

# DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS e teoria de circuitos

Parte 1

8ª Edição

Robert L. Boylestad  
Louis Nashelsky



[www.pearson.com.br/electronics](http://www.pearson.com.br/electronics)

Oitava Edição

# Introdução à Análise de Circuitos

**Robert L. Boylestad**

Tradução: **J. A. Souza**  
Instituto de Física/UFF

Revisão Técnica: **Ronaldo Sérgio de Biasi**  
Prof. Titular/Instituto Militar de Engenharia — IME



**Prentice-Hall do Brasil**

Título do original em inglês  
*Introductory Circuit Analysis*  
Original English language edition published by  
Copyright © 1997 by Prentice-Hall, Inc.  
All Rights Reserved.

Direitos exclusivos para a língua portuguesa  
Copyright © 1998 by  
**EDITORA PRENTICE-HALL DO BRASIL LTDA.**  
Travessa do Ouvidor, 11  
Rio de Janeiro, RJ — CEP 20040-040

Reservados todos os direitos. É proibida a duplicação ou reprodução  
deste volume, no todo ou em parte, sob quaisquer formas ou por quaisquer  
meios (eletrônico, mecânico, gravação, fotocópia ou outros),  
sem permissão expressa da Editora.

*Para Else Marie  
Alison, Mark, Kelcy e Morgan  
Stacey e Douglas  
e Eric*



# Prefácio

Passaram-se trinta anos — três décadas — desde que foi assinado o primeiro contrato para a publicação de *Introductory Circuit Analysis* com a Charles E. Merrill Publishing Company — a única editora, entre as várias a que apresentei o projeto, que aceitou correr o risco. Lembro-me de que um professor encarregado de avaliar o original para outra editora comentou que o texto continha tantos exemplos e sugestões que ele se preocupava com o que iria fazer na sala de aula — o livro deixava muito pouco por conta dos professores. O resultado foi uma avaliação negativa da qual eu gostaria de ter conservado uma cópia.

O ciclo de produção continua a gerar, através dos anos, experiências para as quais é difícil estar preparado, mas, em geral, a resposta a estes fatos inesperados tem sido bastante satisfatória, principalmente devido à excelente equipe da Charles E. Merrill Publishing (atualmente Prentice Hall). A contribuição destas pessoas para a qualidade e a boa apresentação do texto tem sido sempre um fator importante para o sucesso deste livro.

Os estudantes continuam a ser os meus melhores críticos e também os mais informativos. As capas das pastas que utilizo em minhas aulas ficam tomadas pelas anotações dos seus comentários a respeito de tópicos que precisam de revisão e também sobre novas alternativas para a apresentação dos assuntos, além de problemas novos e interessantes. As cartas dos leitores são sempre bem-recebidas, e algumas foram bastante úteis na definição dos assuntos e também para orientar as correções. Os revisores de cada edição têm sido excelentes, com alguns deles indo além de suas obrigações, contribuindo para o conteúdo do texto. Quando as primeiras reedições eram enviadas para impressão, eu sempre achava que o texto finalmente chegara à sua forma definitiva. Tornou-se cada vez mais evidente, no entanto, com o passar dos anos, que sempre é possível introduzir aperfeiçoamentos e que sempre haverá novos tópicos a serem incluídos. Está se tornando cada vez mais difícil introduzir novos assuntos por causa da necessidade de evitar que o livro se torne excessivamente extenso, o que me coloca diante de difíceis decisões quanto aos tópicos a serem suprimidos. No momento em que a oitava edição está indo para o prelo, já me surpreendo planejando algumas mudanças para a nona edição. Acredito, por exemplo, que a versão do PSpice para o DOS estará totalmente em desuso em um ano ou dois. Quando encontrei a versão para Windows pela primeira vez, eu a recebi com bastante ceticismo, tendo imediatamente chamado a atenção de meus colegas para todas as tarefas que ela não podia realizar tão bem quanto a versão para DOS. No entanto, utilizando a versão 6.2 e após muitas horas de interação, cheguei à conclusão de que algumas das minhas suposições originais não estavam corretas, e atualmente utilizo apenas a versão para Windows. A versão para DOS aparece nesta edição somente como uma ponte para os usuários atuais. No que se refere ao PSpice, o

conteúdo desta edição foi projetado para fornecer aos estudantes todos os detalhes necessários para a análise computacional, tanto nos capítulos sobre corrente contínua (dc) quanto nos relacionados a corrente alternada (ac). Em outras palavras, o nível de detalhamento é suficiente para eliminar a necessidade de um suplemento. Acredito que, realizando uma pequena sessão de treinamento com os estudantes em uma sala de computação no começo do curso e fornecendo-lhes um horário e um local para tirar dúvidas, teremos feito o suficiente para que eles entendam a maioria dos programas que aparecem no texto. É sempre uma surpresa agradável para mim observar que estudantes que começam nosso curso com deficiências de matemática ou redação se adaptam ao computador com extrema facilidade. Acredito que para muitos o computador representa uma forma de recuperar a confiança em si próprios e os faz se sentirem mais integrados ao resto da turma. A inclusão do C++ nesta edição é uma resposta a numerosos pedidos de usuários e também ao fato de que esta linguagem vem sendo usada em um número cada vez maior de programas. Os programas em C++ apresentados no texto, embora em número limitado, revelam algumas das características desta linguagem e pelo menos fazem com que o estudante tome conhecimento da existência desta linguagem. As razões para a inclusão do MathCAD são praticamente as mesmas. Incluímos, finalmente, vários exemplos que utilizam a calculadora TI-85 nas seções que lidam com corrente alternada, para mostrar como o seu uso pode facilitar as operações com números complexos. Para aqueles (como eu) que iniciaram suas carreiras utilizando uma régua de cálculo e tabelas para trabalhar com números complexos, esta calculadora foi muito bem-recebida. Existem assim numerosos exemplos do uso desta calculadora espalhados pelas seções em que analisamos circuito de ac, tendo sido dado a estes o mesmo destaque, que o utilizado para os pacotes de software.

Todos os títulos dos capítulos desta edição permanecem idênticos aos da anterior, tendo sido adicionadas somente nove seções novas. Este comentário não deve, no entanto, fazer com que o leitor pense que esta é a sétima edição com uma capa diferente. Houve mudanças em todos os capítulos, e o conteúdo foi reescrito, atualizado e expandido. Alguns dos novos tópicos envolvem Algarismos significativos, precisão e arredondamento; considerações de segurança; interruptores GFCI; aterramento; supermalhas e supernós; novos métodos experimentais; discos rígidos para computadores; sondas de efeito Hall; valores iniciais da tensão em capacitores e da corrente em indutores. Entre as áreas nas quais o conteúdo foi expandido, temos as seguintes: potenciômetros; regras dos divisores de tensão e de corrente; resistência interna; técnicas de medida; curto-circuitos e circuitos abertos; circuitos em série-paralelo; análise nodal; teorema de Thévenin; fontes dependentes; potência; ressonância em parale-

lo; pontas de prova compensadas e problemas. Quando examino o original corrigido deste texto, fico surpreso ao notar que a área que sempre parece necessitar de maior atenção é a introdução. É claro que é extremamente importante que os estudantes entendam claramente os conceitos fundamentais de modo a adquirirem uma base sólida para o estudo do assunto de cada capítulo. Uma importante modificação adotada ao longo de todo o texto é que agora todas as figuras possuem uma legenda para definir tanto o seu conteúdo quanto o seu objetivo. Nas edições anteriores, somente 20% das figuras possuíam legenda. Acredito que estas legendas auxiliarão os estudantes a compreender o texto e os exemplos.

Como aconteceu em todas as outras edições, há uma extensa lista de pessoas que contribuíram para o conteúdo, a qualidade e a precisão deste texto. Na minha própria instituição, os conselhos e sugestões oferecidos por Jerry Sitbon ajudaram a imprimir uma orientação mais prática a este livro. Agradeço à sua esposa, a Sra. Catherine Sitbon, nascida em Paris, França, por ter obtido na École Polytechnique as informações a respeito de Leon Thévenin que aparecem nesta edição. O professor James L. Antonakos, do Broome Community College, foi particularmente solícito no que se refere à linguagem C++, contribuindo com todos os seus anos de experiência com o programa e com o mundo editorial para a elaboração dos programas que aparecem nesta oitava edição. O professor William Boettcher, do Albuquerque Technical-Vocational Institute, amigo de longa data tanto do autor quanto deste livro, prestou um auxílio inestimável na elaboração dos programas em MathCAD que desempenham um papel importante nesta edição. Gostaria também de estender meus agradecimentos aos colaboradores, tanto da comunidade acadêmica quanto do setor industrial, cujos nomes aparecem a seguir. Suas contribuições, críticas e sugestões ajudaram a estabelecer as prioridades para esta edição do livro.

### Agradecimentos

Professor Derek Abbot — University of Adelaide, Australia  
 Professor G. Thomas Bellarmine — University of West Florida  
 Bill Boettcher — Albuquerque Technical-Vocational Institute  
 Professor Lester W. Cory — Southeastern Massachusetts University  
 Professor Gerald L. Doult — DeVry Institute of Technology — Kansas City

John Dunbar — DeVry Institute of Technology — Atlanta  
 Kenneth Frament — DeVry Institute of Technology — Phoenix  
 Professor Bernard Guss — Pennsylvania State University  
 Robert Herrick — Purdue University  
 Ernest Joerg  
 Karen Karger — Tektronix, Inc.  
 Ms. Mary Kuykendall — Hall of History Foundation  
 Professor M. David Luneau, Jr. — University of Arkansas at Little Rock  
 Leei Mao — Greenville Technical College  
 Professor Edward F. McBrien — Arizona State University  
 Ms. Carol Parcels — Hewlett-Packard Corp.  
 Vic Quiros — DeVry Institute of Technology — Phoenix  
 Madame Martine Roudeix — Ecole Polytechnique, Palaiseau, France  
 Monsieur Raymond Josue Seckel — Biblioteca Nacional da França  
 Professor Paul T. Svatik — Owens Community College  
 Mrs. Barbara Sweeney — Arquivos da AT&T  
 Ms. Marie-Christine Thooris — Ecole Polytechnique, Palaiseau, France  
 Ms. Kathy Truesdell — Texas Instruments  
 Dr. Domingo L. Uy — Hampton University

Tive a felicidade de trabalhar com uma equipe muito talentosa no escritório de Ohio da Prentice Hall. Não imaginaria passar por todas as etapas do processo de publicação sem a presença de pessoas como Dave Garza para supervisionar o projeto, Rex Davidson para manter minha sanidade e controlar o andamento dos trabalhos, e Carol Robison para cuidar de uma infinidade de detalhes. Sem a sua ajuda, teria sido impossível completar três publicações nos últimos 18 meses. Marianne L' Abbate, editora de texto, foi uma excelente aquisição para a equipe e conseguiu fazer com que o processo transcorresse com o mínimo possível de problemas. O mesmo se pode dizer do excelente trabalho dos revisores Maggie Shaffer e Lois Porter. Além disso, gostaria de agradecer especificamente à chefe da editoração eletrônica, Linda Ludewig; à gerente de marketing, Debbie Yarnell; a Ruta K. Fiorino e Maureen Henry, do departamento de publicidade; e a Jayme Demsky, representante da editora, por seus esforços para fazer deste livro um sucesso.

Desejo a todos um ano letivo pleno de realizações e com muita saúde.

# Sumário

## 1 Introdução, 1

- 1.1 A indústria eletroeletrônica, 1
- 1.2 Um pouco de história, 2
- 1.3 Unidades de medida, 5
- 1.4 Sistemas de unidades, 6
- 1.5 Algarismos significativos, precisão e arredondamento, 8
- 1.6 Potências de dez, 8
- 1.7 Conversão entre potências de dez, 11
- 1.8 Conversões dentro do mesmo sistema e entre sistemas de unidades, 12
- 1.9 Símbolos, 13
- 1.10 Tabelas de conversão, 13
- 1.11 Análise por computador, 14

## 2 Corrente e tensão, 19

- 2.1 Os átomos e sua estrutura, 19
- 2.2 Corrente, 21
- 2.3 Tensão, 23
- 2.4 Fontes de corrente contínua (cc), 24
- 2.5 Condutores e isolantes, 30
- 2.6 Semicondutores, 31
- 2.7 Amperímetros e voltímetros, 31
- 2.8 Análise computacional, 32

## 3 Resistência, 36

- 3.1 Introdução, 36
- 3.2 Resistência: fios circulares, 37
- 3.3 Tabelas de fios, 39
- 3.4 Resistência: unidades métricas, 41
- 3.5 Efeitos da temperatura, 42
- 3.6 Supercondutores, 45
- 3.7 Tipos de resistores, 48
- 3.8 Código de cores e valores dos resistores, 51
- 3.9 Condutância, 53
- 3.10 Medidores de resistência (ohmímetros), 53
- 3.11 Termistores, 54
- 3.12 Célula fotocondutora, 54
- 3.13 Varistores, 55
- 3.14 Análise computacional, 55

## 4 Lei de Ohm, potência e energia, 60

- 4.1 Lei de Ohm, 60
- 4.2 Gráficos  $V-I$ , 62
- 4.3 Potência, 64
- 4.4 Medidores de potência, 66

- 4.5 Eficiência, 66
- 4.6 Energia, 68
- 4.7 Disjuntores, ICFA e fusíveis, 71
- 4.8 Análise computacional, 72

## 5 Circuitos em série, 80

- 5.1 Introdução, 80
- 5.2 Circuitos em série, 81
- 5.3 Fontes de tensão em série, 83
- 5.4 Lei de Kirchhoff para tensões, 83
- 5.5 Intercambiando elementos em série, 86
- 5.6 Regra dos divisores de tensão, 87
- 5.7 Notação, 89
- 5.8 Resistência interna das fontes de tensão, 93
- 5.9 Regulação de tensão, 95
- 5.10 Técnicas de medida, 95
- 5.11 Análise computacional, 96

## 6 Circuitos com elementos em paralelo, 109

- 6.1 Introdução, 109
- 6.2 Elementos em paralelo, 109
- 6.3 Condutância e resistência totais, 110
- 6.4 Circuitos em paralelo, 115
- 6.5 Lei de Kirchhoff para a corrente, 116
- 6.6 Regra do divisor de corrente, 118
- 6.7 Fontes de tensão em paralelo, 121
- 6.8 Circuitos abertos e curtos-circuitos, 121
- 6.9 Efeito da ligação de um voltímetro, 124
- 6.10 Técnicas para pesquisar defeitos, 125
- 6.11 Análise computacional, 126

## 7 Circuitos em série-paralelo, 135

- 7.1 Circuitos em série-paralelo, 135
- 7.2 Exemplos descritivos, 139
- 7.3 Circuitos em cascata, 143
- 7.4 Fonte com divisor de tensão (com carga e sem carga), 145
- 7.5 Ligação de uma carga a um potenciômetro, 146
- 7.6 Projeto de amperímetros, voltímetros e ohmímetros, 148
- 7.7 Aterramento, 150
- 7.8 Análise computacional, 152

## 8 Métodos de análise e tópicos selecionados (corrente contínua), 163

- 8.1 Introdução, 163
- 8.2 Fontes de corrente, 163

- 8.3 Conversões de fontes, 165
- 8.4 Fontes de corrente em paralelo, 166
- 8.5 Fontes de corrente em série, 167
- 8.6 Análise das correntes nos ramos, 168
- 8.7 Método das malhas (abordagem geral), 171
- 8.8 Método das malhas (abordagem padronizada), 175
- 8.9 Método dos nós (abordagem geral), 177
- 8.10 Método dos nós (abordagem padronizada), 181
- 8.11 Circuitos em ponte, 184
- 8.12 Conversões  $Y-\Delta(T-\pi)$  e  $\Delta-Y(\pi-T)$ , 187
- 8.13 Análise computacional, 191

## 9 Teoremas da análise de circuitos, 202

- 9.1 Introdução, 202
- 9.2 Teorema da superposição, 202
- 9.3 Teorema de Thévenin, 208
- 9.4 Teorema de Norton, 216
- 9.5 Teorema da transferência máxima de potência, 219
- 9.6 Teorema de Millman, 226
- 9.7 Teorema da substituição, 229
- 9.8 Teorema da reciprocidade, 230
- 9.9 Análise computacional, 231

## 10 Capacitores, 245

- 10.1 Introdução, 245
- 10.2 O campo elétrico, 245
- 10.3 Capacitância, 246
- 10.4 Rigidez dielétrica, 250
- 10.5 Corrente de fuga, 250
- 10.6 Tipos de capacitores, 251
- 10.7 Circuitos capacitivos: fase de carga, 256
- 10.8 Circuitos capacitivos: fase de descarga, 260
- 10.9 Valores iniciais, 263
- 10.10 Valores instantâneos, 264
- 10.11  $\tau = R_{th}C$ , 265
- 10.12 A corrente  $i_c$ , 267
- 10.13 Capacitores em série e em paralelo, 268
- 10.14 Energia armazenada em um capacitor, 271
- 10.15 Capacitâncias parasitas, 271
- 10.16 Análise computacional, 272

## 11 Circuitos magnéticos, 282

- 11.1 Introdução, 282
- 11.2 Campos magnéticos, 282
- 11.3 Densidade de fluxo magnético, 284
- 11.4 Permeabilidade magnética, 286
- 11.5 Relutância, 286
- 11.6 Equivalente da definição de resistência para circuitos magnéticos, 286
- 11.7 Força magnetizante, 287
- 11.8 Histerese, 287
- 11.9 Lei de Ampère para circuitos magnéticos, 291
- 11.10 O fluxo  $\Phi$ , 292
- 11.11 Circuitos magnéticos em série: determinação do produto  $NI$ , 292
- 11.12 Entreferos, 295
- 11.13 Circuitos magnéticos em série-paralelo, 296
- 11.14 Determinação de  $\Phi$ , 297
- 11.15 Aplicações, 299

## 12 Indutores, 309

- 12.1 Introdução, 309
- 12.2 A lei de Faraday para a indução eletromagnética, 309
- 12.3 A lei de Lenz, 310
- 12.4 Auto-indutância, 310
- 12.5 Tipos de indutores, 311
- 12.6 Tensão induzida, 312
- 12.7 Transientes em circuitos  $R-L$ : fase de armazenamento, 314
- 12.8 Transientes em circuitos  $R-L$ : fase de decaimento, 317
- 12.9 Valores iniciais, 319
- 12.10 Valores instantâneos, 320
- 12.11  $\tau = L/R_{th}$ , 321
- 12.12 Indutores em série e em paralelo, 322
- 12.13 Circuitos  $R-L$  e  $R-L-C$  no estado estacionário, 323
- 12.14 Energia armazenada por um indutor, 324
- 12.15 Análise computacional, 325

## 13 Correntes e tensões alternadas senoidais, 334

- 13.1 Introdução, 334
- 13.2 Tensão alternada senoidal: características e definições, 335
- 13.3 A senóide, 339
- 13.4 Expressão geral para tensões ou correntes senoidais, 342
- 13.5 Relações de fase, 344
- 13.6 Valor médio, 347
- 13.7 Valor eficaz, 352
- 13.8 Medidores e instrumentos de corrente alternada, 355
- 13.9 Análise computacional, 357

## 14 Os elementos básicos e os fasores, 366

- 14.1 Introdução, 366
- 14.2 A derivada, 366
- 14.3 Resposta dos elementos básicos  $R$ ,  $L$  e  $C$  a uma tensão ou corrente senoidal, 367
- 14.4 Respostas de frequência dos elementos básicos, 374
- 14.5 Potência média e fator de potência, 377
- 14.6 Números complexos, 379
- 14.7 Forma retangular, 380
- 14.8 Forma polar, 381
- 14.9 Conversão entre as duas formas, 381
- 14.10 Operações matemáticas com números complexos, 383
- 14.11 Operações com números complexos utilizando calculadoras e computadores, 387
- 14.12 Fasores, 389
- 14.13 Análise computacional, 393

## 15 Circuitos de corrente alternada em série e em paralelo, 404

- 15.1 Introdução, 404
- 15.2 Impedância e o diagrama de fasores, 404
- 15.3 Configuração em série, 409
- 15.4 Regra dos divisores de tensão, 415
- 15.5 Resposta de frequência de um circuito  $R-C$ , 417
- 15.6 Circuito ac em série — resumo, 421
- 15.7 Admitância e susceptância, 422
- 15.8 Circuitos ac em paralelo, 425

- 15.9 Regra dos divisores de corrente, 430
- 15.10 Resposta de frequência do circuito  $R$ - $L$  paralelo, 430
- 15.11 Circuitos ac em paralelo — resumo, 434
- 15.12 Circuitos equivalentes, 434
- 15.13 Medidas de fase utilizando um osciloscópio de traço duplo, 438
- 15.14 Análise computacional, 439

## 16 Circuitos ac com elementos em série e em paralelo, 457

- 16.1 Introdução, 457
- 16.2 Exemplos ilustrativos, 458
- 16.3 Circuitos em cascata, 464
- 16.4 Análise computacional, 464

## 17 Métodos de análise e tópicos selecionados (ac), 473

- 17.1 Introdução, 473
- 17.2 Fontes independentes e fontes dependentes (controladas), 473
- 17.3 Conversões de fontes, 474
- 17.4 Análise de malhas, 476
- 17.5 Análise nodal, 480
- 17.6 Circuitos em ponte (ac), 487
- 17.7 Conversões  $\Delta$ - $Y$  e  $Y$ - $\Delta$ , 490
- 17.8 Análise computacional, 493

## 18 Teorema sobre circuitos (corrente alternada), 504

- 18.1 Introdução, 504
- 18.2 Teorema da superposição, 504
- 18.3 Teorema de Thévenin, 509
- 18.4 Teorema de Norton, 518
- 18.5 Teorema da transferência máxima de potência, 522
- 18.6 Teoremas da substituição, da reciprocidade e de Millman, 525
- 18.7 Análise computacional, 525

## 19 Potência (ac), 540

- 19.1 Introdução, 540
- 19.2 Circuitos resistivos, 541
- 19.3 Potência aparente, 541
- 19.4 Circuitos indutivos e potência reativa, 542
- 19.5 Circuitos capacitivos, 544
- 19.6 O triângulo de potências, 545
- 19.7  $P$ ,  $Q$  e  $S$  totais, 546
- 19.8 Correção do fator de potência, 549
- 19.9 Wattímetros e medidores de fator de potência, 552
- 19.10 Resistência efetiva, 552
- 19.11 Análise computacional, 554

## 20 Ressonância, 563

- 20.1 Introdução, 563
- 20.2 Circuito ressonante em série, 564

- 20.3 Fator de qualidade ( $Q$ ), 565
- 20.4  $Z_T$  em função da frequência, 567
- 20.5 Seletividade, 568
- 20.6  $V_R$ ,  $V_L$  e  $V_C$ , 570
- 20.7 Exemplos (ressonância em série), 571
- 20.8 Circuito ressonante em paralelo, 572
- 20.9 Curva de seletividade para circuitos ressonantes em paralelo, 575
- 20.10 Comportamento do circuito ressonante em paralelo para  $Q_L \geq 10$ , 577
- 20.11 Tabela de resultados, 579
- 20.12 Exemplos (ressonância em paralelo), 579
- 20.13 Análise computacional, 583

## 21 Decibéis, filtros e gráficos de Bode, 590

- 21.1 O logaritmo, 590
- 21.2 Propriedades dos logaritmos, 592
- 21.3 O decibel, 593
- 21.4 Filtros, 595
- 21.5 Filtro  $R$ - $C$  passa-baixos, 596
- 21.6 Filtro  $R$ - $C$  passa-altos, 599
- 21.7 Filtros de banda de transmissão, 601
- 21.8 Filtros de banda de atenuação, 604
- 21.9 Filtros de banda dupla, 605
- 21.10 Gráficos de Bode, 606
- 21.11 Traçado do gráfico de Bode, 611
- 21.12 Filtro passa-baixos com atenuação limitada, 614
- 21.13 Filtro passa-altos com atenuação limitada, 617
- 21.14 Outras propriedades e um resumo em forma de tabela, 621
- 21.15 Circuitos de desvio, 625
- 21.16 Análise computacional, 627

## 22 Formas de onda propulsadas e a resposta de circuitos $R$ - $C$ , 639

- 22.1 Introdução, 639
- 22.2 Pulsos ideais e pulsos reais, 639
- 22.3 Taxa de repetição e ciclo de operação, 642
- 22.4 Valor médio, 643
- 22.5 Transientes em circuitos  $R$ - $C$ , 644
- 22.6 Resposta de um circuito  $R$ - $C$  a uma onda quadrada, 646
- 22.7 Ponta de prova atenuadora compensada, 650
- 22.8 Análise computacional, 653

## 23 Sistemas polifásicos, 658

- 23.1 Introdução, 658
- 23.2 O gerador trifásico, 659
- 23.3 O gerador tipo  $Y$ , 660
- 23.4 Seqüência de fases nos geradores tipo  $Y$ , 661
- 23.5 Os geradores tipo  $Y$  ligados a cargas tipo  $Y$ , 662
- 23.6 O sistema  $Y$ - $\Delta$ , 663
- 23.7 O gerador tipo  $\Delta$ , 665
- 23.8 Seqüência de fases nos geradores tipo  $\Delta$ , 666
- 23.9 Os sistemas trifásicos  $\Delta$ - $\Delta$  e  $\Delta$ - $Y$ , 666
- 23.10 Potência em circuitos trifásicos, 667
- 23.11 O método dos três wattímetros, 670
- 23.12 O método dos dois wattímetros, 670

- 23.13 Cargas não-equilibradas em sistemas tipo Y de quatro fios, 672
- 23.14 Cargas não-equilibradas em sistemas tipo Y de três fios, 673
- 23.15 Análise computacional, 674

## 24 Circuitos não-senoidais, 685

- 24.1 Introdução, 685
- 24.2 Séries de Fourier, 686
- 24.3 Resposta de um circuito a um sinal não-senoidal, 692
- 24.4 Adição e subtração de formas de onda não-senoidais, 696
- 24.5 Análise computacional, 696

## 25 Transformadores, 702

- 25.1 Introdução, 702
- 25.2 Indutância mútua, 702
- 25.3 Ligação em série de indutores mutuamente acoplados, 704
- 25.4 O transformador de núcleo de ferro, 706
- 25.5 Impedância refletida e potência, 708
- 25.6 Circuito equivalente do transformador de núcleo de ferro, 709
- 25.7 Efeito da frequência, 711
- 25.8 O transformador de núcleo de ar, 712
- 25.9 Uso de transformadores para casamento de impedâncias, isolamento elétrico e medidas de posição, 713
- 25.10 Dados fornecidos pelos fabricantes, 716
- 25.11 Tipos de transformadores, 717
- 25.12 Transformadores com derivação e com mais de uma carga, 718
- 25.13 Circuitos com indutores magneticamente acoplados, 719
- 25.14 Análise computacional, 720

## 26 Análise de sistemas — uma introdução, 727

- 26.1 Introdução, 727
- 26.2 Os parâmetros de impedância  $Z_e$  e  $Z_o$ , 728
- 26.3 Os ganhos de tensão  $A_{v_{NL}}$ ,  $A_v$  e  $A_{vT}$ , 730
- 26.4 Os ganhos de corrente  $A_i$  e  $A_{iT}$  e o ganho de potência  $A_p$ , 732
- 26.5 Sistemas em cascata, 734
- 26.6 Parâmetros de impedância ( $z$ ), 736
- 26.7 Parâmetros de admitância ( $y$ ), 739

- 26.8 Parâmetros híbridos ( $h$ ), 741
- 26.9 Impedâncias de entrada e de saída, 743
- 26.10 Conversão de parâmetros, 745
- 26.11 Análise computacional, 746

## Apêndices

### Apêndice A

PSpice, C++, MathCAD, 754

### Apêndice B

Fatores de conversão, 756

### Apêndice C

Determinantes, 759

### Apêndice D

Código de cores de capacitores de mica (picofarads), 766

### Apêndice E

Código de cores para capacitores cilíndricos (picofarads), 767

### Apêndice F

O alfabeto grego, 768

### Apêndice G

Conversões entre parâmetros magnéticos, 769

### Apêndice H

Condições para a máxima transferência de potência, 770

### Apêndice I

Respostas de alguns problemas selecionados com numeração ímpar, 772

## Índice, 781

# Apêndices

**APÊNDICE A**  
**PSpice, C++ e MathCad**

**APÊNDICE B**  
**Fatores de Conversão**

**APÊNDICE C**  
**Determinantes**

**APÊNDICE D**  
**Código de Cores para Capacitores de Mica**  
**(Picofarads)**

**APÊNDICE E**  
**Código de Cores para Capacitores Cilíndricos**  
**(Picofarads)**

**APÊNDICE F**  
**Alfabeto Grego**

**APÊNDICE G**  
**Conversões entre Parâmetros Magnéticos**

**APÊNDICE H**  
**Condições para a Máxima Transferência de Potência**

**APÊNDICE I**  
**Respostas de Problemas Ímpares Escolhidos**

# Apêndice A

## PSpice, C++ e MathCad

### PSpice

O programa de computador utilizado neste livro, o PSpice, é originário de programas desenvolvidos na Universidade da Califórnia em Berkeley durante os anos 70. SPICE é um acrônimo para *Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis* — Programa de Simulação com Ênfase em Circuitos Integrados. O SPICE tem sofrido muitas mudanças desde as primeiras versões de programas para análise de circuitos, como o ECAP (Electrical Circuit Analysis Program — Programa de Análise de Circuitos Elétricos). Enquanto algumas empresas adaptaram o SPICE a suas necessidades específicas, a MicroSim desenvolveu tanto uma versão comercial como uma versão para estudantes. Como as versões comerciais ou profissionais usadas pelas empresas de engenharia são muito dispendiosas, a MicroSim autoriza a cópia da versão para estudantes dentro da comunidade universitária. Os programas apresentados neste livro foram todos desenvolvidos em uma versão para estudantes, de modo a assegurar que funcionem no ambiente estudantil. O PSpice é apenas um entre vários programas de análise e simulação de circuitos de corrente contínua e alternada capazes de analisar praticamente qualquer tipo de circuito. O pacote comercial é excessivamente complexo para a maioria das aplicações em sala de aula, além de muito caro, enquanto o pacote para estudantes foi desenvolvido de modo a permitir que os alunos se familiarizem com esta importante ferramenta por um custo mínimo. Na verdade, como já foi dito, a MicroSim autoriza a cópia da versão para estudantes como forma de facilitar a sua disseminação.

O texto deste livro foi escrito de forma a fornecer detalhes suficientes para conduzir o usuário através da análise sem necessidade de nenhum texto adicional. Entretanto, a MicroSim fornece manuais a preços acessíveis que podem ser úteis para quem desejar níveis de detalhamento superiores aos oferecidos neste livro. O PSpice é fornecido atualmente em dois formatos: DOS e Windows. No primeiro, o circuito é descrito através de parâmetros alfanuméricos que especificam os componentes que estão ligados aos diferentes nós; no segundo, o circuito é desenhado na tela do computador. Esta é a única diferença entre as duas versões; o modo como o programa analisa o circuito e o formato de saída são exatamente os mesmos nos dois casos.

### Equipamentos Necessários

As análises que aparecem neste livro foram executadas com a versão 6.2 do programa PSpice. Esta versão pode ser instalada e executada nas seguintes plataformas:

- Computadores PC e compatíveis (IBM, COMPAQ, TANDY, GATEWAY etc.)
- Estações SUN SPARC rodando Sun OS 4.1.2 (Solaris 1.0.1)
- Estações SUN SPARC rodando Solaris 2.3 (Sun OS 5.3)
- Estações de trabalho HP9000/800

### Configurações Mínimas

- Um computador com processador 80386 ou melhor
- Pelo menos 4 MB de RAM
- Co-processador matemático
- Pelo menos 20 MB de espaço livre no disco rígido

Uma porta serial (para versões normais) ou uma porta paralela (para versões de rede)  
 Pelo menos um drive de 3,5"  
 Sistema operacional MS-DOS 3.3 ou posterior  
 Monitor monocromático ou colorido e placa de vídeo compatível  
 Para a versão Windows, Windows 3.1 ou posterior  
 Drive de CD-ROM para a versão em CD-ROM

## Documentação

A documentação está disponível on-line (CD-ROM) ou em formato impresso (manuais). Para informações a respeito de como adquirir os manuais, o leitor deve ligar para (714) 837-3022 ou (800) 245-3022.

Entre os manuais disponíveis estão os seguintes:

Manuais de Instalação (DOS ou Windows)  
 Guia do Usuário para Análise de Circuitos (DOS ou Windows)  
 Manual de Referência para Análise de Circuitos (DOS ou Windows)  
 Guias, Notas Técnicas e Sugestões Práticas (para as duas versões)  
 Esquemas MicroSim (Windows)

## Assistência Técnica

A assistência técnica está disponível através do seguinte número, de 8:30 às 17:00, Pacific Standard Time, de segunda a sexta-feira: (714) 837-0790.

A MicroSim também dispõe de um Bulletin Board Service (BBS). Neste BBS, o leitor encontrará informações a respeito dos programas oferecidos pelo MicroSim e um serviço de mensagens que o usuário pode usar para apresentar comentários e sugestões. Telefone de acesso: (714) 830-1550. Configuração do modem: 1200-14, k baud, N-8-1).

O endereço da MicroSim na Internet é Tech.Support@MicroSim.com.

## C++

A versão de C++ utilizada neste livro é o Borland C++ 4.0, disponível em CD-ROM para DOS e Windows.

## Configurações Mínimas

DOS versão 4.01 ou posterior  
 Windows 3.1 ou posterior, no modo 386-enhanced  
 Disco rígido com 2 MB de espaço livre para a instalação mínima a partir do CD-ROM (90 MB para a instalação completa)  
 Drive de CD-ROM  
 Pelo menos 4 MB de memória estendida (RAM)

Embora os itens a seguir não sejam essenciais, eles podem melhorar o desempenho do sistema:

8 MB de RAM  
 Co-processador matemático (se você for escrever programas que usem aritmética de ponto flutuante); o Borland C++ 4.0 emula esse co-processador se ele não estiver presente.

## Documentação (Somente no CD-ROM)

Guia do Usuário  
 Guia do Programador  
 Manual das Bibliotecas  
 Manual do DOS  
 Guia do Usuário do Turbo Debugger  
 Guia do Programador para Windows  
 Guia de Referência para Windows  
 Exemplos de programas  
 Outros.

## MathCad

O livro utiliza a Edição para Estudantes do MathCad Versão 2.54, escrita por Richard B. Anderson e publicada por Addison-Wesley Publishing Company, Inc. e The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc. A Edição para Estudantes foi desenvolvida e programada por MathSoft Inc.

Podem ser obtidas informações através da Addison-Wesley Publishing Company pelo telefone (617) 944-3700 ou por carta ao Eastern Regional Office, Route 128, Reading, MA 01867, USA.

# Apêndice B

## FATORES DE CONVERSÃO

Para Converter de	Para	Multiplique por
Anos	Dias	365
	Horas	8760
	Minutas	525.600
	Segundos	$3,1536 \times 10^7$
Btus	Calorias-grama	251.996
	Ergs	$1,054 \times 10^{10}$
	Libras-pé	777.649
	Hps-hora	0,000393
	Joules	1054,35
	Quilowatts-hora	0,000293
	Watts-segundo	1054,35
Centímetros	Angstroms	$1 \times 10^8$
	Pés	0,0328
	Polegadas	0,3937
	Metros	0,01
	Milhas	$6,214 \times 10^{-6}$
	Milímetros	10
Dias	Horas	24
	Minutos	1440
	Segundos	86.400
Dinas	Galões	264,172
	Newtons	0,00001
	Libras	$2,248 \times 10^{-6}$
Elétrons-volts	Ergs	$1,60209 \times 10^{-12}$
Ergs	Dinas-centímetro	1,0
	Elétrons-volts	$6,242 \times 10^{11}$
	Libras-pé	$7,376 \times 10^{-8}$
	Joules	$1 \times 10^{-7}$
	Quilowatts-hora	$2,777 \times 10^{-14}$
Galões	Polegadas cúbicas	231
	Litros	3,785
	Oncas	128
	Pintas	8
Gauss	Maxwells/centímetro quadrado	1,0
	Linhas/centímetro quadrado	1,0
	Linhas/polegada quadrada	6,4516

Para Converter de	Para	Multiplique por
Gilberts	Ampères-espira	0,7958
Gramas	Dinas	980,665
	Onças	0,0353
	Libras	0,0022
Horas	Segundos	3600
HP	Btus/hora	2547,16
	Ergs/segundo	$7,46 \times 10^8$
	Pés-libra/segundo	550,221
	Joules/segundo	746
	Watts	746
Joules	Btus	0,000948
	Ergs	$1 \times 10^7$
	Libras-pé	0,7376
	Hps-hora	$3,725 \times 10^{-3}$
	Quilowatts-hora	$2,777 \times 10^{-3}$
	Watts-segundo	1,0
Libras-pé	Dinas-centímetro	$1,3558 \times 10^7$
	Ergs	$1,3558 \times 10^7$
	Hps-hora	$5,050 \times 10^{-3}$
	Joules	1,3558
	Newtons-metro	1,3558
Linhas	Maxwells	1,0
Linhas/centímetro quadrado	Gauss	1,0
Linhas/polegada quadrada	Gauss	0,1550
	Webers/polegada quadrada	$1 \times 10^{-8}$
Litros	Centímetros cúbicos	1000,028
	Polegadas cúbicas	61,025
	Galões	0,2642
	Onças fluidas	33,815
	Quartos (líquido nos EUA)	1,0567
Lumens	Velas	0,0796
Lumens/centímetro quadrado	Lamberts	1,0
Lumens/pé quadrado	Velas-pé	1,0
Maxwells	Linhas	1,0
	Webers	$1 \times 10^{-8}$
Metros	Angstroms	$1 \times 10^{10}$
	Centímetros	100
	Pés	3,2808
	Polegadas	39,370
	Milhas	0,000621
Metros cúbicos	Pés cúbicos	35,315
Mils circulares	Centímetros quadrados	$5,067 \times 10^{-6}$
	Polegadas quadradas	$7,854 \times 10^{-7}$

Para Converter de	Para	Multiplique por
Milhas	Pés	5280
	Quilômetros	1,609
	Metros	1609,344
Milhas/hora	Quilômetros/hora	1,609344
Newtons-metro	Dinas-centímetro	$1 \times 10^5$
	Quilogramas-metro	0,10197
Oersteds	Ampères-espiras/polegada	2,0212
	Ampères-espiras/metro	79,577
	Gilberts/centímetro	1,0
Pés	Centímetros	30,48
	Metros	0,3048
Polegadas	Angstroms	$2,54 \times 10^8$
	Centímetros	2,54
	Pés	0,0833
	Metros	0,0254
Polegadas cúbicas	Centímetros cúbicos	16,387
	Galões	0,00433
Quartos	Centímetros cúbicos	946,353
	Polegadas cúbicas	57,75
	Galões	0,25
	Litros	0,9463
	Pintas	2
	Oncas fluidas	32
Quilogramas	Dinas	980,665
	Oncas	35,2
	Libras	2,2
Radianos	Graus	57,2958
Slugs	Quilogramas	14,5939
	Libras	32,1740
Velas-pé	Lumens/pé quadrado	1,0
	Lumens/metro quadrado	10,764
Watts	Btus/hora	3,4144
	Ergs/segundo	$1 \times 10^7$
	HP	0,00134
	Joules/segundo	1,0
Webers	Linhas	$1 \times 10^9$
	Maxwells	$1 \times 10^8$

# Apêndice C

## DETERMINANTES

Os determinantes são utilizados para resolver sistemas de duas ou mais equações lineares. Uma vez que o método seja entendido perfeitamente, podemos obter as soluções de forma simples e direta.

Considere o seguinte sistema de equações,  $x$  e  $y$  são as incógnitas e  $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1$  e  $c_2$  são constantes:

Col. 1	Col. 2	Col. 3
$a_1x$	$+ b_1y$	$= c_1$
$a_2x$	$+ b_2y$	$= c_2$

(C.1a)

(C.1b)

Uma das maneiras de resolver o problema é explicitar uma das incógnitas na Eq. (C.1a) e substituí-la na Eq. (C.1b). Assim, por exemplo, determinando o valor de  $x$  na Eq. (C.1a),

$$x = \frac{c_1 - b_1y}{a_1}$$

e substituindo o resultado na Eq. (C.1b), temos:

$$a_2 \left( \frac{c_1 - b_1y}{a_1} \right) + b_2y = c_2$$

Agora é possível determinar o valor de  $y$ , a única variável que resta, e substituir o resultado na Eq. (C.1a) ou (C.1b) para obter o valor de  $x$ . Este método pode ser aceitável no caso de um sistema de duas equações, mas se torna muito longo e cansativo para sistemas de três ou mais equações.

A solução de um sistema de duas equações com o auxílio de determinantes é a seguinte:

Col. 1	Col. 2	Col. 1	Col. 2
$x = \frac{\begin{vmatrix} c_1 & b_1 \\ c_2 & b_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}}$		$y = \frac{\begin{vmatrix} a_1 & c_1 \\ a_2 & c_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}}$	

(C.2)

Observe, em primeiro lugar, que apenas constantes aparecem entre traços verticais e que os dois denominadores são iguais. Na verdade, cada um desses denominadores é simplesmente uma lista dos coeficientes de  $x$  e  $y$  na mesma ordem em que aparecem nas Eqs. (C.1a) e (C.1b). Na solução de  $x$ , os coeficientes de  $x$  no numerador são substituídos pelas constantes de segundo membro das Eqs. (C.1a) e (C.1b), enquanto os coeficientes de  $y$  são mantidos. Na solução de  $y$ , os coeficientes de  $y$  no numerador são substituídos pelas constantes do segundo membro das Eqs. (C.1a) e (C.1b) e os coeficientes de  $x$  são mantidos.

Os blocos que aparecem entre linhas verticais no numerador e no denominador das Eqs. (C.2) são chamados de *determinantes* (D) e podem ser calculados numericamente da seguinte forma:

Col. 1	Col. 2
Determinante = $D = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix} = a_1b_2 - a_2b_1$	

(C.3)

O valor expandido é obtido multiplicando o elemento do canto superior esquerdo pelo elemento do canto inferior direito e subtraindo do resultado o produto do dois outros elementos. Este determinante em particular é chamado de determinante de *segunda ordem* porque contém duas linhas e duas colunas.

Ao resolver sistemas de equações com o auxílio de determinantes, é importante lembrar que a ordem dos coeficientes das incógnitas nas equações deve ser respeitada na hora de escrever os determinantes. Assim, como  $a_1$  e  $a_2$  estão na primeira coluna das Eqs. (C.1a) e (C.1b), devem aparecer na primeira coluna. (O mesmo se aplica a  $b_1$  e  $b_2$ .)

Expandindo todos os determinantes, obtemos as seguintes expressões:

$$x = \frac{\begin{vmatrix} c_1 & b_1 \\ c_2 & b_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}} = \frac{c_1 b_2 - c_2 b_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \quad (\text{C.4a})$$

$$y = \frac{\begin{vmatrix} a_1 & c_1 \\ a_2 & c_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}} = \frac{a_1 c_2 - a_2 c_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \quad (\text{C.4b})$$

**EXEMPLO C.1** Calcule os seguintes determinantes:

a.  $\begin{vmatrix} 2 & 2 \\ 3 & 4 \end{vmatrix} = (2)(4) - (3)(2) = 8 - 6 = 2$

b.  $\begin{vmatrix} 4 & -1 \\ 6 & 2 \end{vmatrix} = (4)(2) - (6)(-1) = 8 + 6 = 14$

c.  $\begin{vmatrix} 0 & -2 \\ -2 & 4 \end{vmatrix} = (0)(4) - (-2)(-2) = 0 - 4 = -4$

d.  $\begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 3 & 10 \end{vmatrix} = (0)(10) - (3)(0) = 0$

**EXEMPLO C.2** Resolva o sistema:

$$\begin{aligned} 2x + y &= 3 \\ 3x + 4y &= 2 \end{aligned}$$

**Solução:**

$$x = \frac{\begin{vmatrix} 3 & 1 \\ 2 & 4 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2 & 1 \\ 3 & 4 \end{vmatrix}} = \frac{(3)(4) - (2)(1)}{(2)(4) - (3)(1)} = \frac{12 - 2}{8 - 3} = \frac{10}{5} = 2$$

$$y = \frac{\begin{vmatrix} 2 & 3 \\ 3 & 2 \end{vmatrix}}{5} = \frac{(2)(2) - (3)(3)}{5} = \frac{4 - 9}{5} = \frac{-5}{5} = -1$$

**Verificação:**

$$\begin{aligned} 2x + y &= (2)(2) + (-1) \\ &= 4 - 1 = 3 \quad (\text{confere}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 3x + 4y &= (3)(2) + (4)(-1) \\ &= 6 - 4 = 2 \quad (\text{confere}) \end{aligned}$$

**EXEMPLO C.3** Obtenha os valores de  $x$  e  $y$  no sistema a seguir:

$$\begin{aligned} -x + 2y &= 3 \\ 3x - 2y &= -2 \end{aligned}$$

**Solução:** Neste exemplo, observe o efeito do sinal negativo e o uso de parênteses para assegurar que o sinal correto seja obtido em cada produto:

$$\begin{aligned} x &= \frac{\begin{vmatrix} 3 & 2 \\ -2 & -2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -1 & 2 \\ 3 & -2 \end{vmatrix}} = \frac{(3)(-2) - (-2)(2)}{(-1)(-2) - (3)(2)} \\ &= \frac{-6 + 4}{2 - 6} = \frac{-2}{-4} = \frac{1}{2} \\ y &= \frac{\begin{vmatrix} -1 & 3 \\ 3 & -2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -1 & 2 \\ 3 & -2 \end{vmatrix}} = \frac{(-1)(-2) - (3)(3)}{(-1)(-2) - (3)(2)} \\ &= \frac{2 - 9}{2 - 6} = \frac{-7}{-4} = \frac{7}{4} \end{aligned}$$

**EXEMPLO C.4** Resolva o sistema:

$$\begin{aligned} x &= 3 - 4y \\ 20y &= -1 + 3x \end{aligned}$$

**Solução:** Neste caso, é preciso, antes de mais nada, colocar as equações na mesma forma que nas Eqs. (C.1a) e (C.1b):

$$\begin{aligned} x + 4y &= 3 \\ -3x + 20y &= -1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x &= \frac{\begin{vmatrix} 3 & 4 \\ -1 & 20 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & 4 \\ -3 & 20 \end{vmatrix}} = \frac{(3)(20) - (-1)(4)}{(1)(20) - (-3)(4)} \\ &= \frac{60 + 4}{20 + 12} = \frac{64}{32} = 2 \\ y &= \frac{\begin{vmatrix} 1 & 3 \\ -3 & -1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & 4 \\ -3 & 20 \end{vmatrix}} = \frac{(1)(-1) - (-3)(3)}{(1)(20) - (-3)(4)} \\ &= \frac{-1 + 9}{20 + 12} = \frac{8}{32} = \frac{1}{4} \end{aligned}$$

O uso de determinantes não se limita a sistemas de duas equações; os determinantes podem ser aplicados a sistemas com qualquer número de equações. Inicialmente, vamos apresentar um método que se aplica apenas a determinantes de terceira ordem, caso em que se enquadra a maioria dos problemas deste livro. Em seguida, discutiremos um método mais geral para resolver sistemas com qualquer número de equações.

Considere o seguinte sistema de equações:

Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4
$a_1x$	$+ b_1y$	$+ c_1z$	$= d_1$
$a_2x$	$+ b_2y$	$+ c_2z$	$= d_2$
$a_3x$	$+ b_3y$	$+ c_3z$	$= d_3$

onde  $x$ ,  $y$  e  $z$  são incógnitas e  $a_{1,2,3}$ ,  $b_{1,2,3}$ ,  $c_{1,2,3}$  e  $d_{1,2,3}$  são constantes.

