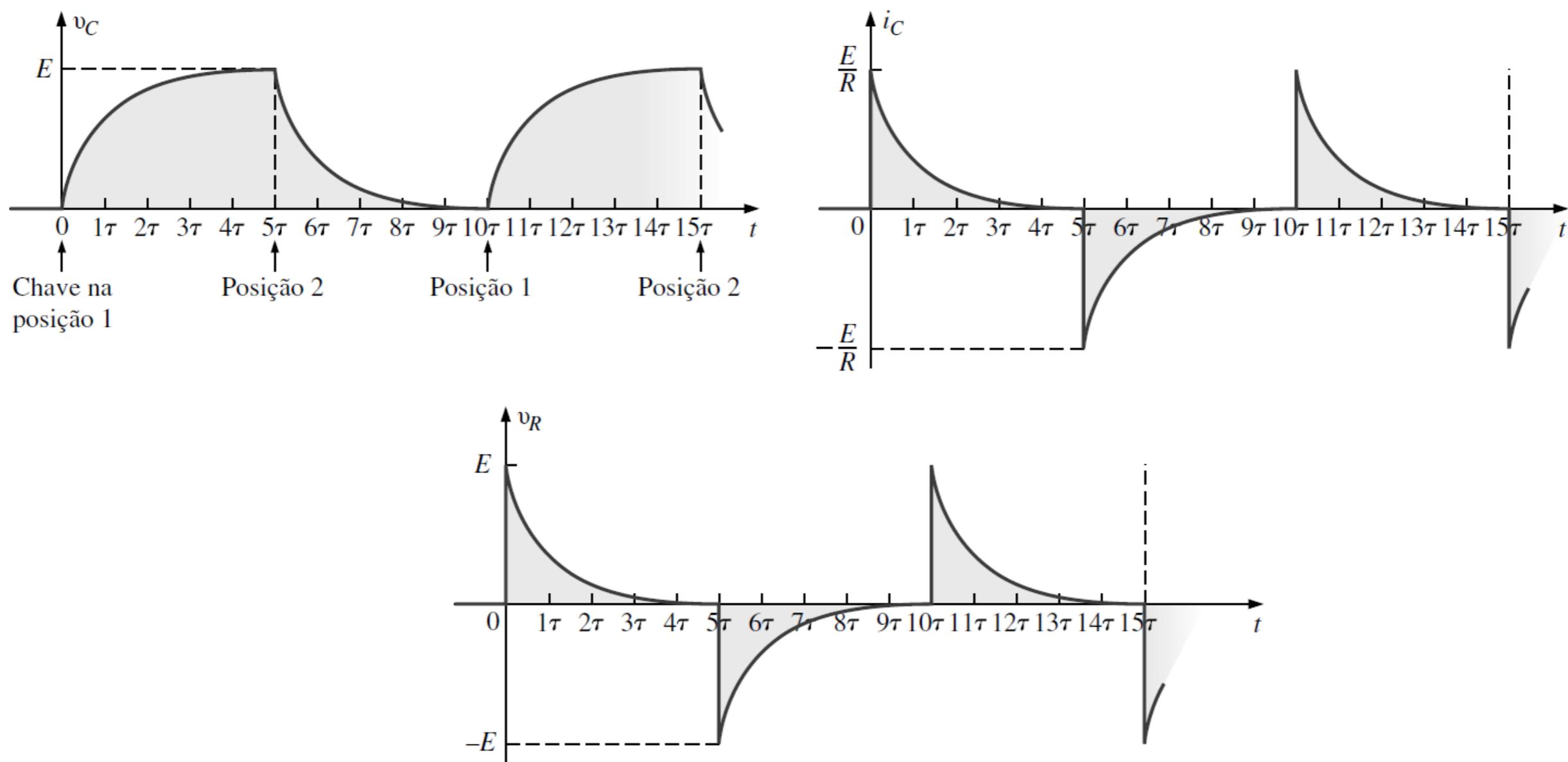


Figura 10.40 v_C , i_C e v_R para chaveamento 5τ entre contatos na Figura. 10.39(a).

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Fase de descarga.

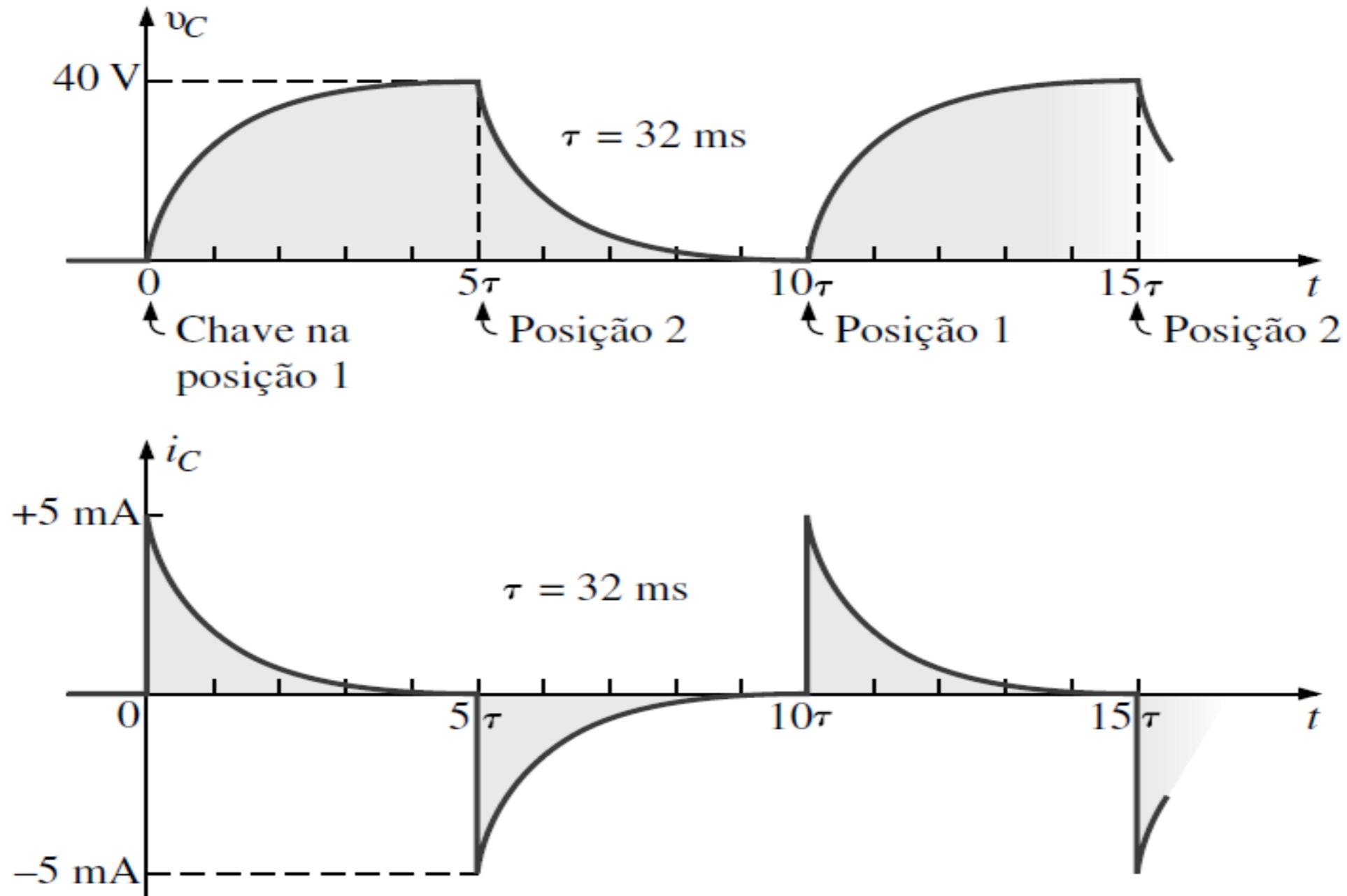
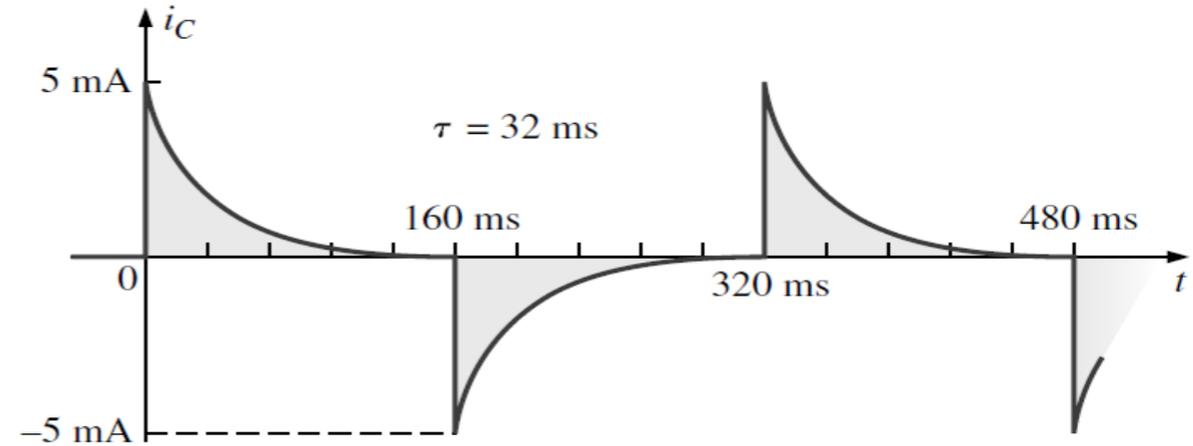
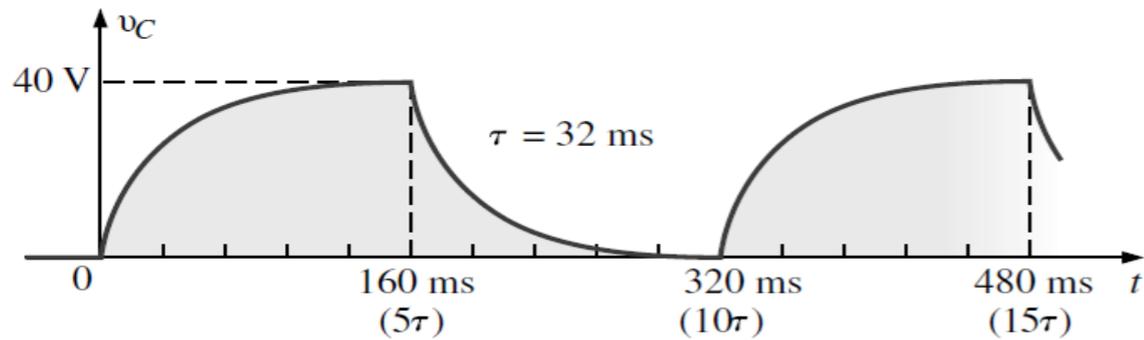


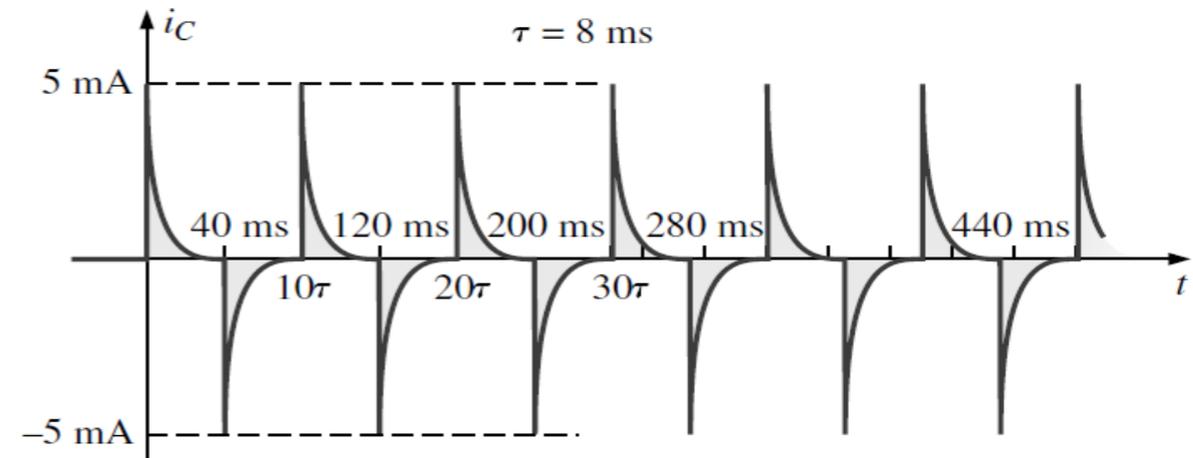
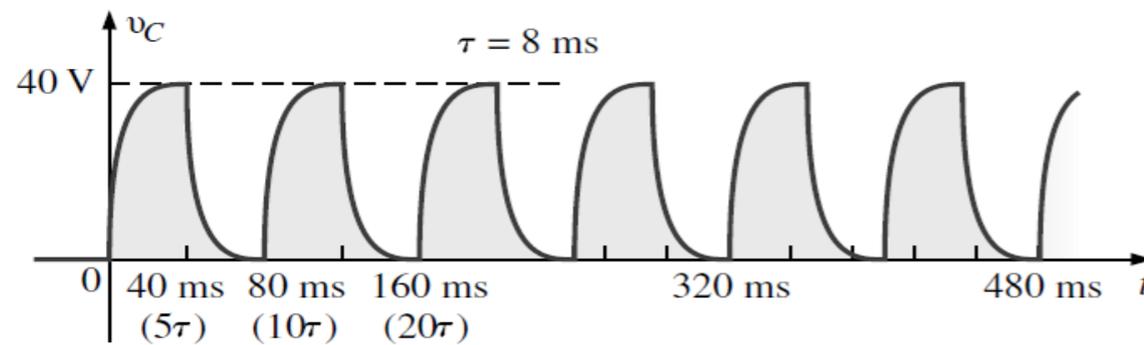
Figura 10.41 v_C e i_C para o circuito na Figura 10.39(a) com os valores no Exemplo 10.6.

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Efeito da constante de tempo (RC).



(a)



(b)

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

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Efeito da constante de tempo (RC).