Os determinantes envolvidos no cálculo de  $x$ ,  $y$  e  $z$  podem ser obtidos por um método análogo ao que foi usado no caso de um sistema de duas equações. No caso de  $x$ , por exemplo, o determinante do numerador é obtido substituindo os elementos da primeira coluna pelos elementos do segundo membro do sistema de equações. O denominador é simplesmente o determinante dos coeficientes das incógnitas. Os resultados são os seguintes:

$$x = \frac{\begin{vmatrix} d_1 & b_1 & c_1 \\ d_2 & b_2 & c_2 \\ d_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix}}{D}, \quad y = \frac{\begin{vmatrix} a_1 & d_1 & c_1 \\ a_2 & d_2 & c_2 \\ a_3 & d_3 & c_3 \end{vmatrix}}{D}, \quad z = \frac{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & d_3 \end{vmatrix}}{D}$$

onde

$$D = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix}$$

Para determinar o valor numérico de determinantes de terceira ordem, basta repetir as duas primeiras colunas de determinante à direita do determinante e somar os produtos dos elementos que pertencem a diagonais específicas, da forma indicada a seguir:

$$D = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix} \begin{matrix} 4(-) & 5(-) & 6(-) \\ a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \\ 1(+) & 2(+) & 3(+) \end{matrix}$$

Os produtos associados às diagonais 1, 2 e 3 são positivos e sua soma é dada por:

$$+a_1b_2c_3 + b_1c_2a_3 + c_1a_2b_3$$

Os produtos associados às diagonais 4, 5 e 6 são negativos e sua soma é dada por:

$$-a_3b_2c_1 - b_3c_2a_1 - c_3a_2b_1$$

O resultado final é a soma de todas as diagonais:

$$\boxed{+(a_1b_2c_3 + b_1c_2a_3 + c_1a_2b_3) - (a_3b_2c_1 + b_3c_2a_1 + c_3a_2b_1)} \quad (\text{C.5})$$

**Atenção:** Este método de expansão é válido apenas para determinantes de terceira ordem!

**EXEMPLO C.5** Calcule o seguinte determinante:

$$\begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ -2 & 1 & 0 \\ 0 & 4 & 2 \end{vmatrix} \rightarrow \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ -2 & 1 & 0 \\ 0 & 4 & 2 \end{vmatrix} \begin{matrix} (-) & (-) & (-) \\ 1 & 2 & 3 \\ -2 & 1 & 0 \\ 0 & 4 & 2 \\ (+) & (+) & (+) \end{matrix}$$

**Solução**

$$\begin{aligned} & [(1)(1)(2) + (2)(0)(0) + (3)(-2)(4)] \\ & \quad - [(0)(1)(3) + (4)(0)(1) + (2)(-2)(2)] \\ & = (2 + 0 - 24) - (0 + 0 - 8) = (-22) - (-8) \\ & = -22 + 8 = -14 \end{aligned}$$

**EXEMPLO C.6** Obtenha o valor de  $x$ ,  $y$  e  $z$  no seguinte sistema de equações:

$$\begin{aligned} 1x + 0y - 2z &= -1 \\ 0x + 3y + 1z &= +2 \\ 1x + 2y + 3z &= 0 \end{aligned}$$

**Solução**

$$x = \frac{\begin{vmatrix} -1 & 0 & -2 \\ 2 & 3 & 1 \\ 0 & 2 & 3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & 0 & -2 \\ 0 & 3 & 1 \\ 1 & 2 & 3 \end{vmatrix}} = \frac{\begin{vmatrix} -1 & 0 & -2 \\ 2 & 3 & 1 \\ 0 & 2 & 3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & 0 & -2 \\ 0 & 3 & 1 \\ 1 & 2 & 3 \end{vmatrix}}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{[(-1)(3)(3) + (0)(1)(0) + (-2)(2)(2)] - [(0)(3)(-2) + (2)(1)(-1) + (3)(2)(0)]}{[(1)(3)(3) + (0)(1)(1) + (-2)(0)(2)] - [(1)(3)(-2) + (2)(1)(1) + (3)(0)(0)]} \\ &= \frac{(-9 + 0 - 8) - (0 - 2 + 0)}{(9 + 0 + 0) - (-6 + 2 + 0)} \\ &= \frac{-17 + 2}{9 + 4} = -\frac{15}{13} \end{aligned}$$

$$y = \frac{\begin{vmatrix} 1 & -1 & -2 \\ 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 3 \end{vmatrix}}{13} = \frac{\begin{vmatrix} 1 & -1 & -2 \\ 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 3 \end{vmatrix}}{13}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{[(1)(2)(3) + (-1)(1)(1) + (-2)(0)(0)] - [(1)(2)(-2) + (0)(1)(1) + (3)(0)(-1)]}{13} \\ &= \frac{(6 - 1 + 0) - (-4 + 0 + 0)}{13} \\ &= \frac{5 + 4}{13} = \frac{9}{13} \end{aligned}$$

$$z = \frac{\begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 3 & 2 \\ 1 & 2 & 0 \end{vmatrix}}{13} = \frac{\begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 3 & 2 \\ 1 & 2 & 0 \end{vmatrix}}{13}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{[(1)(3)(0) + (0)(2)(1) + (-1)(0)(2)] - [(1)(3)(-1) + (2)(2)(1) + (0)(0)(0)]}{13} \\ &= \frac{(0 + 0 + 0) - (-3 + 4 + 0)}{13} \\ &= \frac{0 - 1}{13} = -\frac{1}{13} \end{aligned}$$

ou, a partir de  $0x + 3y + 1z = +2$ ,

$$z = 2 - 3y = 2 - 3\left(\frac{9}{13}\right) = \frac{26}{13} - \frac{27}{13} = -\frac{1}{13}$$

**Verificação:**

$$\left. \begin{aligned} 1x + 0y - 2z &= -1 \\ 0x + 3y + 1z &= +2 \\ 1x + 2y + 3z &= 0 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} -\frac{15}{13} + 0 + \frac{2}{13} &= -1 \\ 0 + \frac{27}{13} + \frac{-1}{13} &= +2 \\ -\frac{15}{13} + \frac{18}{13} + \frac{-3}{13} &= 0 \end{aligned} \left\} \begin{aligned} -\frac{13}{13} &= -1 \checkmark \\ \frac{26}{13} &= +2 \checkmark \\ -\frac{18}{13} + \frac{18}{13} &= 0 \checkmark \end{aligned}$$

Vamos agora passar à abordagem geral do problema de expansão dos determinantes, que é válida para determinantes de qualquer ordem. Uma das formas de expandir um determinante de terceira ordem é a seguinte:

$$D = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix} = a_1 \underbrace{\left( + \begin{vmatrix} b_2 & c_2 \\ b_3 & c_3 \end{vmatrix} \right)}_{\text{Co-fator}} + b_1 \underbrace{\left( - \begin{vmatrix} a_2 & c_2 \\ a_3 & c_3 \end{vmatrix} \right)}_{\text{Co-fator}} + c_1 \underbrace{\left( + \begin{vmatrix} a_2 & b_2 \\ a_3 & b_3 \end{vmatrix} \right)}_{\text{Co-fator}}$$

Fator multiplicador
Fator multiplicador
Fator multiplicador

Esta expansão foi obtida multiplicando os elementos da primeira linha de  $D$  pelos co-fatores correspondentes. Não é necessário que os fatores multiplicadores pertençam à primeira linha; na verdade, qualquer *linha ou coluna* pode ser usada para expandir um determinante.

O sinal de cada co-fator depende da posição do fator multiplicador correspondente, de acordo com o seguinte esquema:

$$\begin{vmatrix} + & - & + \\ - & + & - \\ + & - & + \end{vmatrix}$$

Observe que o sinal de cada elemento pode ser obtido atribuindo o sinal positivo ao elemento situado no canto superior esquerdo e atribuindo alternadamente sinais negativos e positivos aos elementos vizinhos, tanto no sentido horizontal como no vertical.

No caso de um determinante de terceira ordem, os elementos têm os seguintes sinais:

$$\begin{vmatrix} a_1^{(+)} & b_1^{(-)} & c_1^{(+)} \\ a_2^{(-)} & b_2^{(+)} & c_2^{(-)} \\ a_3^{(+)} & b_3^{(-)} & c_3^{(+)} \end{vmatrix}$$

Os menores complementares associados a cada fator multiplicativo são obtidos eliminando a linha e a coluna nas quais o fator multiplicativo está localizado e escrevendo um determinante de segunda ordem com os elementos restantes, nas mesmas posições relativas que tinham no determinante de terceira ordem.

Considere os co-fatores associados a  $a_1$  e  $b_1$  na expansão de  $D$ . O sinal é positivo para  $a_1$  e negativo para  $b_1$ , como vemos no esquema padrão. De acordo com o método que acabamos de descrever, podemos encontrar os menores complementares de  $a_1$  e  $b_1$  da seguinte forma:

$$a_{1(\text{menor})} = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} b_2 & c_2 \\ b_3 & c_3 \end{vmatrix}$$

$$b_{1(\text{menor})} = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_2 & c_2 \\ a_3 & c_3 \end{vmatrix}$$

Como já dissemos, qualquer linha ou coluna pode ser usada para expandir um determinante. Usando a primeira coluna, obtemos a expansão

$$D = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix} = a_1 \left( + \begin{vmatrix} b_2 & c_2 \\ b_3 & c_3 \end{vmatrix} \right) + a_2 \left( - \begin{vmatrix} b_1 & c_1 \\ b_3 & c_3 \end{vmatrix} \right) + a_3 \left( + \begin{vmatrix} b_1 & c_1 \\ b_2 & c_2 \end{vmatrix} \right)$$

Às vezes, a escolha de uma certa linha ou coluna pode facilitar consideravelmente o trabalho de expandir um determinante. Nos determinantes a seguir, por exemplo, a melhor escolha é, respectivamente, a primeira coluna e a terceira linha:

$$D = \begin{vmatrix} 2 & 3 & -2 \\ 0 & 4 & 5 \\ 0 & 6 & 7 \end{vmatrix} = 2 \left( + \begin{vmatrix} 4 & 5 \\ 6 & 7 \end{vmatrix} \right) + 0 + 0 = 2(28 - 30)$$

$$= -4$$

$$\begin{aligned}
 D &= \begin{vmatrix} 1 & 4 & 7 \\ 2 & 6 & 8 \\ 2 & 0 & 3 \end{vmatrix} = 2 \left( + \begin{vmatrix} 4 & 7 \\ 6 & 8 \end{vmatrix} \right) + 0 + 3 \left( + \begin{vmatrix} 1 & 4 \\ 2 & 6 \end{vmatrix} \right) \\
 &= 2(32 - 42) + 3(6 - 8) = 2(-10) + 3(-2) \\
 &= -26
 \end{aligned}$$

---

**EXEMPLO C.7** Expanda os seguintes determinantes de terceira ordem:

$$\begin{aligned}
 \text{a. } D &= \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 3 \end{vmatrix} = 1 \left( + \begin{vmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 3 \end{vmatrix} \right) + 3 \left( - \begin{vmatrix} 2 & 3 \\ 1 & 3 \end{vmatrix} \right) + 2 \left( + \begin{vmatrix} 2 & 3 \\ 2 & 1 \end{vmatrix} \right) \\
 &= 1[6 - 1] + 3[-(6 - 3)] + 2[2 - 6] \\
 &= 5 + 3(-3) + 2(-4) \\
 &= 5 - 9 - 8 \\
 &= -12
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{b. } D &= \begin{vmatrix} 0 & 4 & 6 \\ 2 & 0 & 5 \\ 8 & 4 & 0 \end{vmatrix} = 0 + 2 \left( - \begin{vmatrix} 4 & 6 \\ 4 & 0 \end{vmatrix} \right) + 8 \left( + \begin{vmatrix} 4 & 6 \\ 0 & 5 \end{vmatrix} \right) \\
 &= 0 + 2[-(0 - 24)] + 8[(20 - 0)] \\
 &= 0 + 2(24) + 8(20) \\
 &= 48 + 160 \\
 &= 208
 \end{aligned}$$


---

# Apêndice D

## CÓDIGO DE CORES DE CAPACITORES DE MICA (PICOFARADS)

Especificações RETMA e MIL

Cor	Algarismo Significativo	Multiplicador Decimal	Tolerância $\pm \%$	Classe	Coef. de Temp. PPM/°C Não Mais que	Varição da Cap. Não Mais que
Preto	0	1	20	A	$\pm 1.000$	$\pm (5\% + 1 \text{ pF})$
Marrom	1	10	—	B	$\pm 500$	$\pm (3\% + 1 \text{ pF})$
Vermelho	2	100	2	C	$\pm 200$	$\pm (0,5\% + 0,5 \text{ pF})$
Laranja	3	1.000	3	D	$\pm 100$	$\pm (0,3\% + 0,1 \text{ pF})$
Amarelo	4	10.000	—	E	$+100 - 20$	$\pm (0,1\% + 0,1 \text{ pF})$
Verde	5	—	5	—	—	—
Azul	6	—	—	—	—	—
Violeta	7	—	—	—	—	—
Cinza	8	—	—	I	$+150 - 50$	$\pm (0,03\% + 0,2 \text{ pF})$
Branco	9	—	—	J	$+100 - 50$	$\pm (0,2\% + 0,2 \text{ pF})$
Dourado	—	0,1	—	—	—	—
Prateado	—	0,01	10	—	—	—

Nota: Se as duas filas de pontos não estiverem do mesmo lado, gire o capacitor, usando os terminais como eixo, para ler a segunda fila do lado oposto.

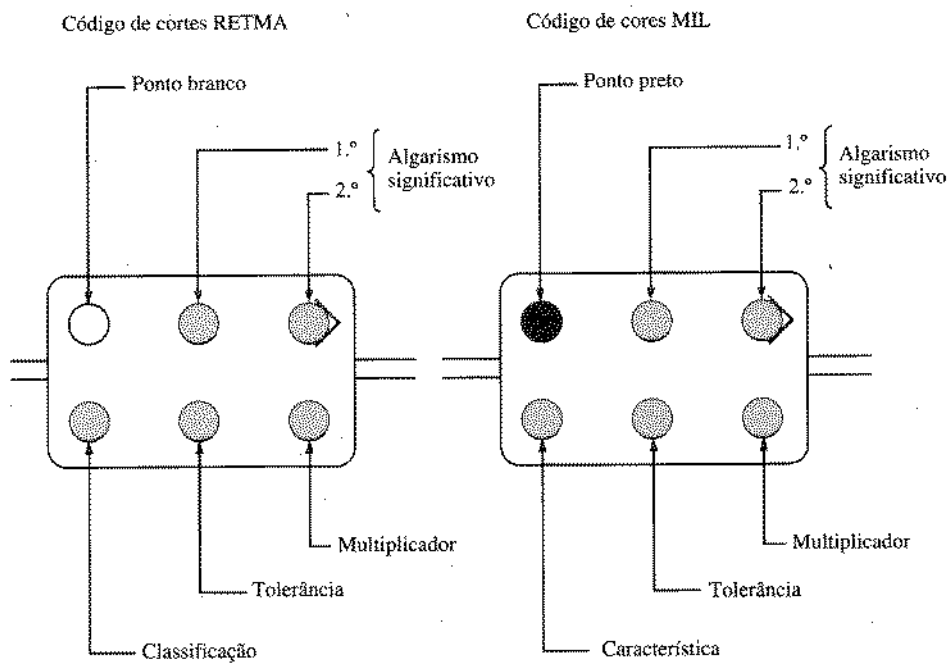


Fig. D.1

# Apêndice E

## CÓDIGO DE CORES PARA CAPACITORES CILÍNDRICOS (PICOFARADS)

Cor	Algarismo Significativo	Multiplicador	Tolerância $\pm \%$
Preto	0	1	20
Marrom	1	10	—
Vermelho	2	100	—
Laranja	3	1000	30
Amarelo	4	10.000	40
Verde	5	$10^5$	5
Azul	6	$10^6$	—
Violeta	7	—	—
Cinza	8	—	—
Branco	9	—	10

*Nota:* A tensão de trabalho é identificada por um número de um algarismo para tensões até 900 V e por um número de dois algarismos para tensões maiores do que 900 V. Em ambos os casos, deve-se acrescentar dois zeros ao valor indicado.

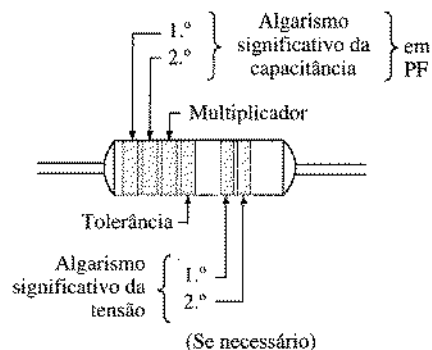


Fig. E.1

# Apêndice F

## O ALFABETO GREGO

Letra	Maiúscula	Minúscula	Utilizada para Designar
Alfa	A	$\alpha$	Área, ângulos, coeficientes
Beta	B	$\beta$	Ângulos, coeficientes, densidade de fluxo
Gamma	$\Gamma$	$\gamma$	Gravidade específica, condutividade
Delta	$\Delta$	$\delta$	Densidade, variação
Epsilon	E	$\epsilon$	Base dos logaritmos naturais
Zeta	Z	$\zeta$	Coeficientes, coordenadas, impedância
Eta	H	$\eta$	Eficiência, coeficiente de histerese
Teta	$\Theta$	$\theta$	Ângulo de fase, temperatura
Iota	I	$\iota$	
Kapa	K	$\kappa$	Constante dielétrica, suscetibilidade
Lambda	$\Lambda$	$\lambda$	Comprimento de onda
Mi	M	$\mu$	Fator de amplificação, prefixo <i>micro</i> , permeabilidade
Ni	N	$\nu$	Relatividade
Csi	$\Xi$	$\xi$	
Ômicron	O	$o$	
Pi	$\Pi$	$\pi$	3,1416
Rô	P	$\rho$	Resistividade
Sigma	$\Sigma$	$\sigma$	Somatório
Tau	T	$\tau$	Constante de tempo
Ipsilon	Y	$\upsilon$	
Fi	$\Phi$	$\phi$	Ângulos, fluxo magnético
Xi	X	$\chi$	
Psi	$\Psi$	$\psi$	Fluxo elétrico, diferença de fase
Ômega	$\Omega$	$\omega$	Ohms, velocidade angular

# Apêndice G

## CONVERSÕES ENTRE PARÂMETROS MAGNÉTICOS

	SI (MKS)	CGS	Inglês
$\Phi$	webers (Wb) 1 Wb	maxwells = $10^8$ maxwells	linhas = $10^8$ linhas
$B$	Wb/m <sup>2</sup> 1 Wb/m <sup>2</sup>	gauss (maxwells/cm <sup>2</sup> ) = $10^4$ gauss	linhas/pol. <sup>2</sup> = $6,452 \times 10^3$ linhas/pol. <sup>2</sup>
$A$	1 m <sup>2</sup>	= $10^4$ cm <sup>2</sup>	= 1.550 pol. <sup>2</sup>
$\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7}$ Wb/Am	= 1 gauss/oersted	= 3,20 linhas/Am
$\mathcal{F}$	$NI$ (ampères-espiras, I) 1 I	$0,4\pi NI$ (gilberts) = 1,257 gilberts	$NI$ (I) 1 gilbert = 0,7958 I
$H$	$NI/l$ (I/m) 1 I/m	$0,4\pi NI/l$ (oersteds) = $1,26 \times 10^{-3}$ oersteds	$NI/l$ (I/pol.) = $2,54 \times 10^{-3}$ I/pol.
$H_s$	$7,97 \times 10^3 B_s$ (I/m)	$B_s$ (oersteds)	$0,313 B_s$ (I/pol.)

# Apêndice H

## CONDIÇÕES PARA A MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA

Determinação das condições para que a transferência de potência seja a maior possível quando a componente resistiva da carga é ajustável mas a componente reativa é fixa.\*

No caso do circuito da Fig. H.1, a potência fornecida à carga é dada por:

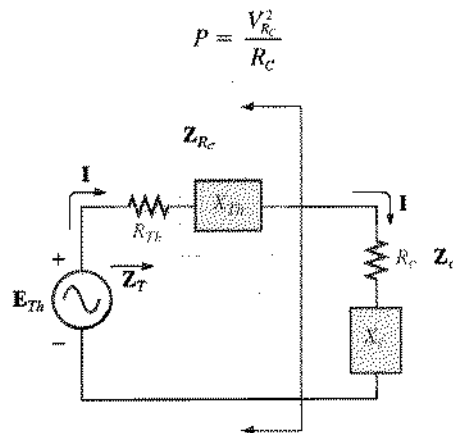


Fig. H.1

Aplicando a regra dos divisores de tensão:

$$V_{R_c} = \frac{R_c E_{Th}}{R_c + R_{Th} + X_{Th} \angle 90^\circ + X_c \angle 90^\circ}$$

O módulo de  $V_{R_c}$  é dado por:

$$V_{R_c} = \frac{R_c E_{Th}}{\sqrt{(R_c + R_{Th})^2 + (X_{Th} + X_c)^2}}$$

logo

$$V_{R_c}^2 = \frac{R_c^2 E_{Th}^2}{\sqrt{(R_c + R_{Th})^2 + (X_{Th} + X_c)^2}}$$

e portanto

$$P = \frac{V_{R_c}^2}{R_c} = \frac{R_c E_{Th}^2}{\sqrt{(R_c + R_{Th})^2 + (X_{Th} + X_c)^2}}$$

\*Agradecemos ao Professor Harry J. Franz, da Pennsylvania State University, Campus de Beaver, pela sugestão.

A potência transferida à carga será máxima quando  $dP/dR_C = 0$ . Esta igualdade ocorre para

$$R_C = \sqrt{R_{Th}^2 + (X_{Th} + X_C)^2} \quad [\text{Eq. (18.21)}]$$

O módulo da impedância total do circuito é:

$$Z_T = \sqrt{(R_{Th} + R_C)^2 + (X_{Th} + X_C)^2}$$

Substituindo a expressão de  $R_C$  nesta última equação, obtemos, após algumas manipulações algébricas:

$$Z_T = 2R_C(R_C + R_{Th})$$

e a potência à carga é dada por

$$\begin{aligned} P = I^2 R_C &= \frac{E_{Th}^2}{Z_T^2} R_C = \frac{E_{Th}^2 R_C}{2R_C(R_C + R_{Th})} \\ &= \frac{E_{Th}^2}{4 \left( \frac{R_C + R_{Th}}{2} \right)} \\ &= \frac{E_{Th}^2}{4R_{med}} \end{aligned}$$

onde

$$R_{med} = \frac{R_C + R_{Th}}{2}$$

# Apêndice I

## RESPOSTAS DE ALGUNS PROBLEMAS SELECIONADOS COM NUMERAÇÃO ÍMPAR

### Capítulo 1

5. 3 h  
7. CGS  
9. MKS = CGS =  $20^{\circ}\text{C}$   
 $K = SI = 293,15$   
11. 45,72 cm  
13. (a)  $15 \times 10^3$  (b)  $30 \times 10^{-3}$   
(c)  $7,4 \times 10^6$  (d)  $6,8 \times 10^{-6}$   
(e)  $402 \times 10^{-6}$  (f)  $200 \times 10^{-12}$   
15. (a)  $10^4$  (b) 10  
(c)  $10^9$  (d)  $10^{-2}$   
(e) 10 (f)  $10^{31}$   
17. (a)  $10^{-1}$  (b)  $10^{-4}$   
(c)  $10^9$  (d)  $10^{-9}$   
(e)  $10^{42}$  (f)  $10^3$   
19. (a)  $10^6$  (b)  $10^{-2}$   
(c)  $10^{32}$  (d)  $10^{-63}$   
21. (a)  $10^{-6}$  (b)  $10^{-3}$   
(c)  $10^{-6}$  (d)  $10^9$   
(e)  $10^{-16}$  (f)  $10^{-1}$   
23. (a) 0,006 (b) 400  
(c) 5000, 5, 0,005  
(d) 0,0003, 0,3, 300  
25. (a) 90 s (b) 144 s  
(c)  $50 \times 10^3 \mu\text{s}$   
(d) 160 mm (e) 120 ns  
(f) 41,898 dias (g) 1,02 m  
27. (a) 2,54 m (b) 1,219 m  
(c) 26,7 N (d) 0,1348 lb.  
(e) 4921,26 ft  
(f) 3,2187 m (g) 8530,17 jardas  
29.  $670,62 \times 10^6 \text{ mph}$   
31. 2,045 s  
33. 67,06 dias  
35. 3600  
37. 345,6 m  
39. 0,02 milhas/min  
41. (a)  $4,74 \times 10^{-3} \text{ Btu}$   
(b)  $7,098 \times 10^{-4} \text{ m}^3$   
(c)  $1,2096 \times 10^5 \text{ s}$   
(d) 2113,38 pints

### Capítulo 2

3. (a) 18 mN (b) 2 mN  
(c)  $180 \mu\text{N}$   
7. (a) 72 mN  
(b)  $Q_1 = 20 \mu\text{C}$ ,  $Q_2 = 40 \mu\text{C}$   
9. 3,1 A  
11. 90 C  
13. 0,5 A

15. 1,194 A > 1 A (sim)  
17. (a) 1,248 milhões  
(b) 0,936 milhões. A opção (a).  
19. 252 J  
21. 4 C  
23. 3,533 V  
25. 5 A  
27. 25 h  
29. 0,773 h  
31. a de 60 Ah pode fornecer 50% mais corrente.  
33. 545,45 mA, 129,6 kJ  
43. 600 C

### Capítulo 3

1. (a) 500 mils (b) 10 mils  
(c) 4 mils (d) 1000 mils  
(e) 240 mils (f) 3,937 mils  
3. (a) 0,04 in. (b) 0,03 in.  
(c) 0,2 in. (d) 0,025 in.  
(e) 0,00278 in. (f) 0,009 in.  
5. 73,33  $\Omega$   
7. 3,581 ft  
9. (a)  $R_{\text{prata}} > R_{\text{cobre}} > R_{\text{alumínio}}$   
(b) prata 9,9  $\Omega$ ,  
cobre 1,037  $\Omega$ ,  
alumínio 0,34  $\Omega$   
11. (a) 21,71  $\mu\Omega$  (b) 35,59  $\mu\Omega$   
(c) aumenta (d) diminui  
13. 942,28 m $\Omega$   
15. (a) #8:1,1308  $\Omega$ , #18:11,493  $\Omega$   
(b) #18:#8 = 10,164:1  $\approx$  10:1,  
#18:#8 = 1:10,164  $\approx$  1:10  
17. (a) 1,087 mA/CM  
(b) 1,384 kA/in.<sup>2</sup>  
(c) 3,6127 in.<sup>2</sup>  
19. (a) 21,71  $\mu\Omega$  (b) 35,59  $\mu\Omega$   
21. 0,15 in.  
23. 2,409  $\Omega$   
25. 3,67  $\Omega$   
27. 0,046  $\Omega$   
29. (a)  $40,29^{\circ}\text{C}$  (b)  $-195,61^{\circ}\text{C}$   
31. (a)  $\alpha_{20} \approx 0,00393$   
(b)  $83,61^{\circ}\text{C}$   
33. 1,751  $\Omega$   
35. 142,86  
41.  $-30^{\circ}\text{C}:10,2 \text{ k}\Omega$ ,  
 $100^{\circ}\text{C}:10,15 \text{ k}\Omega$   
43. 6,5 k $\Omega$   
47. (a) Vermelho Vermelho Marrom Prateado  
(b) Amarelo Violeta Vermelho Prateado

- (c) Azul Cinza Laranja Prateado  
(d) Branco Marrom Verde Prateado  
49. sim  
51. (a) 0,1566 S (b) 0,0955 S  
(c) 0,0219 S  
57. (a) 10 fc:3 k $\Omega$ , 100 fc:0,4 k $\Omega$   
(b) neg. (c) não-escalas logarítmicas  
(d)  $-321,43 \Omega/\text{fc}$

### Capítulo 4

1. 15 V  
3. 4 k $\Omega$   
5. 72 mV  
7. 54,55  $\Omega$   
9. 28,571  $\Omega$   
11. 1,2 k $\Omega$   
13. (a) 12,632  $\Omega$  (b) 4,1 MJ  
17. 800 V  
19. 1 W  
21. (a) 57.600 J  
(b)  $16 \times 10^{-3} \text{ kWh}$   
23. 2 s  
25. 196  $\mu\text{W}$   
27. 4 A  
29. 9,61 V  
31. 0,833 A, 144,06  $\Omega$   
33. (a) 0,133 mA (b) 66,5 mAh  
35. (c)  $\approx 70,7 \text{ mA}$   
37. (a) 12 kW  
(b) 10,130 W < 12.000 W (sim)  
39. 16,34 A  
41. (a) 238 W (b) 17,36%  
43. (a) 1657,78 W  
(b) 15,07 A  
(c) 19,38 A  
45. 65,25%  
47. 80%  
49. (a) 17,9%  
(b) 76,73%, 328,66% de aumento  
51. (a) 1350 J  
 $P$  (b)  $W$  dobra,  $P$  permanece a mesma  
53. 6,67 h  
55. (a) 50 kW (b) 240,38 A  
(c) 90 kWh  
57. \\$2,19

### Capítulo 5

1. (a) 20  $\Omega$ , 3 A  
(b) 1,63 M $\Omega$ , 6,135  $\mu\text{A}$   
(c) 110  $\Omega$ , 318,2 mA  
(d) 10 k $\Omega$ , 12 mA

3. (a) 16 V (b) 4,2 V  
 5. (a) 0,388 A (CW)  
 (b) 2,087 A (CCW)  
 7. (a) 5 V (b) 70 V  
 9. 3,28 mA, 7,22 V  
 11. (a) 70,6  $\Omega$ , 85 mA (CCW),  
 $V_1 = 2,8045$  V,  
 $V_2 = 0,4760$  V,  
 $V_3 = 0,850$  V,  
 $V_4 = 1,870$  V  
 (b)-(c)  $P_1 = 0,2384$  W,  
 $P_2 = 0,0405$  W,  
 $P_3 = 0,0723$  W,  
 $P_4 = 0,1590$  W  
 (d)  $\frac{1}{2}$  W (todos)  
 13. (a) 225  $\Omega$ , 0,533 A  
 (b) 8 W  
 (c) 15 V  
 15. Todos  $V_{ab}$   
 (a) 66,67 V (b) -8 V  
 (c) 20 V (d) 0,18 V  
 17. (a) 12 V (b) 24 V  
 (c) 60  $\Omega$  (d) 0,4 A  
 (e) 60  $\Omega$   
 19. (a)  $R_3 = 80 \Omega$   
 (b)  $0,2 \text{ W} < \frac{1}{4} \text{ W}$   
 21.  $R_1 = 3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 15 \text{ k}\Omega$   
 23. (a)  $R_1 = 0,4 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 1,2 \text{ k}\Omega$ ,  
 $R_3 = 4,8 \text{ k}\Omega$   
 (b)  $R_1 = 0,4 \text{ M}\Omega$ ,  
 $R_2 = 1,2 \text{ M}\Omega$ ,  
 $R_3 = 4,8 \text{ M}\Omega$   
 25. (a)  $I$  (sentido horário) = 6,667 A,  
 $V = 20$  V  
 (b)  $I$  (sentido horário) = 1 A,  
 $V = 10$  V  
 27. (a) 20 V, 26 V, 35 V,  
 -12 V, 0 V  
 (b) -6 V, -47 V, 9 V  
 (c) -15 V, -38 V  
 29.  $V_0 = 0$  V,  $V_4 = 10$  V,  
 $V_7 = 4$  V,  $V_{10} = 20$  V,  
 $V_{23} = 6$  V,  $V_{30} = -8$  V,  
 $V_{67} = 0$  V,  $V_{56} = -6$  V,  
 $I$  (para cima) = 1,5 A  
 31. 2  $\Omega$   
 33. 100  $\Omega$   
 35. 1,52%  
 (b)  $I_3 = 1,05$  A,  $I_1 = 0,3$  A,  
 $I_2 = 0,15$  A,  $I_5 = 0,6$  A  
 (d)  $P_1 = 0,27$  W,  
 $P_2 = 0,135$  W,  
 $P_3 = 0,54$  W,  
 $P_{\text{def.}} = 0,945$  W  
 (e)  $R_1, R_2 = \frac{1}{2} \text{ W}$ ,  $R_3 = 1 \text{ W}$   
 11. (a) 66,67 mA (b) 225  $\Omega$   
 (c) 8 W  
 13. (a)  $I_s = 7,5$  A,  $I_1 = 1,5$  A  
 (b)  $I_s = 9,6$  mA,  $I_1 = 0,8$  mA  
 15. 1260 W  
 17. (a) 4 mA (b) 24 V  
 (c) 18,4 mA  
 19. (a)  $I_1 = 3$  mA,  $I_2 = 1$  mA,  
 $I_3 = 1,5$  mA  
 (b)  $I_2 = 4 \mu\text{A}$ ,  $I_3 = 1,5 \mu\text{A}$ ,  
 $I_4 = 5,5 \mu\text{A}$ ,  $I_1 = 6 \mu\text{A}$   
 21. (a)  $R_1 = 5 \Omega$ ,  $R_2 = 10 \Omega$   
 (b)  $E = 12$  V,  $I_2 = 1,333$  A,  
 $I_3 = 1$  A,  $R_3 = 12 \Omega$ ,  
 $I = 4,333$  A  
 (c)  $I_1 = 64$  mA,  $I_3 = 16$  mA,  
 $I_2 = 20$  mA,  $R = 3,2 \text{ k}\Omega$ ,  
 $I = 36$  mA  
 (d)  $E = 30$  V,  $I_1 = 1$  A,  
 $I_2 = I_3 = 0,5$  A,  
 $R_2 = R_3 = 60 \Omega$ ,  
 $P_{R_2} = 15$  W  
 23. (a)  $I_1 = 4$  A,  $I_2 = 8$  A  
 (b)  $I_1 = 2$  A,  $I_2 = 4$  A,  
 $I_3 = 1$  A,  $I_4 = 1,333$  A  
 (c)  $I_1 = 272,73$  mA,  
 $I_2 = 227,27$  mA,  
 $I_3 = 90,91$  mA,  
 $I_4 = 500$  mA  
 (d)  $I_2 = 4,5$  A,  $I_3 = 8,5$  A,  
 $I_4 = 8,5$  A  
 25. (a)  $I = 4$  A,  $I_2 = 4$  A,  
 $I_1 = 3$  A  
 27.  $R_1 = 6 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 1,5 \text{ k}\Omega$ ,  
 $R_3 = 0,5 \text{ k}\Omega$   
 29.  $I = 3$  A,  $R = 2 \Omega$   
 31. (a) 6,13 V  
 (b) 9 V  
 (c) 9 V  
 33. (a) 4 V (b) 3,997 V  
 (c) 3,871 V (d) 3 V  
 (e)  $R_m$  deve ser a maior possível  
 35. Não! A polaridade da fonte de 4V  
 está invertida.  
 (d) em série:  $R_6$  e  $R_7$ ,  
 em paralelo:  $E$ ,  $R_1$ , e  $R_4$ ;  
 $R_2$  e  $R_5$   
 3. (a) sim (LKC) (b) 3 A  
 (c) sim (LKC) (d) 4 V  
 (e) 2  $\Omega$  (f) 5 A  
 (g)  $P_1 = 12$  W,  $P_2 = 18$  W,  
 $P_{\text{def.}} = 50$  W  
 5. (a) 4  $\Omega$   
 (b)  $I_s = 9$  A,  $I_1 = 6$  A,  $I_2 = 3$  A  
 (c) 6 V  
 7.  $I_1 = 6$  A,  $I_2 = 16$  A,  $I_3 = 0,8$  A,  
 $I = 22$  A  
 9. (a) 4 A  
 (b)  $I_2 = 1,333$  A,  $I_3 = 0,6665$  A  
 (c)  $V_a = 8$  V,  $V_b = 4$  V  
 11. (a) 5  $\Omega$ , 16 A  
 (b)  $I_{R_2} = 8$  A,  $I_3 = I_9 = 4$  A  
 (c)  $I_8 = 1$  A (d) 14 V  
 13. (a)  $V_G = 1,9$  V,  $V_s = 3,65$  V  
 (b)  $I_1 = I_2 = 7,05 \mu\text{A}$ ,  
 $I_D = 2,433$  mA  
 (c) 6,268 V  
 (d) 8,02 V  
 15. (a) 0,6 A  
 (b) 28 V  
 17. (a)  $I_2 = 1,667$  A,  $I_6 = 1,111$  A,  
 $I_8 = 0$  A  
 19. (a) 1,882  $\Omega$   
 (b)  $V_1 = V_4 = 32$  V  
 (c) 8 A  
 (d) 1,882  $\Omega$   
 21. (a) 6,75 A  
 (b) 32 V  
 23. 8,333  $\Omega$   
 25. (a) 24 A  
 (b) 8 A  
 (c)  $V_3 = 48$  V,  $V_5 = 24$  V,  
 $V_7 = 16$  V  
 (d)  $P(R_7) = 128$  W,  
 $P(E) = 5760$  W  
 27. 4,44 W  
 29. (a) 64 V  
 (b)  $R_{L_2} = 4 \text{ k}\Omega$ ,  
 $R_{L_3} = 3 \text{ k}\Omega$   
 (c)  $R_1 = 0,5 \text{ k}\Omega$ ,  
 $R_2 = 1,2 \text{ k}\Omega$ ,  
 $R_3 = 2 \text{ k}\Omega$   
 31. (a) sim (b)  $R_1 = 750 \Omega$ ,  
 $R_2 = 250 \Omega$   
 (c)  $R_1 = 745 \Omega$ ,  $R_2 = 255 \Omega$   
 33. (a) 1 mA (b)  $R_{\text{derivação}} = 5 \text{ m}\Omega$   
 35. (a)  $R_s = 300 \text{ k}\Omega$ ,  
 (b) 20.000  
 37. 0,05  $\mu\text{A}$

## Capítulo 6

1. (a) 2, 3, 4 (b) 2, 3 (c) 1, 4  
 3. (a) 6  $\Omega$ , 0,1667 S  
 (b) 1 k $\Omega$ , 1 mS  
 (c) 2,076 k $\Omega$ , 0,4817 mS  
 (d) 1,333  $\Omega$ , 0,75 S  
 (e) 9,948  $\Omega$ , 100,525 mS  
 (f) 0,6889  $\Omega$ , 1,4516 S  
 5. (a) 18  $\Omega$  (b)  $R_1 = R_2 = 24 \Omega$   
 7. 120  $\Omega$   
 9. (a) 0,8571  $\Omega$ , 1,1667 S

## Capítulo 7

1. (a) em série:  $E$ ,  $R_1$ , e  $R_4$ ,  
 em paralelo:  $R_2$  e  $R_3$   
 (b) em série:  $E$  e  $R_1$ ,  
 em paralelo:  $R_2$  e  $R_3$   
 (c) em série:  $E$ ,  $R_1$ , e  $R_5$ ;  
 $R_3$  e  $R_4$   
 em paralelo: nenhum elemento

## Capítulo 8

1. 28 V  
 3. (a)  $I_1 = 12$  A,  $I_x = 11$  A  
 (b)  $V_x = 24$  V,  $V_3 = 6$  V

5. (a) 3 A, 6  $\Omega$  (b) 4,091 mA, 2,2 k $\Omega$
7. (a) 8 A (b) 8 A
9. 9,6 V, 2,4 A
11. (a) 5,4545 mA, 2,2 k $\Omega$   
(b) 17,375 V (c) 5,375 V  
(d) 2,443 mA
13. (I) para cima:  $I_{R_1} = 1,445$  mA;  
para baixo:  $I_{R_3} = 9,958$  mA;  
para a esquerda:  $I_{R_2} = 8,513$  mA  
(II) para a direita:  $I_{R_1} = 2,0316$  mA;  
para a esquerda:  $I_{R_2} = 0,8$  mA;  
para cima:  $I_{R_3} = 1,2316$  mA  
para a esquerda:  $I_{R_4} = 1,2316$  mA
15. (d) para a esquerda: 63,694 mA
17. (a) para a esquerda:  $I_{R_1} = 0,1429$  A;  
para a esquerda:  $I_{R_2} = 0,7143$  A  
para baixo:  $I_{R_3} = 0,5714$  A  
(b) para baixo:  $I_{R_1} = 3,0625$  A;  
para baixo:  $I_{R_3} = 0,1875$  A  
para cima:  $I_{R_2} = 3,25$  A
19. (I)  $I_1 = 1,8701$  A;  
 $I_2 = -8,5484$  A;  
 $V_{ab} = -22,74$  V  
(II)  $I_2 = 1,274$  A;  
 $I_3 = 0,26$  A;  
 $V_{ab} = -0,904$  V
21. (a) 72,16 mA, -4,433 V  
(b) 1,953 A, -7,257 V
23. (a) Todas no sentido horário  
 $I_1 = 0,0321$  mA  
 $I_2 = -0,8838$  mA  
 $I_3 = -0,968$  mA  
 $I_4 = -0,639$  mA  
(b) Todas no sentido horário  
 $I_1 = -3,8$  A  
 $I_2 = -4,2$  A  
 $I_3 = 0,2$  A
25. (a) No sentido horário  
 $I_1 = -\frac{1}{3}$  A,  $I_2 = -\frac{1}{3}$  A  
(b) No sentido horário  
 $I_1 = -3,0625$  A,  
 $I_2 = 0,1875$  A
27. (I) (a) Sentido horário  
(b)  $I_1 = 1,871$  A,  
 $I_2 = -8,548$  A  
(c)  $I_{R_1} = 1,871$  A,  
 $I_{R_2} = -8,548$  A,  
 $I_{R_3} = 10,419$  A
29.  $I_{5\Omega}$  (para a direita) = 1,9535 A,  
 $V_a = -7,26$  V
31. (a) Todas no sentido horário  
 $I_1 = 0,0321$  mA,  
 $I_2 = -0,8838$  mA,  
 $I_3 = -0,968$  mA,  
 $I_4 = -0,639$  mA  
(b) Todas no sentido horário  
 $I_1 = 3,8$  A,  $I_2 = -4,2$  A,  
 $I_3 = 0,2$  A
33. (I) (b)  $V_1 = -14,86$  V,  
 $V_2 = -12,57$  V  
(c)  $V_{R_1} = V_{R_4} =$   
 $V_1 = -14,86$  V,  
 $V_{R_2} = V_2 = -12,57$  V,  
 $V_{R_3} = 9,71$  V (+ -)  
(II) (b)  $V_1 = -2,556$  V,  
 $V_2 = 4,03$  V  
(c)  $V_{R_1} = V_1 = -2,556$  V,  
 $V_{R_2} = V_{R_3} = V_2 = 4,03$  V,  
 $V_{R_4} = V_{R_3} = V_2 - V_1$   
 $= 6,586$  V
35. (I)  $V_1 = 7,238$  V,  
 $V_2 = -2,453$  V,  
 $V_3 = 1,405$  V  
(II)  $V_1 = -6,64$  V,  
 $V_2 = 1,288$  V,  
 $V_3 = 10,676$  V
37. (a)  $V_1 = 10,083$  V,  
 $V_2 = 6,944$  V,  
 $V_3 = -17,056$  V  
(b)  $V_1 = 48$  V,  $V_2 = 64$  V
39. (b) (I)  $V_1 = -14,86$  V,  
 $V_2 = -12,57$  V  
(II)  $V_1 = -2,556$  V,  
 $V_2 = 4,03$  V  
(c) (I)  $V_{R_1} = V_{R_4} = -14,86$  V,  
 $V_{R_2} = -12,57$  V,  
 $V_{R_3} = V_1 + 12 - V_2$   
 $= 9,71$  V  
(II)  $V_{R_1} = -2,556$  V,  
 $V_{R_2} = V_{R_3} = 4,03$  V,  
 $V_{R_4} = V_{R_3} = V_2 - V_1$   
 $= 6,586$  V
41. (I)  $V_1 = -5,311$  V,  
 $V_2 = -0,6219$  V,  
 $V_3 = 3,751$  V,  
 $V_{-5A} = -5,311$  V  
(II)  $V_1 = -6,917$  V,  
 $V_2 = 12$  V,  
 $V_3 = 2,3$  V,  
 $V_{3A} = V_2 - V_1 = 18,917$  V,  
 $V_{2A} = V_3 - V_2 = -9,7$  V
43. (b)  $V_{R_5} = 0,1967$  V  
(c) não  
(d) não
45. (b)  $I_{R_5} = 0$  A  
(c) não  
(d) não
47. (a) 3,33 mA  
(b) 1,177 A
49. (a) 133,33 mA  
(b) 7 A
51. (b) 0,833 mA
53. 4,2  $\Omega$
- (b) para baixo: 3,11 A
5. (a) 6  $\Omega$ , 6 V  
(b) 2  $\Omega$ : 0,75 A,  
30  $\Omega$ : 0,1667 A,  
100  $\Omega$ : 0,0566 A
7. (I) 2  $\Omega$ , 84 V (II) 1,579 k $\Omega$ ,  
-1,149 V
9. (I) 45  $\Omega$ , -5 V (II) 2,055 k $\Omega$ ,  
16,772 V
11. 4,041 k $\Omega$ , 9,733 V
13. (I): 14  $\Omega$ , 2,571 A,  
(II): 7,5  $\Omega$ , 1,333 A
15. (a) 9,756  $\Omega$ , 0,95 A  
(b) 2  $\Omega$ , 30 A
17. (a) 10  $\Omega$ , 0,2 A  
(b) 4,033 k $\Omega$ , 2,9758 mA
19. (I) (a) 14  $\Omega$   
(b) 23,14 W  
(II) (a) 7,5  $\Omega$   
(b) 3,33 W
21. (a) 9,756  $\Omega$ , 2,2 W  
(b) 2  $\Omega$ , 450 W
23. 0  $\Omega$
25. 500  $\Omega$
27. 39,3  $\mu$ A, 220 mV
29. 2,25 A, 6,075 V
35. (a) 0,357 mA (b) 0,357 mA  
(c) sim

## Capítulo 10

1.  $9 \times 10^3$  N/C
3. 70  $\mu$ F
5. 50 V/m
7.  $8 \times 10^3$  V/m
9. 937,5 pF
11. mica
13. (a)  $10^6$  V/m (b) 4,96  $\mu$ C  
(c) 0,0248  $\mu$ F
15. 29,035 V
17. (a) 0,5 s (b)  $20(1 - e^{-t/0,5})$   
(c)  $1\tau$ : 12,64 V,  $3\tau$ : 19 V,  
 $5\tau$ : 19,87 V  
(d)  $i_C = 0,2 \times 10^{-3} e^{-t/0,5}$   
 $v_R = 20e^{-t/0,5}$
19. (a) 5,5 ms  
(b)  $100(1 - e^{-t/(5,5 \times 10^{-3})})$   
(c)  $1\tau$ : 63,21 V,  $3\tau$ : 95,02 V,  
 $5\tau$ : 99,33 V  
(d)  
 $i_C = 18,18 \times 10^{-3} e^{-t/(5,5 \times 10^{-3})}$   
 $v_R = 60e^{-t/(5,5 \times 10^{-3})}$
21. (a) 10 ms  
(b)  $50(1 - e^{-t/(10 \times 10^{-3})})$   
(c)  $10 \times 10^{-3} e^{-t/(10 \times 10^{-3})}$   
(d)  $v_C \equiv 50$  V,  $i_C = 0$  A  
(e)  $v_C = 50e^{-t/(4 \times 10^{-3})}$   
 $i_C = -25 \times 10^{-3} e^{-t/(4 \times 10^{-3})}$
23. (a)  $80(1 - e^{-t/(1 \times 10^{-6})})$   
(b)  $0,8 \times 10^{-3} e^{-t/(1 \times 10^{-6})}$   
(c)  $v_C = 80e^{-t/(4,9 \times 10^{-6})}$   
 $i_C = 0,163 \times 10^{-3} e^{-t/(4,9 \times 10^{-6})}$

## Capítulo 9

1. (a) Sentido horário:  $I_{R_1} = \frac{5}{3}$  A,  $I_{R_2} = 0$  A,  
Sentido horário:  $I_{R_3} = \frac{5}{3}$  A  
(b)  $E_1$ : 5,33 W,  $E_2$ : 0,333 W  
(c) 8,333 W (d) não
3. (a) para baixo: 4,4545 mA

25. (a)  $10 \mu\text{s}$  (b)  $3 \text{ kA}$  (c) sim
27. (a)  $v_C = 52 \text{ V} - 40 \text{ V} e^{-t/123,8 \text{ ms}}$   
 $i_C = 2,198 \text{ mA} e^{-t/123,8 \text{ ms}}$
29.  $1,386 \mu\text{s}$
31.  $R = 54,567 \text{ k}\Omega$
33. (a)  $v_C = 60(1 - e^{-t/0,25})$ ,  
 $0,5 \text{ s: } 55,07 \text{ V}$ ,  $1 \text{ s: } 59,596 \text{ V}$   
 $i_C = 60 \times 10^{-3} e^{-t/0,25}$   
 $0,5 \text{ s: } 4,93 \text{ mA}$ ,  
 $1 \text{ s: } 0,404 \text{ mA}$   
 $v_{R1} = 60 e^{-t/0,25}$   
 $0,5 \text{ s: } 4,93 \text{ V}$ ,  $1 \text{ s: } 0,404 \text{ V}$
- (b)  $t = 0,405 \text{ s}$ ; mais  $1,387 \text{ s}$
35. (a)  $19,634 \text{ V}$   
 (b)  $2,31 \text{ s}$   
 (c)  $1,155 \text{ s}$
37. (a)  $v_C = 3,275(1 - e^{-t/52,68 \text{ ms}})$   
 $i_C = 1,216 \times 10^{-3} e^{-t/52,68 \text{ ms}}$
39. (a)  $v_C = 27,2 - 25,2 e^{-t/18,26 \text{ ms}}$   
 $i_C = 3,04 \text{ mA} e^{-t/18,26 \text{ ms}}$
41.  $0-4 \text{ ms: } 0,3 \text{ mA}$ ,  
 $4-6 \text{ ms: } 0,9 \text{ mA}$ ,  
 $6-7 \text{ ms: } 3 \text{ mA}$ ,  
 $7-10 \text{ ms: } 0 \text{ mA}$ ,  
 $10-13 \text{ ms: } -3,2 \text{ mA}$ ,  
 $13-15 \text{ ms: } 1,8 \text{ mA}$
43.  $0-4 \text{ ms: } 0 \text{ V}$ ,  
 $4-6 \text{ ms: } -8 \text{ V}$ ,  
 $6-16 \text{ ms: } 20 \text{ V}$ ,  
 $16-18 \text{ ms: } 0 \text{ V}$ ,  
 $18-20 \text{ ms: } -12 \text{ V}$ ,  
 $20-25 \text{ ms: } 0 \text{ V}$
45.  $V_1 = 10 \text{ V}$ ,  $Q_1 = 60 \mu\text{C}$ ,  
 $V_2 = 6,67 \text{ V}$ ,  $Q_2 = 40 \mu\text{C}$ ,  
 $V_3 = 3,33 \text{ V}$ ,  $Q_3 = 40 \mu\text{C}$
47. (a)  $56,54 \text{ V}$   
 (b)  $42,405 \text{ V}$   
 (c)  $14,135 \text{ V}$   
 (d)  $43,46 \text{ V}$   
 (e)  $433,44 \text{ ms}$
49.  $8640 \text{ pJ}$
51. (a)  $5 \text{ J}$   
 (b)  $0,1 \text{ C}$   
 (c)  $200 \text{ A}$   
 (d)  $10 \text{ kW}$   
 (e)  $10 \text{ s}$

## Capítulo 11

1.  $\Phi: 5 \times 10^4 \text{ linhas}$   
 $5 \times 10^4 \text{ linhas}$ ,  $B: 8 \text{ gauss}$ ,  
 $51,616 \text{ linhas}$
3. (a)  $0,04 \text{ T}$
5.  $952,4 \times 10^3 \text{ Ae/Wb}$
7.  $2624,67 \text{ Ae/m}$
9.  $2,133 \text{ A}$
11. (a)  $N_1 = 60 \text{ t}$   
 (b)  $13,34 \times 10^{-4} \text{ Wb/Am}$
13.  $2,687 \text{ A}$
15.  $1,35 \text{ N}$
17. (a)  $2,028 \text{ A}$  (b)  $\approx 2 \text{ N}$

## Capítulo 12

1.  $4,25 \text{ V}$
3.  $14 \text{ espiras}$
5.  $15,65 \mu\text{H}$
7. (a)  $2,5 \text{ V}$  (b)  $0,3 \text{ V}$   
 (c)  $200 \text{ V}$
9.  $0-3 \text{ ms: } 0 \text{ V}$ ,  $3-8 \text{ ms: } 1,6 \text{ V}$ ,  
 $8-13 \text{ ms: } -1,6 \text{ V}$ ,  
 $13-14 \text{ ms: } 0 \text{ V}$ ,  
 $14-15 \text{ ms: } 8 \text{ V}$ ,  
 $15-16 \text{ ms: } -8 \text{ V}$ ,  
 $16-17 \text{ ms: } 0 \text{ V}$
11.  $0-5 \mu\text{s: } 4 \text{ mA}$ ,  $10 \mu\text{s: } -8 \text{ mA}$ ,  
 $12 \mu\text{s: } 4 \text{ mA}$ ,  $12-16 \mu\text{s: } 4 \text{ mA}$ ,  
 $24 \mu\text{s: } 0 \text{ mA}$
13. (a)  $2,27 \mu\text{s}$   
 (b)  $5,45 \times 10^{-3}(1 - e^{-t/2,27 \mu\text{s}})$   
 (c)  $v_L = 12e^{-t/2,27 \mu\text{s}}$   
 $v_R = 12(1 - e^{-t/2,27 \mu\text{s}})$   
 (d)  $i_L: 1\tau = 3,45 \text{ mA}$ ,  
 $3\tau = 5,179 \text{ mA}$ ,  
 $5\tau = 5,413 \text{ mA}$ ,  
 $v_L: 1\tau = 4,415 \text{ V}$ ,  
 $3\tau = 0,598 \text{ V}$ ,  
 $5\tau = 0,081 \text{ V}$
15. (a)  $i_L = 0,882 \times 10^{-3}(1 - e^{-t/0,735 \mu\text{s}})$ ,  
 $v_L = 6e^{-t/0,735 \mu\text{s}}$   
 (b)  $i_L = 0,882 \times 10^{-3}e^{-t/0,333 \mu\text{s}}$   
 $v_L = -13,23e^{-t/0,333 \mu\text{s}}$
17. (a)  $i_L = 1,765 \text{ mA} - 4,765 \text{ mA} e^{-t/588,24 \mu\text{s}}$   
 $v_L = 16,2 \text{ V} e^{-t/588,24 \mu\text{s}}$
19. (a)  $i_L = -0,692 \text{ mA} - 2,308 \text{ mA} e^{-t/19,23 \mu\text{s}}$   
 $v_L = 24 \text{ V} e^{-t/19,23 \mu\text{s}}$
21.  $25,68 \mu\text{s}$
23. (a)  $i_L = 3,638 \times 10^{-3}(1 - e^{-t/6,676 \mu\text{s}})$ ,  
 $v_L = 5,45 e^{-t/6,676 \mu\text{s}}$   
 (b)  $2,825 \text{ mA}$ ,  $1,2186 \text{ V}$   
 (c)  $i_L = 2,825 \times 10^{-3}e^{-t/2,128 \mu\text{s}}$   
 $v_L = -13,27 e^{-t/2,128 \mu\text{s}}$
25. (a)  $0,243 \text{ V}$   
 (b)  $29,47 \text{ V}$   
 (c)  $18,96 \text{ V}$   
 (d)  $2,025 \text{ ms}$
27. (a)  $20 \text{ V}$   
 (b)  $12 \mu\text{A}$   
 (c)  $5,376 \mu\text{s}$   
 (d)  $0,366 \text{ V}$
29.  $i_L = -3,478 \text{ mA} - 7,432 \text{ mA} e^{-t/173,9 \mu\text{s}}$   
 $v_L = 51,28 \text{ V} e^{-t/173,9 \mu\text{s}}$
31. (a)  $8 \text{ H}$   
 (b)  $4 \text{ H}$
33.  $L: 4 \text{ H}$ ,  $2 \text{ H}$   
 $R: 5,7 \text{ k}\Omega$ ,  $9,1 \text{ k}\Omega$
35.  $V_1 = 16 \text{ V}$ ,  $V_2 = 0 \text{ V}$ ,  
 $I_1 = 4 \text{ mA}$

37.  $V_1 = 10 \text{ V}$   
 $I_1 = 2 \text{ A}$   
 $I_2 = 1,33 \text{ A}$
39.  $W_C = 360 \mu\text{J}$   
 $W_L = 12 \text{ J}$

## Capítulo 13

1. (a)  $10 \text{ ms}$  (b)  $2$  (c)  $100 \text{ Hz}$   
 (d) amplitude  $= 5 \text{ V}$ ,  
 $V_{p-p} = 6,67 \text{ V}$
3.  $10 \text{ ms}$ ,  $100 \text{ Hz}$
5. (a)  $60 \text{ Hz}$  (b)  $100 \text{ Hz}$   
 (c)  $29,41 \text{ Hz}$  (d)  $40 \text{ kHz}$
7.  $0,25 \text{ s}$
9.  $T = 50 \mu\text{s}$
11. (a)  $\pi/4$  (b)  $\pi/3$  (c)  $\frac{3}{4}\pi$   
 (d)  $\frac{5}{4}\pi$  (e)  $0,989\pi$  (f)  $1,228\pi$
13. (a)  $3,14 \text{ rad/s}$   
 (b)  $20,94 \times 10^3 \text{ rad/s}$   
 (c)  $1,57 \times 10^6 \text{ rad/s}$   
 (d)  $157,1 \text{ rad/s}$
15. (a)  $120 \text{ Hz}$ ,  $8,33 \text{ ms}$   
 (b)  $1,34 \text{ Hz}$ ,  $746,27 \text{ ms}$   
 (c)  $954,93 \text{ Hz}$ ,  $1,05 \text{ ms}$   
 (d)  $9,95 \times 10^{-3} \text{ Hz}$ ,  $100,5 \text{ s}$
17.  $104,7 \text{ rad/s}$
23.  $0,4755 \text{ A}$
25.  $11,537^\circ$ ,  $168,463^\circ$
29. (a)  $v$  atrasada em relação a  $i$  de  $10^\circ$   
 (b)  $i$  atrasada em relação a  $v$  de  $70^\circ$   
 (c)  $i$  atrasada em relação a  $v$  de  $80^\circ$   
 (d)  $i$  atrasada em relação a  $v$  de  $150^\circ$
31. (a)  $v = 25 \text{ sen}(\omega t + 30^\circ)$   
 (b)  $i = 3 \times 10^{-3} \text{ sen}(6,28 \times 10^3 t - 60^\circ)$
33.  $\frac{1}{2} \text{ ms}$
35.  $0,388 \text{ ms}$
37. (a)  $0,4 \text{ ms}$   
 (b)  $2,5 \text{ kHz}$   
 (c)  $-25 \text{ mV}$
39. (a)  $1,875 \text{ V}$  (b)  $-4,778 \text{ mA}$
41. (a)  $40 \mu\text{s}$   
 (b)  $25 \text{ kHz}$   
 (c)  $17,13 \text{ mV}$
43. (a)  $2 \text{ sen } 377t$   
 (b)  $100 \text{ sen } 377t$   
 (c)  $84,87 \times 10^{-3} \text{ sen } 377t$   
 (d)  $33,95 \times 10^{-6} \text{ sen } 377t$
45.  $2,16 \text{ V}$
47.  $0 \text{ V}$
49. (a)  $T = 40 \mu\text{s}$ ,  $f = 25 \text{ kHz}$ ,  
 $V_{av} = 20 \text{ mV}$ ,  
 $V_{eff} = 28,28 \text{ mV}$   
 (b)  $T = 100 \mu\text{s}$ ,  $f = 10 \text{ kHz}$ ,  
 $V_{av} = -0,3 \text{ V}$ ,  
 $V_{eff} = 0,212 \text{ V}$

## Capítulo 14

3. (a)  $3770 \cos 377t$   
 (b)  $452,4 \cos(754t + 20^\circ)$

- (c)  $4440,63 \cos(157t - 20^\circ)$   
 (d)  $200 \cos t$
5. (a)  $210 \sin 754t$   
 (b)  $14,8 \sin(400t - 120^\circ)$   
 (c)  $42 \times 10^{-3} \sin(\omega t + 88^\circ)$   
 (d)  $28 \sin(\omega t + 180^\circ)$
7. (a) 1,592 H (b) 2,654 H  
 (c) 0,8414 H
9. (a)  $100 \sin(\omega t + 90^\circ)$   
 (b)  $8 \sin(\omega t + 150^\circ)$   
 (c)  $120 \sin(\omega t - 120^\circ)$   
 (d)  $60 \sin(\omega t + 190^\circ)$
11. (a)  $1 \sin(\omega t - 90^\circ)$   
 (b)  $0,6 \sin(\omega t - 70^\circ)$   
 (c)  $0,8 \sin(\omega t + 10^\circ)$   
 (d)  $1,6 \sin(377t + 130^\circ)$
13. (a)  $\infty \Omega$  (b) 530,79  $\Omega$   
 (c) 265,39  $\Omega$  (d) 17,693  $\Omega$   
 (e) 1,327  $\Omega$
15. (a) 9,31 Hz (b) 4,66 Hz  
 (c) 18,62 Hz (d) 1,59 Hz
17. (a)  $6 \times 10^{-3} \sin(200t + 90^\circ)$   
 (b)  $33,96 \times 10^{-3} \sin(377t + 90^\circ)$   
 (c)  $44,94 \times 10^{-3} \sin(374t + 300^\circ)$   
 (d)  $56 \times 10^{-3} \sin(\omega t + 160^\circ)$
19. (a)  $1334 \sin(300t - 90^\circ)$   
 (b)  $37,17 \sin(377t - 90^\circ)$   
 (c)  $127,2 \sin 754t$   
 (d)  $100 \sin(1600t - 170^\circ)$
21. (a) C (b)  $L = 254,78 \text{ mH}$   
 (c)  $R = 5 \Omega$
25. 318,47 mH
27. 5,067 nF
29. (a) 0 W (b) 0 W  
 (c) 122,5 W
31. 192 W
33.  $40 \sin(\omega t - 50^\circ)$
35. (a)  $2 \sin(157t - 60^\circ)$   
 (b) 318,47 mH (c) 0 W
37. (a)  $i_1 = 2,828 \sin(10^4 t + 150^\circ)$ ,  
 $i_2 = 11,312 \sin(10^4 t + 150^\circ)$   
 (b)  $i_T = 14,14 \sin(10^4 t + 150^\circ)$
39. (a)  $5 \angle 36,87^\circ$   
 (b)  $2,83 \angle 45^\circ$   
 (c)  $16,38 \angle 77,66^\circ$   
 (d)  $806,23 \angle 82,87^\circ$   
 (e)  $1077,03 \angle 21,80^\circ$   
 (f)  $0,00658 \angle 81,25^\circ$   
 (g)  $11,78 \angle -49,82^\circ$   
 (h)  $8,94 \angle 153,43^\circ$   
 (i)  $61,85 \angle -104,04^\circ$   
 (j)  $101,53 \angle -39,81^\circ$   
 (k)  $4326,66 \angle 123,69^\circ$   
 (l)  $25,495 \times 10^{-3} \angle -78,69^\circ$
41. (a)  $15,033 \angle 86,19^\circ$   
 (b)  $60,208 \angle 4,76^\circ$   
 (c)  $0,30 \angle 88,09^\circ$   
 (d)  $2002,5 \angle -87,14^\circ$   
 (e)  $86,182 \angle 93,73^\circ$   
 (f)  $38,694 \angle -94^\circ$
43. (a)  $11,8 + j 7$   
 (b)  $151,9 + j 49,9$
- (c)  $4,72 \times 10^{-6} + j 71$   
 (d)  $5,2 + j 1,6$   
 (e)  $209,3 + j 311$   
 (f)  $-21,2 + j 12$   
 (g)  $7,03 + j 9,93$   
 (h)  $95,698 + j 22,768$
45. (a)  $6 \angle -50^\circ$   
 (b)  $0,2 \times 10^{-3} \angle 140^\circ$   
 (c)  $109 \angle -230^\circ$   
 (d)  $76,471 \angle -80^\circ$   
 (e)  $4 \angle 0^\circ$   
 (f)  $0,71 \angle -16,49^\circ$   
 (g)  $4,21 \times 10^{-3} \angle 161,1^\circ$   
 (h)  $18,191 \angle -50,91^\circ$
47. (a)  $x = 4, y = 3$   
 (b)  $x = 4$   
 (c)  $x = 3, y = 6$  ou  $x = 6, y = 3$   
 (d)  $30^\circ$
49. (a)  $56,569 \sin(377t + 20^\circ)$   
 (b)  $169,68 \sin 377t$   
 (c)  $11,314 \times 10^{-3} \sin(377t + 120^\circ)$   
 (d)  $7,07 \sin(377t + 90^\circ)$   
 (e)  $1696,8 \sin(377t - 120^\circ)$   
 (f)  $6000 \sin(377t - 180^\circ)$
51.  $i_i = 2,537 \times 10^{-3} \sin(\omega t + 96,79^\circ)$
53.  $i_P = 18 \times 10^{-3} \sin 377t$
13. (a) 40 mH (b) 220  $\Omega$
15. (a)  $V_1 = 37,97 \text{ V} \angle -51,57^\circ$ ,  
 $V_2 = 113,92 \text{ V} \angle 38,43^\circ$   
 (b)  $V_1 = 55,80 \text{ V} \angle 26,55^\circ$ ,  
 $V_2 = 12,56 \text{ V} \angle -63,45^\circ$
17. (a)  $I = 39 \text{ mA} \angle 126,65^\circ$ ,  
 $V_R = 1,17 \text{ V} \angle 126,65^\circ$ ,  
 $V_C = 25,86 \text{ V} \angle 36,65^\circ$   
 (b) 0,058 adiantado  
 (c) 45,63 mW  
 (g)  $Z_T = 30 \Omega - j 512,2 \Omega$
19.  $Z_T = 3,2 \Omega + j 2,4 \Omega$
25. (a)  $Z_T = 3 \Omega + j 8 \Omega$ ,  
 $Y_T = 41,1 \text{ mS} - j 109,5 \text{ mS}$   
 (b)  $Z_T = 60 \Omega - j 70 \Omega$ ,  
 $Y_T = 7,1 \text{ mS} + j 8,3 \text{ mS}$   
 (c)  $Z_T = 200 \Omega - j 100 \Omega$ ,  
 $Y_T = 4 \text{ mS} + j 2 \text{ mS}$
27. (a)  $Y_T = 538,52 \text{ mS} \angle -21,8^\circ$   
 (c)  $E = 3,71 \text{ V} \angle 21,8^\circ$ ,  
 $I_R = 1,855 \text{ A} \angle 21,8^\circ$ ,  
 $I_L = 0,742 \text{ A} \angle -68,2^\circ$   
 (f) 6,88 W  
 (g) 0,928 atrasado  
 (h)  $e = 5,25 \sin(377t + 21,8^\circ)$ ,  
 $i_R = 2,62 \sin(377t + 21,8^\circ)$ ,  
 $i_L = 1,049 \sin(377t - 68,2^\circ)$ ,  
 $i_s = 2,828 \sin 377t$
29. (a)  $Y_T = 129,96 \text{ mS} \angle -50,31^\circ$   
 (c)  $I_s = 7,8 \text{ A} \angle -50,31^\circ$ ,  
 $I_R = 5 \text{ A} \angle 0^\circ$ ,  
 $I_L = 6 \text{ A} \angle -90^\circ$   
 (f) 300 W  
 (g) 0,638 atrasado  
 (h)  $e = 84,84 \sin 377t$ ,  
 $i_R = 7,07 \sin 377t$ ,  
 $i_L = 8,484 \sin(377t - 90^\circ)$ ,  
 $i_s = 11,03 \sin(377t - 50,31^\circ)$
31. (a)  $Y_T = 0,416 \text{ mS} \angle 36,897^\circ$   
 (c)  $L = 10,61 \text{ H}$ ,  $C = 1,326 \mu\text{F}$   
 (d)  $E = 8,498 \text{ V} \angle -56,897^\circ$ ,  
 $I_R = 2,833 \text{ mA} \angle -56,897^\circ$ ,  
 $I_L = 2,125 \text{ mA} \angle -146,897^\circ$ ,  
 $I_C = 4,249 \text{ mA} \angle 33,103^\circ$   
 (g) 24,078 mW  
 (h) 0,8 adiantado  
 (i)  $e = 12,016 \sin(377t - 56,897^\circ)$ ,  
 $i_R = 4 \sin(377t - 56,897^\circ)$ ,  
 $i_L = 3 \sin(377t - 146,897^\circ)$ ,  
 $i_C = 6 \sin(377t + 33,103^\circ)$
33. (a)  $I_1 = 18,09 \text{ A} \angle 65,241^\circ$ ,  
 $I_2 = 8,528 \text{ A} \angle -24,759^\circ$   
 (b)  $I_1 = 11,161 \text{ A} \angle 0,255^\circ$ ,  
 $I_2 = 6,656 \text{ A} \angle 153,690^\circ$
39. (a)  $R_p = 94,73 \Omega$ ,  
 $X_p = 52,1 \Omega$  (C)  
 (b)  $R_p = 4 \text{ k}\Omega$ ,  
 $X_p = 4 \text{ k}\Omega$  (C)
41. (a)  $E = 176,68 \text{ V} \angle 36,44^\circ$ ,  
 $I_R = 0,803 \text{ A} \angle 36,44^\circ$ ,  
 $I_L = 2,813 \text{ A} \angle -53,56^\circ$

## Capítulo 15

1. (a)  $6,8 \Omega \angle 0^\circ$   
 (b)  $754 \Omega \angle 90^\circ$   
 (c)  $15,7 \Omega \angle 90^\circ$   
 (d)  $265,25 \Omega \angle -90^\circ$   
 (e)  $318,47 \Omega \angle -90^\circ$   
 (f)  $200 \Omega \angle 0^\circ$
3. (a)  $88 \times 10^{-3} \sin \omega t$   
 (b)  $9,045 \sin(377t + 150^\circ)$   
 (c)  $2547,02 \sin(157t - 50^\circ)$
5. (a)  $4,24 \Omega \angle -45^\circ$   
 (b)  $3,04 \text{ k}\Omega \angle 80,54^\circ$   
 (c)  $1617,56 \Omega \angle 88,33^\circ$
7. (a)  $10 \Omega \angle 36,87^\circ$   
 (c)  $I = 10 \text{ A} \angle -36,87^\circ$ ,  
 $V_R = 80 \text{ V} \angle -36,87^\circ$ ,  
 $V_L = 60 \text{ V} \angle 53,13^\circ$   
 (f) 800 W (g) 0,8 atrasado
9. (a)  $1660,27 \Omega \angle -73,56^\circ$   
 (b)  $8,517 \text{ mA} \angle 73,56^\circ$   
 (c)  $V_R = 4,003 \text{ V} \angle 73,56^\circ$ ,  
 $V_L = 13,562 \text{ V} \angle -16,44^\circ$   
 (d) 34,09 mW, 0,283 adiantado
11. (a)  $3,16 \text{ k}\Omega \angle 18,43^\circ$   
 (c)  $3,18 \mu\text{F}$ , 6,37 H  
 (d)  $I = 1,3424 \text{ mA} \angle 41,57^\circ$ ,  
 $V_R = 4,027 \text{ V} \angle 41,57^\circ$ ,  
 $V_L = 2,6848 \text{ V} \angle 131,57^\circ$ ,  
 $V_C = 1,3424 \text{ V} \angle -48,43^\circ$   
 (g) 5,406 mW  
 (h) 0,9487 atrasado

- (b) 0,804 atrasado  
 (c) 141,86 W  
 (f)  $I_C = 1,11 \text{ A} \angle 126,43^\circ$   
 (g)  $Z_T = 142,15 \Omega + j 104,96 \Omega$   
 43.  $R = 4 \Omega$ ,  $X_L = 3,774 \Omega$

## Capítulo 16

1. (a)  $1,2 \Omega \angle 90^\circ$   
 (b)  $10 \text{ A} \angle -90^\circ$   
 (c)  $10 \text{ A} \angle -90^\circ$   
 (d)  $I_2 = 6 \text{ A} \angle -90^\circ$ ,  
 $I_3 = 4 \text{ A} \angle -90^\circ$   
 (e)  $60 \text{ V} \angle 0^\circ$   
 3. (a)  $Z_T = 3,87 \Omega \angle -11,817^\circ$ ,  
 $Y_T = 0,258 \text{ S} \angle 11,817^\circ$   
 (b)  $15,504 \text{ A} \angle 41,817^\circ$   
 (c)  $3,985 \text{ A} \angle 82,826^\circ$   
 (d)  $47,809 \text{ V} \angle -7,174^\circ$   
 (e)  $910,71 \text{ W}$   
 5. (a)  $0,375 \text{ A} \angle 25,346^\circ$   
 (b)  $70,711 \text{ V} \angle -45^\circ$   
 (c)  $33,9 \text{ W}$   
 7. (a)  $1,423 \text{ A} \angle 18,259^\circ$   
 (b)  $26,574 \text{ V} \angle 4,763^\circ$   
 (c)  $54,074 \text{ W}$   
 9. (a)  $Y_T = 0,099 \text{ S} \angle -9,709^\circ$   
 (b)  $V_1 = 20,4 \text{ V} \angle 30^\circ$ ,  
 $V_2 = 10,887 \text{ V} \angle 58,124^\circ$   
 (c)  $1,933 \text{ A} \angle 11,109^\circ$   
 11.  $33,201 \text{ A} \angle 38,89^\circ$   
 13.  $139,71 \text{ mW}$

## Capítulo 17

3. (a)  $Z = 21,93 \Omega \angle -46,85^\circ$ ,  
 $E = 10,97 \text{ V} \angle 13,15^\circ$   
 (b)  $Z = 5,15 \Omega \angle 59,04^\circ$ ,  
 $E = 10,3 \text{ V} \angle 179,04^\circ$   
 5. (a)  $5,15 \text{ A} \angle -24,5^\circ$   
 (b)  $0,442 \text{ A} \angle 143,48^\circ$   
 7. (a)  $13,07 \text{ A} \angle -33,71^\circ$   
 (b)  $48,33 \text{ A} \angle -77,57^\circ$   
 9.  $-3,165 \times 10^{-3} \text{ V} \angle 137,29^\circ$   
 11.  $I_{1k\Omega} = 10 \text{ mA} \angle 0^\circ$   
 $I_{2k\Omega} = 1,667 \text{ mA} \angle 0^\circ$   
 13.  $I_L = 1,378 \text{ mA} \angle -56,31^\circ$   
 15. (a)  $V_1 = 19,86 \text{ V} \angle 43,8^\circ$ ,  
 $V_2 = 8,94 \text{ V} \angle 106,9^\circ$   
 (b)  $V_1 = 19,78 \text{ V} \angle 132,48^\circ$ ,  
 $V_2 = 13,37 \text{ V} \angle 98,78^\circ$   
 17.  $V_1 = 220 \text{ V} \angle 0^\circ$   
 $V_2 = 96,664 \text{ V} \angle -12,426^\circ$   
 $V_3 = 100 \text{ V} \angle 90^\circ$   
 19. (à esquerda)  $V_1 = 14,62 \text{ V} \angle -5,86^\circ$   
 (em cima)  $V_2 = 35,03 \text{ V} \angle -37,69^\circ$   
 (à direita)  $V_3 = 32,4 \text{ V} \angle -73,34^\circ$   
 (no meio)  $V_4 = 5,677 \text{ V} \angle 23,53^\circ$   
 21.  $2,253 \text{ V} \angle 17,628^\circ$   
 23.  $-10,667 \text{ V} \angle 0^\circ$   
 25.  $-2451,92 \text{ E}_t$

27. (a) Não  
 (b)  $1,76 \text{ mA} \angle -71,54^\circ$   
 (c)  $7,03 \text{ V} \angle -18,46^\circ$   
 29. Sim  
 31.  $R_x = R_2 R_3 / R_1$   
 $L_x = R_2 L_3 / R_1$   
 33. (a)  $11,57 \text{ A} \angle -67,13^\circ$   
 (b)  $36,9 \text{ A} \angle 23,87^\circ$

## Capítulo 18

1. (a)  $6,095 \text{ A} \angle -32,115^\circ$   
 (b)  $3,77 \text{ A} \angle -93,8^\circ$   
 3.  $i = 0,5 \text{ A} + 1,581 \sin(\omega t - 26,565^\circ)$   
 5.  $6,261 \text{ mA} \angle -63,43^\circ$   
 7.  $-22,09 \text{ V} \angle 6,34^\circ$   
 9.  $19,62 \text{ V} \angle 53^\circ$   
 11.  $V_s = 10 \text{ V} \angle 0^\circ$   
 13. (a)  $Z_{Th} = 21,312 \Omega \angle 32,196^\circ$   
 $E_{Th} = 2,131 \text{ V} \angle 32,196^\circ$   
 (b)  $Z_{Th} = 6,813 \Omega \angle -54,228^\circ$   
 $E_{Th} = 57,954 \text{ V} \angle 11,099^\circ$   
 15. (a)  $Z_{Th} = 4 \Omega \angle 90^\circ$   
 $E_{Th} = 4 \text{ V} + 10 \text{ V} \angle 0^\circ$   
 (b)  $I = 0,5 \text{ A} + 1,118 \text{ A} \angle -26,565^\circ$   
 17. (a)  $Z_{Th} = 4,472 \text{ k}\Omega \angle -26,565^\circ$   
 $E_{Th} = 31,31 \text{ V} \angle -26,565^\circ$   
 (b)  $I = 6,26 \text{ mA} \angle 63,435^\circ$   
 19.  $Z_{Th} = 4,44 \text{ k}\Omega \angle -0,031^\circ$   
 $E_{Th} = -444,45 \times 10^3 \text{ V} \angle 0,255^\circ$   
 21.  $Z_{Th} = 5,099 \text{ k}\Omega \angle -11,31^\circ$   
 $E_{Th} = -50 \text{ V} \angle 0^\circ$   
 23.  $Z_{Th} = -39,215 \Omega \angle 0^\circ$   
 $E_{Th} = 20 \text{ V} \angle 53^\circ$   
 25.  $Z_{Th} = 607,42 \Omega \angle 0^\circ$   
 $E_{Th} = 1,62 \text{ V} \angle 0^\circ$   
 27. (a)  $Z_N = 21,312 \Omega \angle 32,196^\circ$   
 $I_N = 0,1 \text{ A} \angle 0^\circ$   
 (b)  $Z_N = 6,813 \Omega \angle -54,228^\circ$   
 $I_N = 8,506 \text{ A} \angle 65,324^\circ$   
 29. (a)  $Z_N = 9,66 \Omega \angle 14,93^\circ$   
 $I_N = 2,15 \text{ A} \angle -42,87^\circ$   
 (b)  $Z_N = 4,37 \Omega \angle 55,67^\circ$   
 $I_N = 22,83 \text{ A} \angle -34,65^\circ$   
 31. (a)  $Z_N = 9 \Omega \angle 0^\circ$   
 $I_N = 1,333 \text{ A} + 2,667 \text{ A} \angle 0^\circ$   
 (b)  $12 \text{ V} + 2,65 \text{ V} \angle -83,66^\circ$   
 33.  $Z_N = 5,1 \text{ k}\Omega \angle -11,31^\circ$   
 $I_N = -1,961 \times 10^{-3} \text{ V} \angle 11,31^\circ$   
 35.  $Z_N = 5,1 \text{ k}\Omega \angle -11,31^\circ$   
 $I_N = 9,81 \text{ mA} \angle 11,31^\circ$   
 37.  $Z_N = 6,63 \text{ k}\Omega \angle 0^\circ$   
 $I_N = 0,792 \text{ mA} \angle 0^\circ$   
 39. (a)  $Z_c = 8,32 \Omega \angle 3,18^\circ$ ,  
 $1198,2 \text{ W}$   
 (b)  $Z_c = 1,562 \Omega \angle -14,47^\circ$ ,  
 $1,614 \text{ W}$   
 41.  $40 \text{ k}\Omega$ ,  $25 \text{ W}$   
 43. (a)  $9 \Omega$  (b)  $20 \text{ W}$   
 45. (a)  $1,414 \text{ k}\Omega$  (b)  $0,518 \text{ W}$   
 49.  $25,77 \text{ mA} \angle 104,4^\circ$

## Capítulo 19

1. (a)  $120 \text{ W}$   
 (b)  $Q_T = 0 \text{ VAR}$ ,  $S_T = 120 \text{ VA}$   
 (c)  $0,5 \text{ A}$   
 (d)  $I_1 = \frac{1}{6} \text{ A}$ ,  $I_2 = \frac{1}{3} \text{ A}$   
 3. (a)  $400 \text{ W}$ ,  $-400 \text{ VAR}(C)$ ,  
 $565,69 \text{ VA}$ ,  $0,7071$  adiantado  
 (c)  $5,66 \text{ A} \angle 135^\circ$   
 5. (a)  $500 \text{ W}$ ,  $-200 \text{ VAR}(C)$ ,  
 $538,52 \text{ VA}$   
 (b)  $0,928$  adiantado  
 (d)  $10,776 \text{ A} \angle 21,875^\circ$   
 7. (a)  $R: 200 \text{ W}$ ,  $L.C: 0 \text{ W}$   
 (b)  $R: 0 \text{ VAR}$ ,  $C: 80 \text{ VAR}$ ,  
 $L: 100 \text{ VAR}$   
 (c)  $R: 200 \text{ VA}$ ,  $C: 80 \text{ VA}$ ,  
 $L: 100 \text{ VA}$   
 (d)  $200 \text{ W}$ ,  $20 \text{ VAR}(L)$ ,  
 $200,998 \text{ VA}$ ,  $0,995$  (atrasado)  
 (f)  $10,05 \text{ A} \angle -5,73^\circ$   
 9. (a)  $R: 38,99 \text{ W}$ ,  $L: 0 \text{ W}$ ,  $C: 0 \text{ W}$   
 (b)  $R: 0 \text{ VAR}$ ,  $L: 126,74 \text{ VAR}$ ,  
 $C: 46,92 \text{ VAR}$   
 (c)  $R: 38,99 \text{ VA}$ ,  $L: 126,74 \text{ VA}$ ,  
 $C: 46,92 \text{ VA}$   
 (d)  $38,99 \text{ W}$ ,  $79,82 \text{ VAR}(L)$ ,  
 $88,83 \text{ VA}$ ,  $0,439$  (atrasado)  
 (f)  $0,31 \text{ J}$   
 (g)  $W_L = 0,32 \text{ J}$ ,  $W_C = 0,12 \text{ J}$   
 11. (a)  $Z = 2,30 \Omega + j 1,73 \Omega$   
 (b)  $4000 \text{ W}$   
 13. (a)  $900 \text{ W}$ ,  $0 \text{ VAR}$ ,  $900 \text{ VA}$ ,  $1$   
 (b)  $9 \text{ A} \angle 0^\circ$   
 (d)  $Z_1: R = 0 \Omega$ ,  $X_C = 20 \Omega$   
 $Z_2: R = 2,83 \Omega$ ,  $X = 0 \Omega$   
 $Z_3: R = 5,66 \Omega$ ,  $X_L = 4,717 \Omega$   
 15. (a)  $1100 \text{ W}$ ,  $2366,26 \text{ VAR}$ ,  
 $2609,44 \text{ VA}$ ,  $0,4215$  (adiantado)  
 (b)  $521,89 \text{ V} \angle -65,07^\circ$   
 (c)  $Z_1: R = 1743,38 \Omega$ ,  
 $X_C = 1307,53 \Omega$   
 $Z_2: R = 43,59 \Omega$ ,  $X_C = 99,88 \Omega$   
 17. (a)  $7,81 \text{ kVA}$   
 (b)  $0,640$  (atrasado)  
 (c)  $65,08 \text{ A}$   
 (d)  $1105 \mu\text{F}$   
 (e)  $41,67 \text{ A}$   
 19. (a)  $128,14 \text{ W}$   
 (b)  $a-b: 42,69 \text{ W}$ ,  $b-c: 64,03 \text{ W}$ ,  
 $a-c: 106,72 \text{ W}$ ,  $a-d: 106,72 \text{ W}$ ,  
 $c-d: 0 \text{ W}$ ,  $d-e: 0 \text{ W}$ ,  
 $f-e: 21,34 \text{ W}$   
 21. (a)  $5 \Omega$ ,  $132,03 \text{ mH}$   
 (b)  $10 \Omega$   
 (c)  $15 \Omega$ ,  $262,39 \text{ mH}$

## Capítulo 20

1. (a)  $\omega_s = 250 \text{ rad/s}$ ,  
 $f_s = 39,79 \text{ Hz}$

- (b)  $\omega_s = 3535,53 \text{ rad/s}$ ,  
 $f_s = 562,7 \text{ Hz}$   
 (c)  $\omega_s = 21.880 \text{ rad/s}$ ,  
 $f_s = 3482,31 \text{ Hz}$
3. (a)  $X_L = 40 \Omega$   
 (b)  $I = 10 \text{ mA}$   
 (c)  $V_R = 20 \text{ mV}$ ,  $V_L = 400 \text{ mV}$ ,  
 $V_C = 400 \text{ mV}$   
 (d)  $Q_s = 20$  (alto)  
 (e)  $L = 1,27 \text{ mH}$ ,  $C = 0,796 \mu\text{F}$   
 (f)  $BP = 250 \text{ Hz}$   
 (g)  $f_2 = 5,125 \text{ kHz}$ ,  
 $f_1 = 4,875 \text{ kHz}$
5. (a)  $BP = 400 \text{ Hz}$   
 (b)  $f_2 = 6200 \text{ Hz}$ ,  
 $f_1 = 5800 \text{ Hz}$   
 (c)  $X_L = X_C = 45 \Omega$   
 (d)  $P_{PC} = 375 \text{ mW}$
7. (a)  $Q_s = 10$   
 (b)  $X_L = 20 \Omega$   
 (c)  $L = 1,59 \text{ mH}$ ,  $C = 3,98 \mu\text{F}$   
 (d)  $f_2 = 2100 \text{ Hz}$ ,  $f_1 = 1900 \text{ Hz}$
9.  $L = 13,26 \text{ mH}$ ,  $C = 27,07 \text{ nF}$   
 $f_2 = 8460 \text{ Hz}$ ,  $f_1 = 8340 \text{ Hz}$
11. (a)  $f_s = 1 \text{ MHz}$   
 (b)  $BP = 160 \text{ kHz}$   
 (c)  $R = 720 \Omega$ ,  $L = 0,7162 \text{ mH}$ ,  
 $C = 35,37 \text{ pF}$   
 (d)  $R_i = 56,25 \Omega$
13. (a)  $f_p = 159,155 \text{ kHz}$   
 (b)  $V_C = 4 \text{ V}$   
 (c)  $I_L = I_C = 40 \text{ mA}$   
 (d)  $Q_p = 20$
15. (a)  $f_s = 11.253,95 \text{ Hz}$   
 (b)  $Q_i = 1,77$  (n o)  
 (c)  $f_p = 9.280,24 \text{ Hz}$ ,  
 $f_m = 10.794,41 \text{ Hz}$   
 (d)  $X_L = 5,83 \Omega$ ,  $X_C = 8,57 \Omega$   
 (e)  $Z_{Tp} = 12,5 \Omega$   
 (f)  $V_C = 25 \text{ mV}$   
 (g)  $Q_p = 1,46$ ,  $BP = 6,356 \text{ kHz}$   
 (h)  $I_C = 2,92 \text{ mA}$ ,  $I_L = 3,54 \text{ mA}$
17. (a)  $X_C = 30 \Omega$   
 (b)  $Z_{Tp} = 225 \Omega$   
 (c)  $I_C = 0,6 \text{ A} \angle 90^\circ$ ,  
 $I_L = 0,6 \text{ A} \angle -86,19^\circ$   
 (d)  $L = 0,239 \text{ mH}$ ,  
 $C = 265,26 \text{ nF}$   
 (e)  $Q_p = 7,5$ ,  $BP = 2,67 \text{ kHz}$
19. (a)  $f_s = 7,118 \text{ kHz}$ ,  
 $f_p = 6,647 \text{ kHz}$ ,  $f_m = 7 \text{ kHz}$   
 (b)  $X_L = 20,88 \Omega$ ,  $X_C = 23,94 \Omega$   
 (c)  $Z_{Tp} = 55,56 \Omega$   
 (d)  $Q_p = 2,32$ ,  $BP = 2,865 \text{ kHz}$   
 (e)  $I_L = 99,28 \text{ mA}$ ,  
 $I_C = 92,73 \text{ mA}$   
 (f)  $V_C = 2,22 \text{ V}$
21. (a)  $f_p = 3558,81 \text{ Hz}$   
 (b)  $V_C = 138,2 \text{ V}$   
 (c)  $P = 691 \text{ mW}$   
 (d)  $BP = 575,86 \text{ Hz}$
23. (a)  $X_L = 98,54 \Omega$   
 (b)  $Q_i = 8,21$   
 (c)  $f_p = 8,05 \text{ kHz}$   
 (d)  $V_C = 4,83 \text{ V}$   
 (e)  $f_2 = 8,55 \text{ kHz}$ ,  
 $f_1 = 7,55 \text{ kHz}$
25.  $R_s = 3,244 \text{ k}\Omega$ ,  $C = 31,66 \text{ nF}$
27. (a)  $f_p = 251,65 \text{ kHz}$   
 (b)  $Z_{Tp} = 4,444 \text{ k}\Omega$   
 (c)  $Q_p = 14,05$   
 (d)  $BP = 17,91 \text{ kHz}$   
 (e)  $20 \text{ nF}$ :  $f_p = 194,93 \text{ kHz}$ ,  
 $Z_{Tp} = 49,94 \Omega$ ,  $Q_p = 2,04$ ,  
 $BP = 95,55 \text{ kHz}$   
 (f)  $1 \text{ nF}$ :  $f_p = 251,65 \text{ kHz}$ ,  
 $Z_{Tp} = 13,33 \text{ k}\Omega$ ,  $Q_p = 21,08$ ,  
 $BP = 11,94 \text{ kHz}$   
 (g) Circuito:  $L/C = 100 \times 10^3$   
 parte (e):  $L/C = 1 \times 10^3$   
 parte (f):  $L/C = 400 \times 10^3$   
 (h) sim,  $L/C \uparrow$ ,  $BP \downarrow$
- (b)  $f_{c1}$ :  $V_o = 0,656V_i$ ,  
 $f_{c2}$ :  $V_o = 0,656V_i$   
 $f_{\text{centro}} = 1392,60 \text{ Hz}$ :  $V_o = 0,711V_i$   
 $500 \text{ Hz}$ :  $V_o = 0,516V_o$ ,  
 $4 \text{ kHz}$ :  $V_o = 0,437V_i$
- (b)  $BP = 2,9 \text{ kHz}$ ,  
 $f_{\text{centro}} = 1,94 \text{ kHz}$
29. (a)  $f_s = 100,658 \text{ kHz}$   
 (b)  $Q_s = 18,39$ ,  $BP = 5473,52 \text{ Hz}$   
 (c)  $f_s$ :  $A_v = 0,93$   
 $f_1 = 97.921,24 \text{ Hz}$ ,  
 $f_2 = 103.394,76 \text{ Hz}$ ,  
 $f = 95 \text{ kHz}$ :  $A_v = 0,392$ ,  
 $f = 105 \text{ kHz}$ :  $A_v = 0,5$   
 (d)  $f = f_s$ ,  $V_o = 0,93 \text{ V}$ ,  
 $f = f_1 = f_2$ ,  $V_o = 0,658 \text{ V}$
31. (a)  $Q_s = 12,195$   
 (b)  $BP = 410 \text{ Hz}$ ,  
 $f_2 = 5205 \text{ Hz}$ ,  
 $f_1 = 4795 \text{ Hz}$   
 (c)  $f_s$ :  $V_o = 0,024V_i$   
 (d) n o será modificada
33. (a)  $f_p = 726,44 \text{ kHz}$  (atenuação)  
 $f = 2,013 \text{ MHz}$  (transmissão)
35. (a-b)  $f_c = 6772,55 \text{ Hz}$   
 (c)  $f_c$ :  $-3 \text{ dB}$ ,  $\frac{1}{2}f_c$ :  $-6,7 \text{ dB}$ ,  
 $2f_c$ :  $-0,969 \text{ dB}$ ,  
 $\frac{1}{10}f_c$ :  $-20,04 \text{ dB}$ ,  
 $10f_c$ :  $-0,043 \text{ dB}$   
 (d)  $f_c$ :  $0,707$ ,  $\frac{1}{2}f_c$ :  $0,4472$ ,  
 $2f_c$ :  $0,894$   
 (e)  $f_c$ :  $45^\circ$ ,  $\frac{1}{2}f_c$ :  $63,43^\circ$ ,  $2f_c$ :  $26,57^\circ$
37. (a-b)  $f_c = 13,26 \text{ kHz}$   
 (c)  $f_c$ :  $-3 \text{ dB}$ ,  $\frac{1}{2}f_c$ :  $-0,97 \text{ dB}$ ,  
 $2f_c$ :  $-6,99 \text{ dB}$ ,  
 $\frac{1}{10}f_c$ :  $-0,043 \text{ dB}$ ,  
 $10f_c$ :  $-20,04 \text{ dB}$   
 (d)  $f_c$ :  $0,707$ ,  $\frac{1}{2}f_c$ :  $0,894$ ,  
 $2f_c$ :  $0,447$   
 (e)  $f_c$ :  $-45^\circ$ ,  $\frac{1}{2}f_c$ :  $-26,57^\circ$ ,  
 $2f_c$ :  $-63,43^\circ$
39. (a)  $f_1 = 663,15 \text{ Hz}$ ,  $f_c = 468,1 \text{ Hz}$   
 $0 < f < f_c$ :  $+6 \text{ dB/oitava}$ ,  
 $f > f_c$ :  $-3,03 \text{ dB}$   
 (b)  $f_1$ :  $45^\circ$ ,  $f_c$ :  $54,78^\circ$ ,  $\frac{1}{2}f_1$ :  $63,43^\circ$ ,  
 $2f_1$ :  $84,29^\circ$
41. (a)  $f_1 = 19.894,37 \text{ Hz}$   
 $f_c = 1.989,44 \text{ Hz}$   
 $0 < f < f_c$ :  $0 \text{ dB}$ ,  
 $f_c < f < f_1$ :  $-6 \text{ dB/oitava}$ ,  
 $f > f_1$ :  $-20 \text{ dB}$   
 (b)  $f_c$ :  $-39,29^\circ$ ,  
 $10 \text{ kHz}$ :  $-52,06^\circ$ ,  
 $f_1$ :  $-39,29^\circ$
43. (a)  $f_1 = 964,58 \text{ Hz}$ ,  
 $f_c = 7.334,33 \text{ Hz}$   
 $0 < f < f_1$ :  $-17,62 \text{ dB}$ ,  
 $f_1 < f < f_c$ :  $+6 \text{ dB/oitava}$ ,  
 $f > f_c$ :  $0 \text{ dB}$   
 (b)  $f_1$ :  $39,35^\circ$ ,  $1,3 \text{ kHz}$ :  $43,38^\circ$ ,  
 $f_c$ :  $39,35^\circ$

## Capítulo 21

1. (a) esquerda:  $1,54 \text{ kHz}$ ,  
 direita:  $5,623 \text{ kHz}$   
 (b) em cima:  $0,2153 \text{ V}$ ,  
 em baixo:  $0,5248 \text{ V}$
3. (a)  $1000$  (b)  $10^{12}$   
 (c)  $1585$  (d)  $1,096$   
 (e)  $10^{10}$  (f)  $1513,56$   
 (g)  $10,023$  (h)  $1.258.925,41$
5.  $1,681$   
 7.  $-0,301$
9. (a)  $1,845$   
 (b)  $18,45$
11.  $13,01$
13.  $38,49$
15.  $24,08 \text{ dB}_s$
19. (a)  $0,1f_c$ :  $0,995$ ,  $0,5f_c$ :  $0,894$ ,  
 $f_c$ :  $0,707$ ,  $2f_c$ :  $0,447$ ,  
 $10f_c$ :  $0,0995$   
 (b)  $0,1f_c$ :  $-5,71^\circ$ ,  $0,5f_c$ :  $-26,57^\circ$ ,  
 $f_c$ :  $-45^\circ$ ,  $2f_c$ :  $-63,43^\circ$ ,  
 $10f_c$ :  $-84,29^\circ$
21.  $C = 0,265 \mu\text{F}$ ,  
 $250 \text{ Hz}$ :  $A_v = 0,895$ ,  
 $\theta = -26,54^\circ$ ,  
 $1000 \text{ Hz}$ :  $A_v = 0,4475$ ,  
 $\theta = -63,41^\circ$
23. (a)  $f_c = 3,617 \text{ kHz}$ ,  
 $f_c$ :  $A_v = 0,707$ ,  $\theta = 45^\circ$ ,  
 $2f_c$ :  $A_v = 0,894$ ,  $\theta = 26,57^\circ$ ,  
 $0,5f_c$ :  $A_v = 0,447$ ,  $\theta = 63,43^\circ$ ,  
 $10f_c$ :  $A_v = 0,0995$ ,  $\theta = 5,71^\circ$ ,  
 $\frac{1}{10}f_c$ :  $A_v = 0,0995$ ,  
 $\theta = 84,29^\circ$
25.  $R = 795,77 \Omega \rightarrow 797 \Omega$ ,  
 $f_c$ :  $A_v = 0,707$ ,  $\theta = 45^\circ$ ,  
 $1 \text{ kHz}$ :  $A_v = 0,458$ ,  $\theta = 63,4^\circ$ ,  
 $4 \text{ kHz}$ :  $A_v = 0,9$ ,  $\theta = 26,53^\circ$
27. (a)  $f_{c1} = 795,77 \text{ Hz}$ ,  
 $f_{c2} = 1989,44 \text{ Hz}$