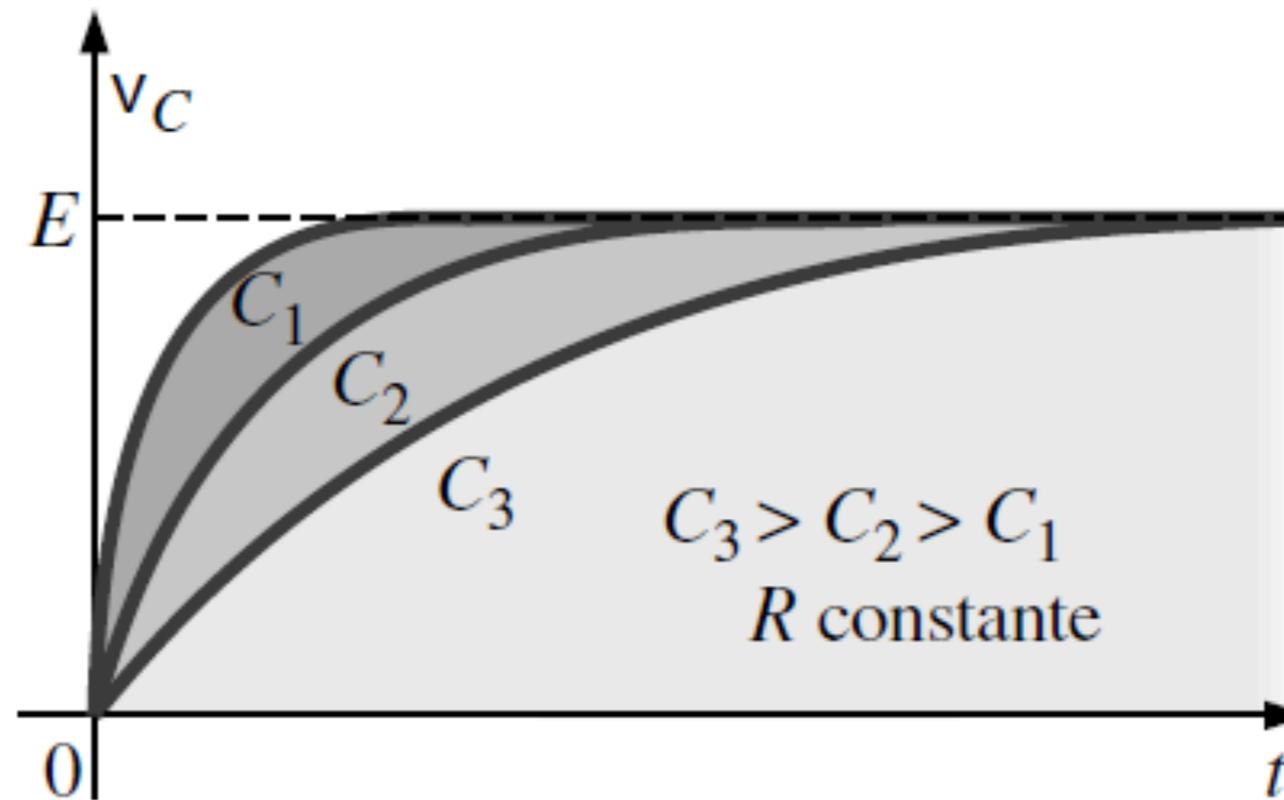


Figura 10.43 Efeito do aumento dos valores de C (com R constante) sobre a curva de carga para v_C .

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Fase de carga:

$$\tau = R_1 \cdot C = 20k \cdot 0,05\mu = 1ms$$

$$v_C = E \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = 12 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{1m}}\right) V$$

$$i_C = i_R = \frac{E}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{12}{20k} \cdot e^{-\frac{t}{1m}} = 0,6 \cdot e^{-\frac{t}{1m}} mA$$

$$v_R = E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = 12 \cdot e^{-\frac{t}{1m}} V$$

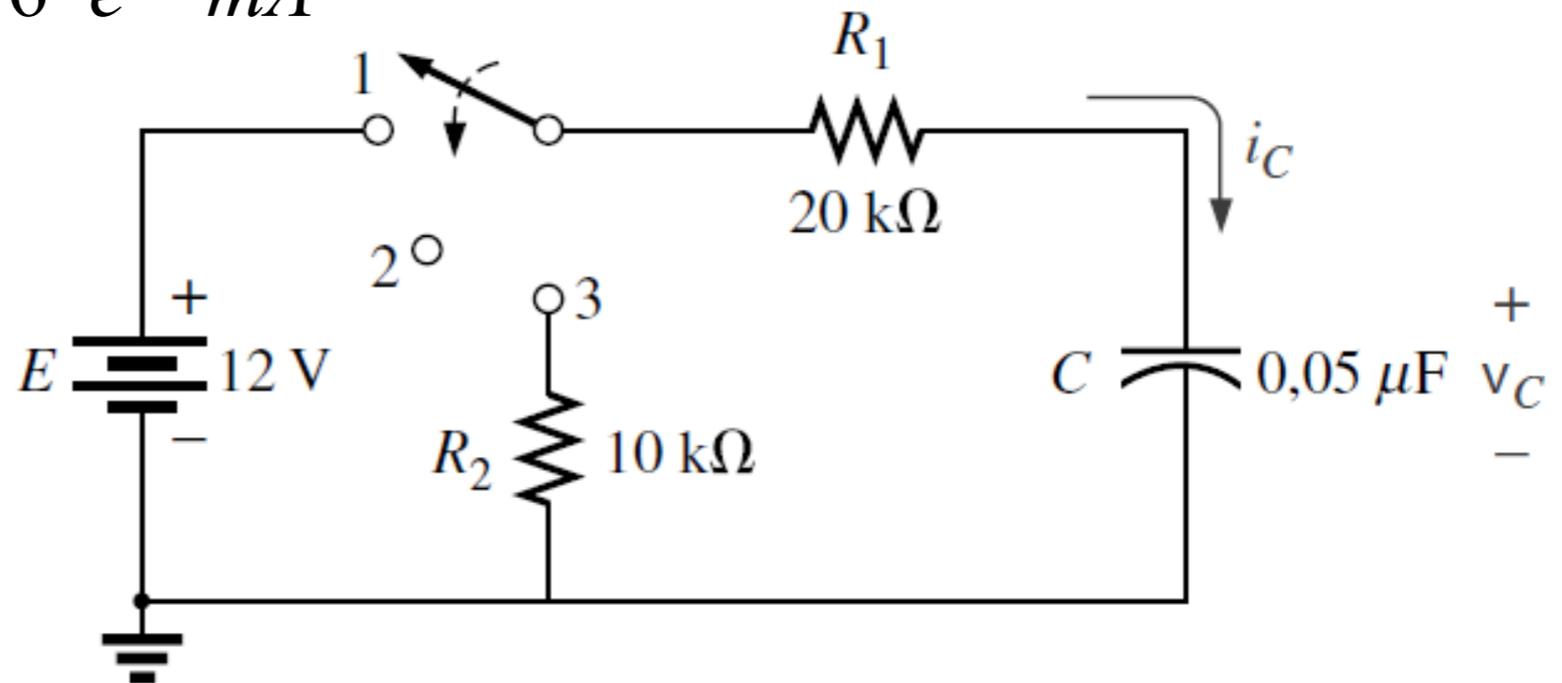


Figura 10.44 Circuito analisado no Exemplo 10.8.

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Fase de armazenamento:

$$v_C = E = 12V$$

$$i_C = 0A$$

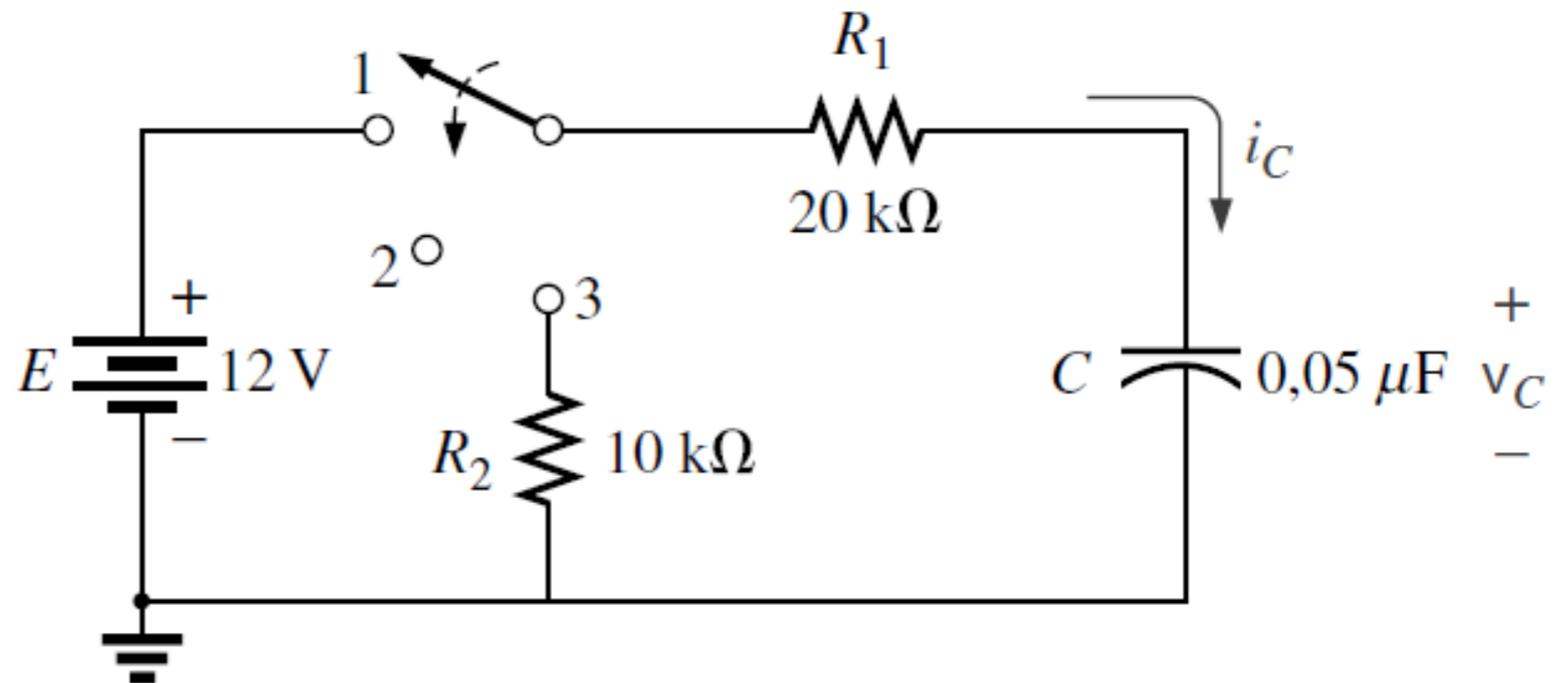


Figura 10.44 Circuito analisado no Exemplo 10.8.

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Fase de descarga:

$$\tau = (R_1 + R_2) \cdot C = (20k + 10k) \cdot 0,05\mu = 1,5ms$$

$$v_C = E \cdot e^{\frac{t}{\tau}} = 12 \cdot e^{\frac{t}{1,5m}} V$$

$$i_C = i_R = \frac{-E}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{-12}{(20k + 10k)} \cdot e^{-\frac{t}{1,5m}} = -0,4 \cdot e^{-\frac{t}{1,5m}} mA$$

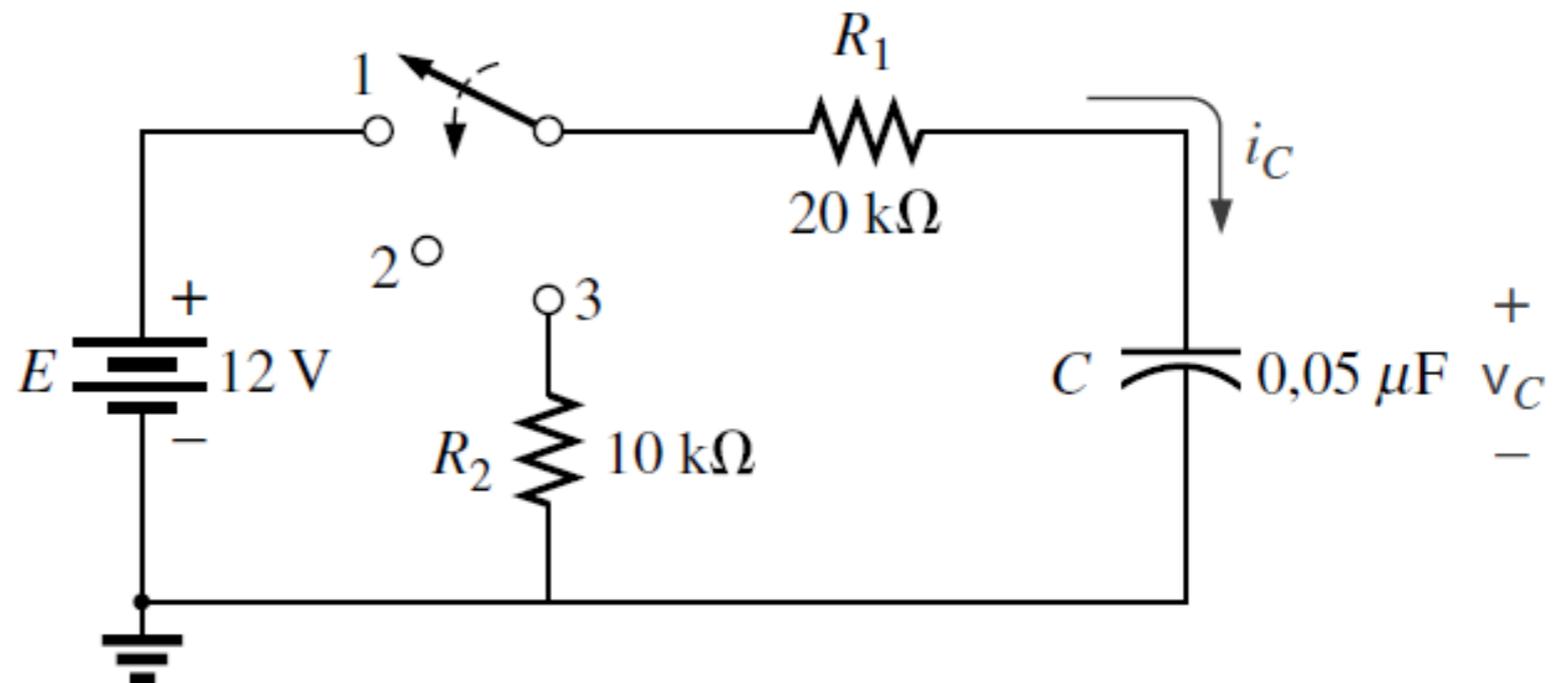


Figura 10.44 Circuito analisado no Exemplo 10.8.

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Efeito da constante de tempo (RC).