45. (a)  $f = 180 \text{ Hz} \approx -3 \text{ dB}$ ,  
 $f = 18 \text{ kHz}: -3,105 \text{ dB}$   
 (b)  $100 \text{ Hz}: 97^\circ$ ,  
 $1,8 \text{ kHz}: 0,12^\circ \approx 0^\circ$ ,  
 $18 \text{ kHz}: -61,8^\circ$
47.  $A_v = -120/[ (1 - j 50/f)(1 - j 200/f)(1 - j f/36 \text{ kHz}) ]$
49.  $f_c = 2 \text{ kHz}$ ,  $0 < f < f_c$ :  $0 \text{ dB}$ ,  
 $f > f_c$ :  $-6 \text{ dB/oitava}$ ,
51.  $f_1 = 1 \text{ kHz}$ ,  $f_2 = 2 \text{ kHz}$ ,  
 $f_3 = 3 \text{ kHz}$   
 $0 < f < f_1$ :  $0 \text{ dB}$ ,  
 $f_1 < f < f_2$ :  $+6 \text{ dB/oitava}$ ,  
 $f_2 < f < f_3$ :  $+12 \text{ dB/oitava}$ ,  
 $f > f_3$ :  $13,06 \text{ dB}$
53. (a) alto-falante de graves:  $0,673$   
 alto-falante de agudos:  $0,678$   
 (b) alto-falante de graves:  $0,015$   
 alto-falante de agudos:  $0,337$   
 (c) alto-falante de frequências intermediárias:  $0,998 \approx 1$

## Capítulo 22

1. (a) positivos (b)  $2 \text{ V}$   
 (c)  $0,2 \text{ ms}$  (d)  $6 \text{ V}$  (e)  $6,5\%$
3. (a) positivos  
 (b)  $10 \text{ mV}$   
 (c)  $3,2 \text{ ms}$  (d)  $20 \text{ mV}$   
 (e)  $3,4\%$
5.  $V_2$  de  $(V_1 - V_2)/V = 0,1$  é  
 $13,571 \text{ mV}$
7. (a)  $120 \mu\text{s}$  (b)  $8,333 \text{ kHz}$   
 (c) máximo =  $440 \text{ mV}$ ,  
 mínimo =  $80 \text{ mV}$
9.  $f_{rp} = 125 \text{ kHz}$ ,  
 Ciclo de operação =  $62,5\%$
11. (a)  $8 \mu\text{s}$   
 (b)  $2 \mu\text{s}$   
 (c)  $125 \text{ kHz}$   
 (d)  $0 \text{ V}$   
 (e)  $3,464 \text{ mV}$
13.  $18,88 \text{ mV}$
15.  $117 \text{ mV}$
17.  $v_o = 4(1 + e^{-t/(20\text{ms})})$
19.  $i_c = -8 \times 10^{-3} e^{-t}$
21.  $i_c = 4 \times 10^{-3} e^{-t/(0,2\text{ms})}$
- (a)  $5\tau = T/2$  (b)  $5\tau = \frac{1}{6}(T/2)$   
 (c)  $5\tau = 10(T/2)$
23.  $0 - T/2$ :  $v_C = 20 \text{ V}$ ,  
 $T/2 - T$ :  $v_C = 20e^{-t/T}$ ,  
 $T - \frac{3}{2}T$ :  $v_C = 20(1 - e^{-t/T})$ ,  
 $\frac{3}{2}T - T$ :  $v_C = 20e^{-t/T}$
25.  $Z_p = 4,573 \text{ M}\Omega \angle -59,5^\circ$ ,  
 $Z_s = 0,507 \text{ M}\Omega \angle -59,5^\circ$

## Capítulo 23

1. (a)  $120,1 \text{ V}$  (b)  $120,1 \text{ V}$   
 (c)  $12,01 \text{ A}$  (d)  $12,01 \text{ A}$
3. (a)  $120,1 \text{ V}$  (b)  $120,1 \text{ V}$   
 (c)  $16,98 \text{ A}$  (d)  $16,98 \text{ A}$
5. (a)  $\theta_2 = -120^\circ$ ,  $\theta_3 = 120^\circ$

- (b)  $V_{an} = 120 \text{ V} \angle 0^\circ$ ,  
 $V_{bn} = 120 \text{ V} \angle -120^\circ$ ,  
 $V_{cn} = 120 \text{ V} \angle 120^\circ$
- (c)  $I_{an} = 8 \text{ A} \angle -53,13^\circ$ ,  
 $I_{bn} = 8 \text{ A} \angle -173,13^\circ$ ,  
 $I_{cn} = 8 \text{ A} \angle 66,87^\circ$
- (e)  $8 \text{ A}$  (f)  $207,85 \text{ V}$
7.  $V_\phi = 127 \text{ V}$ ,  $I_\phi = 8,98 \text{ A}$ ,  
 $I_L = 8,98 \text{ A}$
9. (a)  $E_{AN} = 12,7 \text{ kV} \angle -30^\circ$ ,  
 $E_{BN} = 12,7 \text{ kV} \angle -150^\circ$ ,  
 $E_{CN} = 12,7 \text{ kV} \angle 90^\circ$   
 (b)  $I_{an} = 11,285 \text{ A} \angle -97,54^\circ$ ,  
 $I_{bn} = 11,285 \text{ A} \angle -217,54^\circ$ ,  
 $I_{cn} = 11,285 \text{ A} \angle 22,46^\circ$   
 (c)  $I_L = I_\phi$   
 (d)  $V_{an} = 12,154,28 \text{ V} \angle -29,34^\circ$ ,  
 $V_{bn} = 12,154,28 \text{ V} \angle -149,34^\circ$ ,  
 $V_{ca} = 12,154,28 \text{ V} \angle 90,66^\circ$
11. (a)  $120,1 \text{ V}$  (b)  $208 \text{ V}$   
 (c)  $13,364 \text{ A}$  (d)  $23,15 \text{ A}$
13. (a)  $\theta_2 = -120^\circ$ ,  $\theta_3 = +120^\circ$   
 (b)  $V_{ab} = 208 \text{ V} \angle 0^\circ$ ,  
 $V_{bc} = 208 \text{ V} \angle -120^\circ$ ,  
 $V_{ca} = 208 \text{ V} \angle 120^\circ$   
 (d)  $I_{ab} = 9,455 \text{ A} \angle 0^\circ$ ,  
 $I_{bc} = 9,455 \text{ A} \angle -120^\circ$ ,  
 $I_{ca} = 9,455 \text{ A} \angle 120^\circ$   
 (e)  $16,376 \text{ A}$  (f)  $120,1 \text{ V}$
15. (a)  $\theta_2 = -120^\circ$ ,  $\theta_3 = 120^\circ$   
 (b)  $V_{ab} = 208 \text{ V} \angle 0^\circ$ ,  
 $V_{bc} = 208 \text{ V} \angle -120^\circ$ ,  
 $V_{ca} = 208 \text{ V} \angle 120^\circ$   
 (d)  $I_{ab} = 86,67 \text{ A} \angle -36,87^\circ$ ,  
 $I_{bc} = 86,67 \text{ A} \angle -156,87^\circ$ ,  
 $I_{ca} = 86,67 \text{ A} \angle 83,13^\circ$   
 (e)  $150,11 \text{ A}$  (f)  $120,1 \text{ V}$
17. (a)  $I_{ab} = 15,325 \text{ A} \angle -73,30^\circ$ ,  
 $I_{bc} = 15,325 \text{ A} \angle -193,30^\circ$ ,  
 $I_{ca} = 15,325 \text{ A} \angle 46,7^\circ$   
 (b)  $I_{Aa} = 26,54 \text{ A} \angle -103,31^\circ$ ,  
 $I_{Bb} = 26,54 \text{ A} \angle 136,68^\circ$ ,  
 $I_{Cc} = 26,54 \text{ A} \angle 16,69^\circ$   
 (c)  $E_{AB} = 17,013,6 \text{ V} \angle -0,59^\circ$ ,  
 $E_{BC} = 17,013,77 \text{ V} \angle -120,59^\circ$ ,  
 $E_{CA} = 17,013,87 \text{ V} \angle 119,41^\circ$
19. (a)  $208 \text{ V}$  (b)  $120,09 \text{ V}$   
 (c)  $7,076 \text{ A}$  (d)  $7,076 \text{ A}$
21.  $V_\phi = 69,28 \text{ V}$ ,  $I_\phi = 2,89 \text{ A}$ ,  
 $I_L = 2,89 \text{ A}$
23.  $V_\phi = 69,28 \text{ V}$ ,  $I_\phi = 5,77 \text{ A}$ ,  
 $I_L = 5,77 \text{ A}$
25. (a)  $440 \text{ V}$  (b)  $440 \text{ V}$   
 (c)  $29,33 \text{ A}$  (d)  $50,8 \text{ A}$
27. (a)  $\theta_2 = -120^\circ$ ,  $\theta_3 = +120^\circ$   
 (b)  $V_{ab} = 100 \text{ V} \angle 0^\circ$ ,  
 $V_{bc} = 100 \text{ V} \angle -120^\circ$ ,  
 $V_{ca} = 100 \text{ V} \angle 120^\circ$   
 (d)  $I_{ab} = 5 \text{ A} \angle 0^\circ$ ,  
 $I_{bc} = 5 \text{ A} \angle -120^\circ$ ,  
 $I_{ca} = 5 \text{ A} \angle 120^\circ$   
 (e)  $8,66 \text{ A}$

29. (a)  $\theta_2 = -120^\circ$ ,  $\theta_3 = 120^\circ$   
 (b)  $V_{ab} = 100 \text{ V} \angle 0^\circ$ ,  
 $V_{bc} = 100 \text{ V} \angle -120^\circ$ ,  
 $V_{ca} = 100 \text{ V} \angle 120^\circ$   
 (d)  $I_{ab} = 7,072 \text{ A} \angle 45^\circ$ ,  
 $I_{bc} = 7,072 \text{ A} \angle -75^\circ$ ,  
 $I_{ca} = 7,072 \text{ A} \angle 165^\circ$   
 (e)  $12,25 \text{ A}$
31.  $2160 \text{ W}$ ,  $0 \text{ VAR}$ ,  $2160 \text{ VA}$ ,  
 $F_p = 1$
33.  $7210,67 \text{ W}$ ,  $7210,67 \text{ VAR(C)}$ ,  
 $10,197,42 \text{ VA}$ ,  $0,707$  adiantado
35.  $7,263 \text{ kW}$ ,  $7,263 \text{ kVAR}$ ,  
 $10,272 \text{ kVA}$ ,  $0,707$  atrasado
37.  $287,93 \text{ W}$ ,  $575,86 \text{ VAR(L)}$ ,  
 $643,83 \text{ VA}$ ,  $0,4472$  atrasado
39.  $900 \text{ W}$ ,  $1200 \text{ VAR(L)}$ ,  $1500 \text{ VA}$ ,  
 $0,6$  atrasado
41.  $Z_\phi = 12,98 \Omega - j 17,31 \Omega$
43. (a)  $9237,6 \text{ V}$  (b)  $80 \text{ A}$   
 (c)  $1276,8 \text{ kW}$   
 (d)  $0,576$  atrasado  
 (e)  $I_{Aa} = 80 \text{ A} \angle -54,83^\circ$   
 (f)  $V_{an} = 7773,45 \text{ V} \angle -4,87^\circ$   
 (g)  $Z_\phi = 62,52 \Omega + j 74,38 \Omega$   
 (h)  $F_p$  (de todo o sistema) =  $0,576$ ,  
 $F_p$  (da carga) =  $0,643$  (ambos atrasados)  
 (i)  $93,98\%$
45. (b)  $P_T = 5899,64 \text{ W}$ ,  
 $P_{medidor} = 1966,55 \text{ W}$
49. (a)  $120,09 \text{ V}$   
 (b)  $I_{an} = 8,492 \text{ A}$ ,  $I_{bn} = 7,076 \text{ A}$ ,  
 $I_{cn} = 42,465 \text{ A}$   
 (c)  $4928,5 \text{ W}$ ,  $4928,53 \text{ VAR(L)}$ ,  
 $6969,99 \text{ VA}$ ,  $0,7071$  atrasado  
 (d)  $I_{an} = 8,492 \text{ A} \angle -75^\circ$ ,  
 $I_{bn} = 7,076 \text{ A} \angle -195^\circ$ ,  
 $I_{cn} = 42,465 \text{ A} \angle 45^\circ$   
 (e)  $I_N = 34,712 \text{ A} \angle -42,972^\circ$

## Capítulo 24

1. (I) a. não b. não c. sim d. não  
 e. sim  
 (II) a. sim b. sim c. sim d. sim  
 e. não  
 (III) a. sim b. sim c. não d. sim  
 e. sim  
 (IV) a. não b. não c. sim d. sim  
 e. sim
7. (a)  $19,04 \text{ V}$  (b)  $4,53 \text{ A}$
9.  $71,872 \text{ W}$
11. (a)  $i = 2 + 2,08 \sin(400t - 33,69^\circ) + 0,5 \sin(800t - 53,13^\circ)$   
 (b)  $2,508 \text{ A}$   
 (c)  $v_R = 24 + 24,96 \sin(400t + 33,69^\circ) + 6 \sin(800t - 53,13^\circ)$   
 (d)  $30,092 \text{ A}$

- (e)  $v_L = 16,64 \sin(400t + 56,31^\circ) + 8 \sin(800t + 36,87^\circ)$   
 (f) 13,055 V (g) 75,481 W  
 13. (a)  $i = 1,2 \sin(400t + 53,13^\circ)$   
 (b) 0,848 A  
 (c)  $v_R = 18 \sin(400t + 53,13^\circ)$   
 (d) 12,73 V  
 (e)  $v_C = 18 + 23,98 \sin(400t - 36,87^\circ)$   
 (f) 24,73 V (g) 10,79 W  
 15.  $v_o = 2,257 \times 10^{-3} \sin(377t + 93,66^\circ) + 1,923 \times 10^{-3} \sin(754t + 1,64^\circ)$   
 17.  $i_T = 30 + 30,27 \sin(20t + 7,59^\circ) + 0,5 \sin(40t - 30^\circ)$
- (d)  $0,351 \text{ A} \angle -6,71^\circ$   
 (e)  $28,1 \text{ V} \angle -6,71^\circ$   
 (g) 30 V  
 19. (a)  $Z_p = 280,71 \Omega \angle -85,91^\circ$   
 (b)  $I_p = 0,427 \text{ A} \angle 85,91^\circ$   
 (c)  $V_{R_e} = 8,54 \text{ V} \angle 85,91^\circ$   
 $V_{X_e} = 17,08 \text{ V} \angle 175,91^\circ$   
 $V_{X_C} = 136,64 \text{ V} \angle -4,09^\circ$   
 21.  $Z_i = 7980 \Omega \angle 89,98^\circ$   
 23. (a) 20 (b) 83,33 A (c) 4,167 A  
 (d)  $a = \frac{1}{20}, I_s = 4,167 \text{ A}, I_p = 83,33 \text{ A}$   
 25. (a)  $25 \text{ V} \angle 0^\circ, 5 \text{ A} \angle 0^\circ$   
 (b)  $80 \Omega \angle 0^\circ$  (c)  $20 \Omega \angle 0^\circ$   
 27. (a)  $E_2 = 40 \text{ V} \angle 60^\circ,$   
 $I_2 = 3,33 \text{ A} \angle 60^\circ,$   
 $E_3 = 30 \text{ V} \angle 60^\circ,$   
 $I_3 = 3 \text{ A} \angle 60^\circ$   
 (b)  $R_1 = 64,52 \Omega$   
 29.  $[Z_1 + X_{L1}]I_1 - Z_{M12}I_2 + Z_{M13}I_3 = E_1,$   
 $Z_{M12}I_1 - [Z_2 + Z_3 + X_{L2}]I_2 + Z_2I_3 = 0,$   
 $Z_{M13}I_1 - Z_2I_2 + [Z_2 + Z_4 + X_{L3}]I_3 = 0$

## Capítulo 25

1. (a) 0,2 H  
 (b)  $e_p = 1,6 \text{ V}, e_s = 5,12 \text{ V}$   
 (c)  $e_p = 15 \text{ V}, e_s = 24 \text{ V}$   
 3. (a) 158,02 mH  
 (b)  $e_p = 24 \text{ V}, e_s = 1,8 \text{ V}$   
 (c)  $e_p = 15 \text{ V}, e_s = 24 \text{ V}$   
 5. 1,354 H  
 7.  $I_1(R_1 + jX_{L1}) + I_2(jX_m) = E_1$   
 $I_1(jX_m) + I_2(jX_{L2} + R_L) = 0$   
 9. (a) 3,125 V (b) 391,02  $\mu\text{Wb}$   
 11. 56,31 Hz  
 13. 400  $\Omega$   
 15. 12.000 t  
 17. (a) 20  $\Omega$   
 (b) 40  $\Omega$

## Capítulo 26

1.  $Z_i = 986,84 \Omega$   
 3. (a)  $I_{i1} = 10 \mu\text{A}$   
 (b)  $Z_{i2} = 4,5 \text{ k}\Omega$   
 (c)  $E_{i3} = 6,9 \text{ V}$   
 5.  $Z_o = 44,59 \text{ k}\Omega$   
 7.  $Z_o = 10 \text{ k}\Omega$   
 9. (a)  $A_v = -392,98$   
 (b)  $A_{v_T} = -320,21$

11. (a)  $A_{v_{NL}} = -2398,8$   
 (b)  $E_i = 50 \text{ mV}$   
 (c)  $Z_i = 1 \text{ k}\Omega$   
 13. (a)  $A_G = 6,067 \times 10^4$   
 (b)  $A_{GT} = 4,94 \times 10^4$   
 15. (a)  $A_{v_T} = 1500$   
 (b)  $A_{i_T} = 187,5$   
 (c)  $A_{i1} = 15, A_{i2} = 12,5$   
 (d)  $A_{i_T} = 187,5$   
 17. (a)  $z_{11} = (Z_1Z_2 + Z_1Z_3)/(Z_1 + Z_2 + Z_3),$   
 $z_{12} = Z_1Z_3/(Z_1 + Z_2 + Z_3),$   
 $z_{21} = z_{12},$   
 $z_{22} = (Z_1Z_3 + Z_2Z_3)/(Z_1 + Z_2 + Z_3)$   
 19. (a)  $y_{11} = (Y_1Y_2 + Y_1Y_3)/(Y_1 + Y_2 + Y_3),$   
 $y_{12} = -Y_1Y_2/(Y_1 + Y_2 + Y_3),$   
 $y_{21} = y_{12},$   
 $y_{22} = (Y_1Y_2 + Y_2Y_3)/(Y_1 + Y_2 + Y_3)$   
 21.  $h_{11} = Z_1Z_2/(Z_1 + Z_2),$   
 $h_{21} = -Z_1/(Z_1 + Z_2),$   
 $h_{12} = Z_1/(Z_1 + Z_2),$   
 $h_{22} = (Z_1 + Z_2 + Z_3)/(Z_1Z_3 + Z_2Z_3)$   
 23.  $h_{11} = (Y_1 + Y_2 + Y_3)/(Y_1Y_2 + Y_1Y_3),$   
 $h_{21} = -Y_2/(Y_2 + Y_3),$   
 $h_{12} = Y_2/(Y_2 + Y_3),$   
 $h_{22} = Y_2Y_3/(Y_2 + Y_3)$   
 25. (a) 47,62 (b) -99  
 27.  $Z_i = 9,219,5 \Omega \angle -139,4^\circ,$   
 $Z_o = 29,07 \text{ k}\Omega \angle -86,05^\circ$   
 29.  $h_{11} = 2,5 \text{ k}\Omega, h_{12} = 0,5,$   
 $h_{21} = -0,75, h_{22} = 0,25 \text{ mS}$

# Introdução

## 1.1 A INDÚSTRIA ELETROELETRÔNICA

O recente surto de tecnologias em Wall Street é uma evidência clara de que a indústria eletroeletrônica terá um efeito extremamente amplo sobre os avanços futuros da maior parte das áreas do conhecimento que afetam nosso modo de vida, saúde e educação profissional. Você seria capaz de imaginar um campo de atuação, hoje em dia, mesmo aqueles onde as pessoas tentam reduzir ao mínimo o uso de tecnologia, que não procura alargar seus horizontes através do uso de inovações técnicas tais como gravadores, copiadoras, computadores e instrumentos de análise de dados?

Todos os aspectos das nossas vidas parecem ser influenciados por avanços tecnológicos que surgem a uma taxa cada vez maior. Para um leigo, o aperfeiçoamento mais óbvio dos últimos anos foi a redução do tamanho dos sistemas eletroeletrônicos. Hoje em dia, existem televisões pequenas o suficiente para serem transportadas com facilidade, com um sistema de alimentação que as torna ainda mais portáteis. Computadores com uma memória razoável podem ser agora menores do que este livro. A única limitação no processo de redução no tamanho dos rádios é imposta pela necessidade do usuário de ler os números no mostrador. Os aparelhos para surdez são praticamente invisíveis, e os marcapassos são atualmente muito menores e mais confiáveis. Toda esta redução em tamanho é devida essencialmente a uma inovação espetacular que apareceu nas últimas décadas — o circuito integrado (CI). O CI, que apareceu na década de 1950, alcançou agora um estágio em que pode ser subdividido em linhas de 0,5 micrómetro de largura. Em uma polegada ( $\approx 2,5$  cm) podemos acomodar cerca de 50.000 destas linhas. Tente visualizar a divisão de uma faixa de uma polegada de largura em 100 subdivisões e considere então 1.000 ou 25.000 divisões — é realmente uma façanha incrível. O circuito integrado da Fig. 1.1 possui cerca de 1,2 milhão de componentes e no entanto sua largura é de apenas cerca de meia polegada ( $\approx 1,25$  cm).

É natural, quando consideramos as mudanças ocorridas nestas últimas décadas, que desejemos saber quais os limites desta tendência. Em vez de seguir uma curva monótona que tornaria possíveis algumas previsões, o desenvolvimento industrial está sujeito a turbulências que revolucionam os avanços importantes no campo em questão. Atualmente a evidência é de que a miniaturização continuará, mas a uma taxa moderada. O interesse dirige-se agora para o aumento da qualidade e do rendimento (percentagem de circuitos integrados de boa qualidade obtidos no processo de produção).

A história nos mostra que têm havido máximos e mínimos no crescimento industrial mas os lucros continuam a crescer constantemente e os fundos destinados a pesquisa e desenvolvimento constituem uma parte cada vez maior dos orçamentos. Estas mudanças rápidas implicam a necessidade de uma reciclagem constante dos empregados, desde os iniciantes até os diretores. Muitas empresas instituíram seus próprios programas de treinamento e encorajam universidades próximas a desenvolver programas que assegurem que os conceitos e procedimentos mais atualizados sejam ensinados a seus

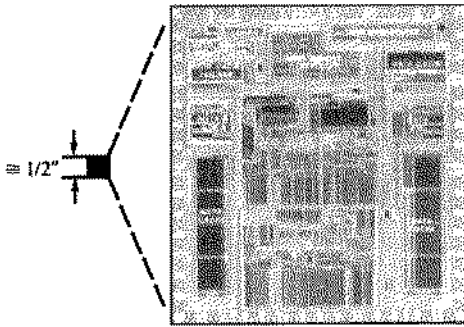


Fig. 1.1 Circuito integrado. (Cortesia de Motorola Semiconductor Products.)

empregados. Um período de relaxamento pode ser desastroso para uma companhia que atua em um campo tão competitivo quanto este.

No entanto, por maiores que sejam as pressões sobre alguém que trabalha neste campo para que se mantenha em dia com os últimos avanços, existe uma vantagem que logo se tomará óbvia: uma vez que um conceito ou um procedimento tenha sido clara e corretamente compreendido, ele dará frutos durante toda a carreira do indivíduo, em qualquer nível. Por exemplo, uma vez que uma relação fundamental como a lei de Ohm (Cap. 4) seja compreendida, ela nunca será substituída por outra equação à medida que considerarmos teorias mais avançadas. Esta lei é uma relação entre quantidades fundamentais, que pode ser aplicada em qualquer nível.\* Além disso, uma vez que um procedimento ou um método de análise seja claramente compreendido, ele pode, em geral, ser aplicado a uma grande (se não infinita) variedade de problemas, fazendo com que seja desnecessário aprender uma técnica diferente para cada pequena variação no sistema. O conteúdo deste livro é tal que cada fragmento de informação terá aplicações em cursos mais avançados. Ele não será substituído por um conjunto de equações e de procedimentos diferentes, a não ser que isto seja uma necessidade de uma área específica de aplicação. Mesmo quando isto acontecer, os novos procedimentos serão quase sempre uma versão expandida dos conceitos já apresentados no texto.

Deste modo, é extremamente importante que o material apresentado neste curso introdutório seja entendido com clareza e precisão. Ele é fundamental para se obter um bom desempenho nos cursos seguintes, e você o aplicará no seu dia-a-dia como profissional deste campo sempre em desenvolvimento.

## 1.2 UM POUCO DE HISTÓRIA

Uma vez que uma hipótese científica tenha sido testada e se torne consensual entre os profissionais de uma determinada área, ela se torna um dos fundamentos desta área, permitindo que se realizem investigações adicionais e que se obtenham novos resultados. É claro que quanto mais peças de um quebra-cabeça estiverem disponíveis, mais fácil será a sua solução. De fato, a história demonstra que às vezes um pequeno avanço isolado pode ser a chave para levar a ciência a um novo nível de compreensão, aumentando também o seu impacto sobre a sociedade.

Se tiver oportunidade, leia alguma das muitas publicações sobre a história do assunto tratado neste livro. Aqui, por causa das limitações de espaço, só poderemos apresentar um pequeno resumo. O número de pessoas que contribuíram é muito maior do que aquele que podemos mencionar, e seus esforços resultaram com frequência em contribuições significativas para a solução de problemas importantes.

Como já mencionamos anteriormente, existem períodos caracterizados pelo que parece ser uma explosão de interesse e de desenvolvimento em certas áreas particulares. Mais adiante veremos que no final do século XVIII e no começo do século XIX invenções, descobertas e teorias apareciam rápida e furiosamente. Cada novo conceito aumentava o número de possíveis áreas de aplicação, até que se tornou quase impossível rastrear a origem de um certo desenvolvimento, a não ser que fosse escolhida uma área de interesse particular. Quando você estiver lendo mais adiante acerca do desenvolvimento do rádio, da televisão e do computador, não se esqueça de que ao mesmo tempo estavam ocorrendo avanços semelhantes nas áreas da telegrafia, telefonia, geração de energia elétrica, gravação de áudio, eletrodomésticos e assim por diante.

Quando lemos alguma coisa sobre os grandes cientistas, inventores e inovadores, existe uma tendência para acreditar que suas contribuições foram resultado de um esforço completamente individual. Em muitos casos, no entanto, isso não é verdadeiro. De fato, muitos dos indivíduos que deram grandes contribuições eram amigos ou colaboradores e se apoiavam mutuamente em seus esforços para investigar várias teorias. Eles estavam, pelo menos, cientes dos esforços uns dos outros, até onde era possível numa época em que uma carta era quase sempre a melhor forma de comunicação. Observe em particular como as datas importantes são próximas entre si durante períodos de desenvolvimento rápido. Um dos investigadores parecia estimular os esforços dos outros ou às vezes fornecia o avanço fundamental necessário ao desenvolvimento de uma certa área de interesse.

As pessoas que deram contribuições durante os estágios iniciais neste campo não eram engenheiros eletricitistas, eletrônicos ou de computação tais como os conhecemos hoje. Na maioria dos casos, eram físicos, químicos, matemáticos ou até mesmos filósofos. Além disso, não pertenciam a apenas um ou dois países do Velho Mundo. Quando nos referimos às pessoas que deram grandes contribuições citamos, na maior parte dos casos, o país de origem para mostrar que quase todas as comunidades com um razoável grau de organização tiveram algum impacto sobre a aquisição de conhecimento sobre as leis fundamentais dos circuitos elétricos.

À medida que você for lendo os outros capítulos deste livro, perceberá que muitas unidades de medida receberam o nome de cientistas importantes nestas áreas — o Conde Alessandro Volta teve seu nome associado à unidade de d.d.p., o *volt*, o *ampère* homenageia André Ampère, o *ohm* homenageia Georg Ohm, e assim por diante — em reconhecimento à importância de suas contribuições para este grande campo do conhecimento.

Na Fig. 1.2 mostramos gráficos temporais onde indicamos um certo número de avanços notáveis, com a intenção principal de identificar períodos específicos de desenvolvimento rápido e também ressaltar os avanços das últimas décadas. O “estado da arte” atual é, em essência, o resultado de esforços que tiveram início há aproximadamente 250 anos, tendo o progresso nos últimos 100 anos sido quase exponencial.

À medida que você for lendo o breve histórico que se segue, tente sentir o interesse crescente, o entusiasmo e o alvoroço que

\*Desde que os materiais envolvidos obedeçam à lei de Ohm, o que nem sempre é verdade. (N. T.)

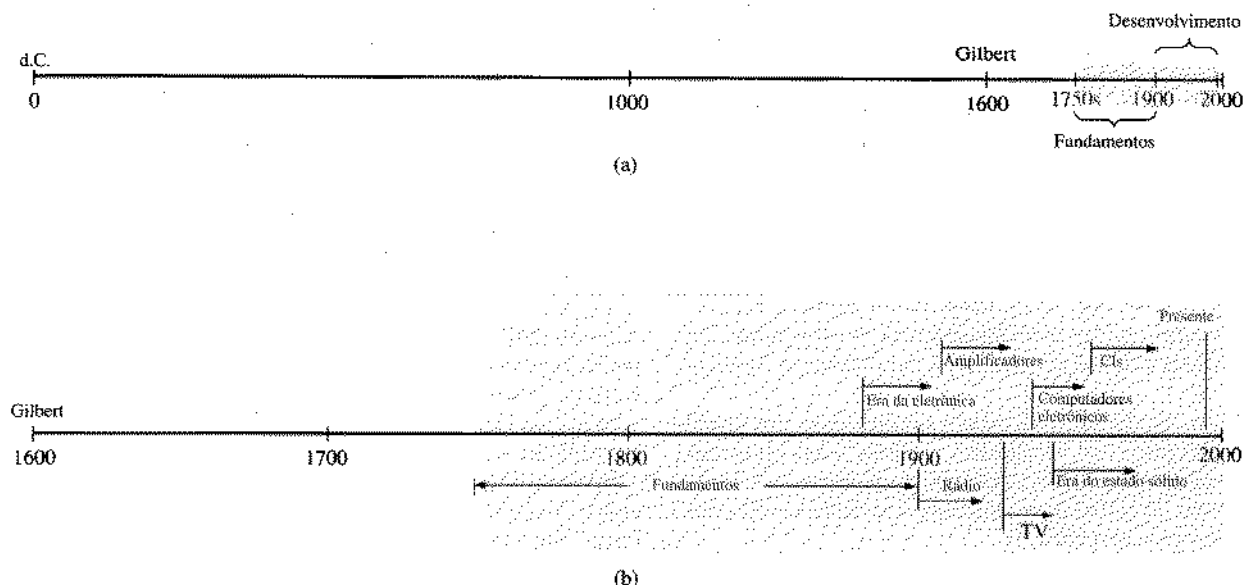


Fig. 1.2 Gráficos temporais: (a) de longo alcance; (b) expandido.

devem ter acompanhado cada nova revelação. Alguns dos termos utilizados serão novos e poderão, portanto, não ser ainda bem compreendidos; nos capítulos seguintes, porém, todos terão seus significados esclarecidos.

## O Começo

O fenômeno da eletricidade estática era conhecido desde a antiguidade, sendo naquela época encarado quase sempre como uma brincadeira. Os gregos denominavam *elektron* a resina fósil usada freqüentemente em demonstrações dos efeitos da eletricidade estática, mas nenhum estudo sistemático foi feito até que William Gilbert retomou a pesquisa sobre o assunto em 1600. A eletrostática foi continuamente investigada nos anos seguintes por pesquisadores como Otto von Guericke, que construiu o primeiro gerador eletrostático capaz de gerar uma quantidade apreciável de carga, e Stephen Gray, que conseguiu transmitir cargas elétricas a grandes distâncias utilizando fios de seda. Charles DuFay demonstrou que existem cargas que se atraem e que se repelem, o que o levou a acreditar que existem dois tipos de carga — teoria aceita até hoje; as duas espécies de carga são denominadas positiva e negativa.

Muitos historiadores defendem o ponto de vista de que o começo da era da eletricidade deve ser associado às pesquisas de Pieter van Musschenbroek e Benjamin Franklin. Em 1745, van Musschenbroek apresentou a *garrafa de Leyden*, destinada a armazenar carga elétrica (o primeiro capacitor), e demonstrou os efeitos do choque elétrico (e assim o poder desta nova forma de energia). Aproximadamente sete anos depois, Franklin utilizou a garrafa de Leyden para demonstrar que o relâmpago é simplesmente uma descarga elétrica e também para aperfeiçoar várias outras teorias importantes, incluindo a denominação de *positiva* e *negativa* para os dois tipos de cargas. A partir deste ponto, à medida que crescia o número de pesquisadores nesta área, novas teorias e descobertas começaram a aparecer com rapidez crescente.

Em 1784, Charles Coulomb demonstrou em Paris que a força entre duas distribuições de carga esfericamente simétricas é inversamente proporcional à distância entre seus centros. Em 1791, Luigi Galvani, professor de anatomia na Universidade de Bolonha, Itália, realizou experiências que mostravam que existe eletricidade no corpo de qualquer animal. A primeira *bateria*, capaz de produzir eletricidade a partir da reação química de um metal com um ácido, foi desenvolvida por outro italiano, Alessandro Volta, em 1799.

A febre de descobertas continuou no começo do século XIX com Hans Christian Oersted, um professor de física sueco que descobriu em 1820 uma relação entre magnetismo e eletricidade fundamental para a teoria do *eletromagnetismo* tal como é conhecida atualmente. No mesmo ano, um físico francês, André Ampère, demonstrou que condutores percorridos por correntes se atraem e repelem do mesmo modo que ímãs permanentes. No período de 1826 a 1827, Georg Ohm, um físico alemão, apresentou uma importante relação entre diferença de potencial, corrente e resistência, conhecida atualmente como lei de Ohm. Em 1831, o físico inglês Michael Faraday descobriu a *indução eletromagnética*, observando que uma variação de corrente em uma bobina pode induzir uma corrente variável em outra bobina, mesmo que a segunda não esteja eletricamente conectada à primeira. O professor Faraday trabalhou também extensamente no aperfeiçoamento de um componente destinado a armazenar carga elétrica, a que ele denominou condensador e conhecido atualmente como capacitor. É de Faraday a idéia de introduzir um dielétrico entre as placas de um capacitor para aumentar a capacidade de armazenamento (Cap. 10). James Clerk Maxwell, um professor de filosofia natural escocês,\* realizou uma análise matemática exaustiva que desembocou num conjunto de equações conhecidas atualmente como *equações de Maxwell*, coroadando os esforços de Faraday para relacionar os efeitos elétricos e magnéticos. Como consequência de suas equações, Maxwell

\*Filosofia natural era o nome dado naquela época ao conjunto da física, química e biologia. (N.T.)

também desenvolveu, em 1862, a teoria eletromagnética da luz, segundo a qual todas as ondas eletromagnéticas se propagam no vácuo à velocidade da luz ( $3 \times 10^8$  metros por segundo). As previsões das equações de Maxwell foram testadas com sucesso em 1888 pelo físico alemão Heinrich Rudolph Hertz, que realizou experiências com ondas eletromagnéticas de frequência menor do que a da luz (conhecidas atualmente como microondas). Em meados da década de 1800, o professor Gustav Robert Kirchhoff introduziu um conjunto de leis sobre tensões e correntes em circuitos que encontram aplicação em todas as áreas e níveis deste campo (Caps. 5 e 6). Em 1895, outro físico alemão, Wilhelm Röntgen, descobriu ondas eletromagnéticas de alta frequência, que foram por ele chamadas de raios X, denominação usada até hoje.

No final do século XIX, já estava estabelecido um grande número de equações, leis e relações, e várias áreas de estudo, incluindo a eletrônica, a geração de energia elétrica e a construção de máquinas de calcular, começaram a se desenvolver como campos de pesquisa respeitáveis.

## A Era da Eletrônica

**Rádio** A determinação precisa da época em que a era eletrônica verdadeiramente se iniciou é considerada uma questão em aberto, sendo algumas vezes associada aos primeiros trabalhos nos quais cientistas aplicaram diferenças de potencial a eletrodos implantados em invólucros de vidro onde se tinha feito vácuo. Muitos, no entanto, preferem associar este início a Thomas Edison, que inseriu um eletrodo metálico no bulbo de uma lâmpada de filamento e descobriu que, quando a lâmpada estava acesa e uma tensão positiva era aplicada ao eletrodo, aparecia uma corrente elétrica no circuito. Este fenômeno, observado em 1883, ficou conhecido como *efeito Edison*. No período que se seguiu, foi dada grande atenção à transmissão de ondas de rádio e ao desenvolvimento de aparelhos transmissores e receptores. Heinrich Hertz, em 1887, durante suas tentativas de verificar os efeitos previstos pelas equações de Maxwell, efetuou em seu laboratório a primeira transmissão de ondas de rádio. Em 1896, um cientista italiano, Guglielmo Marconi (frequentemente denominado o pai do rádio) demonstrou, utilizando uma antena aterrada, que sinais telegráficos podiam ser enviados sem a utilização de fios através de distâncias razoáveis (2,5 km). No mesmo ano, Aleksandr Popov enviou o que pode ter sido a primeira mensagem radiofônica através de uma distância de aproximadamente 300 metros. Ele transmitiu as palavras "*Heinrich Hertz*", homenageando as contribuições pioneiras de Hertz. Em 1901, Marconi conseguiu estabelecer comunicações de rádio através do Atlântico.\*

Em 1904, John Ambrose Fleming aproveitou as idéias de Edison para desenvolver o primeiro diodo, conhecido usualmente

como *válvula de Fleming* — na realidade o primeiro dos *componentes eletrônicos*.\* Este componente teve um profundo impacto sobre o projeto de circuitos para receptores de rádio. Em 1906, Lee De Forest adicionou um terceiro eletrodo à válvula de Fleming e criou o primeiro amplificador, o triodo. Logo depois, em 1912, Edwin Armstrong construiu o primeiro circuito regenerativo para melhorar a qualidade dos receptores, tendo depois utilizado estes mesmos circuitos para desenvolver o primeiro oscilador não-mecânico. Em 1915, sinais de rádio já eram transmitidos através dos Estados Unidos, e em 1918 Armstrong solicitou a patente do circuito superheteródino, um circuito empregado em praticamente todos os aparelhos de rádio e televisão para permitir a amplificação somente numa banda estreita de frequência, em vez de em toda a faixa de sinais. Com isto, quase todos os componentes dos rádios modernos estavam disponíveis, e as vendas de receptores cresceram de uns poucos milhões de dólares no começo da década de 1920 para cerca de 1 bilhão de dólares na década de 1930. Esta última década compreendeu os assim chamados anos dourados do rádio, durante os quais havia uma enorme quantidade de opções para os ouvintes.

**Televisão** A era da televisão também começou para valer na década de 1930. O desenvolvimento do tubo de imagem, no entanto, foi iniciado bem antes por Paul Nipkow com seu *telescópio elétrico*, em 1884. John Baird conseguiu em 1927 transmitir imagens de televisão através de linhas telefônicas e em 1928 realizou o mesmo feito utilizando ondas de rádio. Além disso, em 1930, realizou uma transmissão simultânea de sons e imagens. A primeira antena de televisão comercial do mundo foi instalada em 1932 pela NBC no topo do Empire State Building, em Nova York. Em 1939, a RCA iniciou as primeiras transmissões regulares. A Segunda Guerra Mundial refreou um pouco este desenvolvimento, mas por volta de 1946 o número de aparelhos de televisão domésticos havia aumentado de alguns milhares para alguns milhões. A televisão em cores tornou-se popular no começo da década de 1960.

**Computadores** É costume associar o nome de Blaise Pascal à primeira calculadora mecânica, construída por ele em 1642 para adicionar e subtrair números. Em 1673, Gottfried Wilhelm von Leibniz inventou a *roda de Leibniz*, um aperfeiçoamento da máquina de Pascal que permitia também realizar multiplicações e divisões. Charles Babbage desenvolveu, por volta de 1823, o projeto do *calculador diferencial*, que permitia calcular senos, co-senos, logaritmos e várias outras funções. Apesar dos aperfeiçoamentos que se seguiram, todas as máquinas de calcular permaneceram essencialmente mecânicas até a década de 1930, quando foram introduzidos os primeiros sistemas eletromecânicos, que utilizavam relés. Os sistemas totalmente eletrônicos só começaram a ser utilizados na década de 1940. É interessante notar que embora a IBM tenha sido fundada em 1924, ela só entrou na indústria dos computadores em 1937. Em 1946, um sistema totalmente eletrônico conhecido como Eniac foi construído na Universidade da Pensilvânia. Ele utilizava 18.000 válvulas e pesava 30

\*Em 1893, três anos antes da primeira experiência de Marconi, o cientista brasileiro Roberto Landell de Moura transmitiu sinais e sons musicais através de uma distância de oito quilômetros na cidade de São Paulo, entre a Avenida Paulista e o Alto de Santana. Em 1901, Landell de Moura patenteou no Serviço de Patentes dos Estados Unidos, sob os números 771.917, 775.337 e 775.846, três inventos originais: um "transmissor de ondas", um "telégrafo sem fios" e um modelo de "telefone sem fio".

Além disso, os esquemas constantes de pedidos de patentes demonstram claramente que foi Landell de Moura o verdadeiro inventor da válvula triodo. Informações adicionais sobre Landell de Moura podem ser obtidas, por exemplo, no endereço Internet <http://www.virtual.com.br/cone/cartas.htm>. (N.T.)

\*Na realidade, parece mais justo atribuir a invenção do diodo a Edison, pois nos primeiros tempos do rádio era freqüente a utilização das assim chamadas "lâmpadas de efeito Edison" para substituir válvulas diodo, com resultados plenamente satisfatórios. Este e outros fatos interessantes sobre Edison estão relatados no livro *Incandescent Genius*, de C. B. Wall, Appleton-Century-Crofts, Inc., Nova York, 1959. Uma edição condensada em português deste livro foi publicada em 1958, na antologia *Os 20 Melhores Livros de Seleções*, Editora Ypiranga S.A., Rio de Janeiro-São Paulo. (N.T.)

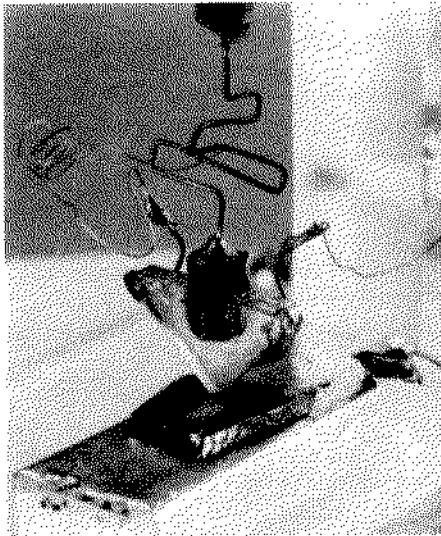


Fig. 1.3 O primeiro transistor. (Cortesia de AT & T, Bell Laboratories.)

toneladas, mas era muitas vezes mais rápido que a maioria dos sistemas eletromecânicos. Embora tenham sido construídos outros computadores a válvula, somente depois do aparecimento dos componentes semicondutores foi que os computadores sofreram variações apreciáveis de tamanho, velocidade e capacidade de processamento.

## A Era dos Semicondutores

Em 1947, os físicos William Shockley, John Bardeen e Walter H. Brattain, que trabalhavam nos laboratórios da Bell Telephone desenvolveram o *transistor*\* de contato de ponta (Fig. 1.3), um amplificador construído inteiramente com materiais semi-condutores, sem a necessidade de bulbos de vidro, vácuo ou tensão para aquecer o filamento. Devido à grande quantidade de conhecimentos disponíveis a respeito do projeto, análise e síntese de circuitos a válvula, a indústria teve uma atitude relutante no início, mas acabou abraçando a nova tecnologia. O primeiro *circuito integrado* (CI) foi desenvolvido em 1958 na Texas Instruments, e o primeiro circuito integrado comercial foi construído em 1961 pela Fairchild Corporation.

É impossível fazer uma revisão apropriada de toda a história do campo da eletroeletrônica em umas poucas páginas. Utilizando o texto e os gráficos da Fig. 1.2, tentamos mostrar o impressionante progresso ocorrido nos últimos 50 anos. A partir do começo do século XX, o crescimento parece ter sido realmente exponencial, o que nos leva a fazer a pergunta: o que acontecerá no futuro? A Fig. 1.2 sugere que muitas inovações importantes aparecerão em poucas décadas, causando provavelmente um crescimento ainda mais rápido do que o que experimentamos agora.

## 1.3 UNIDADES DE MEDIDA

É de importância vital no estudo de qualquer ramo da ciência e tecnologia a compreensão do valor das unidades de medida. Os

efeitos de substituições, em fórmulas básicas, de números sem unidades, ou com unidades incompatíveis, são muitas vezes ignorados, o que conduz a erros grosseiros. Considere, por exemplo, uma fórmula fundamental como a que define a velocidade média:

$$v = \frac{d}{t} \quad \begin{array}{l} v = \text{velocidade} \\ d = \text{distância} \\ t = \text{tempo} \end{array} \quad (1.1)$$

Suponha que, após realizarmos medidas em um objeto em movimento, obtivemos os seguintes dados:

$$d = 4.000 \text{ pés}$$

$$t = 1 \text{ min}$$

e que desejamos calcular  $v$  em milhas por hora.\* É comum que o estudante, sem pensar duas vezes, simplesmente substitua os valores numéricos dados acima em (1.1), obtendo

$$v = \frac{d}{t} = \frac{4.000 \text{ pés}}{1 \text{ min}} = \cancel{4.000 \text{ mi/h}}$$

A resposta assim obtida está, como indicamos, totalmente incorreta. Se desejamos obter a velocidade em *milhas por hora*, a unidade de medida para o deslocamento deve ser a *milha*, e a unidade de medida de tempo deve ser a *hora*. O erro absurdo obtido acima demonstra a importância de nos assegurarmos de que

*o valor numérico de um dado substituído em uma equação deve estar na unidade de medida apropriada para obtermos a resposta nas unidades especificadas pelo problema.*

A questão que se apresenta a seguir é, normalmente, como converter o deslocamento e o intervalo de tempo dados para as unidades de medida apropriadas. Em uma seção posterior deste capítulo, apresentaremos um procedimento mais sistemático; por enquanto, é suficiente saber que

$$1 \text{ mi} = 5.280 \text{ pés}$$

$$4.000 \text{ pés} = 0,7576 \text{ mi}$$

$$1 \text{ min} = \frac{1}{60} \text{ h} = 0,0167 \text{ h}$$

Substituindo na Eq. (1.1), obtemos

$$v = \frac{d}{t} = \frac{0,7576 \text{ mi}}{0,0167 \text{ h}} = 45,37 \text{ mi/h}$$

que difere apreciavelmente do resultado obtido com as unidades incorretas de antes.