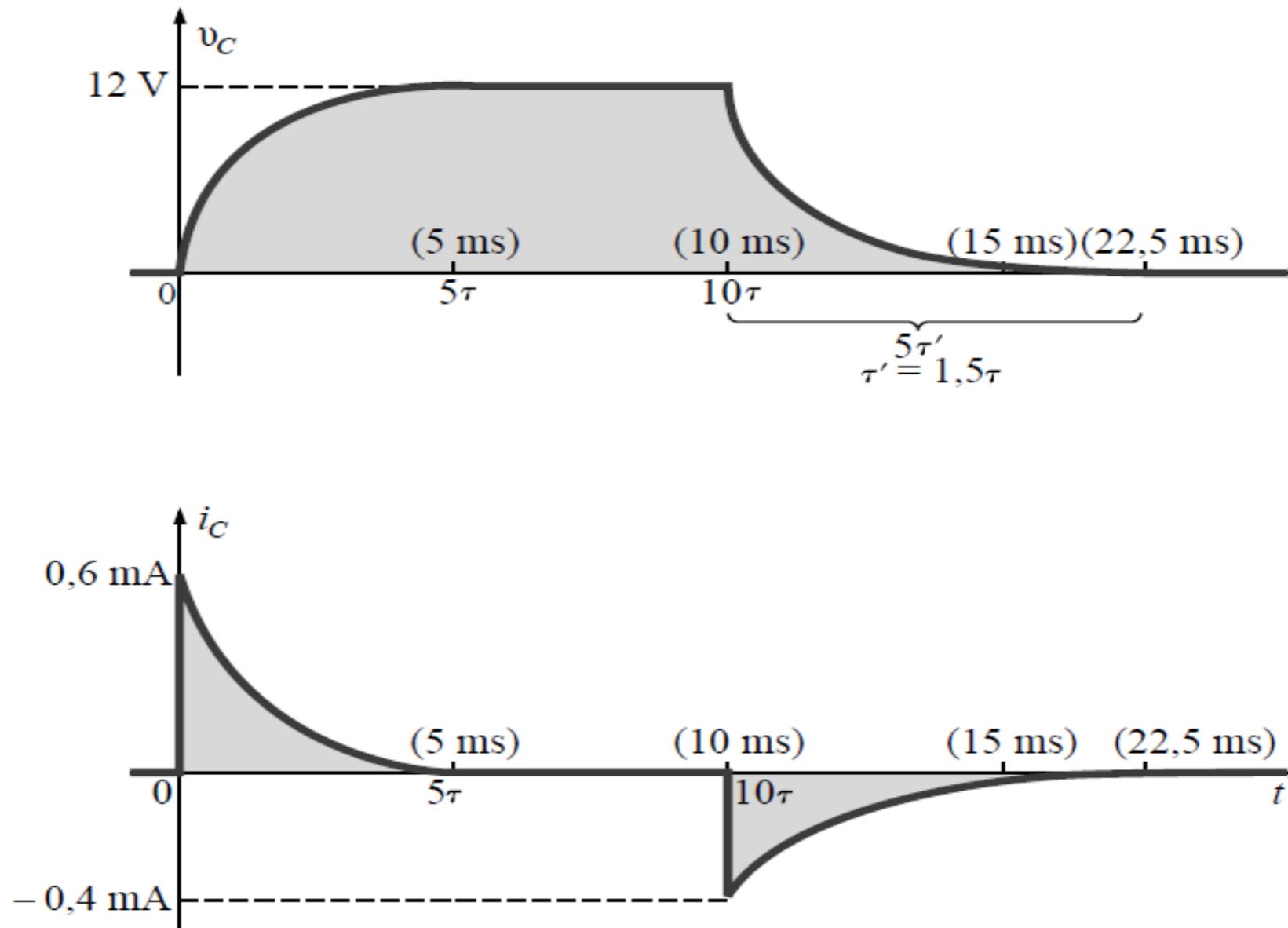


Figura 10.45 v_C e i_C para o circuito na Figura 10.44.

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Transformar a fonte de corrente em fonte de tensão.

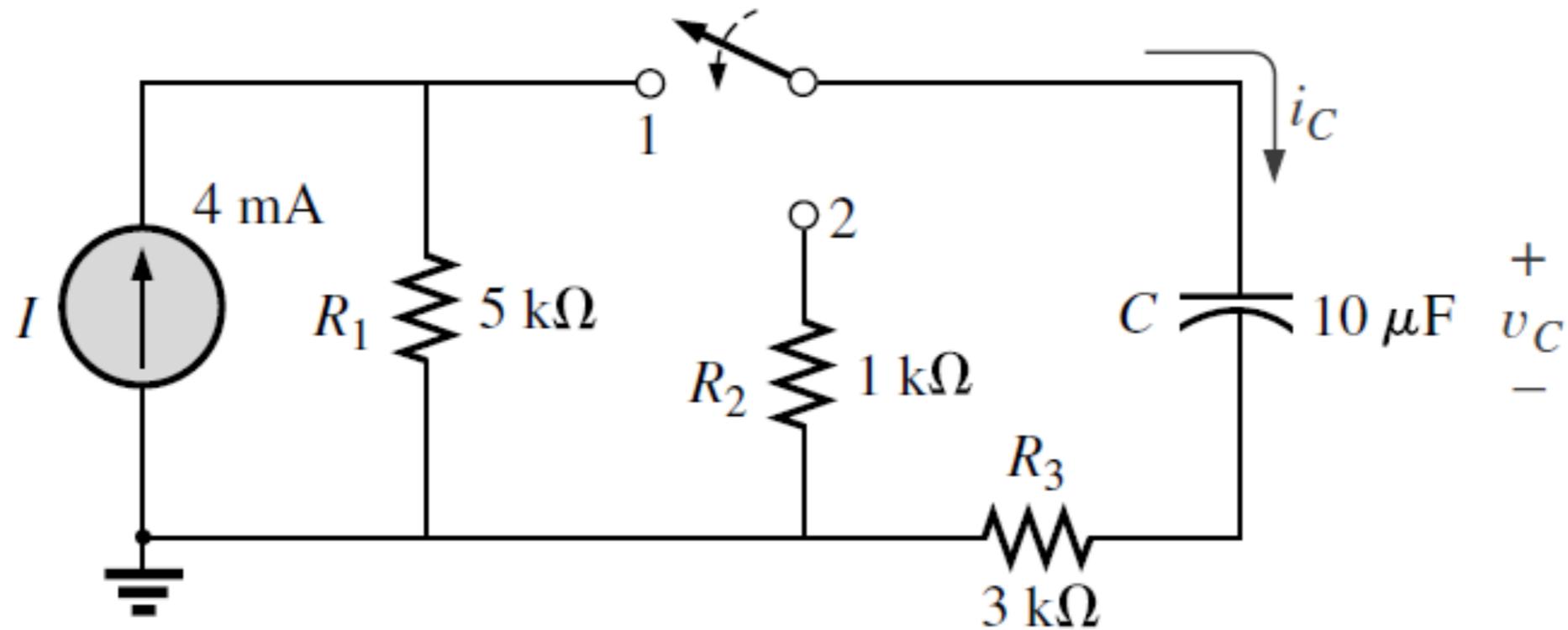


Figura 10.46 Circuito a ser analisado no Exemplo 10.9.

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Fase de carga:

$$\tau = (R_1 + R_3) \cdot C = (5k + 3k) \cdot 10\mu = 80ms$$

$$v_C = E \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = 20 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{80m}}\right) V$$

$$i_C = i_R = \frac{E}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{20}{8k} \cdot e^{-\frac{t}{80m}} = 2,5 \cdot e^{-\frac{t}{80m}} mA$$

$$v_R = E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = 20 \cdot e^{-\frac{t}{80m}} V$$

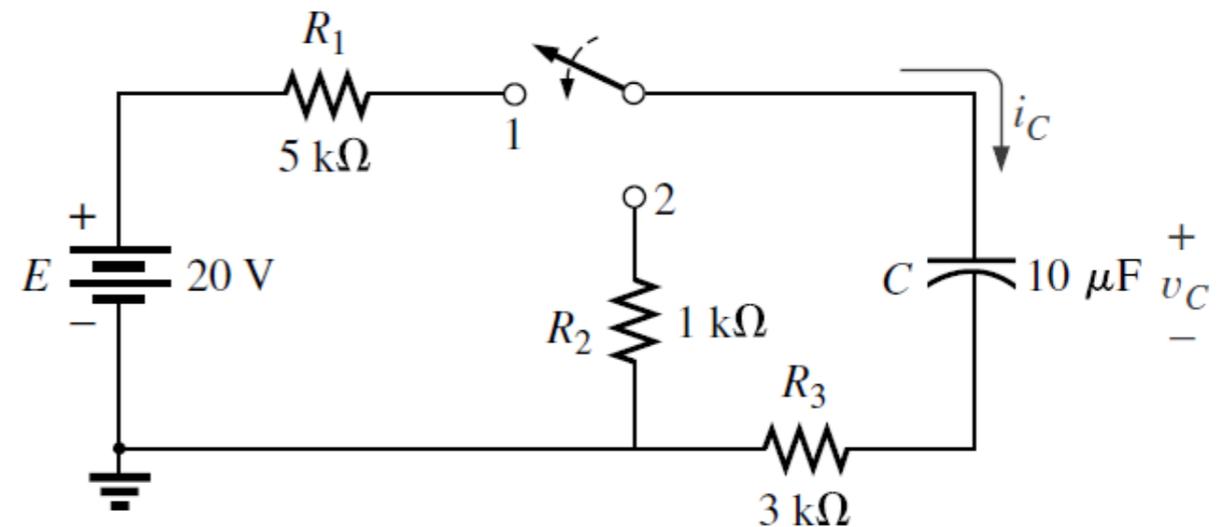


Figura 10.47 Fase de carga para o circuito na Figura. 10.46.

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Fase de descarga:

$$\tau = (R_2 + R_3) \cdot C = (1k + 3k) \cdot 10\mu = 40ms$$

$$v_C = E \cdot e^{\frac{t}{\tau}} = 20 \cdot e^{\frac{t}{40m}} V$$

$$i_C = i_R = \frac{-E}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{-20}{(1k + 3k)} \cdot e^{-\frac{t}{40m}} = -5 \cdot e^{-\frac{t}{40m}} mA$$

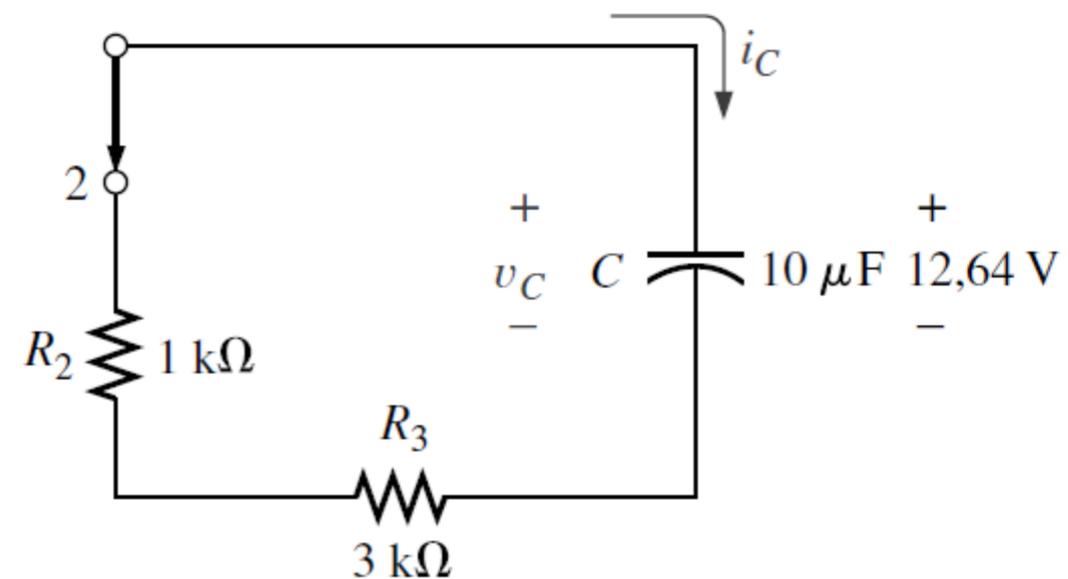


Figura 10.48 Circuito na Figura 10.47 quando a chave é movida para a posição 2 em $t = 1t_1$.

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Fase de carga \rightarrow tensão no capacitor em 1τ :

$$V_C = E \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = 20 \cdot \left(1 - e^{-\frac{80m}{80m}}\right) = 20 \cdot (1 - e^{-1}) = 12,64V$$

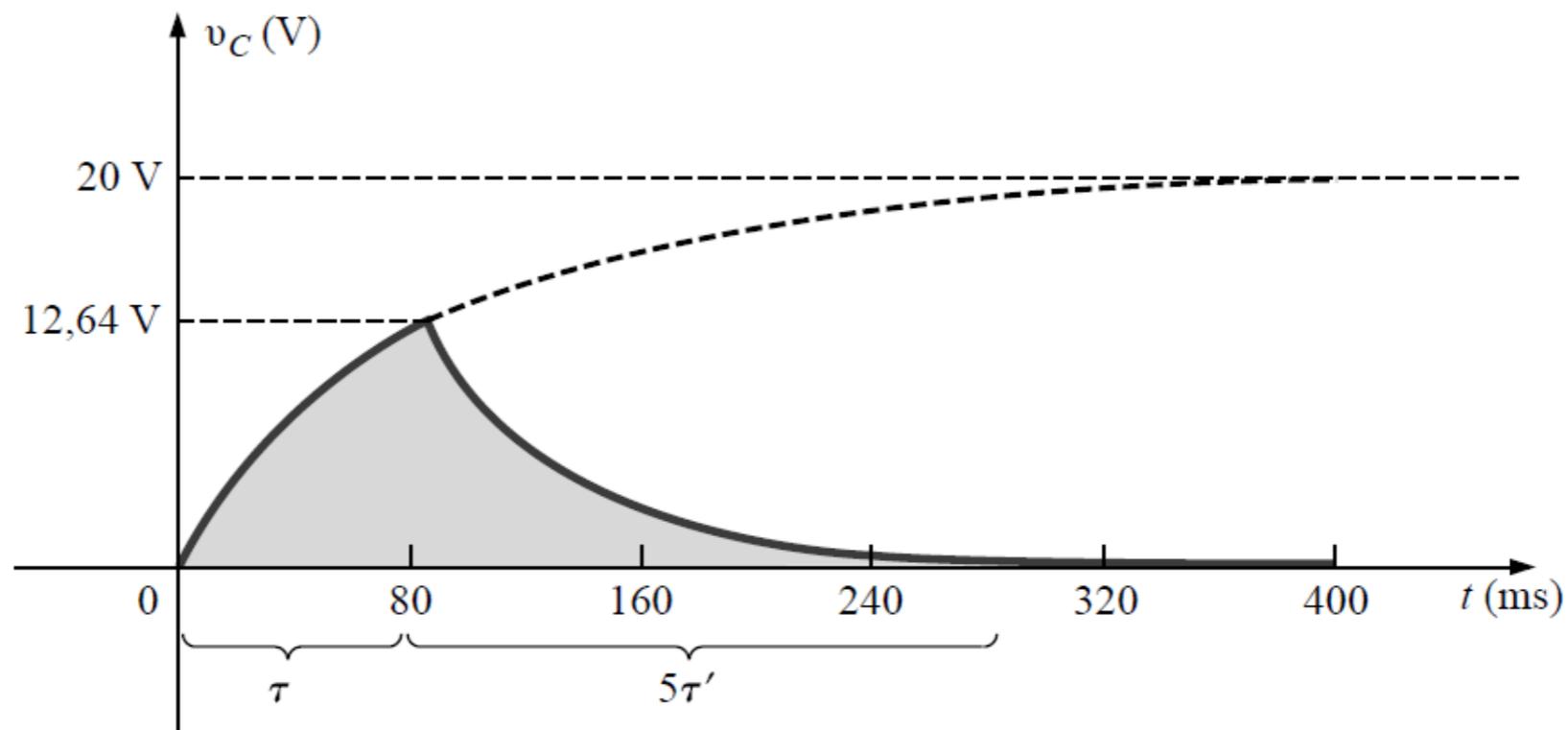


Figura 10.49 v_C para o circuito na Figura 10.47.