Para complicar um pouco as coisas, suponha que o deslocamento seja dado em quilômetros, como acontece agora com a sinalização em muitas auto-estradas norte-americanas. Primeiramente devemos nos lembrar de que o prefixo *quilo* significa multiplicar por 1.000 (ver a Seção 1.5), e depois devemos encontrar o fator de conversão entre quilômetros e milhas. Se este fator de conversão não estiver prontamente acessível, devemos efetuar os cálculos da conversão utilizando a relação entre metros e pés ou polegadas, descrita na Seção 1.6.

\*Os Estados Unidos são o único país que ainda não adotou oficialmente o Sistema Métrico Decimal. (N.T.)

\*Transfer resistor, resistor de transferência. (N.T.)

Antes de substituir valores numéricos em uma equação, tente fazer mentalmente uma estimativa razoável da faixa de valores possíveis para a solução, comparando-a com o resultado obtido. Se um veículo percorre 4.000 pés em 1 minuto, parece razoável que o módulo de sua velocidade seja 4.000 mi/h? É claro que não!.\* Hoje em dia é particularmente importante fazer previamente estas estimativas pois o uso bastante disseminado de máquinas de calcular pode fazer com que um resultado absurdo seja aceito simplesmente porque apareceu no mostrador da calculadora.

Finalmente,

*se uma unidade de medida está associada a um conjunto de dados, ela deve ser explicitamente mencionada quando um desses valores for utilizado na solução de um problema.*

A afirmativa  $v = 45,37$  é, se não indicarmos a unidade (mi/h, km/h, m/s etc.), desprovida de significado.

A manipulação da Eq. (1.1) não apresenta qualquer dificuldade. Um procedimento algébrico trivial nos permite explicitar qualquer uma das três variáveis. No entanto, tendo em vista o número de questões suscitadas por uma equação tão simples, o leitor pode estar querendo saber se as dificuldades associadas a uma equação aumentam na mesma taxa com que aumenta o número de termos. Em geral, isso não acontece. É claro que é mais provável cometermos um erro quando lidamos com uma equação mais complexa, porém, uma vez que tenhamos escolhido o sistema de unidades apropriado e cada um dos termos tenha as suas unidades expressas neste sistema, existirão poucas dificuldades adicionais associadas a uma equação que exija um maior número de cálculos.

\*Estas estimativas supõem, é claro, que a pessoa que faz os cálculos tenha bastante vivência com as unidades de medida empregadas. Uma pessoa acostumada com o Sistema Métrico Decimal teria dificuldade em fazer estimativas com estes dados. Veja a nota anterior. (N.T.)

Em retrospectiva, antes de substituir valores numéricos em uma equação, certifique-se do seguinte:

1. *Todas as quantidades estejam expressas no sistema de unidades apropriado, de acordo com as equações que as definem.*
2. *Tenham sido substituídos na equação os valores corretos de cada uma das quantidades.*
3. *Os valores numéricos de todas as quantidades estejam expressos no mesmo sistema de unidades.*
4. *O valor numérico do resultado seja razoável quando comparado com os dados do problema.*
5. *O resultado esteja expresso no sistema de unidades correto.*

## 1.4 SISTEMAS DE UNIDADES

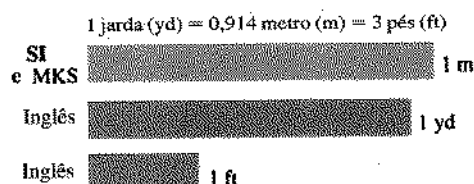
Os sistemas de unidades mais utilizados no passado eram o sistema inglês e o sistema métrico, ilustrados na Tabela 1.1. Observe que enquanto o sistema inglês é baseado em um conjunto único de padrões, o sistema métrico utiliza dois conjuntos de padrões inter-relacionados, o MKS e o CGS. As quantidades fundamentais nestes sistemas, juntamente com suas abreviaturas, são comparadas na Tabela 1.1. As siglas MKS e CGS são derivadas das unidades de medida utilizadas em cada sistema: as unidades fundamentais no sistema MKS são o metro, o quilograma (kg) e o segundo, enquanto no CGS as unidades fundamentais são o centímetro, o grama e o segundo.

É claro que o uso de mais de um sistema de unidades em um mundo que fica cada vez menor devido aos avanços tecnológicos em comunicações e transportes introduz complicações desnecessárias para a compreensão de dados técnicos. Tornou-se cada vez mais óbvia a necessidade de um conjunto padrão de unidades a ser adotado por todas as nações. O Escritório Internacional de Pesos e Medidas, localizado em Sèvres, na França, realiza

**Tabela 1.1**

*Comparação entre os sistemas de unidades métricas e o sistema inglês*

Inglês	Métricos		SI
	MKS	CGS	
<i>Comprimento:</i> Jarda (0,914 m)	Metro (m) (39,37 in.) (100 cm)	Centímetro (cm) (2,54 cm = 1 in.)	Metro (m)
<i>Massa:</i> Slug (14,6 kg)	Quilograma (kg) (1.000 g)	Grama (g)	Quilograma (kg)
<i>Força:</i> Libra (4,45 N)	Newton (N) (100.000 dina)	Dina	Newton (N)
<i>Temperatura:</i> Fahrenheit (°F) (= $\frac{9}{5}^{\circ}\text{C} + 32$ )	Celsius ou centígrado (= $\frac{5}{9} (^{\circ}\text{F} - 32)$ )	Centígrado (°C)	Kelvin (K) K = 273,15 + °C
<i>Energia:</i> pé-libra (1,356 joules)	Newton $\times$ metro ou joule (J) (0,7376 pé-libra)	Dina-centímetro ou erg (1 joule = 10 <sup>7</sup> ergs)	Joule (J)
<i>Tempo:</i> Segundo (s)	Segundo (s)	Segundo (s)	Segundo (s)

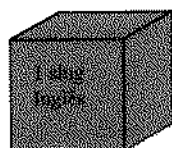
**Comprimento:**


$$1 \text{ m} = 100 \text{ cm} = 39,37 \text{ in.}$$

$$2,54 \text{ cm} = 1 \text{ in}$$


**Massa:**

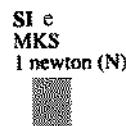
$$1 \text{ slug} = 14,6 \text{ quilogramas}$$



$$1 \text{ quilograma} = 1.000 \text{ g}$$


**Força:**

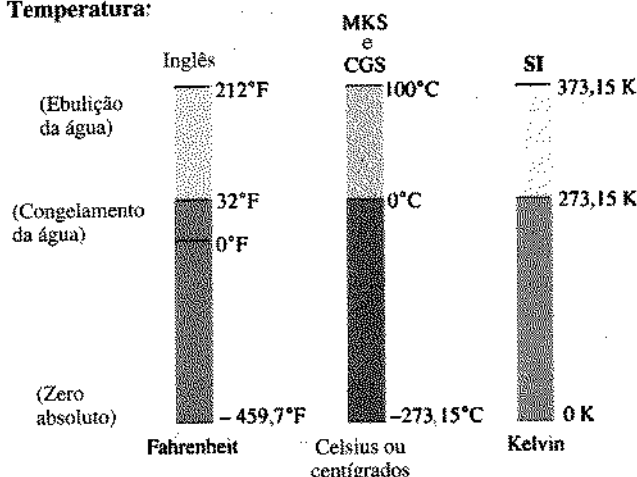
Inglês  
1 libra (lb)



$$\text{libra (lb)} = 4,45 \text{ newtons (N)}$$

$$1 \text{ newton} = 100.000 \text{ dina (dyn)}$$

1 dina (CGS)

**Temperatura:**


$$^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5}^{\circ}\text{C} + 32^{\circ}$$

$$^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} (^{\circ}\text{F} - 32^{\circ})$$

$$\text{K} = 273,15 + ^{\circ}\text{C}$$

Inglês  
1 ft-lb



$$1 \text{ pé-libra} = 1,356 \text{ joules}$$

$$1 \text{ joule} = 10^7 \text{ ergs}$$

1 erg (CGS)

Fig. 1.4 Comparação entre unidades dos vários sistemas de unidades.

periodicamente a Conferência Geral de Pesos e Medidas, à qual comparecem representantes de todos os países do mundo. Em 1960, a Conferência Geral decidiu pela adoção de um sistema chamado Le Système International d'Unités (Sistema Internacional de Unidades), cuja abreviatura em todo mundo é SI. Nos Estados Unidos, este sistema vem sendo utilizado pelo Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos (IEEE) desde 1965 e também, desde 1967, pelo Instituto Americano de Normas Técnicas como um padrão em toda literatura técnica e científica.\*

As unidades de medida do SI, juntamente com suas abreviaturas, foram incluídas na Tabela 1.1 para fins de comparação. Tomamos o cuidado de escolher as abreviaturas mais comumente utilizadas. Logo, é importante que elas sejam utilizadas sempre que possível, para assegurar a compreensão universal das expressões. Observe as semelhanças entre os sistemas SI e MKS. Sempre que for possível e prático, empregaremos neste livro as uni-

dades e abreviaturas do SI, num esforço para contribuir para o uso de um sistema universal.

A Fig. 1.4 pode ajudar o leitor a desenvolver um sentimento intuitivo sobre as relações entre as unidades de medida em cada sistema de unidade. Observe nesta figura como as unidades do sistema CGS são relativamente pequenas. Existe um padrão para todas as unidades de medida de cada sistema. Os padrões de algumas unidades (especialmente as inglesas) são bastante pitorescos.

O metro foi definido originalmente em 1790 como sendo igual a 1/10.000.000 da distância entre o equador e qualquer um dos pólos, ao nível do mar; uma barra construída com uma liga de platina e irídio, e considerada uma expressão material deste padrão, é mantida no Escritório Internacional de Pesos e Medidas em Sèvres, na França.

*Atualmente o metro é definido com base no valor da velocidade da luz no vácuo, que é considerado como sendo exatamente 299.792.458 m/s.*

*O quilograma é definido como a massa igual a 1.000 vezes a massa de um centímetro cúbico de água pura a 4°C.*

\*A ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, adota este sistema praticamente desde a sua criação. (N.T.)

Um cilindro também de platina iridiada é mantido como quilograma padrão em Sèvres.

O segundo foi inicialmente definido como sendo igual a  $1/86.400$  do dia solar médio. No entanto, como o período de rotação da Terra está diminuindo cerca de um segundo a cada dez anos,

*o segundo foi redefinido em 1967 como sendo igual a 9.192.631.770 vezes o período associado à radiação eletromagnética emitida por uma certa transição entre níveis do átomo de césio.*

## 1.5 ALGARISMOS SIGNIFICATIVOS, PRECISÃO E ARREDONDAMENTO

Nesta seção, vamos enfatizar a importância de conhecermos a fonte de um conjunto de dados, de sabermos como um número apareceu e como deve ser manipulado. Frequentemente escrevemos números em formas variadas sem nos preocuparmos muito com o formato utilizado, com o número de algarismos incluídos e com a precisão resultante dos cálculos.

Se expressarmos o resultado de uma medida como 22,1" ou como 22,10", por exemplo, estaremos expressando níveis diferentes de precisão. O primeiro resultado sugere que a medida foi feita com um instrumento que só é preciso até a casa dos décimos; o segundo resultado foi obtido com um instrumento capaz de efetuar leituras precisas até a casa dos centésimos. Logo, devemos ter cuidado com o uso de zeros em um número que expressa o resultado de uma medida, devendo ser bem compreendidas as implicações deste uso.

Existem dois tipos de número, os *exatos* e os *aproximados*. Os números exatos têm a mesma precisão, independentemente do número de algarismos com que são representados; sabemos por exemplo que existem 12 maçãs em uma dúzia, e não 12,1. Neste texto, os números que aparecem nas descrições, diagramas e exemplos são considerados *exatos*, de modo que uma bateria de 100 V pode ter sua tensão escrita como 100,0 V ou 100,00 V e assim por diante, pois convencionamos que a tensão é 100 V em qualquer nível de precisão. Os zeros adicionais não são escritos por razões práticas. No entanto, em condições realísticas, como por exemplo em um laboratório, várias medidas são efetuadas, e o grau de precisão pode variar de um instrumento para outro, sendo assim importante saber trabalhar corretamente com os resultados. Qualquer resultado obtido no laboratório deve ser considerado uma *aproximação*. As escalas dos instrumentos analógicos com seus ponteiros podem ser de leitura difícil, e muito embora os instrumentos digitais apresentem somente algarismos no seu mostrador, todos eles possuem limitações no número de algarismos, não nos dando qualquer informação sobre os algarismos que não aparecem no mostrador.

A precisão de uma medida pode ser determinada pelo número de *algarismos (dígitos) significativos* presentes no resultado. Os algarismos significativos são os inteiros (de 0 até 9) que se podem presumir precisos no caso da medida em questão. Como resultado, todos os algarismos diferentes de zero são considerados significativos, enquanto os zeros são significativos somente em alguns casos. Por exemplo: os zeros em 1.005 são considerados significativos, pois definem o "tamanho" do número e estão ladeados por algarismos diferentes de zero. Já em um número como 0,064 os dois zeros não são considerados significativos porque são utilizados somente para definir a localização da vírgula, não informando nada sobre a precisão da

medida. No caso do número 0,4020, o zero à esquerda da vírgula não é significativo, mas os outros dois são, pois definem a magnitude do número e a precisão da medida até a quarta casa decimal.

Quando adicionamos números aproximados, é importante que tenhamos certeza de ter levado em conta a precisão das parcelas de modo coerente. Ao adicionarmos um resultado cuja precisão só vai até a casa dos décimos a outro cuja precisão vai até a casa dos milésimos, obtemos um resultado cuja precisão chega somente à casa dos décimos. Não podemos esperar que um resultado com maior grau de precisão melhore a qualidade de outro com precisão menor.

*Ao adicionarmos ou subtrairmos números aproximados, a precisão do resultado é determinada pela parcela de menor precisão.*

*No caso da multiplicação e da divisão de números aproximados, o número de algarismos significativos do resultado é igual ao do número com menos algarismos significativos.*

Aparece com frequência a necessidade de *arredondar* números aproximados (isto também acontece com números exatos); ou seja, você deve decidir qual o grau de precisão apropriado e alterar o resultado de modo coerente com a sua escolha. O procedimento consensual é simplesmente observar o algarismo que se segue ao último que desejamos manter na forma arredondada e adicionar 1 a este último algarismo se o seguinte for maior ou igual a 5, deixando-o inalterado no caso de o seguinte ser menor que 5. Por exemplo, podemos arredondar  $3,186 \approx 3,19 \approx 3,2$  dependendo do grau de precisão desejado. O símbolo  $\approx$  significa *aproximadamente igual a*.

**EXEMPLO 1.1** Execute as operações indicadas com os números aproximados que se seguem e arredonde o resultado até o grau de precisão apropriado.

- $532,6 + 4,02 + 0,036 = 536,656 \approx 536,7$  (grau de precisão determinado por 532,6)
- $0,04 + 0,003 + 0,0064 = 0,0494 \approx 0,05$  (grau de precisão determinado por 0,04)
- $4,632 \times 2,4 = 11,1168 \approx 11$  (determinado pelos dois algarismos significativos de 2,4)
- $3,051 \times 802 = 2446,902 \approx 2.450$  (determinado pelos três algarismos significativos de 802)
- $1.402/6,4 = 219,0625 \approx 220$  (determinado pelos dois algarismos significativos de 6,4)
- $0,0046/0,05 = 0,0920 \approx 0,09$  (determinado pelo único algarismo significativo de 0,05)

## 1.6 POTÊNCIAS DE DEZ

O fato de encontrarmos sistemas de unidades com magnitudes relativas tão variadas deveria tornar claro que tanto números muito pequenos quanto números muito grandes são frequentemente encontrados na prática científica. Costumamos utilizar potências de dez para facilitar a manipulação de números de magnitudes tão variadas. Esta anotação utiliza plenamente as propriedades matemáticas das potências de dez. A notação utilizada para representar números que são potências inteiras de dez é a seguinte:

$$\begin{array}{lll}
 1 = 10^0 & 1/10 = & 0,1 = 10^{-1} \\
 10 = 10^1 & 1/100 = & 0,01 = 10^{-2} \\
 100 = 10^2 & 1/1.000 = & 0,001 = 10^{-3} \\
 1.000 = 10^3 & 1/10.000 = & 0,0001 = 10^{-4}
 \end{array}$$

Observe, em particular que  $10^0 = 1$ , pois qualquer número elevado a zero é igual a 1 ( $x^0 = 1$ ,  $1.000^0 = 1$  e assim por diante). Observe também que os números da lista que são maiores que 1 estão associados a potências positivas de dez, enquanto os números que são menores que 1 estão associados a potências negativas de dez.

Um método prático de determinar a potência de dez apropriada é fazer uma pequena marca à direita do numeral 1, não importando a sua localização; conte então o número de casas decimais para a direita ou para a esquerda até chegar à vírgula. Se você tiver que se deslocar para a direita, a potência de dez será positiva; se o deslocamento for para a esquerda, a potência será negativa. Por exemplo:

$$\begin{array}{l}
 10.000,0 = 1 \underbrace{0.000}_1 = 10^{+4} \\
 0,00001 = 0, \underbrace{00001}_5 = 10^{-5}
 \end{array}$$

Relacionamos a seguir algumas relações matemáticas importantes envolvendo potências de dez, juntamente com alguns exemplos. Em cada caso,  $n$  e  $m$  podem ser qualquer número real positivo ou negativo.

$$\frac{1}{10^n} = 10^{-n} \quad \frac{1}{10^{-n}} = 10^n \quad (1.2)$$

A Eq. (1.2) mostra claramente que para deslocar uma potência de dez do denominador para o numerador, ou para fazer a operação inversa, devemos simplesmente trocar o sinal do expoente.

### EXEMPLOS

$$\begin{array}{l}
 \frac{1}{1.000} = \frac{1}{10^{+3}} = 10^{-3} \\
 \frac{1}{0,00001} = \frac{1}{10^{-5}} = 10^{+5}
 \end{array}$$

Produto de potências de dez:

$$(10^n)(10^m) = 10^{(n+m)} \quad (1.3)$$

### EXEMPLOS

$$\begin{array}{l}
 (1.000)(10.000) = (10^3)(10^4) = 10^{(3+4)} = 10^7 \\
 (0,00001)(100) = (10^{-5})(10^2) = 10^{(-5+2)} = 10^{-3}
 \end{array}$$

Divisão de potências de dez:

$$\frac{10^n}{10^m} = 10^{(n-m)} \quad (1.4)$$

### EXEMPLOS

$$\begin{array}{l}
 \frac{100.000}{100} = \frac{10^5}{10^2} = 10^{(5-2)} = 10^3 \\
 \frac{1.000}{0,0001} = \frac{10^3}{10^{-4}} = 10^{(3-(-4))} = 10^{(3+4)} = 10^7
 \end{array}$$

Observe o uso de parênteses no segundo exemplo para se assegurar de que o resultado tenha o sinal correto.

Potência de potências de dez:

$$(10^n)^m = 10^{(nm)} \quad (1.5)$$

### EXEMPLOS

$$\begin{array}{l}
 (100)^4 = (10^2)^4 = 10^{(2)(4)} = 10^8 \\
 (1.000)^{-2} = (10^3)^{-2} = 10^{(3)(-2)} = 10^{-6} \\
 (0,01)^{-3} = (10^{-2})^{-3} = 10^{(-2)(-3)} = 10^6
 \end{array}$$

## Operações Aritméticas Básicas

Vamos analisar agora a utilização de potências de dez para realizar algumas operações aritméticas básicas envolvendo números que não são potências de dez. O número 5.000 pode ser escrito como  $5 \times 1.000 = 5 \times 10^3$ , e o número 0,0004 pode ser escrito como  $4 \times 0,0001 = 4 \times 10^{-4}$ . Podemos, é claro, escrever  $10^5$  como  $1 \times 10^5$ , se isto for necessário para manter a clareza das operações a serem realizadas.

**Adição e Subtração** Para efetuar a adição ou a subtração de expressões envolvendo potências de dez, *os expoentes devem ser os mesmos em todos os termos*, ou seja,

$$A \times 10^n \pm B \times 10^n = (A \pm B) \times 10^n \quad (1.6)$$

### EXEMPLOS

$$\begin{array}{l}
 6.300 + 75.000 = (6,3)(1.000) + (75)(1.000) \\
 \quad \quad \quad = 6,3 \times 10^3 + 75 \times 10^3 \\
 \quad \quad \quad = (6,3 + 75) \times 10^3 \\
 \quad \quad \quad = 81,3 \times 10^3 \\
 0,00096 - 0,000086 = (96)(0,00001) - (8,6)(0,00001) \\
 \quad \quad \quad = 96 \times 10^{-5} - 8,6 \times 10^{-5} \\
 \quad \quad \quad = (96 - 8,6) \times 10^{-5} \\
 \quad \quad \quad = 87,4 \times 10^{-5}
 \end{array}$$

**Multiplicação** Em geral,

$$(A \times 10^n)(B \times 10^m) = (A)(B) \times 10^{(n+m)} \quad (1.7)$$

o que nos mostra que as operações com as potências de dez podem neste caso ser efetuadas separadamente das operações com os números que multiplicam essas potências.

### EXEMPLOS

$$\begin{aligned}(0,0002)(0,000007) &= [(2)(0,0001)][(7)(0,000001)] \\ &= (2 \times 10^{-4})(7 \times 10^{-6}) \\ &= (2)(7) \times (10^{-4})(10^{-6}) \\ &= 14 \times 10^{-10} \\ (340.000)(0,00061) &= (3,4 \times 10^5)(61 \times 10^{-5}) \\ &= (3,4)(61) \times (10^5)(10^{-5}) \\ &= 207,4 \times 10^0 \\ &= 207,4\end{aligned}$$

**Divisão** Em geral,

$$\frac{A \times 10^n}{B \times 10^m} = \frac{A}{B} \times 10^{n-m} \quad (1.8)$$

e vemos que continua válida a observação feita no caso da multiplicação.

### EXEMPLOS

$$\begin{aligned}\frac{0,00047}{0,002} &= \frac{47 \times 10^{-5}}{2 \times 10^{-3}} = \left(\frac{47}{2}\right) \times \left(\frac{10^{-5}}{10^{-3}}\right) \\ &= 23,5 \times 10^{-2} \\ \frac{690.000}{0,00000013} &= \frac{69 \times 10^4}{13 \times 10^{-8}} = \left(\frac{69}{13}\right) \times \left(\frac{10^4}{10^{-8}}\right) \\ &= 5,31 \times 10^{12}\end{aligned}$$

**Potências** Em geral,

$$(A \times 10^n)^m = A^m \times 10^{nm} \quad (1.9)$$

e novamente podemos separar a operação com as potências de dez da operação com os multiplicadores.

### EXEMPLOS

$$\begin{aligned}(0,00003)^3 &= (3 \times 10^{-5})^3 = (3)^3 \times (10^{-5})^3 \\ &= 27 \times 10^{-15} \\ (90.800.000)^2 &= (9,08 \times 10^7)^2 = (9,08)^2 \times (10^7)^2 \\ &= 82,4464 \times 10^{14}\end{aligned}$$

## Notações de Ponto Fixo, de Ponto Flutuante, Científica e de Engenharia

Existem em geral quatro modos de obtenção de um número quando utilizamos um computador ou uma calculadora. Quan-

do não utilizamos potências de dez, os números são escritos na notação de ponto fixo ou na notação de ponto flutuante. Para utilizarmos a notação de ponto fixo é necessário que a localização da vírgula seja mantida constante. No caso da notação de ponto flutuante, a localização da vírgula é definida pelo número a ser exibido no mostrador. Podemos, em boa parte dos computadores e calculadoras, escolher entre as notações de ponto fixo e de ponto flutuante. Utilizando o ponto fixo, o usuário pode decidir o grau de precisão desejado para o resultado: décimos, centésimos, milésimos, e assim por diante. Todos os resultados terão neste caso a vírgula localizada na mesma posição, como ilustram os exemplos a seguir, onde escolhemos a precisão até a casa dos milésimos:

$$\frac{1}{3} = 0,333 \quad \frac{1}{16} = 0,063 \quad \frac{2300}{2} = 1150,000$$

Se tivéssemos optado pela notação de ponto flutuante, os resultados das operações acima apareceriam como:

$$\frac{1}{3} = 0,333333333333 \quad \frac{1}{16} = 0,0625 \quad \frac{2300}{2} = 1150$$

Se os números a serem exibidos no mostrador forem muito grandes ou muito pequenos, podemos utilizar as potências de dez apropriadas.

As notações científica (também chamada padrão) e de engenharia utilizam potências de dez com algumas restrições sobre a mantissa (multiplicador) ou fator de escala (potência da potência de dez). A notação científica impõe que a vírgula apareça logo após o primeiro algarismo maior ou igual a 1, mas menor do que 10. Uma potência de dez virá em seguida (utilizando em geral a notação exponencial E), mesmo que seja dez elevado a zero. Seguem-se alguns exemplos:

$$\frac{1}{3} = 3,333333333333E-1 \quad \frac{1}{16} = 6,25E-2 \quad \frac{2300}{2} = 1,15E3$$

Quando utilizamos a notação científica, podemos escolher entre os formatos de ponto fixo ou de ponto flutuante. Este último foi utilizado no exemplo acima. Se tivéssemos escolhido o formato de ponto fixo com precisão de até milésimos, obteríamos os seguintes resultados para as operações acima:

$$\frac{1}{3} = 3,333E-1 \quad \frac{1}{16} = 6,250E-2 \quad \frac{2300}{2} = 1,150E3$$

Vamos agora introduzir a notação de engenharia, onde todas as potências de dez devem ter expoentes múltiplos de 3 e a mantissa deve ser maior ou igual a 1, mas menor que 1.000. Esta restrição sobre as potências de dez é devida ao fato de que certas potências específicas têm associados a elas certos prefixos que serão introduzidos nos próximos parágrafos. As operações acima, em notação científica com ponto flutuante, ficam assim:

$$\frac{1}{3} = 333,3333333333E-3 \quad \frac{1}{16} = 62,5E-3 \quad \frac{2300}{2} = 1,15E3$$

Se utilizarmos a notação de engenharia com precisão até a terceira casa decimal, obteremos:

Tabela 1.2

Fatores Multiplicativos	Prefixo no SI	Símbolo no SI
$1.000.000.000.000 = 10^{12}$	tera	T
$1.000.000.000 = 10^9$	giga	G
$1.000.000 = 10^6$	mega	M
$1.000 = 10^3$	quilo	k
$0,001 = 10^{-3}$	milli	m
$0,000.001 = 10^{-6}$	micro	$\mu$
$0,000.000.001 = 10^{-9}$	nano	n
$0,000.000.000.001 = 10^{-12}$	pico	p

$$\frac{1}{3} = 333,333\text{E}-3 \quad \frac{1}{16} = 62,500\text{E}-3 \quad \frac{2.300}{2} = 1,150\text{E}3$$

## Prefixos

Na notação de engenharia foram associados a algumas potências de dez específicas certos prefixos e símbolos, listados na Tabela 1.2. Estes prefixos e símbolos permitem que se reconheça facilmente a potência de dez envolvida e facilitam a comunicação entre as pessoas que trabalham em tecnologia.

## EXEMPLOS

$$\begin{aligned} 1.000.000 \text{ ohms} &= 1 \times 10^6 \text{ ohms} \\ &= 1 \text{ megohm (M}\Omega\text{)} \\ 100.000 \text{ metros} &= 100 \times 10^3 \text{ metros} \\ &= 100 \text{ quilômetros (km)} \\ 0,0001 \text{ segundo} &= 0,1 \times 10^{-3} \text{ segundo} \\ &= 0,1 \text{ milissegundo (ms)} \\ 0,000001 \text{ farad} &= 1 \times 10^{-6} \text{ farad} \\ &= 1 \text{ microfarad (\mu F)} \end{aligned}$$

Damos a seguir alguns exemplos com números que não são potências exatas de dez.

## EXEMPLOS

- $41.200 \text{ m}$  é equivalente a  $41,2 \times 10^3 \text{ m} = 41,2 \text{ quilômetros} = 41,2 \text{ km}$ .
- $0,00956 \text{ J}$  é equivalente a  $9,56 \times 10^{-3} \text{ J} = 9,56 \text{ milijoules} = 9,56 \text{ mJ}$ .
- $0,000768 \text{ s}$  é equivalente a  $768 \times 10^{-6} \text{ s} = 768 \text{ microssegundos} = 768 \mu\text{s}$ .
- $\frac{8.400 \text{ m}}{0,06} = \frac{8,4 \times 10^3 \text{ m}}{6 \times 10^{-2}} = \left(\frac{8,4}{6}\right) \times \left(\frac{10^3}{10^{-2}}\right) \text{ m}$   
 $= 1,4 \times 10^5 \text{ m} = 140 \times 10^3 \text{ m} = 140 \text{ quilômetros} = 140 \text{ km}$
- $(0,0003)^4 \text{ s} = (3 \times 10^{-4})^4 \text{ s} = 81 \times 10^{-16} \text{ s}$   
 $= 0,0081 \times 10^{-12} \text{ s} = 0,008 \text{ picossegundos} = 0,0081 \text{ ps}$

## 1.7 CONVERSÃO ENTRE POTÊNCIAS DE DEZ

É muito comum termos necessidade de converter um resultado em uma potência de dez para outra destas potências. Por exemplo, se um freqüencímetro só fornece resultados em quilohertz (kHz), pode ser necessário transformar o resultado da medida para megahertz (MHz); se um aparelho para medidas de pequenos intervalos de tempo está calibrado em milissegundos (ms), pode ser que tenhamos a necessidade de expressar essa medida em microssegundos ( $\mu\text{s}$ ), por exemplo, para traçar um gráfico. Esta conversão não é difícil; basta que tenhamos sempre em mente que um aumento ou uma diminuição no expoente da potência de dez é sempre acompanhado por um efeito oposto sobre o fator que multiplica a potência. O procedimento fica mais claro se examinarmos alguns exemplos.

## EXEMPLOS

- Converter 20 kHz para megahertz.

**Solução:** Na notação com potências de dez:

$$20 \text{ kHz} = 20 \times 10^3 \text{ Hz}$$

Para efetuar a conversão, devemos encontrar o fator multiplicativo que deve preencher o espaço vazio na expressão seguinte:

$$20 \times 10^3 \text{ Hz} \Rightarrow \text{---} \times 10^6 \text{ Hz}$$

Aumenta por um fator 3  
Diminui a classe por um fator 3

Como o expoente da potência de dez *aumenta* por um fator de três, o multiplicador deve *diminuir* deslocando-se a vírgula três casas para a esquerda, como ilustra a expressão a seguir:

$$\frac{020}{3} = 0,02$$

e

$$20 \times 10^3 \text{ Hz} = 0,02 \times 10^6 \text{ Hz} = 0,02 \text{ MHz}$$

- Converter 0,01 ms para microssegundos.

**Solução:** Utilizando potências de dez:

$$0,01 \text{ ms} = 0,01 \times 10^{-3} \text{ s}$$

e

$$0,01 \times 10^{-3} \text{ s} = \text{---} \times 10^{-6} \text{ s}$$

Diminui de 3  
Aumenta de 3

Como o expoente da potência de dez *diminui* por um fator de três, o multiplicador deve *aumentar*, o que se consegue deslocando-se a vírgula três casas para a direita, como vemos a seguir:

$$\underbrace{0,010}_{3} = 10$$

e

$$0,01 \times 10^{-3} \text{ s} = 10 \times 10^{-6} \text{ s} = 10 \mu\text{s}$$

Alguns estudantes têm tendência de pensar que a potência de dez aumentou quando o expoente passa de  $-3$  a  $-6$ ; lembre-se, no entanto, quando estiver comparando potências de dez, que quando o expoente for negativo, quanto maior o valor absoluto do expoente menor será o número representado pela potência de dez.

c. Converter 0,0002 km para milímetros.

**Solução:**

$$0,002 \times 10^3 \text{ m} \xrightarrow[\text{Aumento de 6}]{\text{Diminui de 6}} \underline{\quad} \times 10^{-3} \text{ m}$$

No caso deste exemplo, temos que ser bastante cuidadosos, pois a diferença entre  $+3$  e  $-3$  é 6, o que torna necessário alterar o fator multiplicativo do seguinte modo:

$$\underbrace{0,002000}_6 = 2.000$$

e

$$0,002 \times 10^3 \text{ m} = 2.000 \times 10^{-3} \text{ m} = 2.000 \text{ mm}$$

## 1.8 CONVERSÕES DENTRO DO MESMO SISTEMA E ENTRE SISTEMAS DE UNIDADES

Não é possível evitar, quando estudamos qualquer área da ciência ou tecnologia, as conversões entre várias unidades, tanto dentro do mesmo sistema quanto entre sistemas de unidades diferentes. No entanto, os erros decorrentes dessas operações são tão frequentes que incluímos esta seção, onde apresentamos um método que, se aplicado corretamente, levará sempre ao resultado correto.

Existe, é claro, mais de um método para efetuar a conversão. Na verdade, algumas pessoas preferem efetuar o processo mentalmente. Para conversões elementares, este método é aceitável, mas é bastante arriscado nos casos mais complexos.

O método que desejamos introduzir pode ser entendido com mais clareza examinando-se um problema relativamente simples, como a conversão de polegadas em metros. Para sermos mais específicos, vamos converter 48 polegadas (4 pés) em metros.

Se multiplicarmos as 48 polegadas (in.) por um fator 1, a magnitude desta quantidade não se altera:

$$48 \text{ in.} = 48 \text{ in.}(1) \quad (1.10)$$

No caso deste exemplo, o fator de conversão é

$$1 \text{ m} = 39,37 \text{ in.}$$

Dividindo ambos os lados desta expressão por 39,37 polegadas, obtemos:

$$\frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ in.}} = (1)$$

Note que o resultado final nos diz que a razão  $1 \text{ m}/39,37 \text{ in.}$  é igual a 1, o que é óbvio, pois estas duas quantidades são idênticas. Se substituímos agora este fator (1) na Equação (1.10), obtemos:

$$48 \text{ in.}(1) = 48 \cancel{\text{ in.}} \left( \frac{1 \text{ m}}{39,37 \cancel{\text{ in.}}} \right)$$

o que resulta no cancelamento das polegadas, deixando apenas metros como unidades de medida. Devemos agora efetuar a divisão de 48 por 39,37, para completar a operação:

$$\frac{48}{39,37} \text{ m} = 1,219 \text{ m}$$

Vamos agora rever o método passo a passo:

1. Coloque o fator de conversão numa forma que tenha o valor numérico (1), com a unidade de medida a ser removida no denominador.
2. Efetue as operações matemáticas necessárias para obter o valor correto da quantidade em questão na unidade de medida remanescente.

### EXEMPLOS:

a. Converta 6,8 min para segundos.

**Solução:** O fator de conversão é:

$$1 \text{ min} = 60 \text{ s}$$

Como o minuto deve ser removido do resultado final, ele deve aparecer no denominador do fator (1), como ilustramos a seguir:

*Passo 1:*

$$\left( \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right) = (1)$$

*Passo 2:*

$$6,8 \text{ min}(1) = 6,8 \cancel{\text{ min}} \left( \frac{60 \text{ s}}{1 \cancel{\text{ min}}} \right) = (6,8)(60) \text{ s} = 408 \text{ s}$$

b. Converter 0,24 m para centímetros.

**Solução:** O fator de conversão é:

$$1 \text{ m} = 100 \text{ cm}$$

Como o metro não deve aparecer no resultado final, ele deve estar no denominador do fator (1), ou seja:

Passo 1:

$$\left(\frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}}\right) = 1$$

Passo 2:

$$0,24 \text{ m}(1) = 0,24 \cancel{\text{m}} \left(\frac{100 \text{ cm}}{1 \cancel{\text{m}}}\right) = (0,24)(100) \text{ cm} \\ = 24 \text{ cm}$$

Os produtos (1)(1) e (1)(1)(1) são todos iguais a 1. Usando este fato, podemos efetuar várias conversões no decorrer da mesma operação.

### EXEMPLOS:

- a. Determine o número de minutos equivalente à metade de um dia.

**Solução:** Utilizando os fatores de conversão apropriados e tomando o cuidado de colocar sempre as unidades a serem removidas no denominador, obtemos a seguinte sequência:

$$0,5 \text{ dia} \left(\frac{24 \cancel{\text{h}}}{1 \text{ dia}}\right) \left(\frac{60 \text{ min}}{1 \cancel{\text{h}}}\right) = (0,5)(24)(60) \text{ min} \\ = 720 \text{ min}$$

- b. Converta 2,2 jardas para metros.

**Solução:** Utilizando novamente os fatores de conversão apropriados entre jardas, pés, polegadas e metros, obtemos:

$$2,2 \text{ jardas} \left(\frac{3 \cancel{\text{ft}}}{1 \text{ jarda}}\right) \left(\frac{12 \cancel{\text{in}}}{1 \cancel{\text{ft}}}\right) \left(\frac{1 \text{ m}}{39,37 \cancel{\text{in}}}\right) = \frac{(2,2)(3)(12)}{39,37} \text{ m} \\ = 2,012 \text{ m}$$

Vamos agora dar alguns exemplos que são aplicações práticas dos anteriores.

**EXEMPLOS:** Na Europa, no Canadá, na América do Sul e em muitos outros lugares, a velocidade máxima permitida é dada em quilômetros por hora. Qual o valor, em milhas por hora, de 100 km/h?

$$\left(\frac{100 \text{ km}}{\text{h}}\right) (1)(1)(1)(1) \\ = \left(\frac{100 \cancel{\text{km}}}{\text{h}}\right) \left(\frac{1.000 \cancel{\text{m}}}{1 \cancel{\text{km}}}\right) \left(\frac{39,37 \cancel{\text{in}}}{1 \cancel{\text{m}}}\right) \left(\frac{1 \cancel{\text{ft}}}{12 \cancel{\text{in}}}\right) \left(\frac{1 \text{ mi}}{5.280 \cancel{\text{ft}}}\right) \\ = \frac{(100)(1.000)(39,37)}{(12)(5.280)} \frac{\text{mi}}{\text{h}} \\ = 62,14 \text{ mi/h}$$

Muitas pessoas utilizam o fator de conversão aproximado 0,6 para simplificar as contas; assim,

$$(100 \text{ km/h})(0,6) \approx 60 \text{ mi/h}$$

$$(60 \text{ km/h})(0,6) \approx 36 \text{ mi/h}$$

Determine a velocidade em milhas por hora de um corredor que percorre uma milha em 4 minutos.

Invertendo o fator 4 min/1 mi, obtemos:

$$\left(\frac{1 \text{ mi}}{4 \cancel{\text{min}}}\right) \left(\frac{60 \cancel{\text{min}}}{\text{h}}\right) = \frac{60}{4} \text{ mi/h} = 15 \text{ mi/h}$$

## 1.9 SÍMBOLOS

Utilizaremos neste livro vários símbolos, e é possível que nem todos sejam de conhecimento prévio do leitor. Alguns destes símbolos são definidos na Tabela 1.3, e outros serão definidos no texto à medida que se fizer necessário.

## 1.10 TABELAS DE CONVERSÃO

Quando limitações de tempo não permitem o uso dos métodos descritos neste capítulo, tabelas de conversão como as que aparecem no Apêndice B podem ser muito úteis. No entanto, muito embora estas tabelas pareçam ser fáceis de utilizar, é freqüente a ocorrência de erros, porque as operações indicadas na tabela não são efetuadas corretamente.

Tabela 1.3

Símbolo	Significado
$\neq$	Diferente de $6,12 \neq 6,13$
$>$	Maior que $4,78 > 4,20$
$\gg$	Muito maior que $840 \gg 16$
$<$	Menor que $430 < 540$
$\ll$	Muito menor que $0,002 \ll 46$
$\geq$	Maior ou igual a $x \geq y$ é satisfeita para $y = 3$ e $x = 3$ ou $x > 3$
$\leq$	Menor ou igual a $x \leq y$ é satisfeita para $y = 3$ e $x = 3$ ou $x < 3$
$\approx$	Aproximadamente igual a $3,14159 \approx 3,14$
$\Sigma$	Somatório $\Sigma (4 + 6 + 8) = 18$
$   $	Valor absoluto, ou módulo, de $ a  = 4$ , onde $a = -4$ ou $+4$
$\therefore$	Logo $x = \sqrt{4} \therefore x = +2$
$=$	Igual por definição. Estabelece uma relação entre duas ou mais quantidades

mente. Sempre que estiver utilizando estas tabelas, tente fazer mentalmente uma estimativa da ordem de grandeza da quantidade a ser determinada em comparação com a magnitude desta mesma quantidade no sistema de unidades original. Este cuidado tão simples pode evitar o aparecimento de resultados absurdos que podem ocorrer se a operação for feita de maneira incorreta.

Considere, por exemplo, o seguinte procedimento obtido de uma tabela de conversão.

Para converter de	Para	Multiplique por
Milhas	Metros	$1,609 \times 10^3$

Para converter 2,5 milhas em metros é necessário multiplicar 2,5 pelo fator de conversão, isto é,

$$2,5 \text{ mi} (1,609 \times 10^3) = 4,0225 \times 10^3 \text{ m}$$

A conversão de 4.000 metros em milhas implica um processo de divisão:

$$\frac{4,000 \text{ m}}{1,609 \times 10^3} = 2486,02 \times 10^{-3} = 2,48602 \text{ mi}$$

Nos exemplos acima é fácil perceber que 2,5 milhas equivalem a uns poucos milhares de metros, e também que 4.000 metros equivalem a umas poucas milhas. Como mencionamos anteriormente, estas estimativas eliminam a possibilidade de resultados absurdos oriundos de uma utilização incorreta dos fatores de conversão.

## 1.11 ANÁLISE POR COMPUTADOR

Nos últimos anos, o uso de computadores em processos educacionais tem crescido exponencialmente. São pouquíssimos os textos em nível elementar que não incluem alguma discussão sobre as técnicas de computação mais populares na época de sua publicação. Na realidade, a credibilidade de qualquer trabalho em ciência e tecnologia é, hoje em dia, uma função, embora não exclusiva, do quanto os métodos computacionais foram utilizados na sua confecção.

Não há dúvida de que qualquer estudante deve, ao se formar, ter adquirido um conhecimento básico de métodos computacionais. Todos os empregadores esperam, hoje em dia, que os profissionais recém-formados tenham pelo menos um conhecimento básico do jargão computacional e também alguma experiência prática no assunto.

Para alguns estudantes, o simples fato de pensar em ter que aprender a usar um computador provoca desconfortáveis sensações de insegurança, normalmente associadas ao medo. Pode estar certo, no entanto, que se você aprender a utilizá-lo de maneira apropriada, o computador pode se tornar uma ferramenta muito útil e "amigável", que o ajudará a desenvolver e aplicar as suas habilidades em um ambiente profissional.

Para o principiante em computação existem duas opções para o desenvolvimento das habilidades necessárias: o estudo de linguagens e o uso de "pacotes" de *software*.

## Linguagens

Existem várias linguagens que fornecem uma linha direta de comunicação com o computador e com as operações que ele pode efetuar. Uma linguagem é um conjunto de símbolos, palavras ou enuncia-

dos que o usuário utiliza para entrar com os dados no computador. O sistema do computador "entenderá" estas ordens e as cumprirá na sequência estabelecida por uma série de comandos denominada *programa*. O programa diz ao computador o que fazer seqüencialmente linha por linha, na mesma ordem em que um estudante faria os cálculos manualmente. O computador só pode responder a comandos fornecidos pelo usuário. Para isto é necessário que o programador compreenda perfeitamente a seqüência de operações e cálculos necessária para obter uma certa solução. Em outras palavras, o computador só faz aquilo que o usuário o manda fazer. Ele não possui nenhuma habilidade misteriosa para obter uma solução; devemos dizer-lhe o que fazer. Uma análise extensa pode resultar em um programa com centenas ou milhares de linhas. Uma vez escrito, o programa deve ser cuidadosamente testado para nos assegurarmos de que os resultados obtidos têm algum significado e são válidos para os valores prováveis das variáveis de entrada. Embora a confecção de um programa possa ser um processo longo e cansativo, é preciso não esquecer que, uma vez que o programa tenha sido testado e aprovado, pode ser guardado para ser utilizado novamente no futuro. Deste modo, o usuário tem certeza de que poderá obter resultados altamente precisos com um gasto mínimo de energia e de tempo, sempre que precisar. Entre as linguagens populares usadas hoje em dia no campo da eletroeletrônica podemos citar o C++, o Basic, o Pascal e o Fortran. Cada uma possui seu próprio conjunto de comandos e declarações para a comunicação com o computador, mas qualquer delas pode ser usada na solução de um mesmo problema.

Durante o desenrolar deste texto incluímos o C++ e o Basic (Beginning All-purpose Symbolic Instruction Code — Código de Instrução Simbólica para Aplicações Gerais para Iniciantes), por causa da popularidade crescente do C++ e do formato amigável do Basic. A linguagem C foi desenvolvida nos Laboratórios Bell para estabelecer um canal de comunicação eficiente entre o usuário e a linguagem de máquina da unidade central de processamento (CPU — Central Processing Unit) de um computador. A popularidade do C cresceu muito na indústria e na educação porque ele combina as características de uma linguagem de alto nível (ou seja, é facilmente compreendido pelo usuário) com uma ligação eficiente com o sistema operacional do computador. A linguagem C++ foi introduzida como uma extensão da linguagem C com o objetivo de permitir o desenvolvimento de programas complexos utilizando um método modular. Tanto o C++ quanto o Basic utilizam palavras inglesas, mas o Basic é mais fácil para os iniciantes. A aparência de um programa em Basic, com suas linhas numeradas, é também bastante diferente da aparência de um programa em C++, onde as linhas não são numeradas e a estrutura é modular e seqüencial, não existindo os saltos condicionais tão populares no Basic. Naturalmente, a aparência amistosa do Basic tem um preço: a ligação com a CPU é menos eficiente, o que implica tempos maiores de operação e a necessidade de uma conexão mais sofisticada ao *hardware* do computador.

Obviamente não supomos que as noções de C++ e de Basic dadas neste livro sejam suficientes para permitir a confecção de programas adicionais. Estas linguagens são incluídas apenas em nível introdutório para dar uma noção da aparência e das características de cada uma e também para podermos acompanhar o desenvolvimento de alguns programas simples. Uma exposição apropriada do C++ ou do Basic necessitaria de um curso em separado ou pelo menos de um suplemento de tamanho razoável para preencher as muitas lacunas da apresentação dada no texto.

## Pacotes de Software

O segundo método de utilizar um computador evita a necessidade de aprender uma linguagem em particular; de fato, o usuário não necessita saber qual foi a linguagem utilizada para escrever os programas que compõem o pacote. Tudo que ele precisa saber é como entrar com os parâmetros apropriados, definir as operações a serem efetuadas e extrair os resultados; o pacote faz todo o resto. O usuário não precisa saber os passos intermediários que levam a uma solução — tudo que precisa é saber como colocar os parâmetros apropriados na memória do computador e como obter os resultados. É aí que estão as duas coisas que preocupam o autor no que diz respeito ao uso de pacotes de *software*: o fato de que o estudante muitas vezes obtém uma solução sem ter a menor idéia de como ela foi obtida e o fato de que frequentemente não sabe se se trata de uma solução razoável ou totalmente absurda. É imperativo que o estudante compreenda que o computador deve sempre ser considerado uma ferramenta para auxiliar o usuário — nunca se deve permitir que ele controle os objetivos e o potencial do usuário! Logo, à medida que for progredindo nos capítulos deste livro, certifique-se de que entendeu claramente os conceitos antes de recorrer a um computador.

Todo pacote de software tem um *menu*, que informa a respeito dos principais procedimentos e as situações nas quais o pacote pode ser aplicado. O sistema está pré-programado para, uma vez carregado no computador, executar todos os procedimentos que aparecem no menu. Note, no entanto, que se você desejar algum tipo de operação que não esteja no menu, o pacote não poderá efetua-la, já que as funções do pacote se limitam àquelas desenvolvidas pela equipe de programadores que o criou. Em tais situações, podemos procurar a solução em outro pacote de *software* ou escrever um programa utilizando, por exemplo, uma das linguagens mencionadas anteriormente.

Em termos gerais, se já existe um pacote de *software* disponível para efetuar uma determinada tarefa, é preferível utilizá-lo, em vez de escrever um programa. Boa parte dos pacotes de *software* mais populares é o resultado de muitas horas de trabalho de equipes de programadores com anos de experiência. No entanto, se o pacote não fornece os resultados na forma desejada ou não é capaz de oferecer todos os resultados desejados, o usuário deve usar seus talentos criativos e desenvolver ele próprio um pacote de *software*. Como já mencionamos anteriormente, qualquer programa feito pelo usuário, depois de devidamente testado quanto à faixa dos resultados e à precisão, pode ser considerado um pacote de sua autoria, disponível para uso posterior.

O pacote de *software* a ser empregado com este texto é o PSpice (versões para Windows e para DOS), que é uma versão educacional de um pacote comercial maior conhecido simplesmente como SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis — Programa de Simulação com Ênfase em Circuitos Integrados). Na edição anterior deste livro, só nos referimos à versão para DOS. No entanto, a versão para Windows tornou-se tão popular que achamos apropriado dedicar-lhe a mesma atenção dedicada à versão para DOS. Na Fig. 1.5 vemos uma foto da versão 6.2 do PSpice em CD-ROM (que nos foi enviada pela MicroSim Corporation). Este *software* também está disponível em disquetes de 3,5". No Apêndice A fornecemos uma lista condensada de informações sobre o PSpice.

O conteúdo da lista foi limitado aos assuntos relacionados a este livro, de modo que pudéssemos dar o maior número possível de detalhes dentro desta subdivisão do pacote. O menu do PSpice é bastante extenso, e este *software* pode efetuar muitos

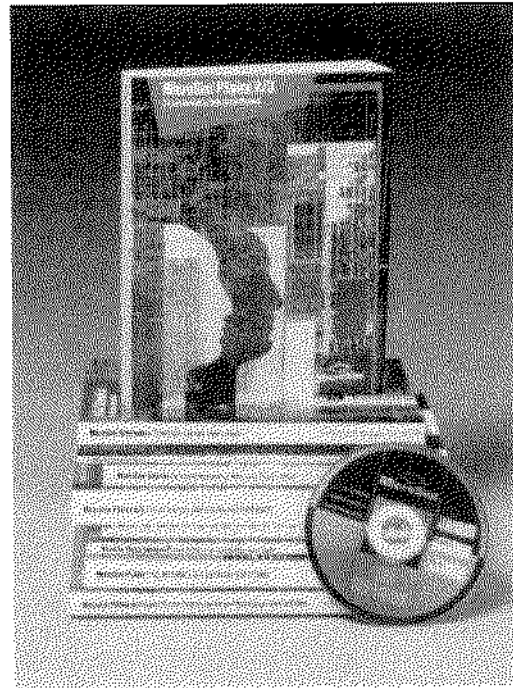


Fig. 1.5 PSpice versão 6.2 em CD-ROM. (Cortesia de MicroSim Corp.)

dos procedimentos que descrevemos neste texto. Quando alguma operação necessária não estava incluída no pacote, o autor utilizou as linguagens C++ ou BASIC para construir um programa que realizasse a tarefa. Na realidade, em várias ocasiões utilizamos tanto o PSpice quanto a construção de um programa para resolver o mesmo problema, a fim de que o estudante percebesse as principais diferenças entre os dois procedimentos.

O tratamento dado ao PSpice neste livro é, em muitos casos, suficiente para a aplicação do pacote a circuitos de corrente contínua ou alternada. Após a aquisição de conhecimentos básicos sobre o equipamento e o suporte disponível, quando necessário, grande parte do texto pode ser analisada utilizando tanto a versão Windows quanto a versão DOS do PSpice, e além disso muitos dos problemas podem ser solucionados do mesmo modo. Os manuais que acompanham o PSpice têm melhorado nas últimas versões e podem aumentar a capacidade de utilização de comandos e operações específicas. Existem outros pacotes de *software* sobre este assunto disponíveis, entre eles o BREADBOARD e o ELECTRONICS WORKBENCH, que utilizam ambos a configuração Windows.

Os métodos e as simulações computacionais constituem uma parte importante do texto. Uma vez que você tenha entendido perfeitamente um conceito básico, dedique algum tempo a investigar a ligação deste conceito com os métodos computacionais e tente adquirir familiaridade com a terminologia e o formato básico de um programa, ou ainda com o uso de um pacote de *software*. Este será um tempo bem empregado, que o preparará para o aprendizado mais profundo sobre sistemas computacionais que você certamente necessitará receber no futuro.

## PROBLEMAS

*Observação:* Os problemas mais difíceis estão assinalados com um asterisco (\*).

## SEÇÃO 1.2 Um Breve Histórico

1. Visite a biblioteca mais próxima e faça um relatório descrevendo a extensão relativa da literatura e do suporte computacional disponíveis sobre o assunto tecnologia — em particular sobre circuitos elétricos, eletrônica, eletromagnetismo e computação.
2. Escolha uma área particular de interesse para os assuntos tratados neste livro e escreva uma pequena monografia sobre a história desta área.
3. Selecione o nome de uma pessoa que tenha dado uma contribuição importante para o campo da eletroeletrônica e escreva uma pequena biografia dela, ressaltando suas contribuições.

## SEÇÃO 1.3 Unidades de Medidas

4. Um veículo se move a 50 mi/h durante 1 min. Determine a distância percorrida em pés.
5. Se uma pessoa percorre uma milha, em média, em 15 min, quantas horas levará para caminhar 12 milhas?

## SEÇÃO 1.4 Sistemas de Unidades

6. Existem vantagens relativas associadas ao uso do sistema métrico em relação ao sistema inglês, no que se refere às unidades de comprimento, massa, força e temperatura? Em caso afirmativo, explique quais são.
7. Dentre os quatro sistemas de unidades que aparecem na Tabela 1.1, qual tem as menores unidades para comprimento, massa e força? Em que situações seria mais apropriada a utilização deste sistema?
- \*8. Qual dos sistemas de unidades listados na Tabela 1.1 tem maior semelhança com o SI? Quais as diferenças entre esses dois sistemas? Na sua opinião, por que as unidades de medida do SI foram escolhidas como ilustra a Tabela 1.1? Dê a melhor razão que você puder imaginar sem consultar nenhum outro texto.
9. Qual o valor da temperatura média ambiente ( $68^\circ\text{F}$ ) nos sistemas MKS, CGS e SI?
10. Qual o valor em pés-libras de uma quantidade de energia igual a 1.000 J?
11. Um comprimento de meia jarda equivale a quantos centímetros?

## SEÇÃO 1.6 Potências de Dez

12. Expresse os números a seguir como potências de dez:

- |              |              |
|--------------|--------------|
| a. 10.000    | b. 0,0001    |
| c. 1.000     | d. 1.000.000 |
| e. 0,0000001 | f. 0,00001   |

13. Utilizando somente as potências de dez que aparecem na Tabela 1.2, expresse os números a seguir na forma que lhe parecer mais apropriada para uso posterior:

- |               |                 |
|---------------|-----------------|
| a. 15.000     | b. 0,03000      |
| c. 7.400.000  | d. 0,0000068    |
| e. 0,00040200 | f. 0,0000000002 |

14. Efetue as operações a seguir, expressando os resultados como potências de dez:

- |  |
|--|
| a. $4200 + 6.800.000$  |
| b. $9 \times 10^4 + 3,6 \times 10^3$                             |
| c. $0,5 \times 10^{-3} - 6 \times 10^{-5}$                       |
| d. $1,2 \times 10^3 + 50.000 \times 10^{-3} - 0,006 \times 10^5$ |

15. Execute as operações indicadas, expressando suas respostas como potências de dez.

- |                            |                                 |
|----------------------------|---------------------------------|
| a. $(100)(100)$            | b. $(0,01)(1.000)$              |
| c. $(10^3)(10^6)$          | d. $(1.000)(0,00001)$           |
| e. $(10^{-6})(10.000.000)$ | f. $(10.000)(10^{-8})(10^{35})$ |

16. Execute as operações a seguir utilizando potências de dez para expressar os resultados:

- |   |
|---|
| a. $(50.000)(0,0003)$                           |
| b. $2.200 \times 0,08$                          |
| c. $(0,000082)(0,00007)$                        |
| d. $(30 \times 10^{-4})(0,0002)(7 \times 10^8)$ |

17. Efetue as operações a seguir, dando as respostas como potências de dez:

- |                               |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|
| a. $\frac{100}{1.000}$        | b. $\frac{0,01}{100}$         |
| c. $\frac{10.000}{0,00001}$   | d. $\frac{0,0000001}{100}$    |
| e. $\frac{10^{38}}{0,000100}$ | f. $\frac{(100)^{1/2}}{0,01}$ |

18. Efetue as operações a seguir, dando as respostas com a utilização de potências de dez:

- |                               |  |
|-------------------------------|--|
| a. $\frac{2.000}{0,00008}$    | b. $\frac{0,00408}{60.000}$                  |
| c. $\frac{0,000215}{0,00005}$ | d. $\frac{78 \times 10^9}{4 \times 10^{-6}}$ |

19. Efetue as operações a seguir, dando as respostas como potências de dez:

- |                 |                     |
|-----------------|---------------------|
| a. $(100)^3$    | b. $(0,0001)^{1/2}$ |
| c. $(10.000)^8$ | d. $(0,00000010)^9$ |

20. Efetue as operações a seguir, expressando as respostas com a utilização de potências de dez:

- |   |
|---|
| a. $(2,2 \times 10^3)^3$  |
| b. $(0,0006 \times 10^2)^4$                                     |
| c. $(0,004)(6 \times 10^2)^2$                                   |
| d. $((2 \times 10^{-3})(0,8 \times 10^4)(0,003 \times 10^5))^3$ |

21. Execute as operações a seguir, dando as respostas em notação científica:

- |  |   |
|--|---|
| a. $(-0,001)^2$                        | b. $\frac{(100)(10^{-4})}{10}$                    |
| c. $\frac{(0,001)^2(100)}{10.000}$     | d. $\frac{(10^2)(10.000)}{0,001}$                 |
| e. $\frac{(0,0001)^3(100)}{1.000.000}$ | *f. $\frac{[(100)(0,01)]^{-3}}{[(100)^2][0,001]}$ |

- \*22. Efetue as operações a seguir, expressando as respostas em notação de engenharia:

- |   |                                       |
|---|---------------------------------------|
| a. $\frac{(300)^2(100)}{10^4}$  | b. $[(40.000)^2][(20)^{-3}]$          |
| c. $\frac{(60.000)^2}{(0,02)^2}$  | d. $\frac{(0,000027)^{1/3}}{210.000}$ |
| e. $\frac{[(4.000)^2][300]}{0,02}$  |                                       |
| f. $[(0,000016)^{1/2}][(100.000)^5][0,02]$  |                                       |
| g. $\frac{[(0,003)^3][(0,00007)^2][(800)^2]}{[(100)(0,0009)]^{1/2}}$ (um desafio) |                                       |

**SEÇÃO 1.7 Conversão entre Potências de Dez**

23. Preencha as lacunas nas seguintes conversões:

- a.  $6 \times 10^3 = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^6$
- b.  $4 \times 10^{-4} = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-6}$
- c.  $50 \times 10^5 = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^3 = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^6$   
 $\hspace{10.5cm} = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^9$
- d.  $30 \times 10^{-8} = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-3} = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-6}$   
 $\hspace{10.5cm} = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-9}$

24. Efetue as conversões a seguir:

- a. 2.000  $\mu$ s para milissegundos
- b. 0,04 ms para microssegundos
- c. 0,06  $\mu$ F para nanofarads
- d. 8.400 ps para microssegundos
- e. 0,006 km para milímetros
- f.  $260 \times 10^3$  mm para quilômetros

**SEÇÃO 1.8 Conversões Dentro do Mesmo Sistema e Entre Sistemas de Unidades**

Nos Problemas 25 a 27, efetue as conversões pedidas:

- 25. a. 1,5 min para segundos
- b. 0,04 h para segundos
- c. 0,05 s para microssegundos
- d. 0,16 m para milímetros
- e. 0,00000012 s para nanossegundos
- f. 3.620.000 s para dias
- g. 1.020 mm para metros
- 26. a. 0,1  $\mu$ F (microfarad) para picofarads
- b. 0,467 km para metros
- c. 63,9 mm para centímetros
- d. 69 cm para quilômetros
- e. 3,2 h para milissegundos
- f. 0,016 mm para  $\mu$ m
- g. 60 cm<sup>2</sup> para metros quadrados
- \*27. a. 100 in. para metros
- b. 4 ft para metros
- c. 6 lb para newtons
- d. 60.000 dyn para libras
- e. 150.000 cm para pés
- f. 0,002 mi para metros (5.280 ft = 1 mi)
- g. 7.800 m para jardas
- 28. Expresse um comprimento de uma milha em pés, jardas, metros e quilômetros.
- 29. Calcule a velocidade da luz em milhas por hora, utilizando o valor dado na Seção 1.4.

- 30. Um corpo percorre 50 pés em 20 segundos. Ache sua velocidade em milhas por hora.
- 31. Em quantos segundos um carro a 100 mi/h atravessa um campo de futebol americano (100 jardas)?
- 32. Converta 6 mi/h em metros por segundo.
- 33. Se um atleta pudesse nadar a 50 m/min, quantos dias levaria para atravessar o Atlântico ( $\approx$  3.000 milhas)?
- 34. Um corredor percorre uma milha em 6,5 min. Quanto tempo levaria para correr 10 km, supondo que mantenha esta velocidade?
- 35. Quantas latas cilíndricas de uma polegada de diâmetro podem ser colocadas lado a lado, em pé, de modo a atravessar um campo de futebol americano de um extremo a outro (100 jardas)?
- 36. Compare o tempo necessário para atravessar os Estados Unidos de costa a costa ( $\approx$  3.000 milhas) a uma velocidade média de 55 mi/h com o mesmo tempo no caso de a velocidade média ser 65 mi/h. O que você acha da relação entre os tempos necessários e os respectivos fatores de segurança?
- \*37. Calcule o deslocamento em metros de um corpo que se move a 600 cm/s durante 0,016 hora.
- \*38. Anualmente, na primavera, é disputada uma competição que consiste em subir 86 andares pelas escadas do Empire State Building, em Nova York. Se você fosse capaz de subir dois degraus por segundo, quanto tempo levaria para chegar ao 86.º andar se cada andar mede 14 pés e cada degrau, cerca de 9 polegadas?
- \*39. O recorde para a competição citada no Problema 38 é 10 minutos e 47 segundos. Qual é a velocidade do corredor em milhas por minuto neste caso?
- \*40. Se a corrida do Problema 38 fosse disputada na horizontal, quanto tempo levaria um atleta que percorre uma milha em 5 minutos para completar a distância equivalente? Compare este resultado com o recorde citado no Problema 39. Certamente a gravidade é um fator a ser levado em conta!

**SEÇÃO 1.10 Tabelas de Conversão**

- 41. Utilizando o Apêndice B, determine o número de
  - a. Btu em 5 J de energia.
  - b. metros cúbicos em 24 onças fluidas de um líquido.
  - c. segundos em 1,4 dia.
  - d. quartilhos em 1 m<sup>3</sup> de um líquido.

**SEÇÃO 1.11 Análise por Computador**

- 42. Observe o fluxograma do seu curso e veja a disponibilidade de cursos sobre computação e a carga horária destes cursos. Quais as linguagens mais usadas e quais os pacotes de software mais populares?
- 43. Escreva uma lista com cinco linguagens de programação bem conhecidas, dando algumas características de cada uma. Que motivos, na sua opinião, fazem com que algumas linguagens sejam melhores para a construção de programas que analisam circuitos elétricos do que outras?

## GLOSSÁRIO

**BASIC** Uma linguagem que emprega expressões familiares em inglês para dirigir a operação de um computador.

**C++** Uma linguagem de computador que torna muito eficiente a comunicação entre o usuário e a linguagem de máquina da unidade central de processamento (CPU) do computador.

**Calculador diferencial** Um dos primeiros calculadores mecânicos.

**CGS** Sistema de unidades que tem o centímetro, o grama e o segundo como unidades de medidas fundamentais.

**Circuito integrado (CI)** Uma estrutura subminiaturizada, que contém um grande número de componentes eletrônicos, projetada para efetuar um conjunto particular de tarefas.

**Efeito Edison** Fluxo de elétrons entre dois eletrodos no interior de um bulbo de vidro onde se fez vácuo.

**Elettricidade estática** Fenômeno causado por cargas elétricas em repouso.

**Eletromagnetismo** Estudo dos fenômenos elétricos e magnéticos e das relações entre eles.

**Eniac** Primeiro computador totalmente eletrônico.

**Garrafa de Leyden** Um dos primeiros dispositivos para armazenar carga elétrica.

**Joule (J)** Unidade de energia nos sistemas SI e MKS; é igual a 0,7378 pés-libra (sistema inglês) e a  $10^7$  ergs (sistema CGS).

**Kelvin (K)** Unidade de temperatura no sistema SI. Para converter uma temperatura em Kelvins para graus Celsius, devemos somar 273,15 à temperatura dada. O grau Celsius é utilizado nos sistemas MKS e CGS.

**Libra (lb)** Unidade de força no sistema inglês. Corresponde a 4,45 newtons.

**Linguagem** Forma de comunicação entre usuário e computador para definir as operações a serem efetuadas e os resultados a serem impressos ou exibidos na tela.

**Menu** Lista de instruções que acompanha a execução de um pacote de *software*, que possibilita ao usuário escolher o passo seguinte da operação.

**Metro (m)** Unidade de comprimento no SI e no MKS. Corresponde a 1,094 jardas (sistema inglês) e a 100 centímetros (CGS).

**MKS** Sistema de unidades em que o metro, o quilograma e o segundo são as unidades fundamentais.

**Newton (N)** Unidade de força no SI e no MKS. Equivale a  $10^5$  dinas (CGS).

**Notação científica** Método para escrever números muito grandes ou muito pequenos, utilizando potências de 10, onde impomos que o multiplicador seja um número entre 1 e 10.

**Pacote de *software*** Programa de computador projetado para realizar tarefas específicas ou gerar resultados em formato particular.

**Pilha, bateria ou célula voltaica** Qualquer dispositivo que utiliza reações químicas para gerar energia elétrica.

**Programa** Lista de comandos sequencial com o objetivo de fazer o computador executar uma tarefa específica.

**PSpice** Pacote de *software* destinado a analisar vários sistemas elétricos e eletrônicos em regimes de corrente contínua, de corrente alternada e transientes.

**Quilograma (kg)** Unidade de massa no SI e no MKS. Equivale a 1.000 g (CGS).

**Segundo (s)** Unidade fundamental de medida de tempo em todos os sistemas de unidades.

**Sistema SI** Sistema de unidades adotado pela Conferência Internacional de Pesos e Medidas em 1960 e logo depois adotado pela ABNT.

**Slug** Unidade de massa no sistema inglês. Equivale a 14,6 kg.

**Transistor** Primeiro amplificador construído com semicondutores.

**Válvula de Fleming** Segundo alguns historiadores, o primeiro dos componentes eletrônicos (diodo a vácuo).

# Corrente e Tensão

## 2.1 OS ÁTOMOS E SUA ESTRUTURA

Uma compreensão clara dos conceitos de corrente e tensão só é possível após termos adquirido um certo grau de familiaridade com o átomo e sua estrutura. O átomo mais simples é o de hidrogênio, constituído por duas partículas, o *próton* e o *elétron* nas posições relativas mostradas na Fig. 2.1(a). O *núcleo* do átomo de hidrogênio é o *próton*, uma partícula positivamente carregada. O *elétron em órbita tem carga elétrica negativa, igual em módulo à carga positiva do próton*. No caso dos átomos de todos os outros elementos, existem também no núcleo, além dos prótons, os *nêutrons*, que têm massa ligeiramente maior que a dos prótons e não possuem carga elétrica. O átomo de hélio, por exemplo, tem dois nêutrons, além de dois elétrons e dois prótons, como vemos na Fig. 2.1(b). *Em todos os átomos neutros, o número de elétrons é igual ao número de prótons*. A massa do elétron é  $9,11 \times 10^{-28}$  g, e as do próton e do nêutron são aproximadamente iguais, sendo este valor aproximado  $1,672 \times 10^{-24}$  g. A massa do próton (ou do nêutron) é por-

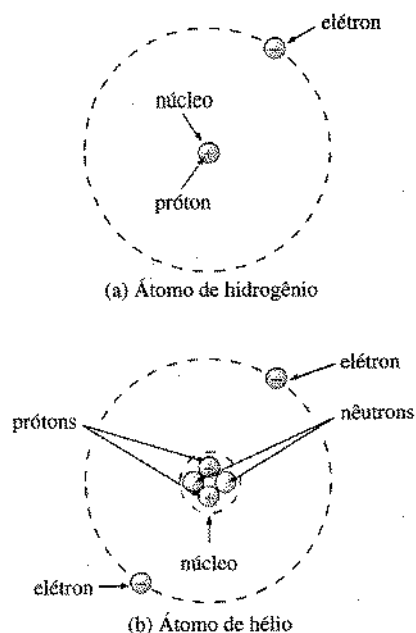
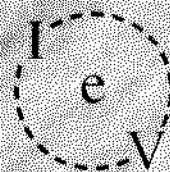


Fig. 2.1 Os átomos de hidrogênio e de hélio.



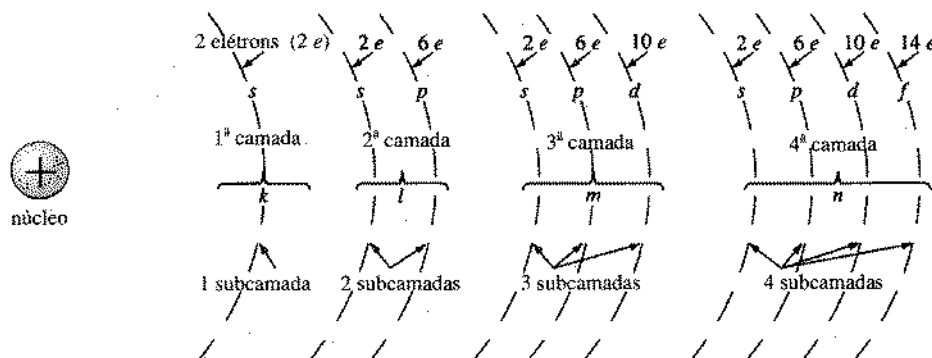


Fig. 2.2 Representação das camadas e subcamadas (níveis e subníveis) da estrutura atômica.

tanto cerca de 1.836 vezes maior que a do elétron. As dimensões típicas (algumas vezes chamadas *raios*) associadas ao próton, nêutron e elétron são todas da ordem de  $10^{-15}$  m.\*

No caso do átomo de hidrogênio, a dimensão associada ao nível mais baixo de energia é cerca de  $5 \times 10^{-11}$  m. Este valor é aproximadamente 25.000 vezes maior que a dimensão característica do núcleo. Se quiséssemos fazer uma imagem clássica, isto equivaleria a uma moeda de um centavo em trajetória circular em torno de outra, sendo o raio da órbita aproximadamente 400 m.

Os átomos dos outros elementos possuem vários elétrons, que se distribuem em camadas (níveis de energia) em torno do núcleo. A primeira camada, que é a mais próxima do núcleo, pode acomodar somente dois elétrons. Se um átomo tiver três elétrons, o terceiro elétron terá que ocupar a segunda camada. Nesta segunda camada, podem ser acomodados no máximo oito elétrons; na terceira, 18; na quarta, 32, sendo o número máximo de elétrons na  $n$ -ésima camada dado, em geral, por  $2n^2$ . Costuma-se designar estas camadas (níveis de energia) por um número ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) ou por uma letra maiúscula ( $n = K, L, M, \dots$ ).

Cada nível de energia se divide em subníveis (subcamadas). O primeiro subnível pode conter no máximo dois elétrons; o segundo subnível, seis; o terceiro, 10; o quarto, 14, e assim por diante. Uma representação esquemática desta distribuição é vista na Fig. 2.2. Os subníveis são designados pelas letras  $s, p, d, f, \dots$ , seguindo, do  $f$  em diante, a ordem alfabética e associados, nesta ordem, a distâncias cada vez maiores do núcleo.

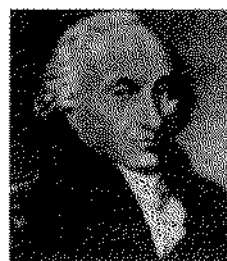
Constatou-se experimentalmente que *cargas de mesmo sinal se repelem, enquanto cargas de sinais contrários se atraem*. O módulo da força de atração ou de repulsão entre dois corpos carregados com cargas  $Q_1$  e  $Q_2$ , distribuídas com simetria esférica, ou se as cargas forem pontuais, é dado pela lei de Coulomb:

$$F \text{ (atração ou repulsão)} = \frac{kQ_1Q_2}{r^2} \quad (\text{newtons, N}) \quad (2.1)$$

onde  $F$  é dada em newtons,  $k$  é uma constante cujo valor no SI é  $9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ ,  $Q_1$  e  $Q_2$  são os valores das cargas em coulombs [cujo nome foi escolhido para homenagear Charles Augustin de Coulomb (vide Fig. 2.3)], e  $r$  é a distância, em metros, entre os centros das duas distribuições de carga. Observe a diminuição da intensidade da força com o inverso de  $r^2$ , o que resulta numa queda bem rápida desta mesma intensidade com a distância.

Existem portanto, no interior dos átomos, uma repulsão entre os elétrons e uma atração entre os prótons. Como o núcleo só contém partículas carregadas positivamente (além dos nêutrons, que não têm carga), os elétrons nas camadas mais próximas ao núcleo sofrem a ação de uma intensa força atrativa. [A Eq. (2.1) indica claramente o que pode resultar dos efeitos combinados de uma carga relativamente intensa combinada com uma distância pequena.] À medida que aumenta a distância entre o núcleo e as camadas eletrônicas, a força de ligação diminui, atingindo seu valor mais baixo para a subcamada mais externa (associada às maiores distâncias do núcleo). Devido a esta força de ligação mais fraca, a remoção de um elétron de uma subcamada mais externa consome menos energia do que a remoção de um elétron de uma subcamada mais interna, que está mais fortemente ligada. É também verdadeiro, em geral, que é mais fácil remover elétrons de

\*Pensar em entidades em nível atômico, como prótons, elétrons, nêutrons ou os próprios átomos, como se fossem diminutas esferas ("bolinhas") de matéria, ou seja, como as partículas da mecânica newtoniana, é incompatível com as teorias modernas sobre a estrutura atômica e as partículas elementares. Para a mecânica quântica, que é a teoria adequada para descrever os processos neste nível, conceitos como "trajetória" e "raio" de partículas não têm significado físico. Portanto a rigor não faz sentido falar em "raios" de partículas elementares. Uma pessoa que não compreender claramente esta distinção entre as estruturas conceituais da mecânica newtoniana e da mecânica quântica terá grande dificuldade em compreender corretamente o funcionamento de vários aparelhos e componentes que utilizam tecnologias de ponta, como por exemplo o microscópio de varredura por tunelamento, o tomógrafo por ressonância magnética, o diodo túnel e o laser, entre muitos outros. (N. T.)



Francês (Angoulême, Paris) (1736-1806)  
Cientista e Inventor;  
Engenheiro Militar nas Índias Ocidentais.

Cortesia da  
Smithsonian Institution.  
Foto n.º 52.597.

Foi aluno da Escola de Engenharia de Mezieres, a primeira a ser fundada no mundo. Formulou a *lei de Coulomb* que caracteriza a força entre duas cargas elétricas, força esta que é a principal responsável pelas interações em nível atômico. Realizou pesquisas extensas sobre o atrito nas máquinas industriais e em moinhos de vento, e também sobre a elasticidade de metais e de fibras de seda.

Fig. 2.3 Charles Augustin de Coulomb.

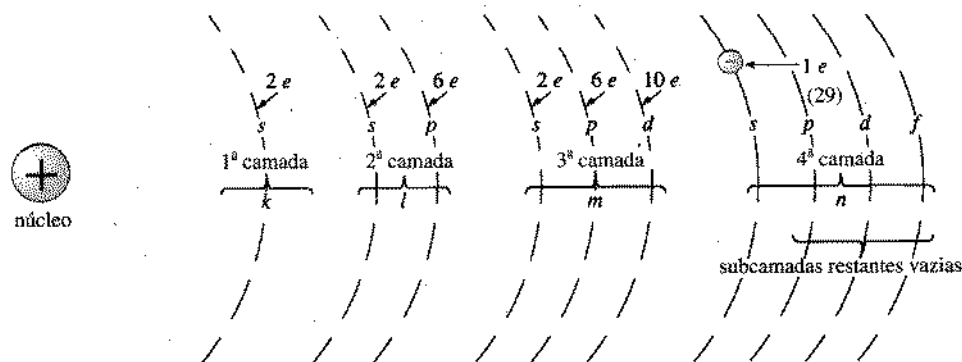


Fig. 2.4 O átomo de cobre.

átomos cujas camadas mais exteriores estão incompletas e, além disso, possuem poucos elétrons nestas camadas. Estas propriedades dos átomos são essenciais para a possibilidade de fazer aparecer no interior dos materiais cargas que possuam alguma mobilidade. Sem este movimento de cargas (ou corrente elétrica), este texto não teria razão de existir, pois praticamente todos os conceitos básicos aqui tratados fundamentam-se neste fenômeno.

O cobre é o metal mais utilizado na indústria eletroeletrônica. Um exame de sua estrutura atômica nos ajudará a compreender por que ele é tão amplamente empregado. O átomo de cobre (cuja estrutura de camadas está representada na Fig. 2.4) tem um elétron a mais além dos necessários para completar as três primeiras camadas. Esta camada exterior incompleta, com apenas um elétron, e a distância a que este elétron fica do núcleo nos sugerem que o vigésimo nono elétron está fracamente ligado ao restante do átomo de cobre. Se este último elétron receber energia suficiente de alguma fonte externa, poderá se libertar do átomo, passando a ser chamado de *elétron livre*. Em um centímetro cúbico de cobre, à temperatura ambiente, há aproximadamente  $9 \times 10^{22}$  elétrons livres. Outros metais que apresentam as mesmas propriedades elétricas do cobre, embora com diferenças quantitativas, são a prata, o ouro, o alumínio e o tungstênio. Na Seção 3.2 discutiremos aspectos adicionais da teoria dos condutores e suas propriedades.

## 2.2 CORRENTE

Considere um pequeno segmento de fio de cobre cortado por um plano imaginário perpendicular ao seu eixo, resultando na seção reta circular que vemos na Fig. 2.5. À temperatura ambiente e na ausência de um campo elétrico externo, o único movimento de elétrons é o causado pela agitação térmica, devido à energia que

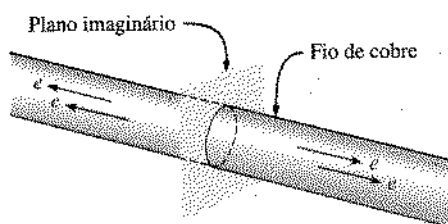


Fig. 2.5 Movimento aleatório dos elétrons em um fio de cobre, quando não existe "pressão" (campo elétrico) aplicada.

os elétrons adquirem através da interação com o meio circundante; este movimento é completamente aleatório. Quando um átomo perde o seu elétron mais fracamente ligado, adquire uma carga líquida positiva, passando a ser chamado de *ion positivo*. O elétron livre pode se deslocar entre estes íons positivos, deixando as proximidades do seu átomo original, enquanto os íons positivos podem apenas oscilar em torno de posições médias fixas. Logo,

*os elétrons livres são as partículas carregadas responsáveis pela corrente elétrica em um fio de cobre ou em qualquer outro sólido condutor de eletricidade.*

Na Fig. 2.6 representamos um arranjo de íons positivos (a rede cristalina) e alguns elétrons livres. Nesta situação, os elétrons livres estão continuamente ganhando e perdendo energia através de interações com a rede e com outros elétrons livres. Este movimento aleatório dos elétrons livres é tal que, após um certo período de tempo, o número de elétrons que atravessam a seção reta do condutor na Fig. 2.5 para a direita é praticamente igual ao número de elétrons que atravessam essa seção reta para a esquerda.

*Na ausência de um campo elétrico externo, ou seja, quando não há nenhuma força externa, o fluxo de carga líquido em um condutor é nulo em qualquer direção.*

Vamos agora ligar os dois terminais de uma bateria aos de uma lâmpada de filamento, montando assim o mais simples dos circuitos elétricos, ilustrado na Fig. 2.7. A bateria provoca, à custa de energia química, um acúmulo de cargas positivas em um terminal e um acúmulo de cargas negativas no outro. A partir do

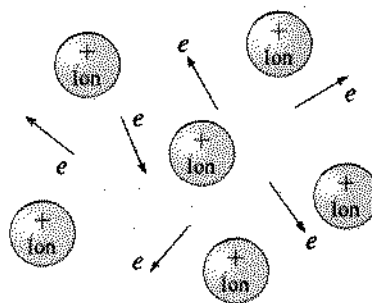


Fig. 2.6 Movimento aleatório dos elétrons livres em uma estrutura cristalina.

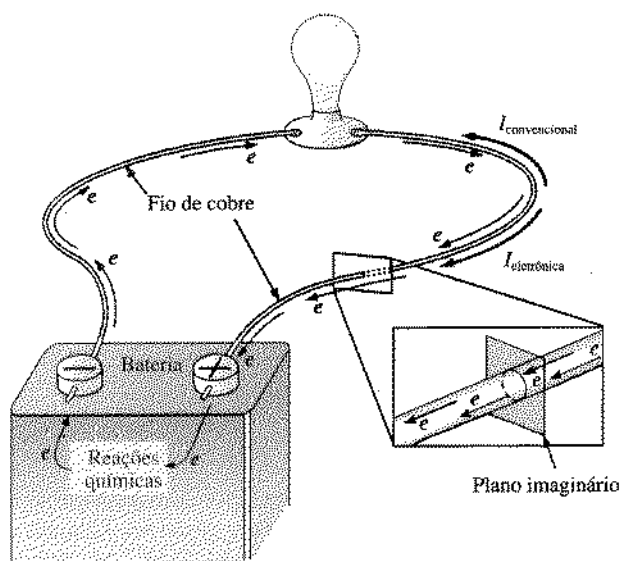


Fig. 2.7 Circuito elétrico básico.

instante em que as conexões forem feitas, fechando o circuito, os elétrons livres serão atraídos pelo terminal positivo (pois sua carga é negativa), adquirindo assim um movimento de arrasto no sentido deste terminal; os íons positivos, presos por fortes interações às posições na rede cristalina, podem no máximo oscilar em torno destas posições. O terminal negativo da bateria funciona como uma “fonte” de elétrons a serem utilizados à medida que os elétrons livres do fio de cobre se deslocam no sentido do terminal positivo. A atividade química da bateria produzirá uma absorção de elétrons no terminal positivo e manterá um fornecimento regular de elétrons no terminal negativo. O escoamento de cargas (elétrons) através do filamento da lâmpada provocará o seu aquecimento até que ele fique incandescente, emitindo assim a luz desejada.

Quando  $6,242 \times 10^{18}$  elétrons atravessam em 1 segundo, com velocidade uniforme, a seção reta circular do condutor na Fig. 2.7, dizemos que este escoamento de carga corresponde a 1 *ampère* (A), em homenagem a André-Marie Ampère (Fig. 2.8). É claro que isto corresponde a um número enorme de elétrons passando através da seção reta em 1 segundo, como podemos perceber levando em conta os conceitos discutidos no Cap. 1. Correntes associadas ao escoamento de apenas uns poucos elétrons por segundo não teriam quase nenhum valor prático. Para estabelecer padrões numéricos que nos permitam fazer comparações, a unidade de carga, o coulomb (C), foi definida como a carga associada a  $6,242 \times 10^{18}$  elétrons. A carga de um elétron, a partir desta definição, é então\*

$$\text{Carga/elétron} = Q_e = \frac{1 \text{ C}}{6,242 \times 10^{18}} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

\*Na realidade, a carga do elétron não foi obtida pela primeira vez por este método. As medidas da carga eletrônica feitas por Milikan em 1911 tornaram possível posteriormente a consideração do ampère como unidade fundamental e a obtenção indireta da carga do elétron, como foi feito no texto. (N. T.)

Podemos agora estabelecer uma expressão para o cálculo da corrente em ampères:

$$I = \frac{Q}{t} \quad \begin{array}{l} I = \text{ampères (A)} \\ Q = \text{coulombs (C)} \\ t = \text{segundos (s)} \end{array} \quad (2.2)$$

A escolha da letra *I* maiúscula para representar a corrente é originária da palavra francesa *intensité*. À direita da Eq. (2.2) damos os símbolos utilizados no SI para cada uma das quantidades envolvidas. Esta equação nos mostra claramente que quanto maior a quantidade de carga que atravessar o fio por unidade de tempo maior será a corrente.

Utilizando manipulações algébricas elementares, podemos determinar as outras duas grandezas:

$$Q = It \quad (\text{coulombs, C}) \quad (2.3)$$

$$t = \frac{Q}{I} \quad (\text{segundos, s}) \quad (2.4)$$

**EXEMPLO 2.1** A cada 64 ms, 0,16 C atravessam a seção reta ilustrada na Fig. 2.7. Determine a corrente em ampères.

**Solução:** Da Eq. (2.2):

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

**EXEMPLO 2.2** Determine o tempo necessário para que  $4 \times 10^{16}$  elétrons atravessem a seção reta vista na Fig 2.7, se a corrente for 5 mA.

**Solução:** Cálculo de *Q*:

$$4 \times 10^{16} \text{ elétrons} \left( \frac{1 \text{ C}}{6,242 \times 10^{18} \text{ elétrons}} \right) = 0,641 \times 10^{-2} \text{ C} = 0,00641 \text{ C} = 6,41 \text{ mC}$$



Francês (Lyon, Paris)  
(1775-1836)  
matemático e físico.  
Professor de  
matemática, École  
Polytechnique de  
Paris.

Cortesia da  
Smithsonian Institution.  
Foto n.º 76.524.

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

Fig. 2.8 André Marie Ampère.

Obtenção de  $t$  [Eq.(2.4)]:

$$t = \frac{Q}{I} = \frac{6,41 \times 10^{-3} \text{ C}}{5 \times 10^{-3} \text{ A}} = 1,282 \text{ s}$$

Observando mais cuidadosamente a Fig. 2.7, vemos que foram indicados nesta figura dois sentidos para o escoamento de cargas. Um deles é denominado *sentido convencional*, e o outro, *sentido eletrônico*. Neste texto utilizaremos somente o sentido convencional por várias razões: este sentido é o mais utilizado em instituições de ensino e na indústria, é empregado na representação simbólica de todos os componentes eletrônicos e é usado pela grande maioria dos pacotes de software educacionais. O sentido convencional foi adotado inicialmente porque na época em que a eletricidade foi descoberta se pensava que as partículas móveis nos condutores metálicos tivessem carga positiva. Na realidade, embora saibamos hoje em dia que são os elétrons que se deslocam, podemos convencionar qualquer um dos dois sentidos; se mantivermos a coerência com nossa convenção durante toda a análise do circuito, obteremos sempre os resultados corretos.

## Considerações de Segurança

É importante compreender que mesmo a passagem de correntes relativamente pequenas através do corpo humano pode ser muito perigosa, causando danos sérios ao organismo. Sabemos experimentalmente que correntes de apenas uns poucos miliampères já provocam reações do nosso organismo. Embora algumas pessoas possam suportar correntes de cerca de 10 mA durante pequenos intervalos de tempo sem efeitos sérios, qualquer corrente acima de 10 mA deve ser considerada perigosa. Correntes de 50 mA podem fazer a pessoa entrar em choque, e correntes acima de 100 mA podem ser fatais. Quando a pele está seca, sua resistência elétrica é suficientemente alta para limitar a corrente que atravessa o corpo em níveis relativamente seguros, pelo menos para as tensões usualmente encontradas nas residências. Note, no entanto, que quando a pele está úmida devido à transpiração, no banho etc. ou se tiver sido danificada, por exemplo, por um ferimento, sua resistência diminui drasticamente, resultando em correntes muito maiores para a mesma tensão. Logo, como regra geral, lembre-se sempre que *água e eletricidade não devem andar juntas*. Existem, é verdade, dispositivos de segurança para uso domiciliar, hoje em dia [como por exemplo o interruptor de corrente por falha no aterramento, que será estudado no Cap. 4] que são projetados para serem usados em áreas úmidas como o banheiro e a cozinha; no entanto, acidentes acontecem. Você não precisa ter medo da eletricidade, mas trate-a com respeito.

## 2.3 TENSÃO

O escoamento de cargas descrito na seção anterior é causado por uma “pressão” externa ligada à energia que as cargas possuem em virtude de suas posições: a *energia potencial elétrica*.

Energia pode ser definida como a *capacidade de realizar trabalho*. No caso de uma partícula de massa  $m$  em um campo gravitacional  $g$ , colocada a uma altura  $h$  em relação a um plano de referência arbitrário, a energia potencial gravitacional expressa em *joules* (J) será

$$W \text{ (energia potencial)} = mgh \quad (\text{joules, J}) \quad (2.5)$$

onde  $g$  vale, no caso da Terra, aproximadamente  $9,8 \text{ m/s}^2$ . Quando colocada nesta posição esta massa possui, em relação ao plano de referência, a capacidade “potencial” de realizar trabalho, como por exemplo a de quebrar um objeto colocado sobre o plano de referência. Se a altura da partícula aumentar, sua energia potencial também aumentará, e ela poderá realizar uma quantidade maior de trabalho. Dizemos que existe uma *diferença de potencial gravitacional* entre as duas alturas, medidas em relação ao mesmo plano de referência.

No interior de uma bateria como a da Fig. 2.7, reações químicas fazem com que as cargas negativas (elétrons) se acumulem em um dos terminais, enquanto as cargas positivas (ions) se acumulam no outro. Deste modo fica estabelecido um “posicionamento” das cargas que resulta em uma *diferença de potencial elétrico* entre os terminais. Se conectarmos os dois terminais através de um condutor, os elétrons acumulados no terminal negativo terão energia suficiente para alcançar o terminal positivo, para o qual são atraídos superando as colisões com os íons da rede e a repulsão de outros elétrons do metal.

As cargas podem ser levadas a um nível de potencial mais alto, desde que uma fonte externa de energia realize trabalho sobre elas, ou podem perder energia potencial à medida que se deslocam através de um circuito elétrico. Em qualquer dos casos dizemos, por definição, que

**Existe uma diferença de potencial de 1 volt (V) entre dois pontos se acontece uma troca de energia de 1 joule (J) quando deslocamos uma carga de 1 coulomb (C) entre estes dois pontos.**

O nome volt foi escolhido para homenagear Alessandro Volta (Fig. 2.9).

Em termos mais visualizáveis, se é necessário gastar uma quantidade de energia igual a 1 joule para deslocar a carga de 1 coulomb na Fig. 2.10 da posição  $x$  para a posição  $y$ , a diferença de potencial ou tensão entre os dois pontos é 1 volt. Se a energia necessária para deslocar a carga de 1 C aumentar para 12 J devido ao aparecimento de forças adicionais que se opõem ao deslocamento, então a diferença de potencial aumentará para 12 V. Logo, a diferença de potencial entre dois pontos de um circuito é



**Itália (Como, Pávia)**  
**\*(1745-1827) Físico,**  
**Professor de Física,**  
Universidade de  
Pávia, Itália.

Cortesia da  
Smithsonian Institution.  
Foto nº 55393

Iniciou suas pesquisas em eletricidade aos 18 anos, trabalhando com outros pesquisadores europeus. Sua maior contribuição foi a invenção de um fonte de energia elétrica, que utiliza reações químicas em 1800 (a primeira *pilha*). Foi a primeira vez que a energia elétrica se tornou disponível de uma maneira relativamente contínua, podendo ser utilizada para fins práticos. Construiu o primeiro *condensador*, conhecido hoje em dia como *capacitor*. Foi convidado a fazer uma demonstração da *pilha de Volta* em Paris, para Napoleão. No Congresso Internacional de Eletricidade realizado em Paris em 1881, foi escolhido em sua homenagem o nome *volt* para a unidade de força eletromotriz.

**Fig. 2.9 Conde Alessandro Volta.**

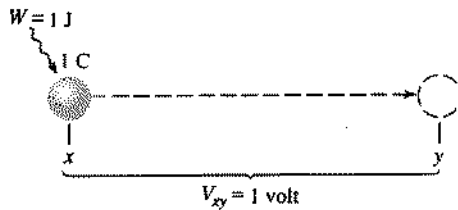


Fig. 2.10 Definição da unidade de diferença de potencial.

um indicador de quanta energia é necessária para deslocar uma carga entre estes dois pontos. Ao contrário, quanto mais alta for a tensão fornecida por uma fonte de energia, como por exemplo uma bateria, maior será a quantidade de energia disponível para provocar o escoamento de carga através do sistema. Observe que na discussão anterior, quando falamos de tensão ou de diferença de potencial, sempre estão envolvidos dois pontos. Assim, daqui por diante, lembre-se sempre desta importante observação:

**A determinação de uma diferença de potencial ou de uma tensão envolve sempre dois pontos de um sistema. Se modificarmos a escolha de qualquer um destes pontos, a diferença de potencial não será mais, em geral, a mesma.**

A diferença de potencial entre dois pontos é definida de modo geral por

$$V = \frac{W}{Q} \quad (\text{volts}) \quad (2.6)$$

Operações algébricas elementares nos permitem escrever então

$$W = QV \quad (\text{joules}) \quad (2.7)$$

$$Q = \frac{W}{V} \quad (\text{coulombs}) \quad (2.8)$$

**EXEMPLO 2.3** Encontre a diferença de potencial entre dois pontos de um sistema elétrico, se é necessário despende 60 J de energia para deslocar uma carga de 20 C entre estes dois pontos.

**Solução:** Da Eq. (2.6):

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

**EXEMPLO 2.4** Determine a energia necessária para deslocar uma carga de 50  $\mu\text{C}$  através de uma diferença de potencial de 6 V.

**Solução:** Da Eq. (2.7):

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

Uma notação clara é muito importante quando analisamos sistemas elétricos e eletrônicos. Para distinguir entre fontes de tensão (baterias, geradores etc.) e quedas de potencial nos ter-

minais de elementos dissipativos, utilizaremos a seguinte notação:

$E$  para fontes de tensão (volts)

$V$  para quedas de tensão (volts)

A terminologia aplicada quando estudamos este assunto causa, algumas vezes, uma certa confusão. Entre os termos encontrados com frequência temos *potencial*, *diferença de potencial*, *tensão*, *diferença de tensão* (*queda ou aumento*) e *força eletromotriz*. Alguns destes termos são utilizados substituindo uns aos outros de modo mais ou menos livre. Para auxiliar a compreensão de cada um destes termos, vamos usar as seguintes definições:

**Potencial:** a tensão em um ponto de um circuito em relação a outro ponto do mesmo circuito escolhido como referência. É comum escolhermos a Terra como referência, considerando arbitrariamente o seu potencial igual a zero.

**Diferença de potencial:** a diferença algébrica de potencial (ou de tensão) entre dois pontos de um circuito.

**Tensão:** quando este termo aparece isolado, significa o mesmo que potencial.

**Diferença de voltagem:** a diferença algébrica de tensão (ou de potencial) entre dois pontos de um sistema. Os termos *queda ou aumento de tensão* são auto-explicativos.

**Força eletromotriz (fem):** outro nome dado à tensão que uma fonte é capaz de estabelecer entre os seus terminais. Este termo, que não é muito utilizado na literatura atual, foi criado no início do estudo do eletromagnetismo, quando os conceitos que acabamos de mencionar não eram ainda bem compreendidos.

Em resumo, a diferença de potencial (em volts) aplicada por uma fonte de tensão sobre um circuito elétrico é a "pressão" que "causa" o escoamento de cargas, ou corrente, pelo sistema elétrico. Uma boa analogia mecânica para a tensão aplicada é a diferença de pressão aplicada por uma bomba ao líquido em um encanamento. O escoamento de líquido resultante é análogo à corrente no circuito elétrico. Se a bomba for desligada e não houver nenhuma outra diferença de pressão (vamos supor, por exemplo, que o encanamento seja horizontal), o líquido permanecerá em repouso, do mesmo modo que os elétrons livres em um fio de cobre não se movem preferencialmente em nenhuma direção quando não há nenhuma tensão aplicada.

## 2.4 FONTES DE CORRENTE CONTÍNUA (CC)

A abreviatura CC utilizada no título desta seção para *corrente contínua* engloba todos os sistemas elétricos em que o *escoamento de cargas se dá sempre no mesmo sentido*. Nos próximos capítulos discutiremos esta terminologia com mais detalhes. Vamos, por enquanto, estudar as fontes que fornecem tensões ou correntes fixas.