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Fase de descarga \rightarrow corrente no capacitor após 1τ :

$$V_C(\tau) = 12,64V$$

$$i_C = -\frac{V_C(\tau)}{R_2 + R_3} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = -\frac{12,64}{1k + 3k} \cdot e^{-\frac{t}{40m}} = -3,16 \cdot e^{-\frac{t}{40m}} \text{ mA}$$

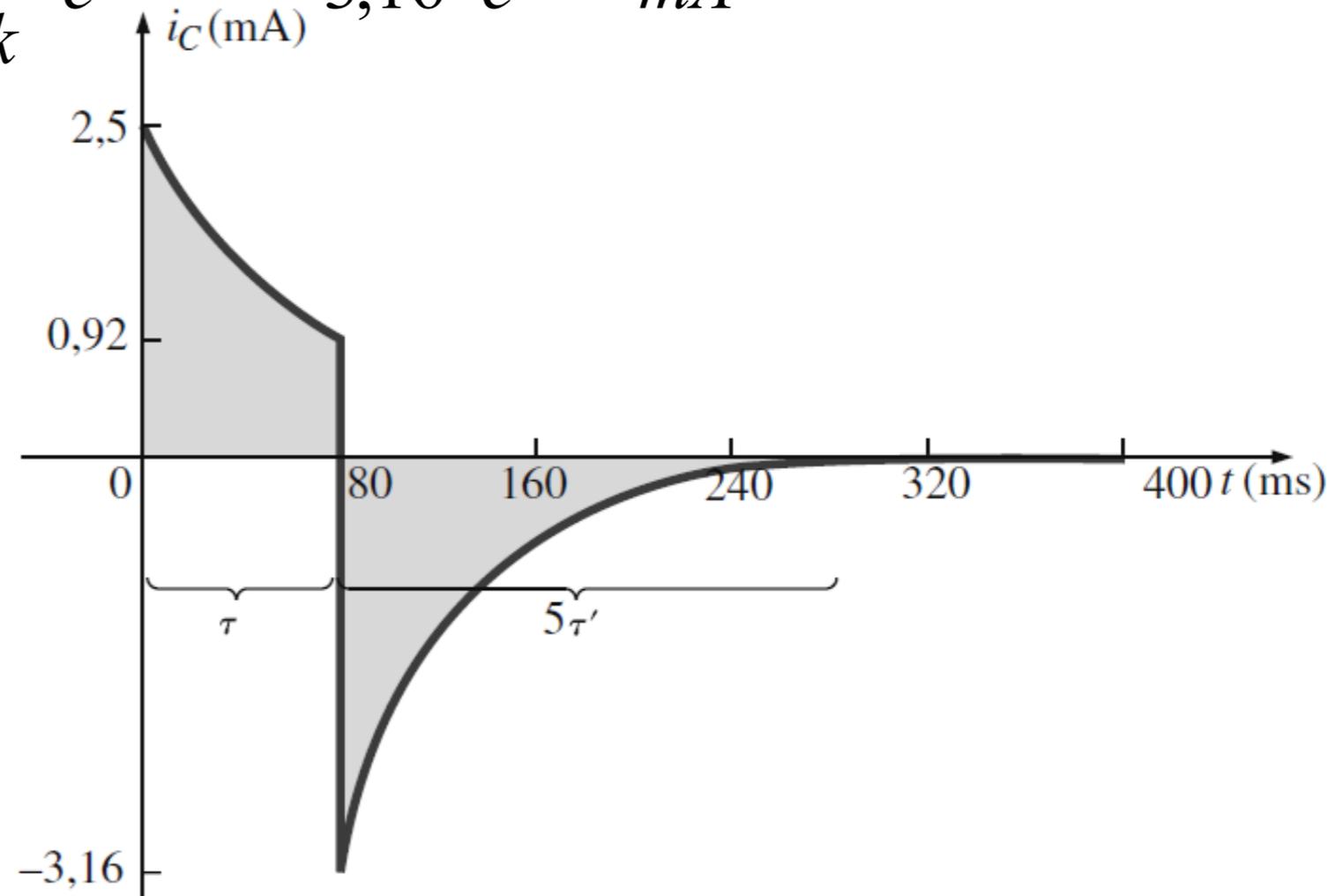


Figura 10.50 i_C para o circuito na Figura 10.47.

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Condições iniciais:

- A tensão entre os terminais do capacitor nesse instante é chamada de valor inicial, como mostra a forma de onda geral vista na figura abaixo.

$$v_C = V_f + (V_i - V_f) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

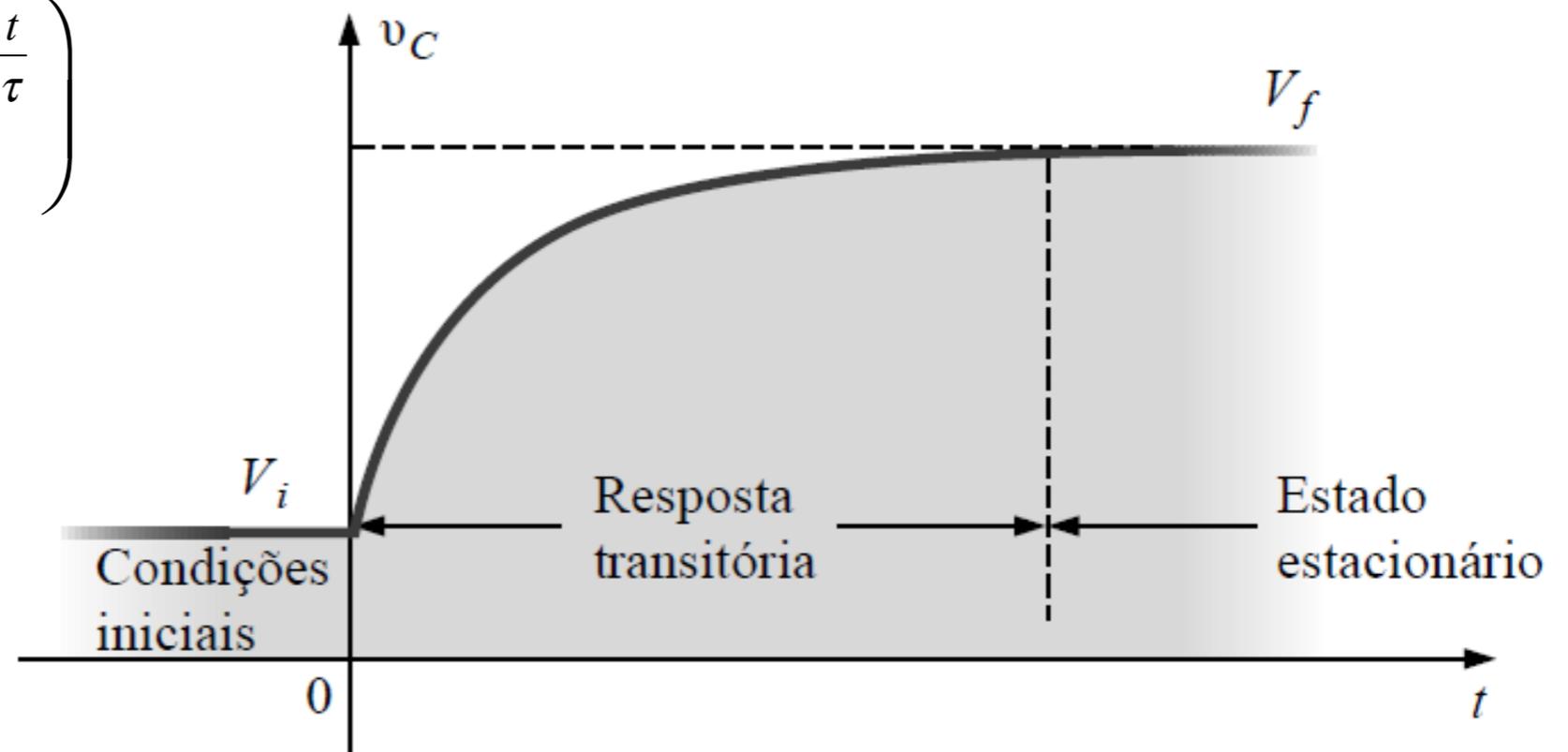


Figura 10.51 Regiões associadas a uma resposta transitória.

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Fase de carga:

$$V_i = 4V \text{ e } V_f = 24V$$

$$\tau = (R_1 + R_2) \cdot C = (2,2k + 1,2k) \cdot 3,3\mu = 11,22ms$$

$$v_C = V_f + (V_i - V_f) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = 24 + (4 - 24) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{11,22m}}\right)$$

$$I_{max} = \frac{E - V_C}{R_1 + R_2} = \frac{24 - 4}{2,2k + 1,2k} = 5,88mA$$

$$i_C = I_{max} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = 5,88 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} mA$$

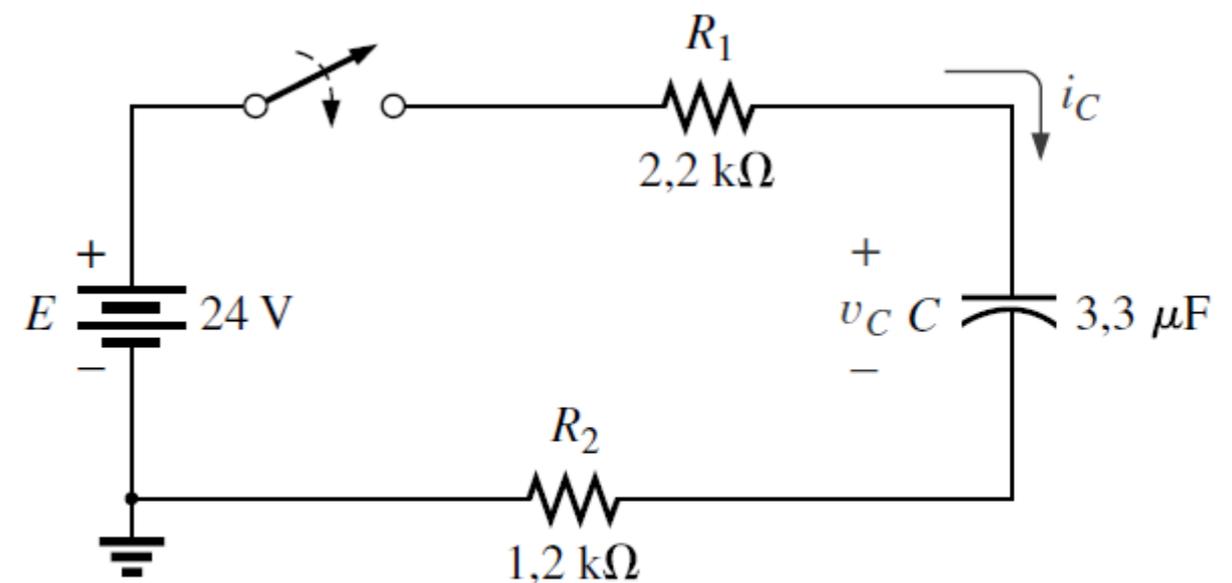


Figura 10.52 Exemplo 10.10.

Transitórios em Circuitos Capacitivos

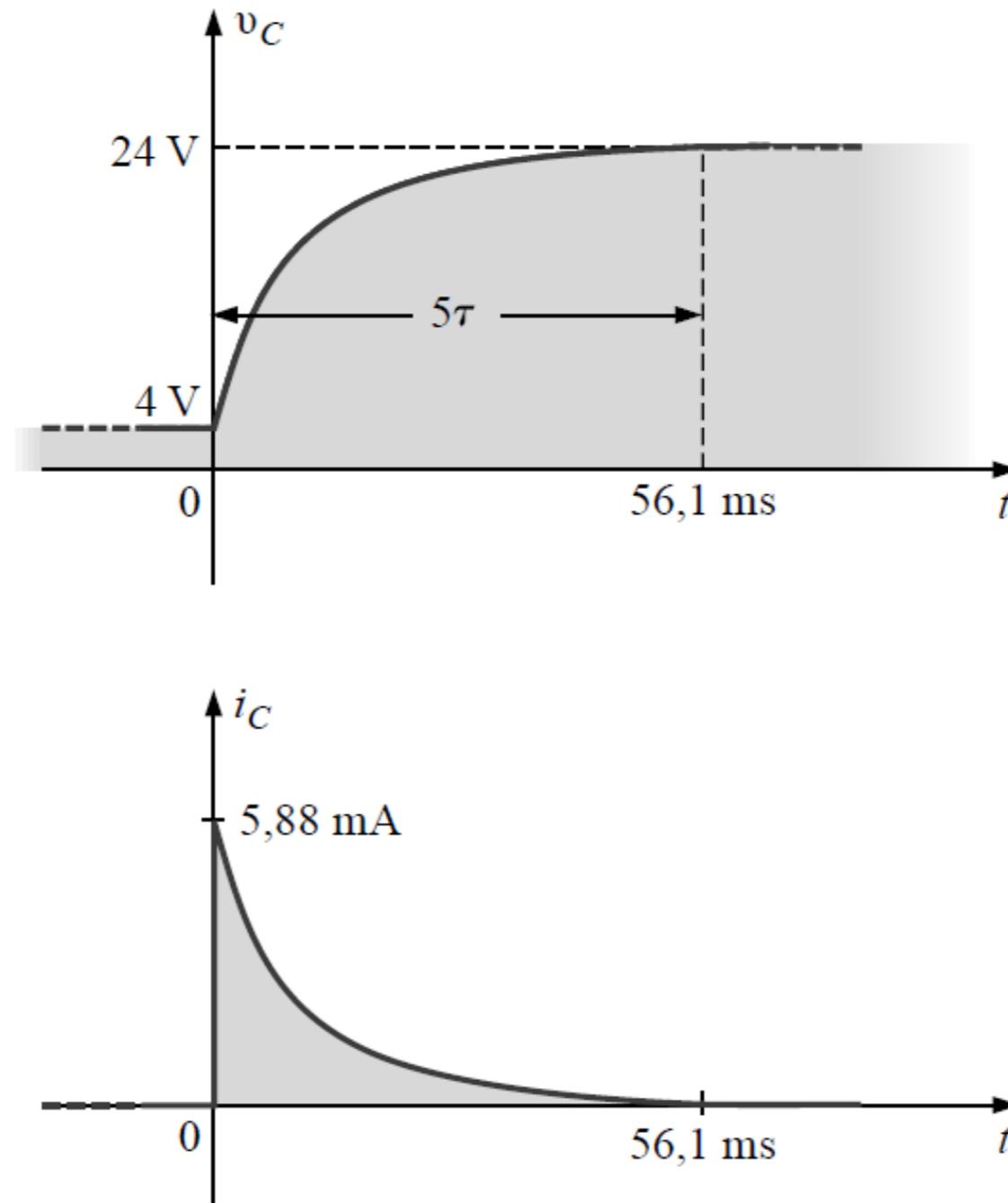


Figura 10.53 v_C e i_C para o circuito mostrado na Figura 10.52.