### Fontes de Tensão de CC

Examinaremos primeiro este tipo de fonte, porque é o mais familiar. O símbolo que utilizaremos neste texto para todas as fon-

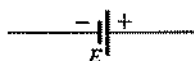


Fig. 2.11 Símbolo para uma fonte de tensão de corrente contínua.

tes de tensão de CC aparece na Fig. 2.11. O comprimento relativo das barras indica o terminal que elas representam.

As fontes de tensão de CC podem ser divididas em três amplas categorias: (1) baterias (utilizam reações químicas); (2) geradores (transformam energia mecânica em elétrica); (3) fontes de alimentação (obtem corrente contínua retificando corrente alternada).

## Baterias

**Informações Gerais** A bateria é, para o leigo, a fonte mais comum de corrente contínua. Uma bateria consiste por definição em uma combinação de duas ou mais células (a própria palavra bateria originou-se da expressão "bateria de células"); uma célula é uma unidade fundamental de produção de energia elétrica através da conversão de energia química ou solar. Todas as células podem ser classificadas como *primárias* ou *secundárias*. A célula secundária é recarregável, enquanto a primária não pode ser recarregada. Em outras palavras, a reação química que ocorre no interior da célula secundária é reversível, o que torna possível restaurar a sua carga. Existem dois tipos mais comuns de baterias recarregáveis: as de chumbo-ácido (usadas principalmente em veículos) e as de níquel-cádmio (usadas em calculadoras, ferramentas portáteis, flashes de máquinas fotográficas, barbeadores elétricos portáteis etc.). A vantagem da célula recarregável é óbvia: não há necessidade de trocar frequentemente as baterias esgotadas, o que reduz os custos.

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

O eletrólito é ao mesmo tempo o elemento de contato e a fonte de íons para a condução entre os terminais.

**Células Primárias Alcalinas e de Lítio-Iodo** A célula alcalina primária utiliza um anodo (+) de zinco pulverizado, um eletrólito de hidróxido de potássio e um catodo (-) de carbono e dióxido de manganês, como ilustra a Fig. 2.12 (a). Observe que, como vemos na Fig. 2.12 (b), quanto maior a bateria, maior a corrente que ela é capaz de sustentar. As baterias para lanternas são projetadas para uso prolongado. Na Fig. 2.13 vemos duas baterias primárias de lítio-iodo; suas características e áreas de aplicação serão estudadas posteriormente nesta seção.

**Célula Secundária de Chumbo-Ácido** No caso da unidade de chumbo-ácido secundária que aparece na Fig. 2.14, o eletrólito é ácido sulfúrico e os eletrodos são construídos com chumbo esponjoso (Pb) e peróxido de chumbo ( $PbO_2$ ). Quando uma carga é conectada aos terminais da bateria, elétrons são transferidos do eletrodo de chumbo esponjoso para o de peróxido de chumbo através da carga. Esta transferência de elétrons continua até que a bateria esteja descarregada. O tempo de descarregamento é determinado pelo grau de diluição do ácido sulfúrico e também pela quantidade de sulfato de chumbo depositada em cada placa. A condição de uma célula de chumbo pode ser determinada medindo-se o peso específico do eletrólito com um densímetro. O peso específico de uma substância é definido como o seu peso por unidade de volume comparado com o peso por unidade de volume de água a 4°C. Quando a bateria está completamente carregada, o peso específico deve estar entre 1,28 e 1,30. Quando este valor cai para cerca de 1,1, a bateria deve ser recarregada.

A bateria de chumbo-ácido pode ser recarregada, qualquer que seja o seu estado de descarga, simplesmente conectando uma fonte de corrente contínua externa que force a passagem de corrente através da bateria em sentido oposto ao da corrente quando a bateria está descarregando. Este processo remove o sulfato de chumbo das placas da bateria e faz a concentração de ácido sulfúrico voltar ao valor original.

A tensão de saída de cada uma das células de chumbo durante a maior parte do processo de descarga é de cerca de 2,1 V. As

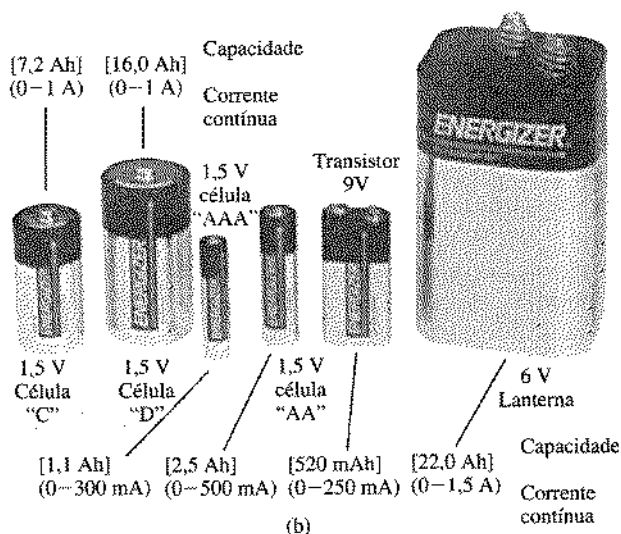
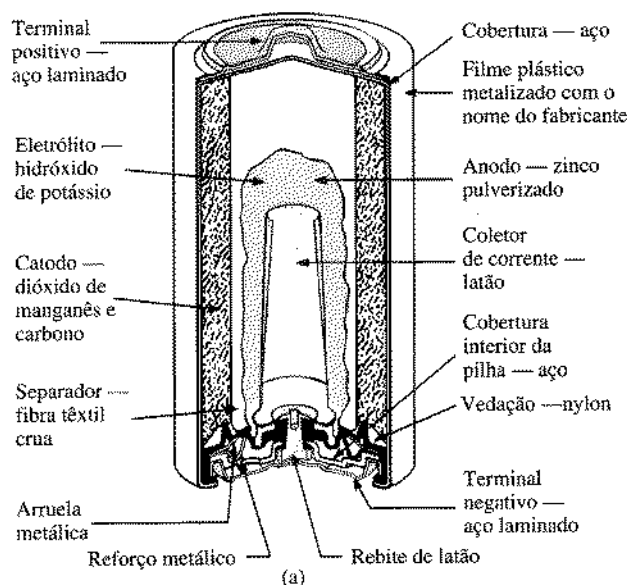
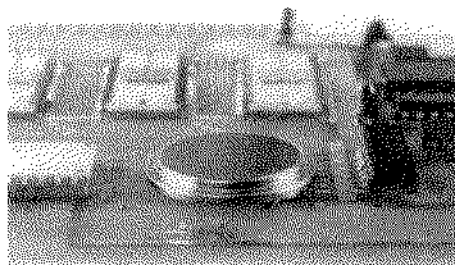
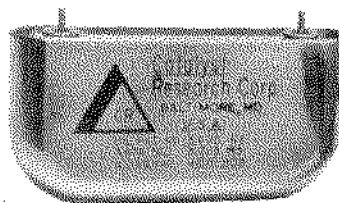


Fig. 2.12 (a) Corte de uma célula alcalina cilíndrica (b) Células primárias. (Cortesia da Eveready Battery Company, Inc.)



(a) Célula de lítio-iodo  
2,8 V, 870 mAh  
Fonte de longa duração apropriada para  
montagens em circuitos impressos.



(b) Bateria de lítio-iodo para  
marcapasso  
2,8 V, 2,0 Ah

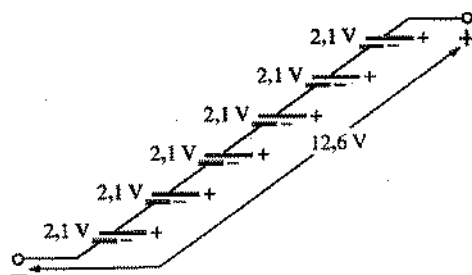
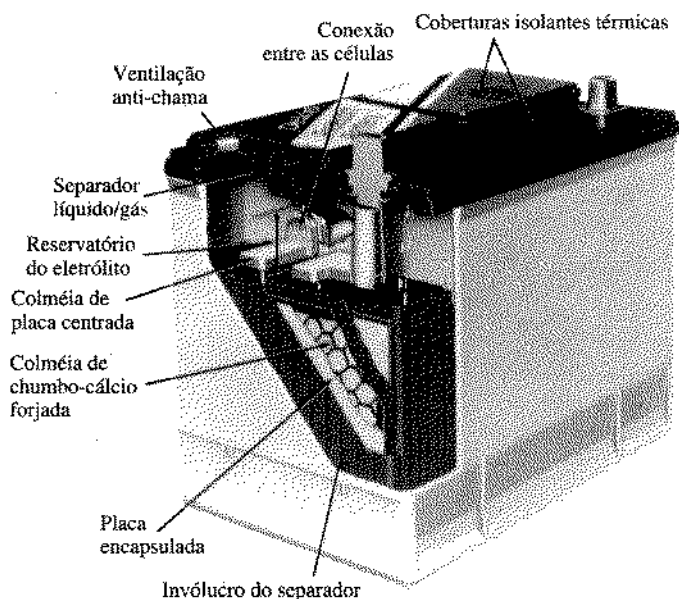
**Fig. 2.13** Células primárias de lítio-iodo. (Cortesia da Catalyst Research Corp.)

baterias comerciais utilizadas em veículos têm em geral seis células em série, como ilustra a Fig. 2.14, fornecendo assim uma tensão de 12,6 V. As baterias de chumbo-ácido são utilizadas em geral em situações em que são necessárias correntes altas durante um período de tempo relativamente curto. Houve um tempo em que todas as baterias de chumbo-ácido possuíam respiradouros. Os gases criados durante a reação de descarga podiam escapar e as aberturas dos respiradouros permitiam a substituição da água ou do eletrólito, além do teste da concentração de ácido com um densímetro. O uso de uma colméia construída com uma liga forjada de chumbo e cálcio em vez da colméia fundida de chumbo e antimônio usada anteriormente possibilitou o aparecimento de baterias que não precisam de manutenção, como a que vemos na Fig. 2.14. A estrutura antiga de chumbo-antimônio era sujeita a corrosão, excesso de carga, ataque pelos gases e pela água e descarga espontânea. Um projeto aperfeiçoado utilizando uma colméia de chumbo-cálcio eliminou ou reduziu substancialmente a maior parte destes problemas.

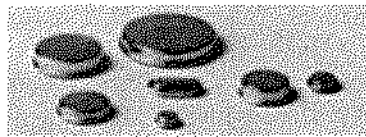
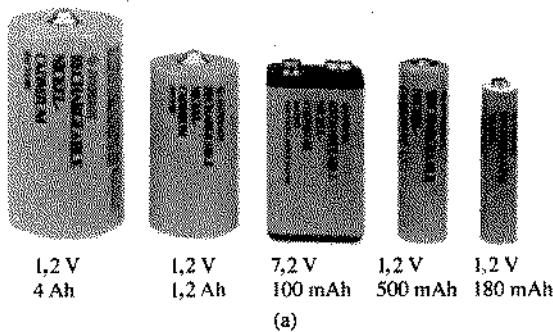
Depois de tantos anos de experiência com a tecnologia das baterias poderíamos pensar que hoje em dia estariam disponíveis

unidades menores e mais potentes. No entanto, até mesmo no caso do carro elétrico, que vem lentamente ganhando interesse e popularidade em todo mundo, a bateria de chumbo-ácido ainda é a principal fonte de energia. Um veículo construído na Noruega e atualmente utilizado numa fase experimental em San Francisco para transportar pessoas para o trabalho tem um peso total de 750 kg, dos quais 250 kg (ou seja, um terço) são devidos a baterias recarregáveis de chumbo-ácido. Embora a velocidade máxima deste veículo seja de cerca de 88 km/h, ele pode percorrer sem recarregar as baterias apenas cerca de 104 km. Tudo indica que, para que as viagens a grandes distâncias se tornem viáveis, será preciso reduzir consideravelmente o peso das baterias, o que exigirá inovações radicais.

**Célula Secundária de Níquel-Cádmio** Esta é uma bateria recarregável que tem atraído enorme atenção e passado por um grande desenvolvimento nos últimos anos. Ela é a bateria mais apropriada para *flashes*, barbeadores a pilha, televisores portáteis, ferramentas a pilha e assim por diante, pois neste caso as correntes são relativamente mais baixas e os períodos de uso



**Fig. 2.14** Bateria de chumbo-ácido que não necessita de manutenção de 12 V (na realidade 12,6 V). (Cortesia da Delco-Remy, divisão da General Motors Corp.)



Eveready® BH 500 célula  
1,2 V, 500 mAh  
Aplicações: em locais onde existem  
sérias limitações para a altura

(b)

**Fig. 2.15** Baterias recarregáveis de níquel-cádmio. (Cortesia da Eveready Batteries.)

contínuo são relativamente mais longos. Uma bateria de níquel-cádmio típica pode ser recarregada cerca de 1.000 vezes, e tem uma vida útil da ordem de alguns anos.

É importante observar que, quando a bateria Ni-Cad é a mais apropriada para um aparelho, não devemos utilizar pilhas não-recarregáveis. Muitos destes aparelhos possuem um circuito interno de recarga cujo funcionamento fica prejudicado se alimentarmos o aparelho com células primárias. Além disso, todas as baterias de Ni-Cad são de 1,2 V enquanto a grande maioria das células não-recarregáveis é de 1,5 V. A resposta à pergunta “com que frequência devo recarregar uma célula secundária?” envolve um pouco de ambigüidade. Na grande maioria dos casos, a bateria pode ser usada até que haja alguma indicação de que ela está “fraca”, como por exemplo a luz de uma lanterna pouco intensa, um desempenho ruim de uma ferramenta ou o piscar de advertência de uma pequena lâmpada que costuma ser instalada em alguns equipamentos. Tenha sempre em mente que as células secundárias têm um pouco de “memória”. Se elas forem recarregadas com muita frequência entre períodos de uso relativamente curtos, podem começar a “acreditar” que são unidades de curta duração, começando assim a não manter mais sua carga em níveis aceitáveis durante o período de tempo especificado pelo fabricante. Por outro lado, tente sempre evitar que a bateria fique quase completamente descarregada. Após vários ciclos de carga e descarga com a bateria neste estado, sua vida útil fica reduzida. Note, finalmente, que o processo de carga para as baterias de níquel-cádmio é bastante diferente do utilizado para as baterias de chumbo-ácido. As baterias de Ni-Cad são carregadas utilizando-se uma fonte de corrente constante, com a tensão nos terminais permanecendo praticamente constante durante todo o processo. Já a carga de uma bateria de chumbo-ácido utiliza uma fonte de tensão constante, enquanto a corrente varia de acordo com o estado da bateria. Durante uma operação de recarga, a capacidade de uma bateria de Ni-Cad aumenta quase linearmente na maior parte do tempo. É possível também que você note que esta bateria está um pouco aquecida durante o processo de carga. Quanto mais baixa estiver a quantidade de carga da bateria durante o processo, maior a sua temperatura. À medida que sua

carga se aproxima do valor nominal, a temperatura da célula se aproxima da temperatura ambiente.

**Células Secundárias de Níquel-Hidrogênio e de Níquel-Hidreto Metálico** Estes são dois outros tipos de células secundárias. A de níquel-hidrogênio é utilizada atualmente quase que só em veículos espaciais, onde são necessárias baterias com alta densidade de energia, robustas, confiáveis e que possam suportar um grande número de ciclos de carga/descarga durante um período de tempo prolongado. A bateria de níquel-hidreto metálico é na realidade um híbrido das baterias de níquel-cádmio e níquel-hidrogênio que combina as características positivas de cada uma, resultando assim em um produto de alta potência armazenado em um espaço pequeno e que possui uma vida útil bastante longa. Embora seja comparativamente cara, esta bateria híbrida é uma opção válida para certas aplicações, entre elas os computadores portáteis (veja a Fig. 2.16).

**Células Solares** Uma célula solar de 40 W e alta densidade é vista na Fig. 2.17 juntamente com alguns dos seus dados e áreas de aplicação. Como, em um dia ensolarado típico, a potência por unidade de área máxima da luz solar é 100 mW/cm<sup>2</sup> e a eficiência das células solares atuais está entre 10% e 14%, a maior potência de saída por centímetro quadrado disponível no caso da maioria das células solares está entre 10 mW e 14 mW. Observe, no entanto, que em 1 m<sup>2</sup> a potência de saída estará entre 100 W e 140 W. Uma descrição mais detalhada das baterias solares será dada nos cursos de eletrônica. O importante, por enquanto, é compreender que uma célula solar com iluminação constante fornece uma tensão contínua bastante estável que pode alimentar uma grande variedade de cargas, desde relógios até automóveis.

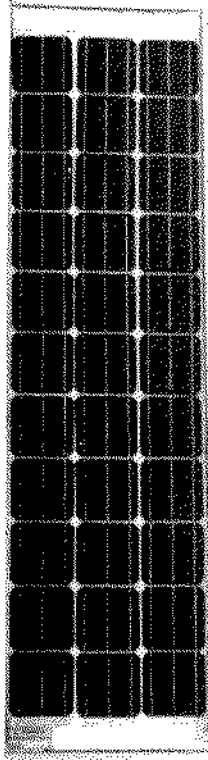
**Número de Ampères-Horas** A capacidade das baterias de manter uma corrente fixa durante um certo intervalo de tempo é usualmente medida em ampères-hora (Ah) ou miliampères-hora (mAh). Esse número aparece nas informações que acompanham algumas figuras desta seção. Uma bateria cujo número de amperes-horas é 100 será capaz, ao menos teoricamente, de sustentar uma corrente de 1 A durante 100 h, 2 A durante 50 h, 10 A durante 10 h e assim por diante, como podemos calcular utilizando a expressão a seguir:

$$\text{Vida útil (horas)} = \frac{\text{taxa ampère-hora (Ah)}}{\text{corrente drenada (A)}} \quad (2.9)$$



10,8 V, 2,9 Ah,  
600 mA (visor monocromático)  
900 mA (visor colorido)

**Fig. 2.16** Bateria de níquel-hidreto metálico (Ni-HM) utilizada em computadores portáteis.



Módulo solar de 40 W, de alta densidade. Para obter o máximo de potência no mínimo de espaço são utilizadas células de 100 mm  $\times$  100 mm. As 33 células em série do módulo constituem uma poderosa fonte de 12 V que pode ser utilizada para carregar baterias em uma ampla faixa de temperaturas ( $-40^{\circ}\text{C}$  a  $60^{\circ}\text{C}$ ).

**Fig. 2.17** Módulo solar. (Cortesia da Motorola Semiconductor Products.)

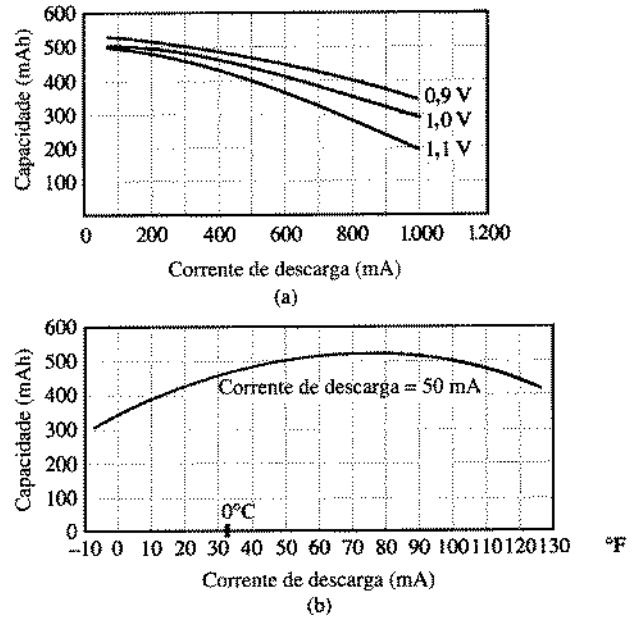
Existem, no entanto, dois fatores que afetam o número de ampères-horas: a temperatura e a rapidez com que a bateria é descarregada, ou seja, a corrente solicitada pelo aparelho alimentado pela bateria. As características da célula EVEREADY® BH 500 mostrada na Fig. 2.15 aparecem na Fig. 2.18. De acordo com a Fig. 2.18,

*a capacidade de manter um nível de corrente constante diminui, para uma bateria de corrente contínua, quando a corrente solicitada aumenta*

e

*esta mesma capacidade diminui em temperaturas mais altas ou mais baixas que a ambiente.*

Para a bateria de 1 V da Fig. 2.18(a), o número de ampères-horas está logo acima de 500 mAh quando a corrente solicitada é 100 mA, mas cai para cerca de 300 mAh quando esta corrente é cerca de 1 A. Para uma célula que tem menos de 4 cm de diâmetro e menos de 1,25 cm de espessura, estas características de descarga são excelentes. A Fig. 2.18(b) nos mostra que o número máximo de mAh (com uma solicitação de corrente de 50 mA) ocorre a uma temperatura em torno de  $24^{\circ}\text{C}$ , ou seja, em torno da temperatura ambiente. Note como a curva cai à direita e à esquerda deste valor máximo. As pessoas em países frios estão familiarizadas com a queda de desempenho das baterias em tem-



**Fig. 2.18** Características da célula Eveready BH500: (a) capacidade em função da corrente de descarga; (b) capacidade em função da temperatura. (Cortesia da Eveready Batteries.)

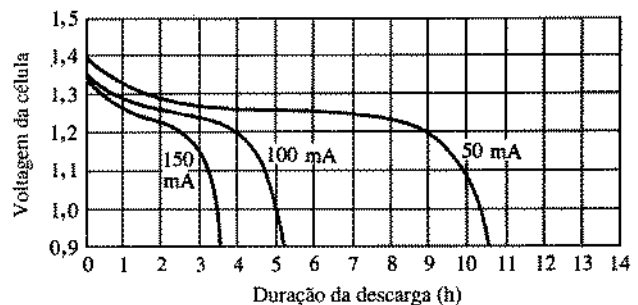
peraturas baixas. Note que a taxa cai para quase 300 mAh em torno de  $-22^{\circ}\text{C}$ .

Outro gráfico que apresenta interesse é o do Fig. 2.19. Ele nos mostra a tensão entre os terminais da bateria depois de um período de utilização da ordem de horas, para algumas solicitações de correntes especificadas. Observe que a queda de desempenho entre a curva de 50 mA e a de 100 mA é muito maior do que entre a curva de 100 mA e de 150 mA, embora a variação de corrente tenha sido a mesma. Em geral,

*a tensão entre os terminais de uma bateria de corrente contínua diminui com o tempo de utilização, e a solicitação de corrente é mantida constante.*

### EXEMPLO 2.5

- Determine a capacidade (número de mAh) e a vida útil em minutos para a bateria BH 500, de 0,9 V, da Fig. 2.18(a), sabendo que a corrente de descarga é 600 mA.
- Se a corrente de descarga for 50 mA, a que temperatura a taxa mAh da bateria da Fig. 2.18(b) será 90% do seu valor máximo?



**Fig. 2.19** Curvas de descarga da célula Eveready BH500. (Cortesia da Eveready Batteries.)

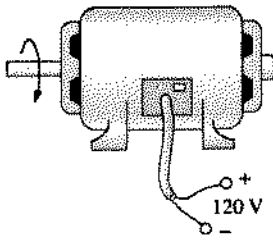


Fig. 2.20 Gerador de corrente contínua.

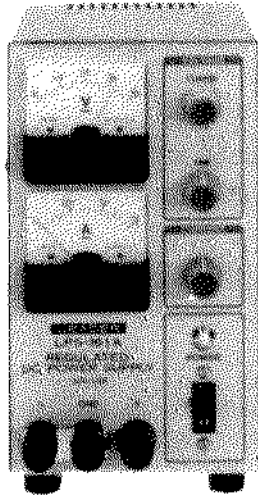


Fig. 2.21 Fonte de alimentação utilizada em laboratório. (Cortesia da Leader Instrument Corp.)

### Soluções:

- a. Vemos da Fig. 2.18(a) que a 600 mA a capacidade é aproximadamente 450 mAh. Logo, utilizando a Eq. 2.9

$$\text{Vida útil} = \frac{450 \text{ mAh}}{600 \text{ mA}} = 0,75 \text{ h} = 45 \text{ min}$$

- b. Observando a Fig. 2.18(b), vemos que o máximo ocorre em aproximadamente 520 mAh. Assim, 90% do valor máximo correspondem a uma taxa de 468 mAh, que ocorre exatamente acima do congelamento. Do gráfico podemos então determinar que esta última taxa ocorre nas temperaturas de 1°C e 45°C.

**Geradores** O gerador de corrente contínua é bastante diferente, tanto na construção quanto no modo de operação, da bateria (Fig. 2.20). Quando um torque externo faz o eixo do gerador girar com a velocidade angular especificada pelo fabricante, aparece entre os terminais externo do gerador uma ddp cujo valor também deve ser o especificado pelo fabricante. Um gerador de corrente contínua é capaz, em geral, de apresentar uma tensão entre os terminais maior do que grande parte das baterias, e é também capaz de gerar potências maiores. Além disso, o seu tempo de vida útil é determinado somente pela qualidade de seus componentes. Os geradores mais comuns disponíveis no comércio são os de 120 V e os 240 V. Conforme mencionamos anteriormente, não faremos neste texto qualquer distinção entre os símbolos de uma bateria e os de um gerador.

**Fontes de Alimentação** A fonte de corrente contínua mais comum nos laboratórios utiliza a *retificação* e a *filtragem*, procurando obter uma tensão contínua o mais estabilizada possível. Estes dois processos serão estudados em detalhes no seu curso de eletrônica. Esta fonte, em resumo, converte uma tensão variável no tempo (como aquela que temos nas tomadas residenciais) em uma tensão de valor fixo. A Fig. 2.21 nos mostra uma dessas fontes.

Muitas das fontes de alimentação utilizadas em laboratório possuem três terminais, fornecendo uma tensão de saída ajustável e regulada, como vemos nas Figs. 2.21 e 2.22(a). Na Fig. 2.22(a) indicamos também o símbolo para o zero de potencial, ou terra. Se desejamos uma tensão de saída de 10 V acima da referência (terra), devemos efetuar as ligações do modo ilustrado na Fig. 2.22(c). Se as ligações forem efetuadas como vemos na Fig. 2.22(d), dizemos que a tensão de saída é de 5 V “flutuantes”, pois as ligações não incluem o nível de referência. Esta configuração da Fig. 2.22(d) quase não é utilizada, pois como ela

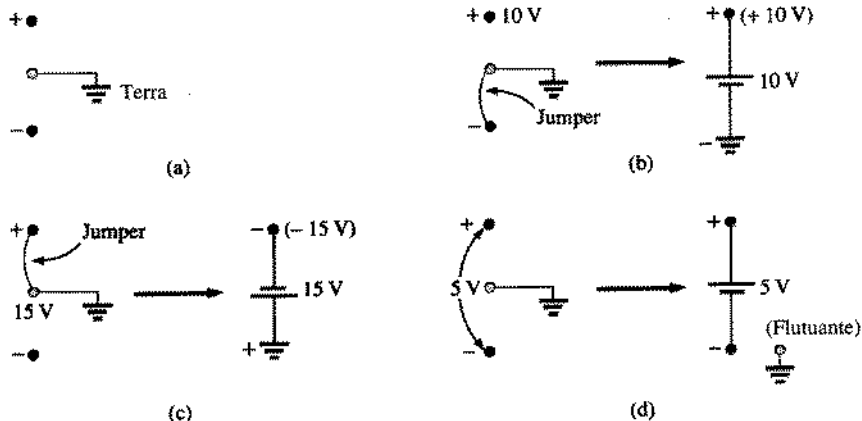


Fig. 2.22 Fontes de alimentação utilizadas em laboratórios: (a) terminais disponíveis; (b) tensão positiva em relação a terra; (c) tensão negativa com relação à terra; (d) tensão flutuante.

não apresenta uma ligação direta e de baixa resistência com a terra, e além disso não há um nível de referência comum para todo o sistema, o operador fica desprotegido. Já os terminais positivos e negativos devem aparecer em qualquer configuração dos circuitos.

## Fontes de Corrente Contínua com Corrente Constante

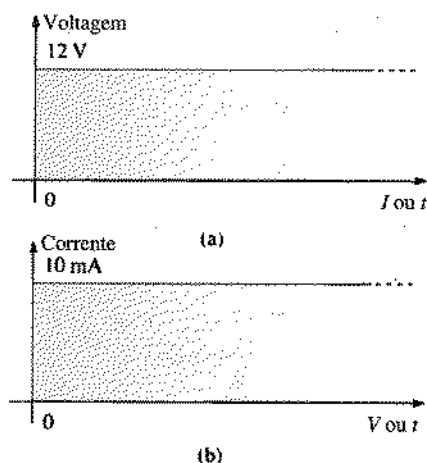
Como existe uma grande variedade de fontes de corrente contínua, e também por causa do seu grande número de aplicações, esta fonte é bastante familiar; suas características básicas são compreendidas até por leigos. A maioria das pessoas sabe, por exemplo, que a bateria de um automóvel fornece uma tensão de saída de aproximadamente 12 V, muito embora a solicitação de corrente seja variável, dependendo das condições de operação. Em outras palavras, *uma fonte de tensão ideal mantém sempre uma tensão fixa entre seus terminais, mesmo que a solicitação de corrente pelo sistema elétrico alimentado pela fonte varie*, como ilustra o gráfico da Fig. 2.23(a). Uma fonte de corrente constante (ou, como se costuma dizer abreviadamente, uma fonte de corrente) é o recíproco de uma fonte de tensão constante (abreviadamente fonte de tensão), ou seja,

*uma fonte de corrente ideal fornece uma corrente fixa a qualquer sistema elétrico ou eletrônico, mesmo que aconteçam variações na ddp entre os terminais causadas pelo sistema,*

conforme ilustra a Fig. 2.23(b). Se você achou o conceito de fonte de corrente estranho e até mesmo um pouco confuso, não fique alarmado. Em capítulos posteriores estudaremos estas fontes com mais detalhes. Além disso, você as encontrará outra vez no curso de eletrônica básica.

## 2.5 CONDUTORES E ISOLANTES

Se ligarmos os extremos de fios construídos com materiais diferentes aos terminais da mesma bateria e medirmos a corrente em cada um destes fios, verificaremos que elas são diferentes. Esta diferença é devida a vários fatores. No entanto, em geral



**Fig. 2.23** Características de saída de: (a) uma fonte de tensão ideal; (b) uma fonte de corrente ideal.

**Tabela 2.1**

Condutividade relativa de vários materiais

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

*denominamos condutores os materiais que permitem a passagem de uma corrente razoavelmente intensa com a aplicação de uma tensão relativamente pequena.*

Além disso,

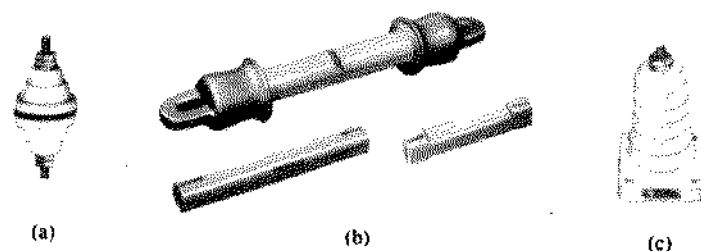
*os átomos dos materiais que são bons condutores possuem apenas um elétron na camada mais distante do núcleo, a camada de valência.*

Como o cobre é o condutor usado com mais frequência, ele foi utilizado como padrão para o cálculo das condutividades relativas que aparecem na Tabela 2.1. Observe que o alumínio, que algumas vezes substitui o cobre, tem apenas 61% da condutividade do cobre. Não se esqueça, no entanto, de que outros fatores, como o custo e o peso da linha de transmissão, devem ser levados em conta.

*Os isolantes são materiais que possuem muito poucos elétrons livres, sendo necessária a aplicação de uma tensão muito elevada para que eles sejam percorridos por uma corrente mensurável.*

Um dos usos mais comuns do material isolante é no encapamento de fios condutores, que, quando desencapados, podem causar acidentes graves. As pessoas que trabalham em manutenção de rede elétrica usam luvas de borracha e trabalham sobre plataformas recobertas com borracha, como medidas de proteção quando trabalham em linhas de transmissão de alta voltagem. Na Fig. 2.24 mostramos alguns isoladores, juntamente com suas aplicações.

É importante lembrar, no entanto, que mesmo o melhor dos isolantes se tornará condutor se for submetido a uma diferença



**Fig. 2.24** Isoladores: (a) para painéis de controle; (b) para antenas; (c) de porcelana, para linhas de transmissão. (Cortesia da Herman H. Smith, Inc.)

**Tabela 2.2**

*Rigidez dielétrica de alguns dos isolantes mais comuns*

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

de potencial suficientemente elevada. O valor do campo elétrico correspondente é denominado *rigidez dielétrica* do material; alguns dos seus valores para isolantes bem conhecidos são dados na Tabela 2.2. De acordo com esta tabela, para isolantes com a mesma forma geométrica, seria necessária uma diferença de potencial por unidade de comprimento (campo elétrico)  $270/30 = 9$  vezes mais intensa para provocar a ruptura da borracha do que aquela necessária para o ar; no caso da mica, seria necessária uma ddp por unidade de comprimento 67 vezes maior que a necessária para o ar.

## 2.6 SEMICONDUTORES

*Os semicondutores são um grupo de materiais cujas características elétricas são intermediárias entre as dos condutores e as dos isolantes.*

Estes materiais são de importância vital para a indústria eletrônica, pois a grande maioria dos componentes eletrônicos e a totalidade dos circuitos integrados (CIs) são construídas utilizando materiais semicondutores. Embora o material mais usado seja o *silício* (Si), o *germânio* (Ge) e o *arseneto de gálio* (GaAs) são também utilizados em muitas aplicações importantes.

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

Outras características dos semicondutores são a fotocondutividade e um coeficiente negativo de variação da resistividade com a temperatura. Denominamos fotocondutividade o aumento da condutividade do material quando os fótons de um feixe de luz incidente causam um aumento na densidade de elétrons livres deste material. Um coeficiente de temperatura negativo significa que a resistividade, e portanto a resistência da amostra (uma característica que será descrita no próximo capítulo), diminui quando a temperatura aumenta (um comportamento contrário ao da maioria dos condutores). Nos próximos capítulos voltaremos a falar dos semicondutores, e você ouvirá falar muito deles, é claro, no seu curso de eletrônica.\*

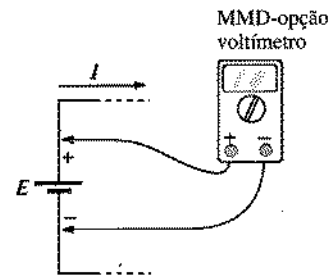
\*É interessante observar que os amplificadores para guitarras atuais de melhor qualidade voltaram a utilizar as válvulas eletrônicas, pois a qualidade de reprodução do som é muito melhor. Quando estes amplificadores utilizavam dispositivos semicondutores, muitos harmônicos do som original não eram reproduzidos pelo equipamento. (N. T.)

## 2.7 AMPERÍMETROS E VOLTÍMETROS

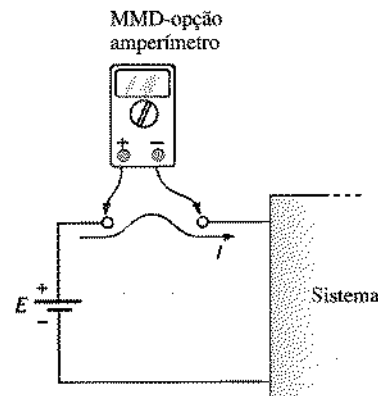
A medida das correntes e das tensões em qualquer sistema elétrico é extremamente importante, pois nos permite avaliar o desempenho do sistema, localizar pontos defeituosos e descobrir efeitos impossíveis de serem previstos em uma análise teórica. Como seus nomes indicam, os *amperímetros* são utilizados para medir intensidade de corrente, e os *voltímetros* para medir a diferença de potencial entre dois pontos. Quando desejamos medir correntes na ordem de miliampêres, costumamos designar o instrumento pela palavra *miliamperímetro*, e, no caso de microampêres, *microamperímetro*. Fazemos o mesmo no caso dos medidores de tensão. As medidas de tensão são mais comuns na indústria do que as de corrente, pois não é necessário alterar as conexões do sistema para medir uma ddp entre dois pontos quaisquer, sendo isto quase sempre necessário no caso de medida de corrente.

A diferença de potencial entre dois pontos de um circuito é medida ligando-se o voltímetro aos dois pontos *em paralelo*, como vemos na Fig. 2.25. Para obtermos uma leitura positiva, devemos ligar a ponta de prova positiva do voltímetro ao ponto de potencial mais alto do circuito e a ponta de prova negativa ao ponto de potencial mais baixo. Se a ligação estiver invertida, o ponteiro (no caso de um voltímetro analógico) sofrerá uma deflexão em sentido contrário, o que pode danificar o aparelho. No caso de um voltímetro digital, a leitura será, neste caso, negativa.

A ligação correta de um amperímetro é ilustrada na Fig. 2.26. Como estes aparelhos medem a taxa de escoamento de cargas,



**Fig. 2.25** Ligação de um voltímetro para se obter uma leitura positiva (+).



**Fig. 2.26** Ligação de um amperímetro para se obter uma leitura positiva (+).

ou seja, a corrente, esta última deve atravessar o aparelho e portanto o amperímetro deve ser ligado *em série* com o circuito. Para isto é sempre necessário abrir o circuito para a colocação do amperímetro. No caso da Fig. 2.26, devemos desconectar a ponta positiva da fonte de tensão inserindo o amperímetro da maneira indicada. Para obter leituras positivas a corrente (no sentido convencional) deve entrar no terminal positivo do amperímetro.

É natural perguntar se a introdução do amperímetro ou do voltímetro não altera as condições do sistema elétrico ou eletrônico onde efetuamos a medida. Examinaremos esta e outras questões nos Caps. 5 e 6, depois da introdução de alguns termos e conceitos adicionais. Por enquanto é suficiente dizer que embora a introdução de voltímetros e amperímetros altere, em princípio, o circuito onde queremos realizar a medida, estes aparelhos são projetados de modo a que estas alterações sejam mínimas.

Existem instrumentos que medem apenas corrente elétrica e outros que medem apenas tensão. Os instrumentos mais comuns em laboratório, no entanto, são o *volt-ohm-miliamperímetro* (VOM) e o *multímetro digital* (MMD), que aparecem nas Figs. 2.27 e 2.28, respectivamente. Ambos os instrumentos medem ddp, corrente e uma terceira grandeza, resistência, que será introduzida no próximo capítulo. O VOM é um instrumento analógico, pois requer a leitura e a interpretação da posição de um ponteiro sobre uma escala contínua, enquanto o MMD exibe os resultados em um visor em forma numérica, com a precisão determinada pela escolha da escala. Ao longo do texto serão feitos vários comentários sobre as características e a utilização destes medidores. Eles deverão ser, no entanto, analisados com mais profundidade em aulas de laboratório.



Fig. 2.27 Volt-ohm-miliamperímetro (VOM) analógico. (Cortesia da Simpson Electric Co.)

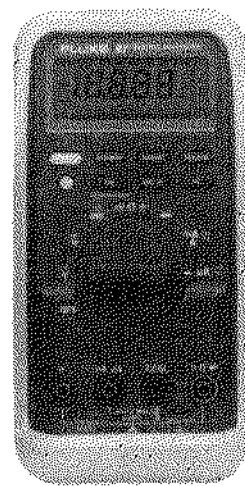


Fig. 2.28 Multímetro digital (MMD). (Cortesia da John Fluke Mfg. Co. Inc.)

## 2.8 ANÁLISE COMPUTACIONAL

Numa tentativa de fazer com que o estudante desenvolva uma certa familiaridade com pacotes de software, discutiremos, nos capítulos iniciais deste livro, como entrar com as informações sobre os elementos básicos de um circuito em um computador. Quando estivermos analisando exemplos de programação, discutiremos como entrar com estes dados utilizando uma linguagem. Como neste capítulo introduzimos o conceito de fonte independente de tensão, vamos agora discutir o procedimento para entrar com as informações pertinentes no computador.

A palavra-chave para a entrada de qualquer dado em um computador é *formato*. A entrada de dados *tem que ser feita* da maneira correta; caso contrário, os dados serão rejeitados ou, o que é pior ainda, mal-interpretados. Lembre-se também de que não existe lugar para a falta de atenção quando você estiver digitando dados em um computador. Um ponto malcolocado ou uma letra incorreta pode tornar inúteis horas de trabalho, fazendo com que o computador rejeite os dados ou forneça resultados completamente absurdos.

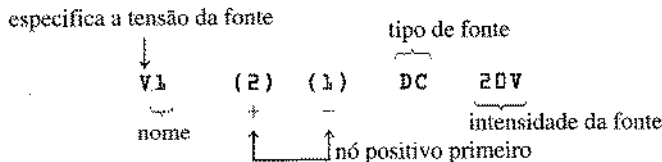
O PSpice não distingue entre letras maiúsculas e minúsculas, mas, como é usual escrever os programas de computador com letras maiúsculas, estas serão utilizadas no nosso texto. Alguns dos comentários que faremos a seguir podem ser uma repetição dos que aparecem no Apêndice A, mas resolvemos mantê-los aqui por uma questão de continuidade. Lembre-se, além disso, de que estas notas não se destinam a torná-lo um especialista no uso do PSpice ou de uma linguagem de programação; queremos somente dar um tratamento superficial para fins de comparação e tornar os métodos computacionais mais familiares. Se você quiser aprender mais sobre estes assuntos, deve consultar a literatura especializada e também freqüentar os cursos disponíveis na sua instituição de ensino.

### PSpice (DOS)

Nesta versão do PSpice todos os valores associados aos elementos do circuito são introduzidos com um formato específico, seguindo-se então uma declaração dizendo qual é a informação que

você deseja na saída. Você descobrirá que as primeiras aplicações do PSpice (DOS) implicarão pequenas listas de dados de entrada, deixando para o software todos os cálculos e arranjos necessários.

No PSpice (DOS), todo elemento do circuito é definido entre terminais chamados *nós*. É suficiente dizer, por enquanto, que um nó é um ponto de conexão entre um elemento e outro. Como é óbvio que qualquer fonte de tensão de corrente contínua possui dois terminais que devem ser conectados ao circuito, esta fonte possui dois nós a serem especificados. O formato básico para a entrada de dados relativos a uma fonte de tensão de corrente contínua no PSpice é o seguinte:



A entrada deve começar com a letra maiúscula V, seguida por um *nome*, à sua escolha, para caracterizar a fonte. Este nome está, em geral, limitado a 8 caracteres, que podem ser algarismos ou letras. A seguir devemos especificar o nó correspondente ao terminal positivo da bateria, como vemos na Fig. 2.29(a). Os números associados aos nós podem ter qualquer valor entre 0 (inclusive) e 9.999, mas não precisam estar em sequência se o circuito for definido apropriadamente. A abreviatura DC\* informa ao computador que se trata de uma fonte de corrente contínua, e 20 V informa a tensão de saída da mesma fonte. Não é necessário colocar a unidade V, mas ela foi incluída por questões de clareza. O PSpice (DOS) ignora qualquer letra escrita após um número, mas é freqüente a utilização destas letras para facilitar futuras referências. O espaçamento entre os itens não é importante, mas um espaçamento constante produz um formato agradável. Esta sintaxe básica de entrada de dados não é difícil, e o estudante não deverá ter maiores problemas com a sua utilização. Observe, por exemplo, a sua aplicação à fonte de voltagem da Fig. 2.29(b):

VDCELL 48 24 DC 1.5V

## PSpice (Windows)

No PSpice (Windows) cada um dos elementos, como por exemplo uma fonte de tensão, tem os seus dados lidos a partir de arquivos no interior do pacote, sendo então colocados em um diagrama juntamente com seus nomes e parâmetros de controle. À medida que o circuito é desenhado, o computador toma conhecimento da estrutura e dos parâmetros de cada elemento importantes para a análise que virá a seguir. Em outras palavras, não há necessidade de assinalar os nós e nem de se preocupar com polaridades ou sentidos de corrente. Será necessário praticar um pouco para desenhar os circuitos corretamente e com rapidez, mas o restante do processo é extremamente rápido. Uma vantagem óbvia da versão Windows é a disponibilidade imediata de um

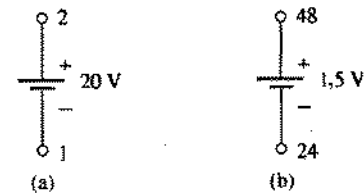


Fig. 2.29 Notação para a tensão nos terminais de uma fonte PSpice (DOS).

diagrama do circuito quando todos os dados tiverem sido fornecidos, em vez de uma simples lista de referências nodais. Algumas partes do procedimento serão repetidas nos primeiros capítulos. Nos capítulos posteriores, no entanto, isto não mais acontecerá por causa da grande quantidade de informações novas a serem apresentadas.

Para inicializar o PSpice Windows devemos chamar o **Gerenciador de Programas (Program Manager)**, escolhendo depois a janela **Design Center Eval**, pressionando ("clique") duas vezes no ícone **Schematics**. Quando aparecer a janela do schematics, observe o menu principal na parte superior e utilize a seguinte sequência para obter uma fonte de tensão de corrente contínua: **Draw-Get New Part-Browse-source.slb-VDC-OK**. A representação da fonte de tensão aparecerá, podendo então ser transportada ao local desejado. Pressionando o botão da esquerda, fixaremos a fonte na sua localização. Se não desejarmos introduzir outras fontes, completamos a operação pressionando o botão da esquerda. Devemos agora estabelecer o nome e o valor das fontes. Pressionando duas vezes em **V1** aparecerá a moldura de diálogo **Edit Reference Designator**, onde você deve pressionar na designação **E**. Pressione em **OK** e esta designação aparecerá no esquema. Para remover as estruturas retangulares de definição, pressione o botão da esquerda. Para entrar com o valor da fonte, pressione duas vezes sobre **0V**, o que fará aparecer a moldura de diálogo **Set Attribute Value**. Entre com o valor 20 V, seguido por um **OK**, e este valor aparecerá no esquema. Pressione novamente o botão da esquerda para remover os retângulos de definição. Se desejar deslocar o nome ou o valor, pressione o botão da esquerda sobre o símbolo a ser deslocado, o que fará aparecer um pequeno retângulo em torno deste caracter. Pressione então o botão sobre a periferia do retângulo e, mantendo o botão pressionado, desloque o parâmetro para o local desejado. Solte o botão, e o símbolo estará colocado na nova posição. Pressionando o botão da esquerda, você removerá o retângulo que envolve o símbolo. O resultado final destas operações aparece na Fig. 2.30.

Caso você deseje girar a figura, utilize a sequência **Ctrl-R** ou **Edit-Rotate**. Podemos criar fontes negativas girando a fonte original de 180° ou fornecendo um número negativo para seu valor.

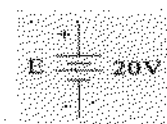


Fig. 2.30 Uma fonte de tensão de corrente contínua no PSpice (Windows).

\*Direct current em inglês. (N. T.)



## PROBLEMAS

### SEÇÃO 2.1 Os Átomos e Sua Estrutura

- Os átomos de alumínio e de prata possuem 13 e 47 elétrons, respectivamente. Escreva as configurações eletrônicas de cada um, incluindo as camadas e subcamadas; dê uma breve justificativa para o fato de ambos os materiais serem bons condutores.
- Ache a força de atração entre um próton e um elétron separados por uma distância igual ao raio da órbita correspondente ao estado fundamental no modelo de Bohr do átomo de hidrogênio ( $5 \times 10^{-11}$  m).
- Calcule a força de atração, em newtons, entre as cargas  $Q_1$  e  $Q_2$  na Fig. 2.31 quando

- $r = 1$  m
- $r = 3$  m
- $r = 10$  m

(Observe como a força diminui rapidamente quando  $r$  aumenta.)

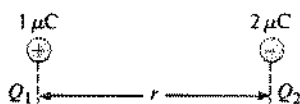


Fig. 2.31 Problema 3.

- Calcule a força de repulsão, em newtons, entre  $Q_1$  e  $Q_2$  na Fig. 2.32 quando

- $r = 1$  m
- $r = 3$  m
- $r = 10$  m

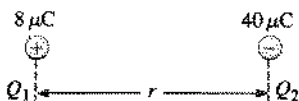


Fig. 2.32 Problema 4.