Transitórios em Circuitos Capacitivos

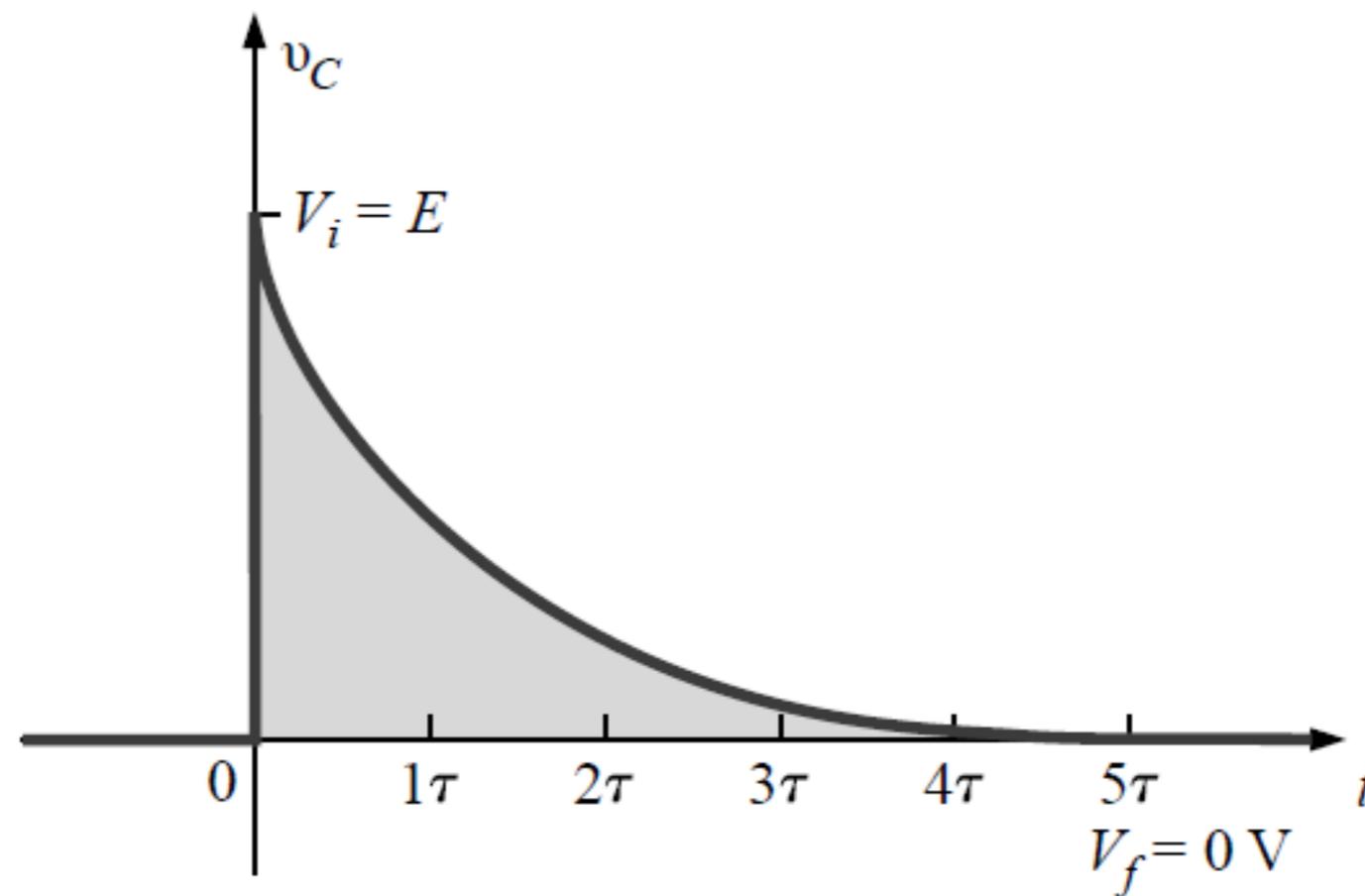


Figura 10.54 Definição dos parâmetros na Equação 10.21 para a fase de descarga.

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Simplificação do circuito usando equivalente de Thévenin:

- Surgirão situações em que o circuito não terá a forma simples vista na figura abaixo.
- Então, será necessário primeiro determinar o circuito equivalente de Thévenin do circuito externo ao capacitor.

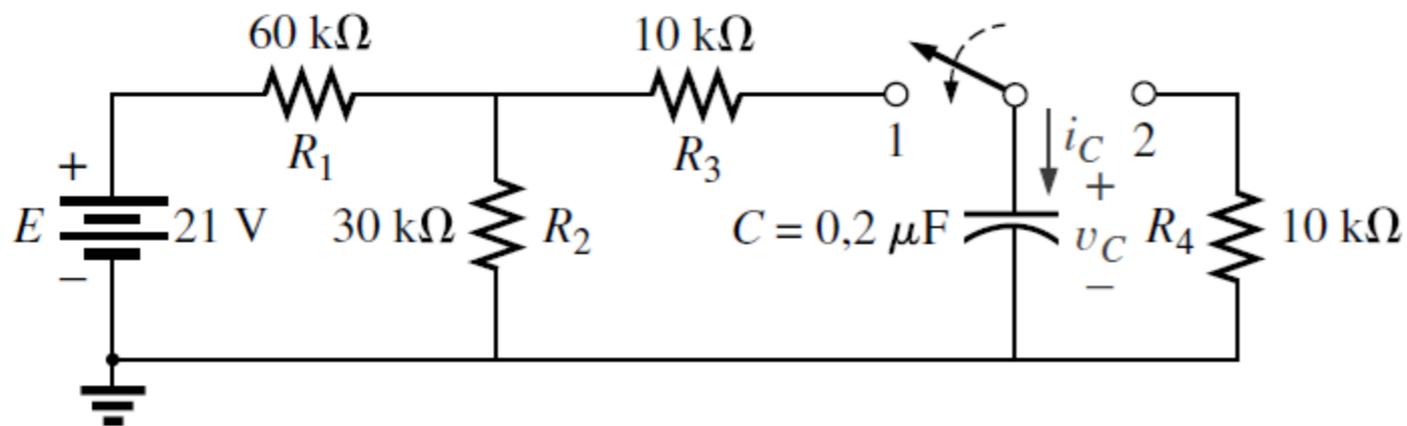


Figura 10.56 Exemplo 10.11.

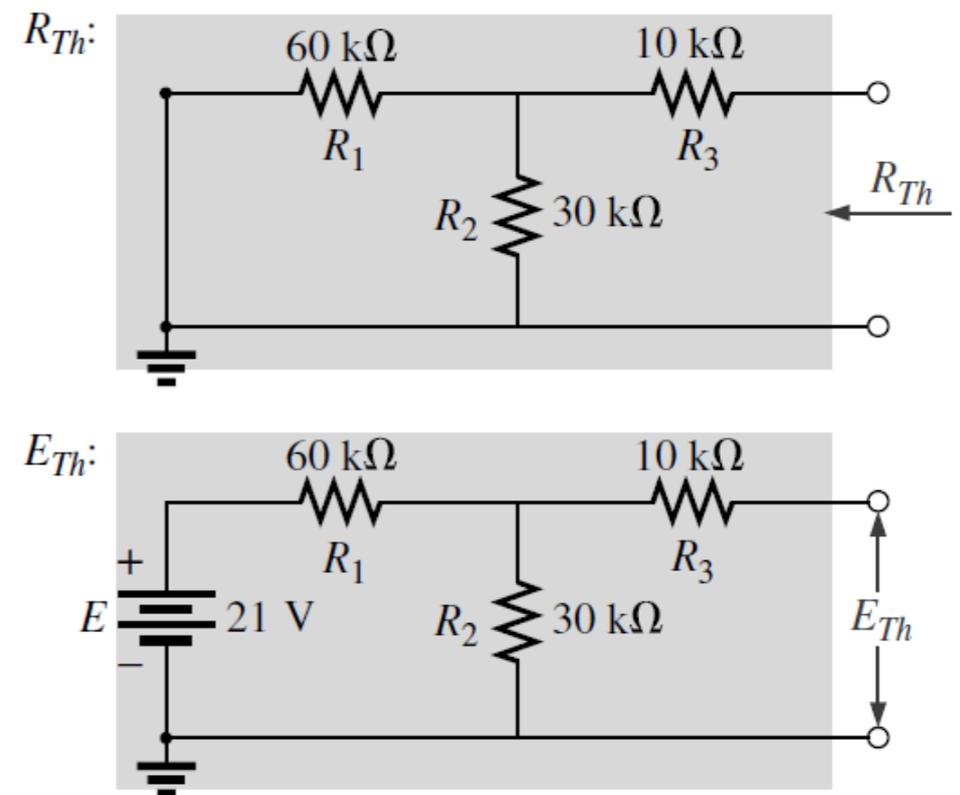


Figura 10.57 Aplicação do teorema de Thévenin ao circuito da Figura 10.56.

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Simplificação do circuito usando equivalente de Thévenin.

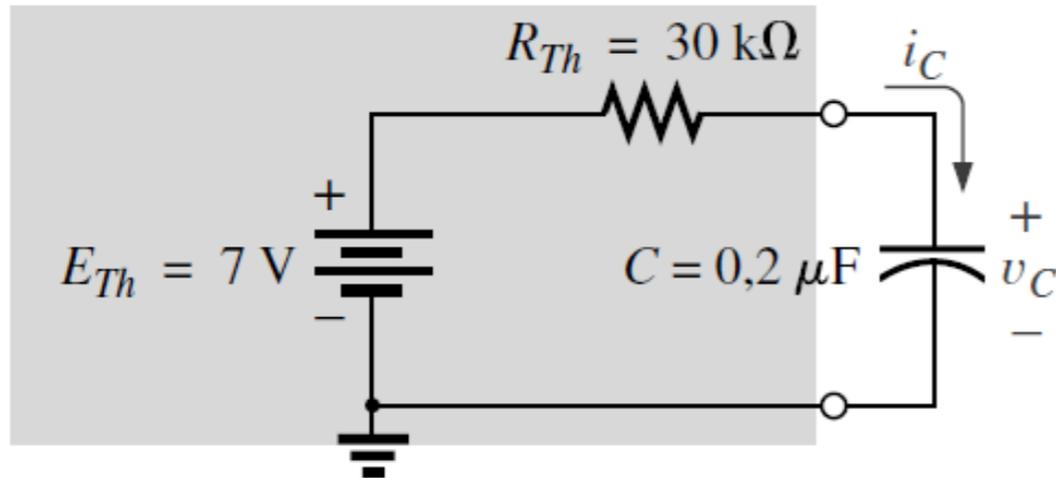


Figura 10.58 Substituição do circuito da Figura 10.56 pelo circuito equivalente de Thévenin.

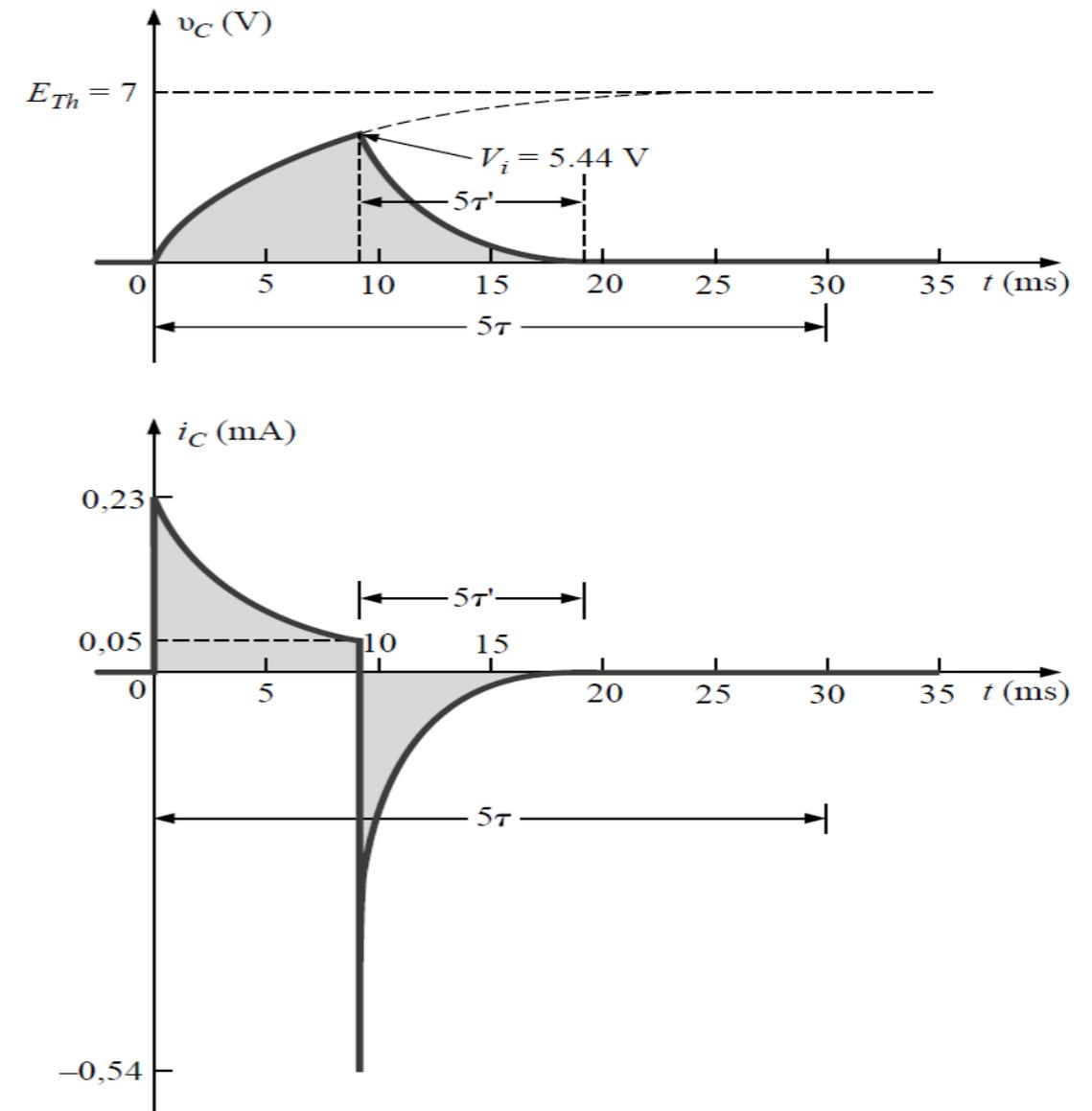


Figura 10.59 Formas de onda para o circuito da Figura 10.56.

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Simplificação do circuito usando equivalente de Thévenin.

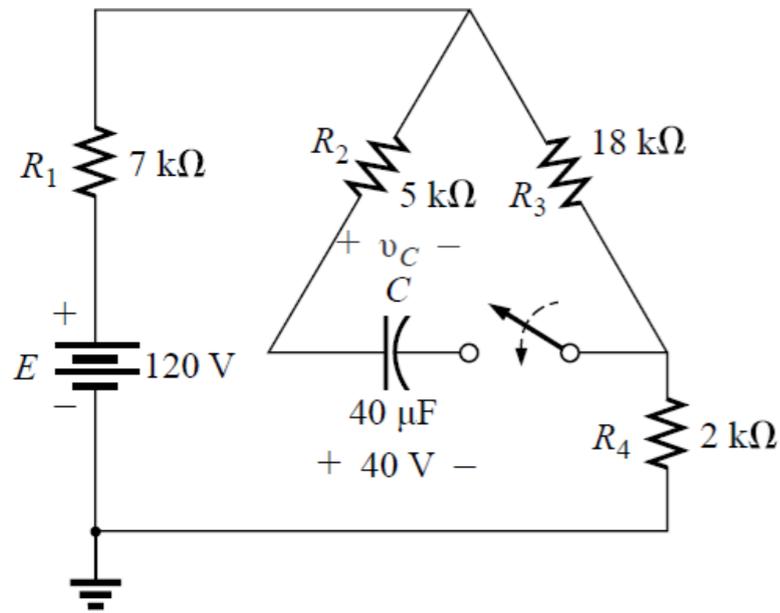


Figura 10.60 Exemplo 10.12.

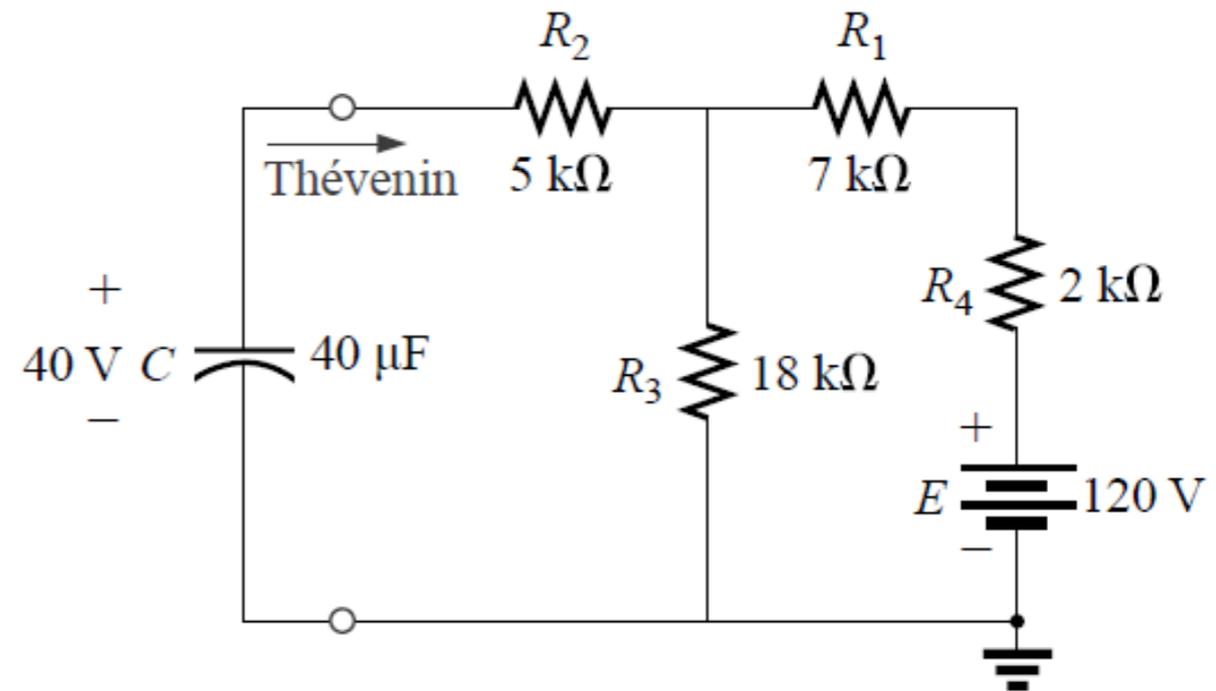


Figura 10.61 Circuito na Figura 10.60 redesenhado.

Transitórios em Circuitos Capacitivos

Simplificação do circuito usando equivalente de Thévenin.

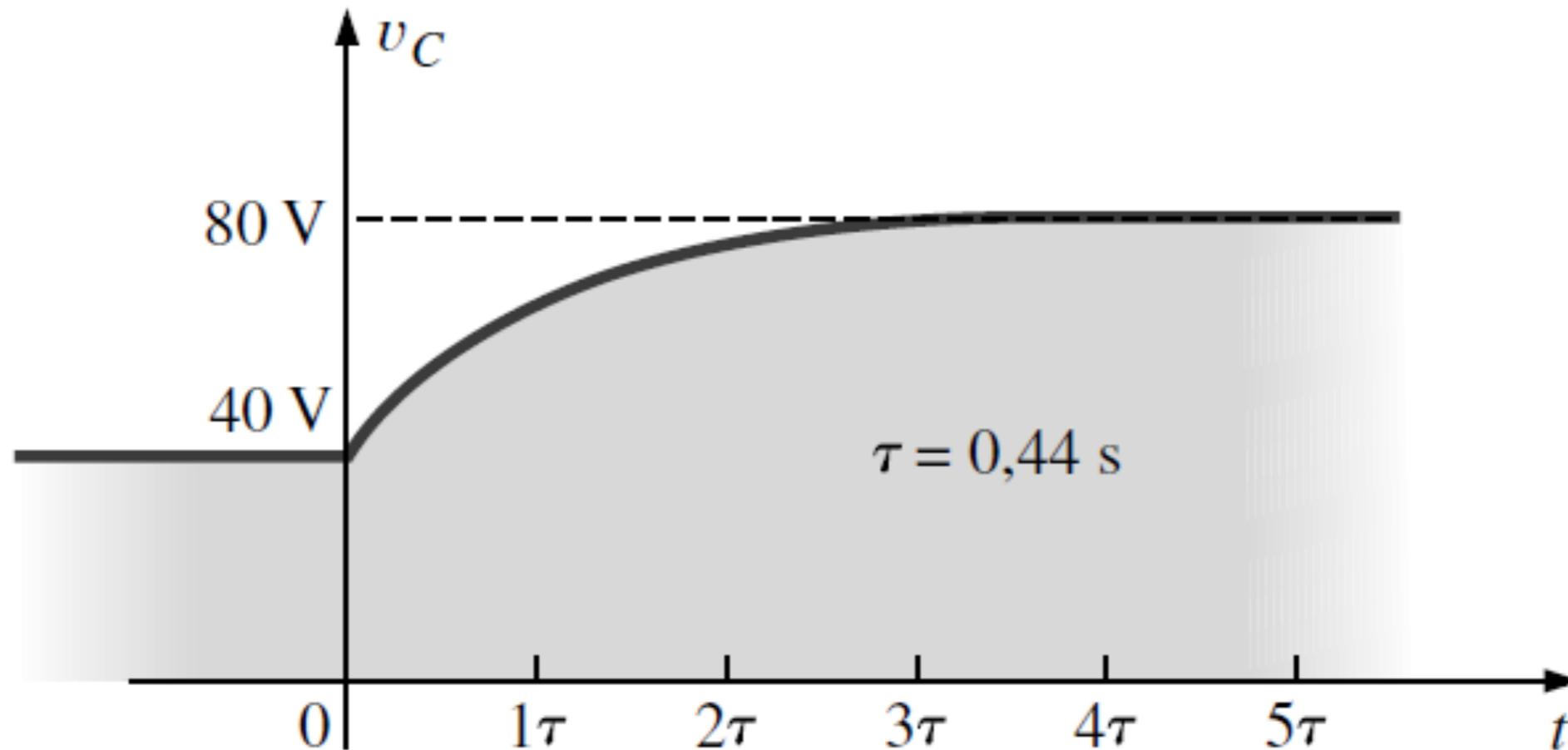


Figura 10.62 v_C para o circuito na Figura 10.60.

Transitórios em Circuitos Capacitivos

A corrente no capacitor:

- 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: $i_R = u_R/R$.
- 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:

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

Transitórios em Circuitos Capacitivos

A corrente no capacitor.

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

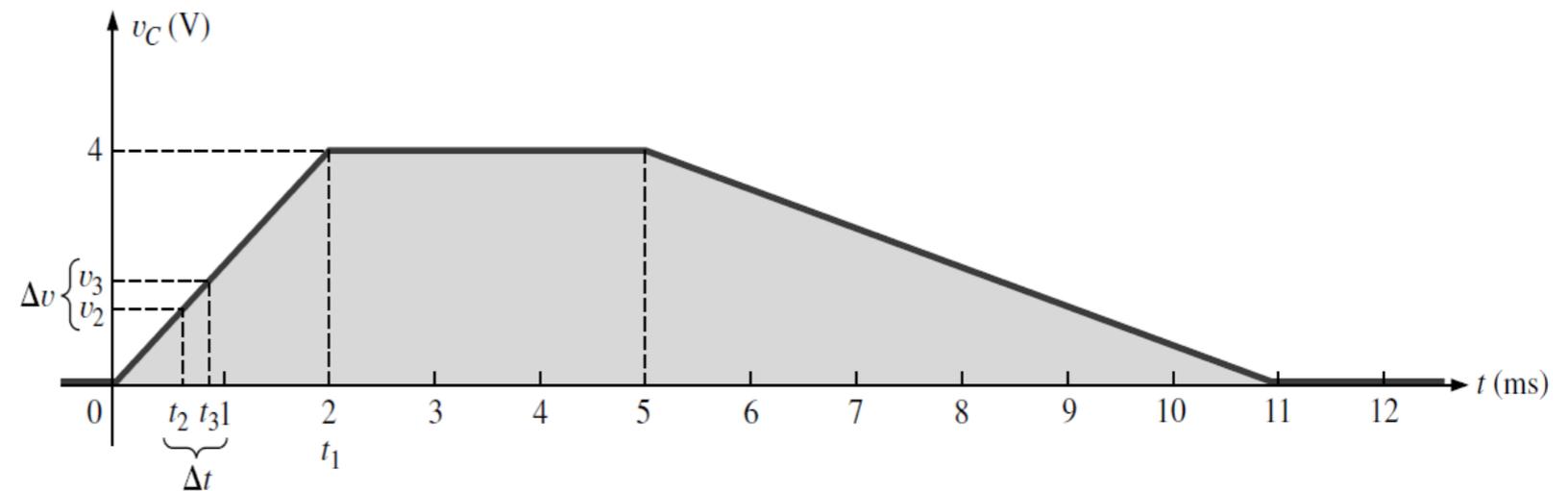


Figura 10.64 v_C para o Exemplo 10.14.

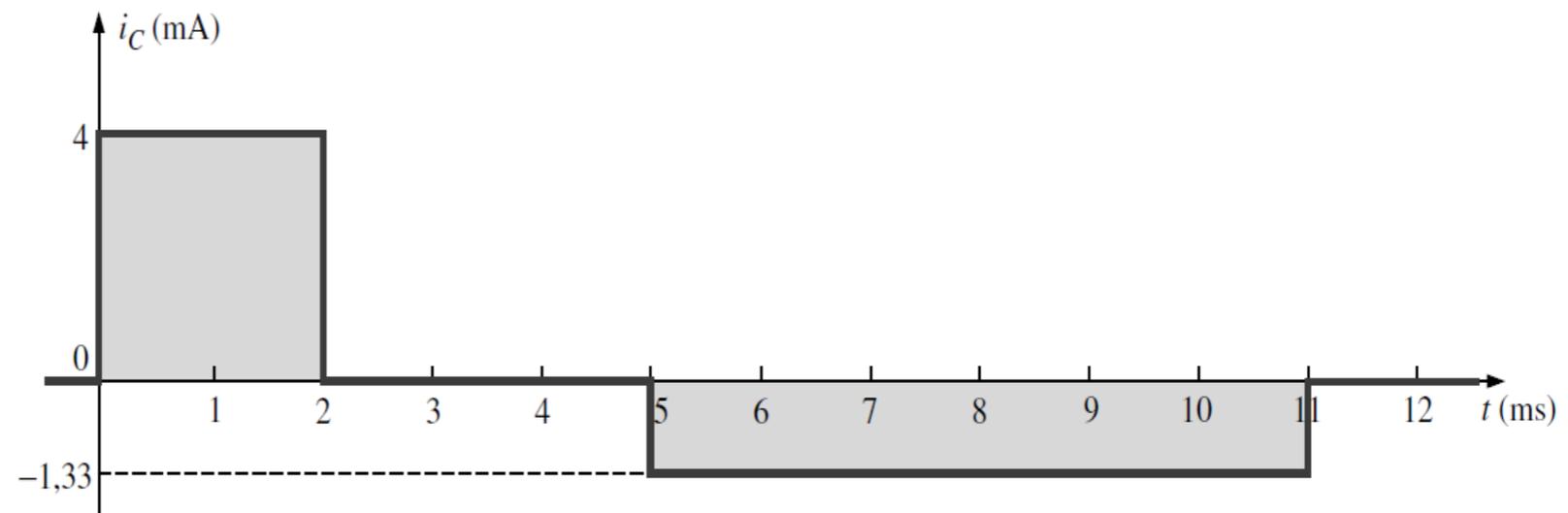


Figura 10.65 Corrente i_C resultante para tensão vista na Figura 10.64.

Associação de Capacitores

Associação de capacitores:

- 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.

$$E = V_1 + V_2 + V_3$$

$$Q = C \cdot V \rightarrow V = \frac{Q}{C}$$

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

$$Q_T = Q_1 = Q_2 = Q_3$$

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

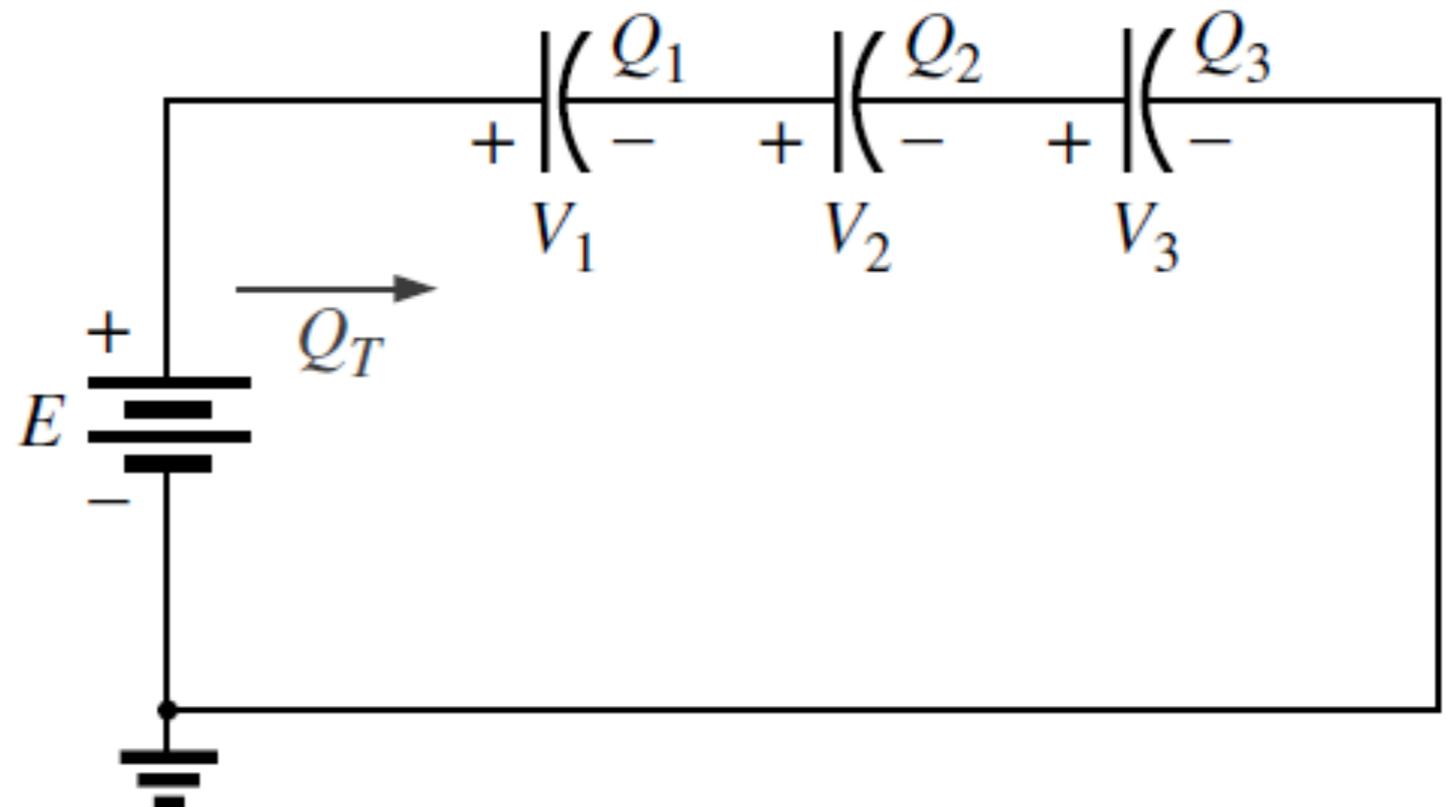


Figura 10.66 Capacitores em série.

Associação de Capacitores

Associação de capacitores:

- 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.

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q = C \cdot V$$

$$C_T \cdot E = C_1 \cdot V_1 + C_2 \cdot V_2 + C_3 \cdot V_3$$

$$V_1 = V_2 = V_3 = E$$

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3$$

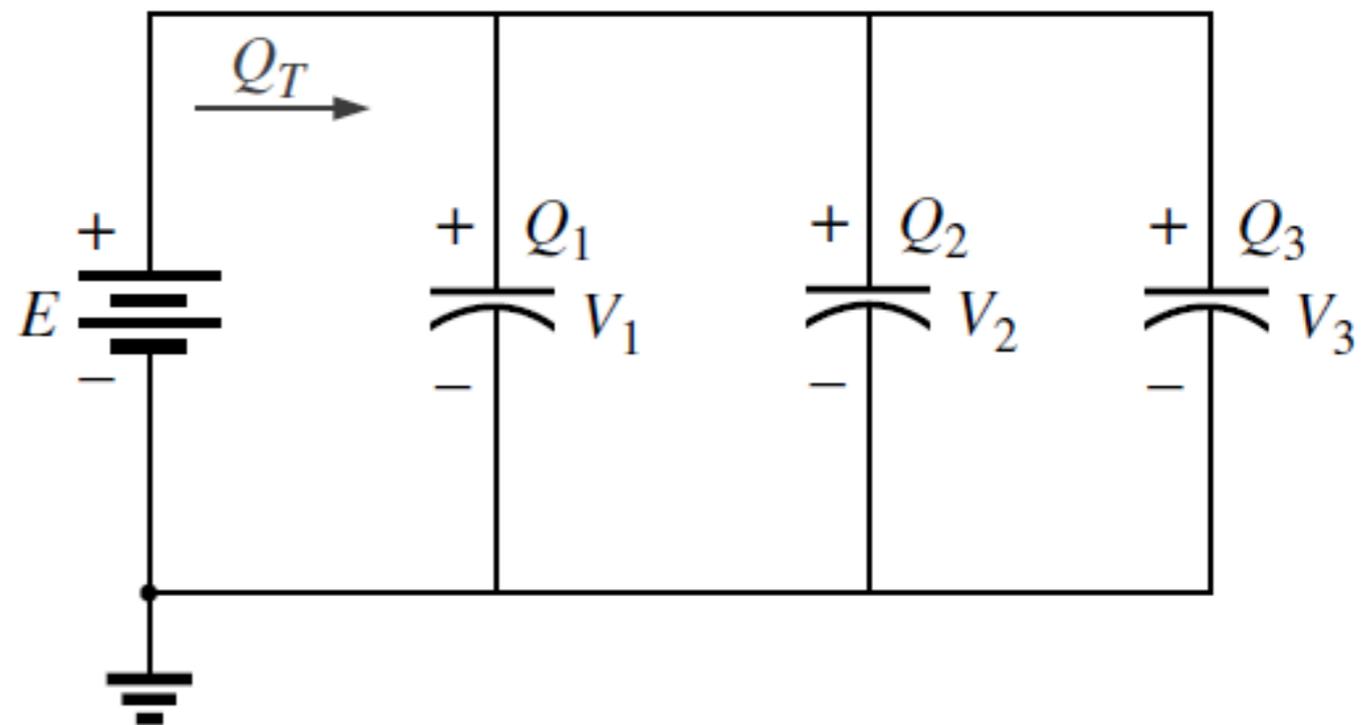


Figura 10.67 Capacitores em paralelo.

Associação de Capacitores

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

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} = \frac{1}{\frac{1}{200\mu} + \frac{1}{50\mu} + \frac{1}{10\mu}} = 8\mu F$$

$$Q_T = C_T \cdot E = 8\mu \cdot 60V = 480\mu C$$

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_T = 480\mu C$$

$$V_1 = \frac{Q_1}{C_1} = \frac{480\mu}{200\mu} = 2,4V$$

$$V_2 = \frac{Q_2}{C_2} = \frac{480\mu}{50\mu} = 9,6V$$

$$V_3 = \frac{Q_3}{C_3} = \frac{480\mu}{10\mu} = 48V$$

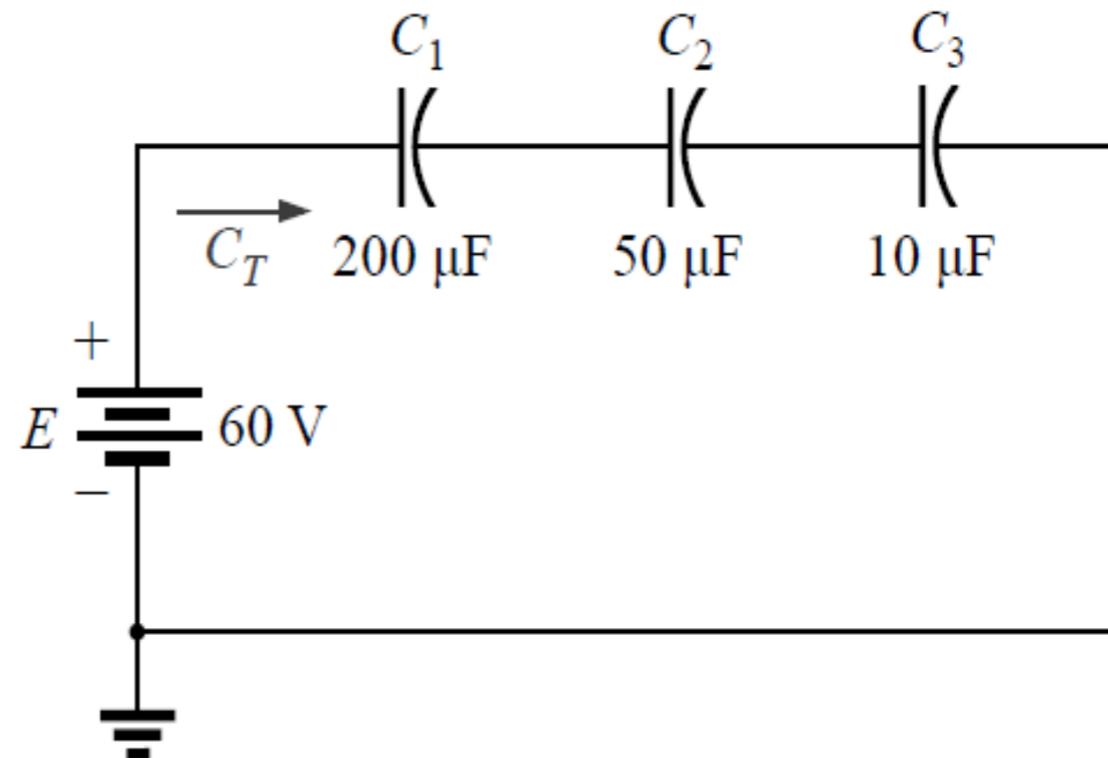


Figura 10.68 Exemplo 10.15.

Associação de Capacitores

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 = 800\mu + 60\mu + 1200\mu = 2060\mu F$$

$$V_1 = V_2 = V_3 = E = 48V$$

$$Q_1 = C_1 \cdot V_1 = 800\mu \cdot 48 = 38,4mC$$

$$Q_2 = C_2 \cdot V_2 = 60\mu \cdot 48 = 2,88mC$$

$$Q_3 = C_3 \cdot V_3 = 1200\mu \cdot 48 = 57,6mC$$

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 38,4m + 2,88m + 57,6m = 98,88mC$$

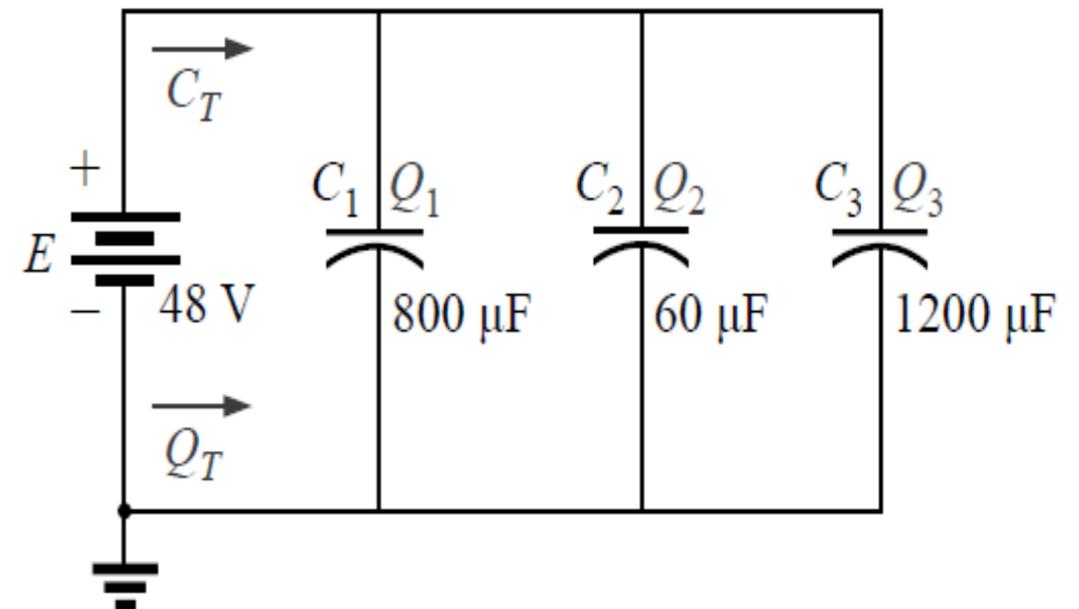


Figura 10.69 Exemplo 10.16.

Associação de Capacitores

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2 + C_3}} = \frac{1}{\frac{1}{3\mu} + \frac{1}{4\mu + 2\mu}} = 2\mu F$$

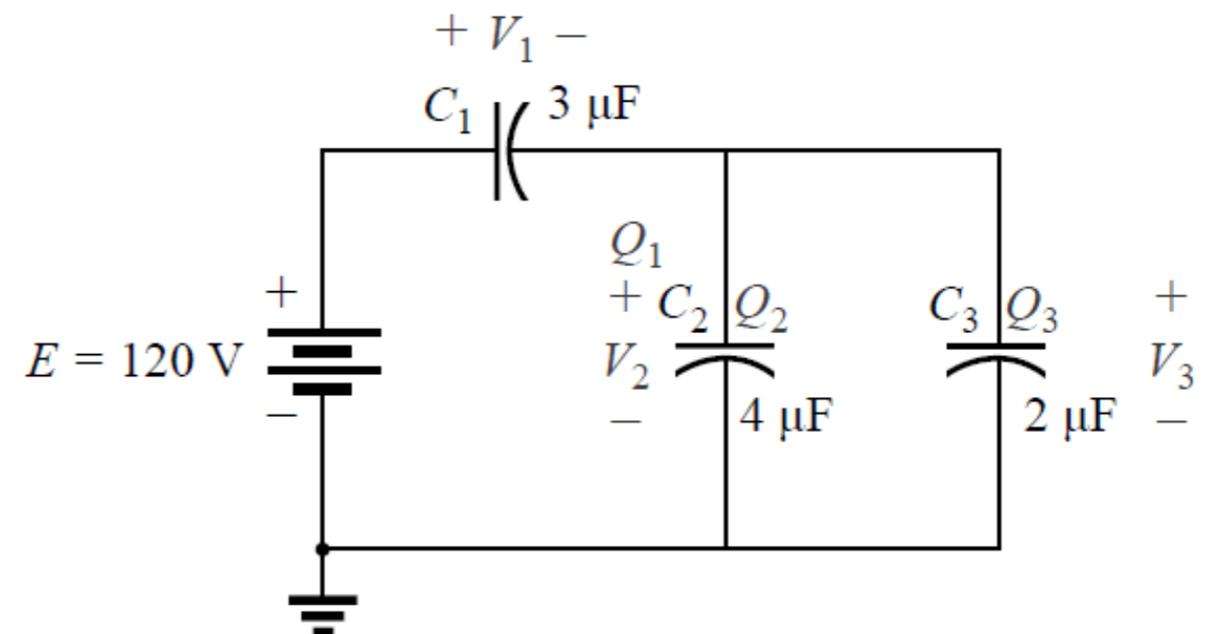


Figura 10.70 Exemplo 10.17.

Energia Armazenada em Capacitores

Armazenamento de energia em capacitores:

- 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 abaixo 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.

$$J = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_C^2$$

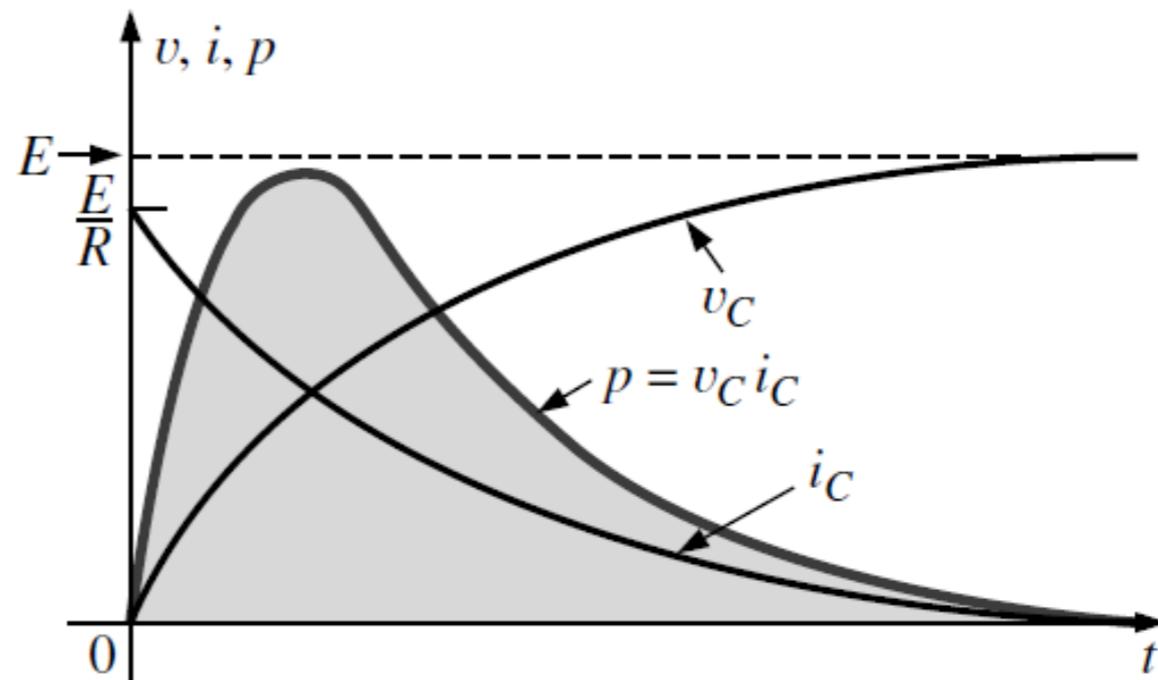


Figura 10.75 Gráfico da potência fornecida a um elemento capacitivo durante a fase transitória.

Capacitâncias Parasitas

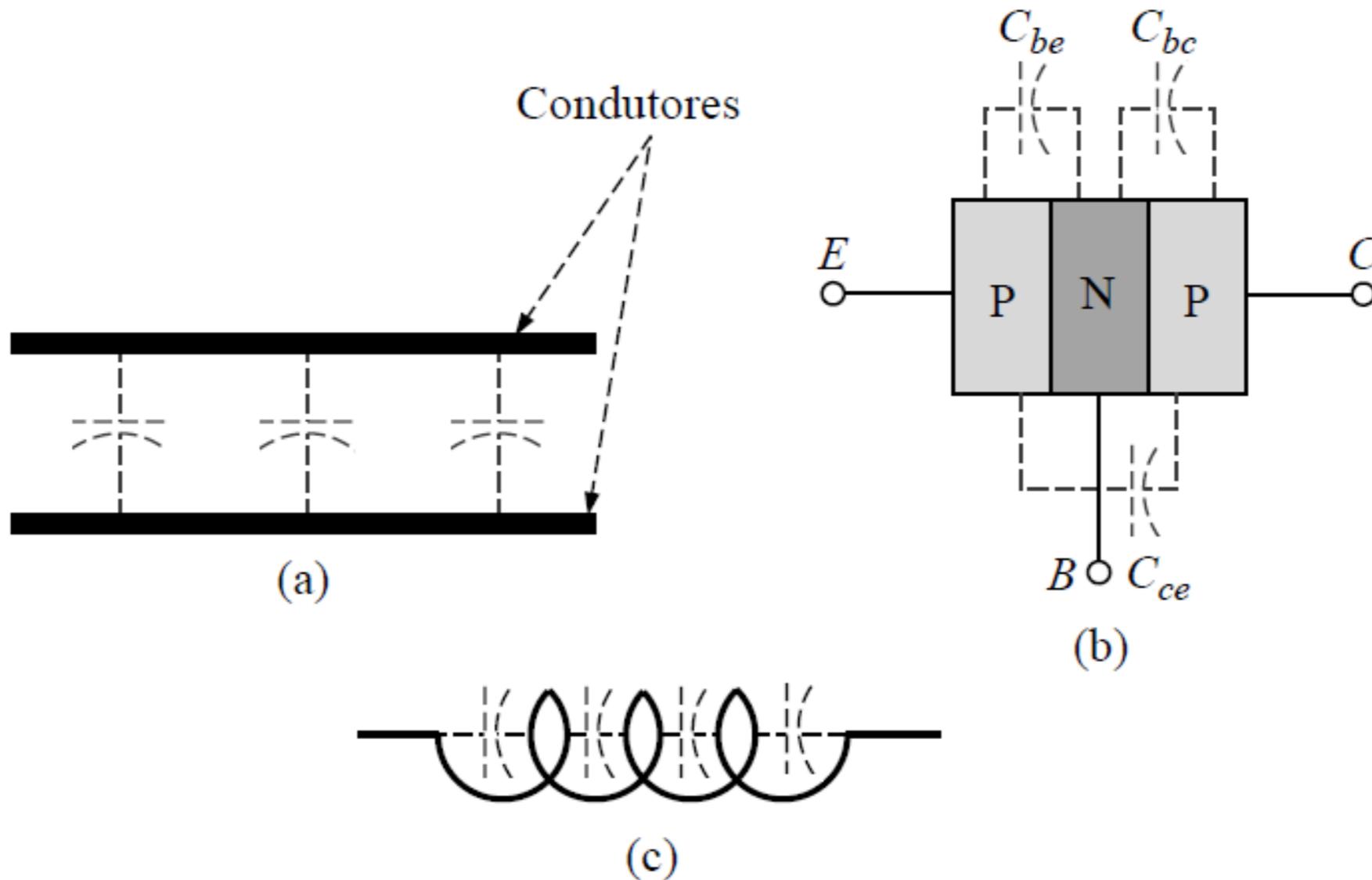
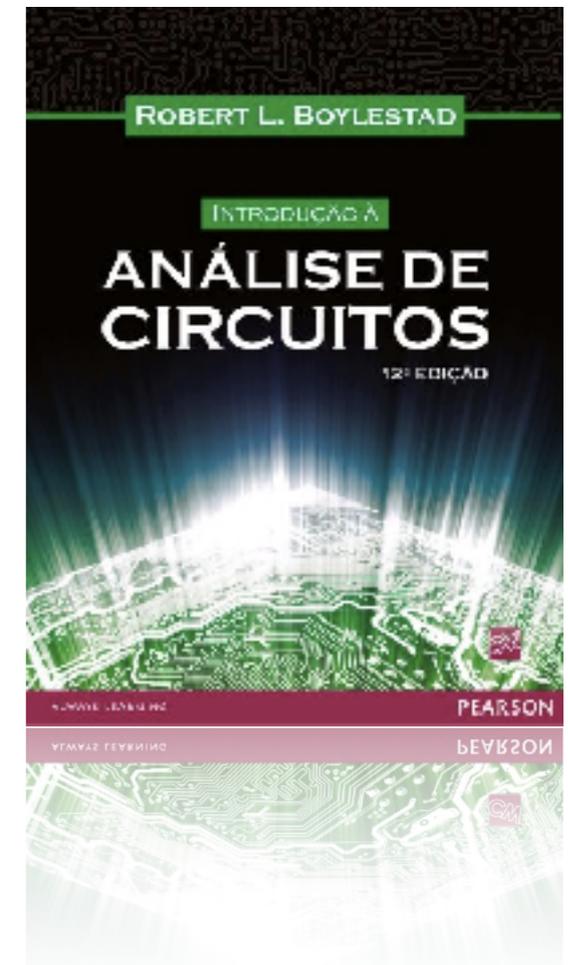
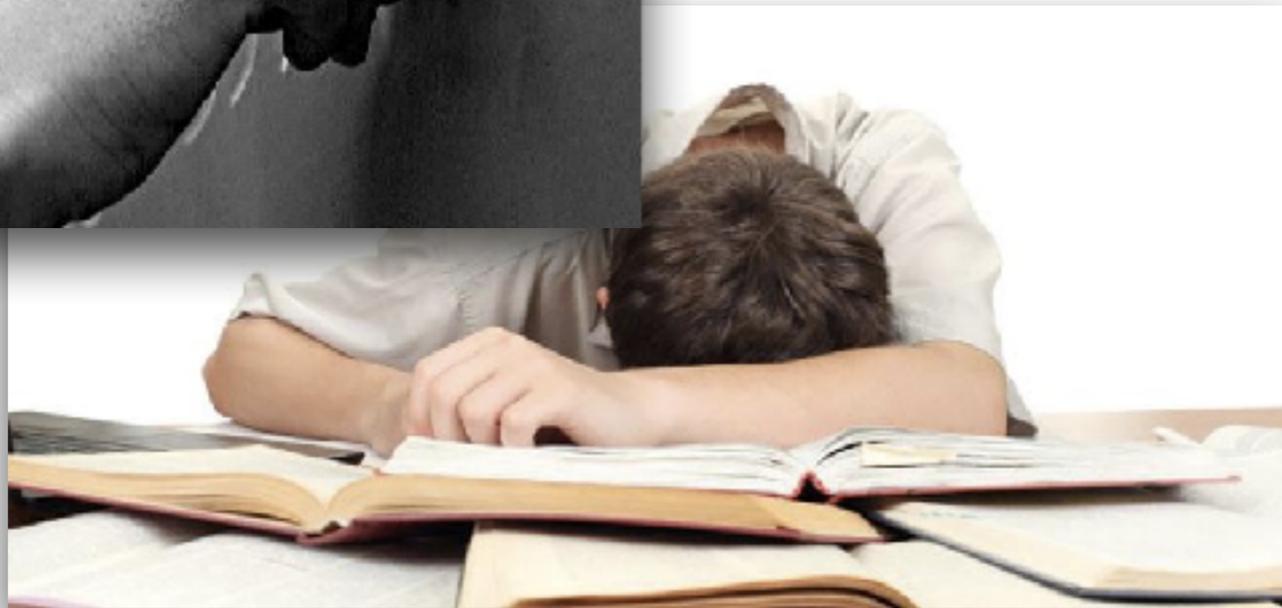
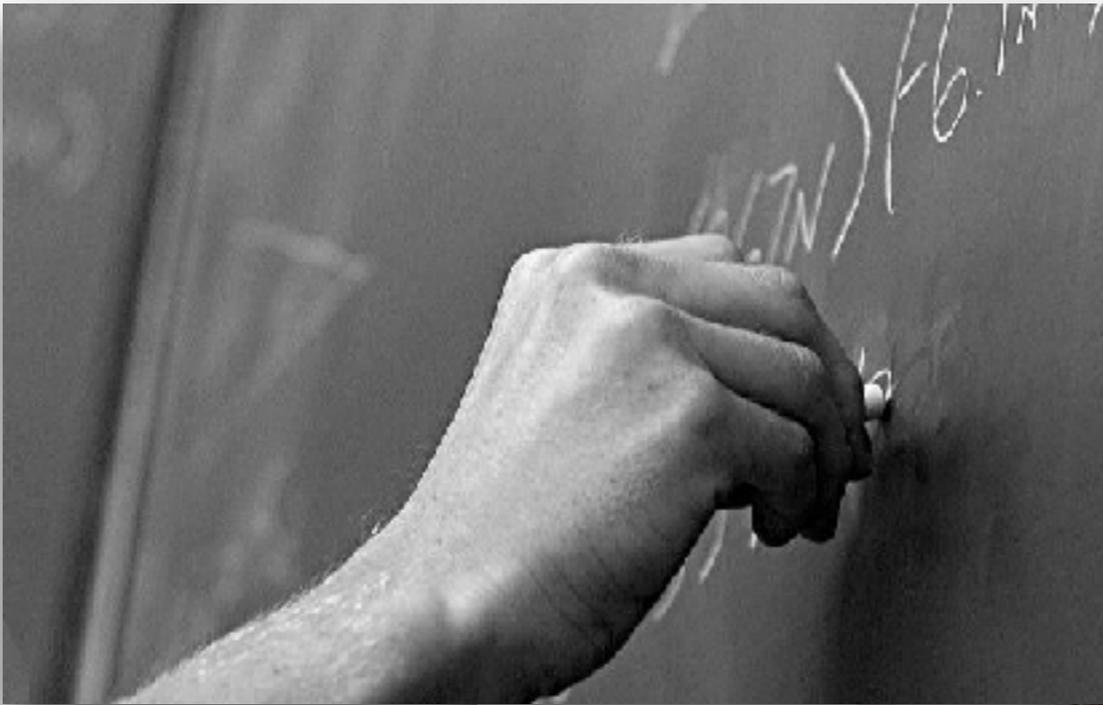


Figura 10.76 Exemplos de capacitâncias parasitas.

Demonstrações

Exemplos:

- Exemplos e problemas do capítulo 10 - Capacitores do livro *Análise de Circuitos* de Robert L. Boylestad, Pearson, 2012.



Durante e após a aula:

- Ler o capítulo 10 - Capacitores do livro *Análise de Circuitos* de Robert L. Boylestad, Pearson, 2012.