- Trace o gráfico da intensidade da força de atração (em Newtons) em função da distância (em metros) para duas cargas pontuais, uma de  $2$  mC e outra  $-4$  μC. Inicialmente faça  $r$  igual a  $0,5$  m e a  $1$  m, continuando em seguida com intervalos de  $1$  m até atingir  $10$  m. Comente a aparência da curva. Ela é linear? O que o gráfico mostra sobre a força de atração entre cargas à medida que a separação entre elas aumenta? O que este mesmo gráfico mostra sobre o comportamento de qualquer função proporcional a  $1/r^2$ ?
- Determine a distância entre duas cargas pontuais de  $20$  μC se a força entre elas tem módulo igual a  $3,6 \times 10^4$  N.
- Dois corpos carregados  $Q_1$  e  $Q_2$ , ambos com simetria esférica, se repelem com uma força cujo módulo é  $1,8$  N quando a distância entre seus centros é  $2$  m.
  - Qual o módulo desta força se a distância aumentar para  $10$  m?
  - Se  $Q_1/Q_2 = 1/2$ , calcule  $Q_1$  e  $Q_2$  ( $r = 10$  m).

### SEÇÃO 2.2 Corrente

- Se uma quantidade de carga igual a  $650$  C atravessa um fio em  $50$  s, calcule a corrente em ampères.
- Calcule a corrente em ampères em um fio que é percorrido por  $465$  C em  $2,5$  min.
- Uma corrente de  $40$  A é mantida em um fio por  $1$  min. Qual a quantidade de carga, em coulomb, que atravessou o fio?
- Quanto coulombs passam através de uma lâmpada de filamento se a corrente é mantida constante em  $750$  mA durante  $2$  min?

- Se um condutor é percorrido por uma corrente constante de  $2$  mA, qual o tempo necessário para que  $4,600 \times 10^{-6}$  C passem através do condutor?
- Calcule a corrente em ampères para um fio que é percorrido por  $21,847 \times 10^{18}$  elétrons em  $7$  s.
- Se um condutor é percorrido por uma corrente de  $1$  A, quantos elétrons atravessam o condutor em  $1$  min?
- A corrente máxima que um fusível suporta é  $1$  A. Ele queimará se  $86$  C passarem por ele em  $1,2$  min?
- Calcule a corrente em um fio percorrido por  $0,784 \times 10^{18}$  elétrons em  $643$  m.s.
- Qual das opções a seguir você prefere:
  - Um centavo por cada elétron que atravessa um fio em cada  $0,01$  μs, sendo a corrente  $2$  mA, ou
  - Um real para cada elétron que percorre um fio em cada  $1,5$  ns, sendo a corrente  $100$  μA?

### SEÇÃO 2.3 Tensão

- Qual tensão entre dois pontos se, para transportar  $50 \times 10^{18}$  elétrons entre estes pontos, é necessário despendar  $90$  mJ de energia?
- Se a diferença de potencial entre dois pontos é  $42$  V, qual o trabalho necessário para transportar  $6$  C de um ponto para o outro?
- Se é necessário gastar  $96$  J para transportar uma carga através de uma diferença de potencial de  $16$  V, qual o valor da carga?
- Qual a quantidade de carga que atravessa uma bateria de  $22,5$  V, se o processo consumiu  $90$  J?
- Um condutor, através do qual passa uma corrente de  $200$  mA, dissipa  $40$  J em forma de calor durante  $30$  s. Qual a diferença de potencial entre os terminais do condutor?
- Existe um escoamento elétrico através de um condutor, à taxa de  $420$  C/min. Se, em  $30$  s, são convertidos em calor  $742$  J, qual a queda de tensão através do condutor?
- A ddp entre dois pontos de um circuito elétrico é  $24$  V. Se em  $5$  ms foi dissipado  $0,4$  J, qual a corrente entre estes dois pontos?

### SEÇÃO 2.4 Fontes de Corrente Contínua (CC)

- Qual o valor da corrente que uma bateria cujo número de Ah é  $200$  pode, teoricamente, manter durante  $40$  horas?
- Qual o número de Ah de uma bateria capaz de fornecer  $0,8$  A durante  $76$  horas?
- Durante quantas horas uma bateria cujo número de Ah é  $32$  pode, teoricamente, fornecer uma corrente igual a  $1,28$  A?
- Calcule o número de mAh da bateria a que se refere o gráfico da Fig. 2.18(b), supondo uma corrente de descarga igual a  $50$  mA; considere as temperaturas  $100^\circ\text{C}$  e  $0^\circ\text{C}$ .
- Calcule o número de mAh para a bateria de  $1,0$  V a que se refere a Fig. 2.18(a), supondo uma solicitação de corrente igual a  $550$  mA. Durante quanto tempo a bateria pode manter esta corrente?
- Durante quanto tempo podemos drenar uma corrente de  $50$  mA da bateria a que se refere a Fig. 2.19 antes que a ddp entre seus terminais caia para  $-1$  V? Repita o cálculo supondo uma solicitação de corrente igual a  $150$  mA; compare as razões entre as correntes solicitadas e os respectivos intervalos de tempo calculados.
- O número de ampères-horas de uma bateria de  $12$  V é  $40$  Ah, enquanto outra bateria com a mesma tensão é capaz de manter  $60$  Ah. Qual a relação entre as quantidades de energia armazenada em cada uma e entre as correntes que elas podem fornecer para dar a partida em motores?
- Utilizando a teoria dada no texto, determine a quantidade de energia disponível (em joules) da bateria da Fig. 2.15(b).
- Uma televisão portátil pode operar ininterruptamente durante cerca de  $5$  horas e meia utilizando uma bateria de  $12$  V e  $3$  Ah. Qual a corrente média durante o período de funcionamento? Qual a energia, em joules, gasta pela bateria?
- Faça uma discussão breve sobre as diferenças entre os três tipos de fontes de tensão (baterias, retificadores e geradores).



35. Compare as características de uma fonte de corrente ideal com as de uma fonte de tensão ideal, ambas de corrente contínua. Quais as semelhanças e diferenças entre elas?

## SEÇÃO 2.5 Condutores e Isolantes

36. Discuta os aspectos da estrutura atômica do cobre que fazem dele um bom condutor.  
37. Dê o nome de dois materiais que não estejam na Tabela 2.2 e que sejam bons condutores.  
38. Esclareça o significado dos termos *isolante* e *rigidez dielétrica*.  
39. Descubra três utilidades para os isolantes que não tenham sido mencionadas na Seção 2.5.

## SEÇÃO 2.6 Semicondutores

40. O que é um semicondutor? Como as suas propriedades se comparam com as de um condutor e as de um isolante?

# GLOSSÁRIO

**Ampère (A):** Unidade de intensidade de corrente elétrica no SI.

**Ampères-horas, número de:** Característica de uma bateria que nos diz durante quanto tempo ela pode drenar uma certa corrente.

**Amperímetro:** Instrumento destinado a medir a corrente elétrica em um circuito. Deve ser ligado em série com o elemento do circuito através do qual se deseja conhecer a corrente.

**Célula:** Unidade fundamental de geração de energia elétrica através de reações químicas no seu interior ou da utilização de energia solar.

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

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

**Célula solar:** Fontes de tensão que convertem a energia dos fótons da luz incidente em energia elétrica.

**Cobre:** Metal cujas propriedades o tornam particularmente útil como condutor de energia elétrica.

**Condutores:** Materiais que permitem a passagem de uma corrente considerável mesmo quando o campo elétrico externo aplicado é relativamente fraco.

**Corrente contínua:** Corrente que circula sempre no mesmo sentido e mantém a intensidade constante.

**Corrente contínua, fonte de corrente de:** Fonte que mantém sempre a mesma saída de corrente, mesmo que o circuito a que ela está ligada faça com que a ddp entre seus terminais varie.

**Corrente contínua, gerador de:** Fonte de tensão de corrente contínua, gerada pela rotação de seu eixo, causada por alguma influência externa.

**Coulomb (C):** Unidade de carga elétrica no SI. Equivale à carga de  $6,242 \times 10^{18}$  elétrons.

**Coulomb, lei de:** Expressão para o módulo da força de interação eletrostática entre duas cargas pontuais ou esfericamente simétricas.

**Dutibilidade:** Propriedade de um material relacionada à sua capacidade de ser moldado em fios muito finos.

41. Consulte um livro sobre componentes eletrônicos que utilizam semicondutores e observe a frequência com que são utilizados o germânio e o silício. Faça uma revisão das características de cada um destes materiais.

## SEÇÃO 2.7 Amperímetros e Voltímetros

42. Qual a diferença entre os modos de ligação de um amperímetro e de um voltmímetro?  
43. A leitura de um amperímetro é 2,5 A durante 4 min. Determine a quantidade de carga que atravessou o amperímetro durante este intervalo de tempo.  
44. A leitura de um voltmímetro para a ddp entre dois pontos de um circuito é 12,5 V. Se um amperímetro conectado aos mesmos pontos apresenta uma leitura de 10 mA, e os dois medidores permaneceram conectados durante 20 s, determine a quantidade de carga transportada de um ponto para o outro e o consumo total de energia.

**Eletrolitos:** Elemento de contato, e também fontes de íons, entre os eletrodos de uma bateria.

**Elétron:** Constituinte básico do átomo com carga elétrica negativa.

**Elétron livre:** Elétron que não está associado a nenhum átomo em particular de uma rede cristalina, estando assim relativamente livre para se deslocar sob a influência de campos elétricos externos.

**Energia potencial:** Energia possuída por um sistema devido à sua configuração (no caso de uma partícula, devido à sua posição).

**Íon positivo:** Átomo com carga elétrica positiva devida à perda de um ou mais de seus elétrons.

**Isolantes:** Materiais que só permitem a passagem de uma corrente mensurável com a aplicação de campos elétricos muito intensos.

**Maleabilidade:** Capacidade que um material possui de ser moldado em vários formatos diferentes.

**Nêutron:** Uma das partículas constituintes do núcleo atômico. Não possui carga elétrica.

**Nó:** Ponto de confluência das ligações de vários elementos de um circuito.

**Núcleo:** Região central do átomo, constituída por prótons e nêutrons.

**Peso específico:** Razão entre o peso de um certo volume de uma substância e o peso de um volume idêntico de água a 4°C.

**Potencial, diferença de:** Diferença algébrica de potencial (ou de tensão) entre dois pontos de um circuito elétrico.

**Próton:** Uma das partículas constituintes do núcleo atômico. Possui carga elétrica positiva.

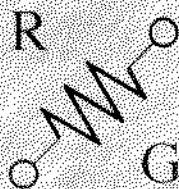
**Retificação:** Processo pelo qual uma corrente alternada é convertida em uma corrente contínua.

**Semicondutor:** Material cuja condutividade é intermediária entre a de um isolante e a de um condutor. É de importância vital para a construção de componentes eletrônicos.

**Volt (V):** Unidade de diferença de potencial entre dois pontos. Se é necessário despendar uma energia de 1 J para deslocar uma carga de 1 C entre dois pontos, dizemos que a diferença de potencial entre estes dois pontos é um volt.

**Voltímetro:** Instrumento destinado a medir a diferença de potencial entre dois pontos de um circuito.

# Resistência



## 3.1 INTRODUÇÃO

O escoamento de carga através de qualquer material encontra a oposição de uma força semelhante, em muitos aspectos, ao atrito mecânico. Esta oposição, resultante das colisões entre elétrons e entre elétrons e átomos do material, *que converte energia elétrica em calor*, é chamada de *resistência* do material. A unidade de medida da resistência é o *ohm*, cujo símbolo é  $\Omega$ , a letra grega maiúscula ômega. O símbolo usado para representar a resistência nos diagramas esquemáticos dos circuitos aparece na Fig. 3.1, juntamente com a abreviatura para esta mesma grandeza ( $R$ ).

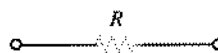


Fig. 3.1 Símbolo de resistência e sua abreviação.

A resistência de qualquer material de seção reta uniforme é determinada por quatro fatores:

1. *Composição*
2. *Comprimento*
3. *Área da seção reta*
4. *Temperatura*

O material escolhido, com sua estrutura molecular particular, reage de uma certa forma característica a pressões para estabelecer uma corrente no seu interior. Os condutores que permitem um grande escoamento de carga com uma pequena pressão externa têm valores de resistência baixos, enquanto os isolantes têm valores elevados de resistência.

Como seria de se esperar, quanto maior o caminho que a carga tem que percorrer, maior o valor de resistência, ao passo que quanto maior a área (e conseqüentemente o espaço disponível), menor a resistência. A resistência é, portanto, diretamente proporcional ao comprimento e inversamente proporcional à área da seção reta do condutor.

Na maioria dos condutores, quando a temperatura aumenta, o aumento no movimento das partículas de sua estrutura molecular aumenta a dificuldade para que os portadores "livres" circulem, o que aumenta o valor de resistência.

A resistência está relacionada aos outros dois fatores por:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (\text{ohms, } \Omega) \quad (3.1)$$

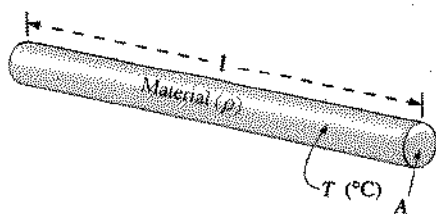


Fig. 3.2 Fatores que afetam a resistência de um condutor.

onde  $\rho$  (letra grega rô) é uma característica do material chamada *resistividade*,  $l$  é o comprimento da amostra e  $A$  é a área da seção reta da amostra.

As unidades de medida a serem usadas na Eq. 3.1 dependem da aplicação. Para fios circulares, as unidades de medida são normalmente definidas como na Seção 3.2. Na maioria das outras aplicações, como o estudo dos circuitos integrados, por exemplo, as unidades são em geral definidas como na Seção 3.4.

## 3.2 RESISTÊNCIA: FIOS CIRCULARES

Para um fio circular, as grandezas que aparecem na Eq. 3.1 são definidas como na Fig. 3.2. Para dois fios de dimensões idênticas e à mesma temperatura, como ilustrado na Fig. 3.3(a),

**quanto maior a resistividade, maior a resistência.**

Além disso, como indicado na Fig. 3.3(b),

**quanto maior o comprimento de um condutor, maior a resistência.**

Já a Fig. 3.3(c) ilustra o fato de que, mantidos constantes todos os outros parâmetros,

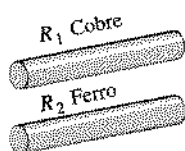
**quanto menor a área da seção reta de um condutor, maior a sua resistência.**

Finalmente, na Fig. 3.3(d) indicamos que, para condutores metálicos feitos do mesmo material e com a mesma forma geométrica,

**quanto mais alta a temperatura de um condutor, maior a resistência.**

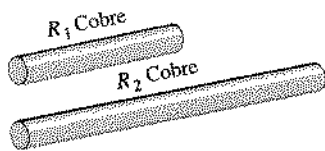
Para fios circulares, as grandezas da Eq. 3.1 têm as seguintes unidades:

$$\begin{aligned} \rho &\text{--- CM-ohms/pé com } T = 20^\circ\text{C} \\ l &\text{--- pés} \\ A &\text{--- mil circular (CM)} \end{aligned}$$



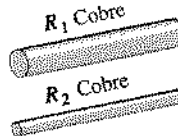
$$\rho_2 > \rho_1$$

(a)



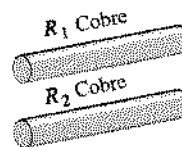
$$l_2 > l_1$$

(b)



$$A_2 < A_1$$

(c)



$$T_2 > T_1$$

(d)

Fig. 3.3 Casos em que  $R_2 > R_1$ . Para cada caso, todos os outros parâmetros que influenciam a resistência são os mesmos.

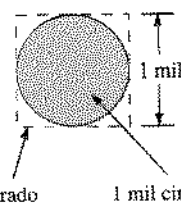


Fig. 3.4 Definição de mil circular (CM).

Note que a área do condutor é medida em *mils circulares* e não em *metros quadrados* ou *polegadas quadradas*, como seria natural se usássemos a equação

$$\text{Área (círculo)} = \pi r^2 = \frac{\pi d^2}{4} \quad \begin{matrix} r = \text{raio} \\ d = \text{diâmetro} \end{matrix} \quad (3.2)$$

O mil é uma unidade de comprimento e se relaciona à polegada por:

$$1 \text{ mil} = \frac{1}{1000} \text{ pol.}$$

$$1000 \text{ mils} = 1 \text{ pol.}$$

ou

Por definição,

**um fio com um diâmetro de 1 mil possui uma área de 1 mil circular (CM), como visto na Fig. 3.4.**

Um mil quadrado foi superposto à área de 1 CM da Fig. 3.4 para mostrar que o mil quadrado tem uma área maior que o mil circular.

Aplicando a definição acima a um fio com um diâmetro de 1 mil e usando a Eq. 3.2, temos:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi}{4} (1 \text{ mil})^2 = \frac{\pi}{4} \text{ mil quadrado} \stackrel{\text{por definição}}{=} 1 \text{ CM}$$

Assim,

$$1 \text{ CM} = \frac{\pi}{4} \text{ mil quadrado} \quad (3.3a)$$

ou

$$1 \text{ mil quadrado} = \frac{4}{\pi} \text{ CM} \quad (3.3b)$$

De acordo com a Eq. 3.3 (b), temos



$$1 \text{ mil quadrado} = \frac{4}{\pi} \text{ CM} = 1,273 \text{ CM}$$

que certamente está de acordo com a representação gráfica da Fig. 3.4. Para um fio com um diâmetro de  $N$  mils (onde  $N$  pode ser qualquer número positivo),

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi N^2}{4} \text{ mil quadrado}$$

Como  $4/\pi \text{ CM} = 1 \text{ mil quadrado}$ , temos

$$A = \frac{\pi N^2}{4} (\text{mil quadrado}) = \left( \frac{\pi N^2}{4} \right) \left( \frac{4}{\pi} \text{ CM} \right) = N^2 \text{ CM}$$

Como  $d = N$ , a área em mils circulares é simplesmente igual ao diâmetro em mils ao quadrado, isto é,

$$A_{\text{CM}} = (d_{\text{mils}})^2 \quad (3.4)$$

O fato de que uma área pode ser igual ao quadrado do diâmetro é demonstrado na Fig. 3.5 para diâmetros de 2 e 3 mils. Embora algumas áreas não sejam circulares, elas possuem a mesma área de 1 mil circular.

No futuro, portanto, para encontrar a área em mils circulares, o diâmetro precisará ser convertido para mils. Como 1 mil = 0,001 polegada, se o diâmetro for dado em polegadas, simplesmente deslocamos a vírgula três casas decimais para a direita. Por exemplo,

$$0,02 \text{ pol.} = 0,020 \text{ mils} = 20 \text{ mils}$$

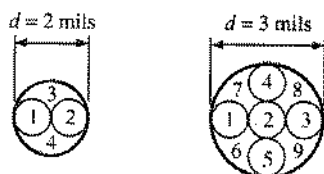
Se o comprimento a ser convertido estiver na forma fracionária, primeiro o convertimos para a forma decimal para depois procedermos como acima. Por exemplo:

$$\frac{1}{8} \text{ pol.} = 0,125 \text{ pol.} = 125 \text{ mils}$$

A constante  $\rho$  (resistividade) é diferente para cada material. Seu valor é a resistência de um fio com 1 pé de comprimento por 1 mil em diâmetro, em geral medida a 20°C (Fig. 3.6). A unidade de medida para  $\rho$  pode ser determinada tirando o valor de  $\rho$  na Eq. (3.1) e substituindo as unidades das outras grandezas. Assim,

$$\rho = \frac{AR}{l}$$

$$\text{Unidades de } \rho = \frac{\text{CM} \cdot \Omega}{\text{pé}}$$



$$A = (2 \text{ mils})^2 = 4 \text{ CM} \quad A = (3 \text{ mils})^2 = 9 \text{ CM}$$

Fig. 3.5 Verificação da Eq. (3.4):  $A_{\text{CM}} = (d_{\text{mils}})^2$

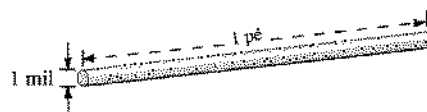


Fig. 3.6 Definição da constante  $\rho$  (resistividade).

A resistividade  $\rho$  é medida também em ohms por mil-pé, como determinado pela Fig. 3.6, ou *ohms-metros* no sistema SI de unidades. Alguns valores típicos de  $\rho$  são dados na Tabela 3.1.

**EXEMPLO 3.1** Qual a resistência de um fio de cobre de 100 pés de comprimento com um diâmetro de 0,020 polegadas a 20°C?

**Solução:**

$$\rho = 10,37 \frac{\text{CM} \cdot \Omega}{\text{pé}} \quad 0,020 \text{ pol.} = 20 \text{ mils}$$

$$A_{\text{CM}} = (d_{\text{mils}})^2 = (20 \text{ mils})^2 = 400 \text{ CM}$$

$$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{(10,37 \text{ CM} \cdot \Omega/\text{pé})(100 \text{ pés})}{400 \text{ CM}}$$

$$R = 2,59 \Omega$$

**EXEMPLO 3.2** Um número indeterminado de pés de um fio foi removido da caixa da Fig. 3.7. Encontre o comprimento do fio de cobre restante, sabendo que ele possui um diâmetro de 1/16 pol. e uma resistência de 0,5  $\Omega$ .

**Solução:**

$$\rho = 10,37 \text{ CM} \cdot \Omega/\text{pé} \quad \frac{1}{16} \text{ pol.} = 0,0625 \text{ pol.} = 62,5 \text{ mils}$$

$$A_{\text{CM}} = (d_{\text{mils}})^2 = (62,5 \text{ mils})^2 = 3906,25 \text{ CM}$$

$$R = \rho \frac{l}{A} \Rightarrow l = \frac{RA}{\rho} = \frac{(0,5 \Omega)(3906,25 \text{ CM})}{10,37 \frac{\text{CM} \cdot \Omega}{\text{pé}}} = \frac{1953,125}{10,37}$$

$$l = 188,34 \text{ pés}$$

Tabela 3.1

A resistividade de vários materiais

Material	$\rho$ @ 20 °C
Prata	9,9
Cobre	10,37
Onro	14,7
Alumínio	17,0
Tungstênio	33,0
Níquel	47,0
Ferro	74,0
Constantan	295,0
Níeromo	600,0
Calorita	720,0
Carbono	21.000,0

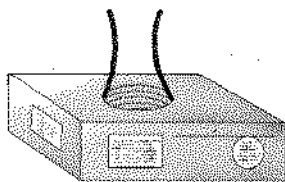


Fig. 3.7 Exemplo 3.2.

**EXEMPLO 3.3** Qual a resistência de uma barra de cobre, como a usada no painel de distribuição de energia de um prédio de escritórios com as dimensões indicadas na Fig. 3.8?

**Solução:**

$$\begin{aligned}
 &5,0 \text{ pol.} = 5000 \text{ mils} \\
 &\frac{1}{2} \text{ pol.} = 500 \text{ mils} \\
 A_{CM} &\left\{ \begin{aligned} A &= (5000 \text{ mils})(500 \text{ mils}) = 2,5 \times 10^6 \text{ mil quadrado} \\ &= 2,5 \times 10^6 \text{ mil-quadrado} \left( \frac{4/\pi \text{ CM}}{1 \text{ mil-quadrado}} \right) \\ A &= 3,185 \times 10^6 \text{ CM} \\ R &= \rho \frac{l}{A} = \frac{(10,37 \text{ CM} \cdot \Omega / \text{pé})(3 \text{ pés})}{3,185 \times 10^6 \text{ CM}} = \frac{31,110}{3,185 \times 10^6} \\ R &= 9,768 \times 10^{-6} \Omega \\ &(\text{muito pequena, } 0,000009768 \Omega) \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

Iremos descobrir nos capítulos que se seguem que quanto menor a resistência de um condutor menores as perdas na transmissão de energia elétrica da fonte para a carga. De maneira semelhante, como a resistividade é um fator determinante na resistência de um condutor, quanto menor a resistividade, menor a resistência (mantidos constantes os outros fatores). A Tabela 3.1 poderia sugerir desse modo que a prata, o cobre, o ouro e o alumínio seriam os melhores condutores e os mais comuns. De modo geral, há outros fatores, entretanto, como a maleabilidade (facilidade com que se pode moldar o material), ductilidade (facilidade com que o material pode ser transformado em fios longos e finos), sensibilidade à temperatura, resistência à fadiga e, naturalmente, o custo que precisam ser levados em consideração quando escolhemos um condutor para uma aplicação particular.

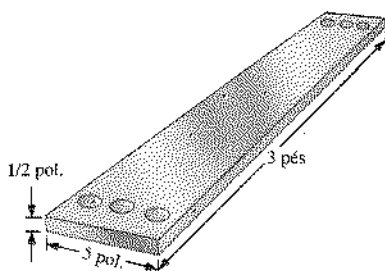


Fig. 3.8 Exemplo 3.3.

Em geral, o cobre é o material mais largamente utilizado, pois é bastante maleável e dútil; é facilmente encontrado; tem boas características térmicas; e é menos caro do que a prata ou o ouro. No entanto, ele certamente não é barato. Os fios são removidos de um edifício a ser demolido, por exemplo, para se extrair o cobre. Durante algum tempo, o alumínio foi usado para fabricar fios comuns porque é mais barato do que o cobre, mas suas características térmicas criaram algumas dificuldades. Descobriu-se que o aquecimento produzido pela corrente e o resfriamento que ocorria quando o circuito era desligado provocavam expansões e contrações dos fios de alumínio a tal ponto que as conexões ficavam frouxas, o que podia resultar em acidentes perigosos. O alumínio ainda é usado hoje, entretanto, em áreas como a produção de circuitos integrados e em situações em que as conexões podem ser feitas de maneira segura. A prata e o ouro são, é claro, muito mais caros que o cobre e o alumínio, mas há situações em que o custo se justifica. A prata possui excelentes características para ser usada como cobertura de superfícies, e o ouro é amplamente utilizado em circuitos integrados. O tungstênio tem uma resistividade três vezes maior que a do cobre, mas há ocasiões em que suas características não-elétricas (grande durabilidade, elevada resistência mecânica) são os fatores mais importantes.

### 3.3 TABELAS DE FIOS

A tabela de fios foi idealizada originariamente para padronizar as dimensões dos fios produzidos nos Estados Unidos. Como resultado, os fabricantes teriam um mercado maior e o consumidor teria facilidade de encontrar os fios de tamanho padrão. A tabela foi projetada para ajudar o usuário de todas as maneiras possíveis; ela normalmente contém dados como a área da seção reta em mils circulares, o diâmetro em mils, a resistividade em ohms por 1000 pés a 20°C e o peso por 1000 pés.

Os tamanhos do American Wire Gage (AWG), ou Calibre Americano para Fios — a padronização mencionada acima — aparecem na Tabela 3.2 para fios cilíndricos maciços de cobre. Uma coluna indicando a corrente máxima permitida em amperes, como determinado pela National Fire Protection Association — Associação Nacional de Proteção contra Incêndios —, também foi incluída.

As dimensões escolhidas possuem uma relação interessante entre si: para cada diminuição de 3 números, a área é duplicada; para cada diminuição de 10 números, a área aumenta por um fator de 10.

Examinando a Eq. (3.1), notamos também que *dobrando a área diminuímos a resistência pela metade, e aumentando a área por um fator de 10 diminuímos a resistência para 1/10 da original*, se todos os outros parâmetros forem mantidos constantes.

As dimensões reais para alguns fios que aparecem na Tabela 3.2 são mostradas na Fig. 3.9 com algumas de suas áreas de aplicação. Seguem alguns exemplos usando a Tabela 3.2.

**EXEMPLO 3.4** Encontre a resistência de 650 pés de fio de cobre #8 ( $T = 20^\circ\text{C}$ ).

**Solução:** Para o fio de cobre #8 (maciço),  $\Omega/1000$  pés a  $20^\circ\text{C} = 0,6282 \Omega$  e

$$650 \text{ pés} \left( \frac{0,6282 \Omega}{1.000 \text{ pés}} \right) = 0,408 \Omega$$

**Tabela 3.2**  
Tamanhos AWG (American Wire Gage)

		Corrente Máxima Permitida para Isolamento*		
AWG #		Área (CM)	$\Omega/1000$ pés a 20 °C	RHW (A)
(4/0)	0000	211.600	0,0490	230
(3/0)	000	167.810	0,0618	200
(2/0)	00	133.080	0,0780	175
(1/0)	0	105.530	0,0983	150
	1	83.694	0,1240	130
	2	66.373	0,1563	115
	3	52.634	0,1970	100
	4	41.742	0,2485	85
	5	33.102	0,3133	—
	6	26.250	0,3951	65
	7	20.816	0,4982	—
	8	16.509	0,6282	50
	9	13.094	0,7921	—
	10	10.381	0,9989	30
	11	8.234,0	1,260	—
	12	6.529,0	1,588	20
	13	5.178,4	2,003	—
	14	4.106,8	2,525	15
	15	3.256,7	3,184	—
	16	2.582,9	4,016	—
	17	2.048,2	5,064	—
	18	1.624,3	6,385	—
	19	1.288,1	8,051	—
	20	1.021,5	10,15	—
	21	810,10	12,80	—
	22	642,40	16,14	—
	23	509,45	20,36	—
	24	404,01	25,67	—
	25	320,40	32,37	—
	26	254,10	40,81	—
	27	201,50	51,47	—
	28	159,79	64,90	—
	29	126,72	81,83	—
	30	100,50	103,2	—
	31	79,70	130,1	—
	32	63,21	164,1	—
	33	50,13	206,9	—
	34	39,75	260,9	—
	35	31,52	329,0	—
	36	25,00	414,8	—
	37	19,83	523,1	—
	38	15,72	659,6	—
	39	12,47	831,8	—
	40	9,89	1049,0	—

\*Não mais de três condutores por eletrodo, cabo ou vala.

Fonte: Reproduzido com permissão da NFPA No. SPPP-6C, National Electric Code®, copyright © 1996, National Fire Protection Association, Quincy, MA 02269. Este material reproduzido não constitui a posição oficial e completa da NFPA sobre o referido assunto, a qual é representada somente pela versão completa. *National Electric Code* é uma marca registrada da National Fire Protection Association, Inc., Quincy, MA, para uma publicação sobre eletricidade trienal. O termo *National Electric Code*, como usado aqui, refere-se à publicação trienal denominada National Electric Code e é usado com permissão da National Fire Protection Association.

**EXEMPLO 3.5** Qual o diâmetro, em polegadas, de um fio de cobre #12?

**Solução:** Para um fio de cobre #12 (maciço),  $A = 6529,9 \text{ CM}$  e

$$d_{\text{mils}} = \sqrt{A_{\text{CM}}} = \sqrt{6529,9 \text{ CM}} \approx 80,81 \text{ mils}$$

$$d = 0,0808 \text{ pol. (ou aproximadamente } 1/12 \text{ pol.)}$$

**EXEMPLO 3.6** Para o sistema da Fig. 3.10, a resistência total de cada linha de transmissão não pode exceder  $0,025 \Omega$  e a corrente máxima solicitada pela carga é 95 A. Que fio deve ser usado?

**Solução:**

$$R = \rho \frac{l}{A} \Rightarrow A = \rho \frac{l}{R} = \frac{(10,37 \text{ CM} \cdot \Omega/\text{pé})(100 \text{ pés})}{0,025 \Omega} = 41.480 \text{ CM}$$

Usando a tabela de fios, escolhemos a menor área que exceda o valor acima, que é o #4, para que a resistência se mantenha dentro dos limites especificados. Notamos, entretanto, que 95 A precisam fluir na linha. Esta especificação faz com que seja necessário o uso do fio #3, pois o fio #4 pode suportar uma corrente de no máximo 85 A.

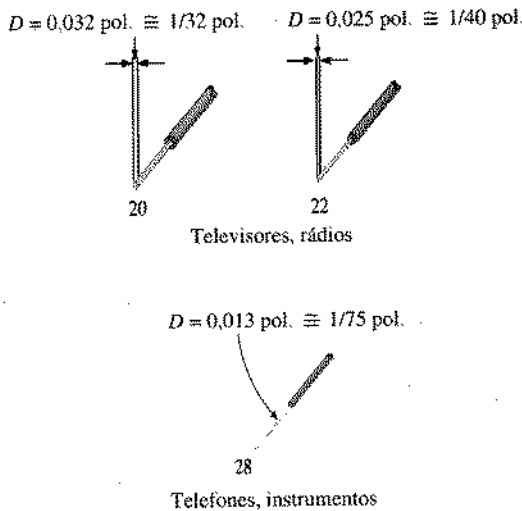
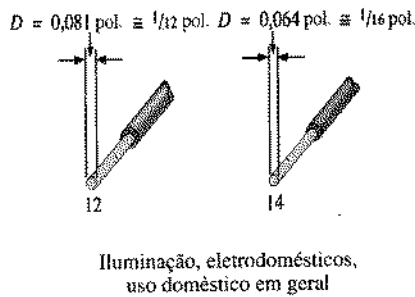
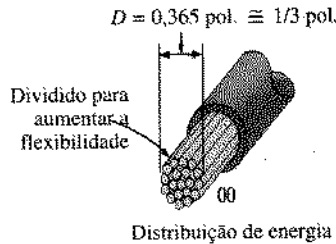


Fig. 3.9 Tamanhos mais comuns de fios e algumas de suas áreas de aplicação.

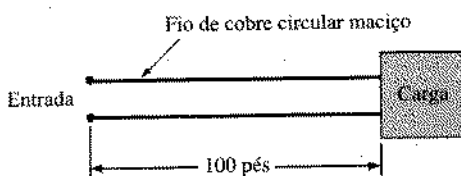


Fig. 3.10 Exemplo 3.6.

### 3.4 RESISTÊNCIA: UNIDADES MÉTRICAS

Os projetos de elementos resistivos para várias áreas de aplicação, incluindo resistores de filmes finos e circuitos integrados, utilizam unidades métricas para as grandezas da Eq. (3.1). Em unidades do sistema SI, a resistividade seria medida em ohms-metros, a área, em metros quadrados, e o comprimento, em metros. Entretanto, o metro é uma unidade de medida muito grande para a maioria das aplicações, de modo que se costuma usar o centímetro. As dimensões resultantes para a Eq. (3.1) são portanto

$$\begin{aligned} \rho &\text{---ohms-centímetros} \\ l &\text{---centímetros} \\ A &\text{---centímetros quadrados} \end{aligned}$$

As unidades de  $\rho$  podem ser derivadas de

$$\rho = \frac{RA}{l} = \frac{\Omega \cdot \text{cm}^2}{\text{cm}} = \Omega \cdot \text{cm}$$

A resistividade de um material é na verdade a resistência de uma amostra como a que aparece na Fig. 3.11. A Tabela 3.3 fornece uma lista de valores de  $\rho$  em ohms-centímetros. Observe que a área é expressa agora em centímetros quadrados, podendo ser determinada com o uso da equação básica  $A = \pi d^2/4$ , eliminando assim a necessidade de se trabalhar com mils circulares, a unidade de medida especial associada aos fios circulares.

**EXEMPLO 3.7** Determine a resistência de 100 pés do fio de telefone de cobre #28 se o seu diâmetro for de 0,0126 polegadas.

**Solução:** Conversões de unidade:

$$l = 100 \text{ pés} \left( \frac{12 \text{ pol.}}{1 \text{ pé}} \right) \left( \frac{2,54 \text{ cm}}{1 \text{ pol.}} \right) = 3048 \text{ cm}$$

$$d = 0,0126 \text{ pol.} \left( \frac{2,54 \text{ cm}}{1 \text{ pol.}} \right) = 0,032 \text{ cm}$$

Assim,

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{(3,1416)(0,032 \text{ cm})^2}{4} = 8,04 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$$

$$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{(1,723 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm})(3048 \text{ cm})}{8,04 \times 10^{-4} \text{ cm}^2} \approx 6,5 \Omega$$

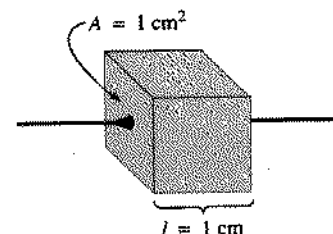


Fig. 3.11 Definição de  $\rho$  em ohm-centímetros.



**Tabela 3.3**

Resistividade ( $\rho$ ) de vários materiais em ohms-centímetros

Prata	$1,645 \times 10^{-6}$
Cobre	$1,723 \times 10^{-6}$
Ouro	$2,443 \times 10^{-6}$
Alumínio	$2,825 \times 10^{-6}$
Tungstênio	$5,485 \times 10^{-6}$
Níquel	$7,811 \times 10^{-6}$
Ferro	$12,299 \times 10^{-6}$
Tântalo	$15,54 \times 10^{-6}$
Nicromo	$99,72 \times 10^{-6}$
Óxido de estanho	$250 \times 10^{-6}$
Carbono	$3.500 \times 10^{-6}$

Usando as unidades para fios circulares e a Tabela 3.2 para a área de um fio #28, encontramos

$$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{(10,37 \text{ CM} \cdot \Omega/\text{pé})(100 \text{ pés})}{159,79 \text{ CM}} \approx 6,5 \Omega$$

**EXEMPLO 3.8** Determine a resistência do resistor de filme fino da Fig. 3.12 se a *resistência laminar*  $R_l$  (definida por  $R_l = \rho/d$ ) é  $100 \Omega$ .

**Solução:** Para materiais depositados de mesma espessura, o fator de resistência laminar é geralmente empregado no projeto de resistores de filmes finos.

A Eq. (3.1) pode ser escrita na forma

$$R = \rho \frac{l}{A} = \rho \frac{l}{dw} = \left( \frac{\rho}{d} \right) \left( \frac{l}{w} \right) = R_s \frac{l}{w}$$

onde  $l$  é o comprimento da amostra e  $w$  sua largura. Substituindo na equação acima, temos

$$R = R_s \frac{l}{w} = \frac{(100 \Omega)(0,6 \text{ cm})}{0,3 \text{ cm}} = 200 \Omega$$

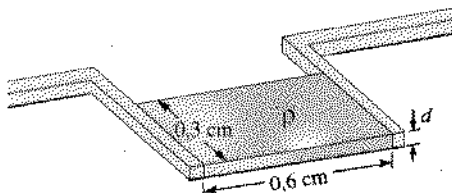
como era de se esperar, pois  $l = 2w$ .

O fator de conversão entre resistividade em mils circulares-ohms por pé e ohms-centímetros é o seguinte:

$$\rho (\Omega \cdot \text{cm}) = (1,662 \times 10^{-7}) \times (\text{valor com CM} \cdot \Omega/\text{pé})$$

Por exemplo, para o cobre  $\rho = 10,37 \text{ CM} \cdot \Omega/\text{pé}$ :

$$\begin{aligned} \rho (\Omega \cdot \text{cm}) &= 1,662 \times 10^{-7} (10,37 \text{ CM} \cdot \Omega/\text{pé}) \\ &= 1,723 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm} \end{aligned}$$



**Fig. 3.12** Resistor de filme fino (observe a Fig. 3.24).

como indicado na Tabela 3.3.

No projeto de circuitos integrados, é usual considerar unidade de resistividade o ohm-centímetro, embora as tabelas frequentemente forneçam  $\rho$  em ohms-metros ou microhms-centímetros. Usando a técnica de conversão do Cap. 1, encontramos o fator de conversão entre ohms-centímetros e ohms-metros, que é o seguinte:

$$1,723 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm} \left[ \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right] = \frac{1}{100} [1,723 \times 10^{-6}] \Omega \cdot \text{m}$$

ou seja, o valor em ohms-metros é 1/100 do valor em ohms-centímetros e

$$\rho (\Omega \cdot \text{m}) = \left( \frac{1}{100} \right) \times (\text{valor em } \Omega \cdot \text{cm})$$

Do mesmo modo:

$$\rho (\mu\Omega \cdot \text{cm}) = (10^6) \times (\text{valor em } \Omega \cdot \text{cm})$$

Para fins de comparação, valores típicos de  $\rho$  em ohms-centímetros para condutores, semicondutores e isolantes são fornecidos na Tabela 3.4.

**Tabela 3.4**

Comparação entre valores de  $\rho$  em  $\Omega \cdot \text{cm}$

Condutores	Semicondutores	Isolantes
Cobre $1,723 \times 10^{-6}$	Ge 50 Si $200 \times 10^3$ GaAs $70 \times 10^6$	Em geral: $10^{10}$

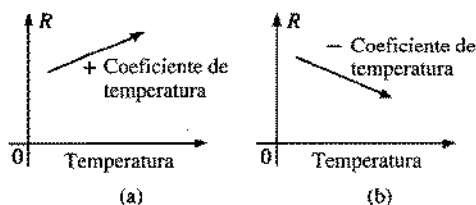
Observe, em particular, a diferença em ordens de grandeza entre condutores e isolantes ( $10^{21}$ ) — uma diferença de enormes proporções. Há também uma diferença significativa nos valores de  $\rho$  para os diferentes semicondutores, mas a diferença em ordens de grandeza entre os valores da resistividade nos semicondutores e os valores da resistividade nos condutores e isolantes é de pelo menos  $10^6$  para todos os semicondutores que aparecem na tabela.

### 3.5 EFEITOS DA TEMPERATURA

A temperatura tem um efeito significativo sobre a resistência de condutores, semicondutores e isolantes.

#### Condutores

Nos condutores existe um grande número de elétrons livres, e qualquer introdução de energia térmica tem um impacto muito pequeno sobre número total de portadores livres. Na verdade, o principal efeito da energia térmica é aumentar a vibração dos átomos de material, dificultando assim a passagem da corrente. O resultado é que



**Fig. 3.13** (a) Condutores — coeficiente de temperatura positivo; (b) Semicondutores — coeficiente de temperatura negativo.

para os condutores, um aumento da temperatura resulta em um aumento no valor de resistência. Consequentemente, os condutores têm um coeficiente de temperatura positivo.

O gráfico da Fig. 3.13(a) representa um material com um coeficiente de temperatura positivo.

## Semicondutores

Nos semicondutores, o aumento da energia térmica produz um aumento no número de portadores livres para condução no material. Temos então que

para os semicondutores, um aumento da temperatura resulta em uma diminuição no valor de resistência. Consequentemente, os semicondutores têm coeficientes de temperatura negativos.

O termistor e a célula fotocondutora das Seções 3.10 e 3.11 deste capítulo são excelentes exemplos de dispositivos semicondutores com coeficientes de temperatura negativos.

## Isolantes

Como nos semicondutores, um aumento na temperatura resulta em uma diminuição na resistência dos isolantes. O resultado é um coeficiente de temperatura negativo.

## Temperatura Absoluta Inferida

A Fig. 3.14 revela que para o cobre (como para a maioria dos condutores metálicos) a resistência aumenta quase linearmente com a temperatura. Como a temperatura pode ter uma influência significativa na resistência de um condutor, é importante que tenhamos algum método de determinar a resistência para qual-

quer temperatura dentro dos limites de operação. Uma equação para este fim pode ser obtida aproximando-se a curva da Fig. 3.14 pela linha reta tracejada que intercepta a escala da temperaturas em  $-234,5^\circ\text{C}$ . Embora a curva na realidade se estenda até o zero absoluto ( $-273,15^\circ\text{C}$ , ou  $0\text{ K}$ ), a aproximação pela linha reta é bastante precisa para o intervalo normal de temperaturas de operação. Em duas diferentes temperaturas,  $t_1$  e  $t_2$ , as resistências do cobre são  $R_1$  e  $R_2$ , como indicado na curva. Utilizando as propriedades de triângulos semelhantes, podemos determinar uma relação matemática entre esses valores de resistência em diferentes temperaturas.

Seja  $x$  igual à distância de  $-234,5^\circ\text{C}$  a  $t_1$  e  $y$  a distância de  $-234,5^\circ\text{C}$  a  $t_2$ , como mostrado na Fig. 3.14. Por semelhança de triângulos,

$$\frac{x}{R_1} = \frac{y}{R_2}$$

ou

$$\frac{234,5 + t_1}{R_1} = \frac{234,5 + t_2}{R_2} \quad (3.5)$$

A temperatura de  $-234,5^\circ\text{C}$  é chamada de *temperatura absoluta inferida* do cobre. Para diferentes materiais condutores, a interseção da linha reta com o eixo das abscissas irá ocorrer em diferentes temperaturas. Alguns valores típicos aparecem na Tabela 3.5.

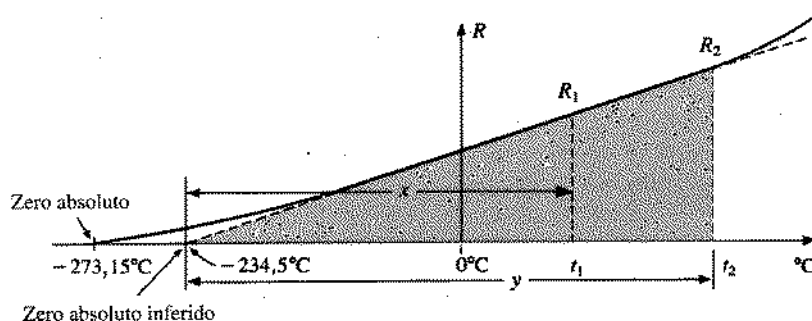
O sinal negativo não aparece associado às temperaturas absolutas inferidas na Eq. (3.5) porque  $x$  e  $y$  são *distâncias* de  $-234,5^\circ\text{C}$  a  $t_1$  e  $t_2$ , respectivamente, sendo assim valores absolutos. Para  $t_1$  e  $t_2$  menores que zero,  $x$  e  $y$  são menores que  $-234,5^\circ\text{C}$  e as distâncias são as diferenças entre a temperatura absoluta inferida e a temperatura de interesse.

A Eq. (3.5) pode facilmente ser adaptada a qualquer material inserindo-se a temperatura absoluta inferida apropriada. Ela pode então ser escrita na forma:

$$\frac{|T| + t_1}{R_1} = \frac{|T| + t_2}{R_2} \quad (3.6)$$

onde  $|T|$  indica que a temperatura absoluta inferida do material envolvido é inserida como um valor positivo na equação. Assim, apenas  $t_1$  e  $t_2$  podem ter sinal negativo.

**EXEMPLO 3.9** Se a resistência de um fio de cobre é  $50\ \Omega$  a  $20^\circ\text{C}$ , qual a sua resistência a  $100^\circ\text{C}$  (ponto de ebulição da água)?



**Fig. 3.14** Efeito da temperatura sobre a resistência do cobre.



**Tabela 3.5**  
Temperaturas absolutas inferidas

Material	°C
Prata	-243
Cobre	-234,5
Ouro	-274
Alumínio	-236
Tungstênio	-204
Níquel	-147
Ferro	-162
Nicromo	-2.250
Constantan	-125.000

**Solução:** Da Eq. (3.5):

$$\frac{234,5^{\circ}\text{C} + 20^{\circ}\text{C}}{50\ \Omega} = \frac{234,5^{\circ}\text{C} + 100^{\circ}\text{C}}{R_2}$$

$$R_2 = \frac{(50\ \Omega)(334,5^{\circ}\text{C})}{254,5^{\circ}\text{C}} = 65,72\ \Omega$$

**EXEMPLO 3.10** Se a resistência de um fio de cobre à temperatura de congelamento da água (0 °C) é 30 Ω, qual a sua resistência a -40 °C?

**Solução:** Utilizando a Eq. (3.5):

$$\frac{234,5^{\circ}\text{C} + 0}{30\ \Omega} = \frac{234,5^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C}}{R_2}$$

$$R_2 = \frac{(30\ \Omega)(194,5^{\circ}\text{C})}{234,5^{\circ}\text{C}} = 24,88\ \Omega$$

**EXEMPLO 3.11** Se a resistência de um fio de alumínio à temperatura ambiente (20 °C) é 100 mΩ (medida com um miliohmímetro, um medidor especialmente projetado para medir resistências muito pequenas), em que temperatura sua resistência será 120 mΩ?

**Solução:** Novamente utilizando a Eq. (3.5):

$$\frac{236^{\circ}\text{C} + 20^{\circ}\text{C}}{100\ \text{m}\Omega} = \frac{236^{\circ}\text{C} + t_2}{120\ \text{m}\Omega}$$

e

$$t_2 = 120\ \text{m}\Omega \left( \frac{256^{\circ}\text{C}}{100\ \text{m}\Omega} \right) - 236^{\circ}\text{C}$$

$$t_2 = 71,2^{\circ}\text{C}$$

## Coeficiente de Temperatura da Resistência

Há uma segunda equação, bastante “popular”, que nos permite calcular a resistência de um condutor em diferentes temperaturas. Definindo

$$\alpha_{20} = \frac{1}{[T] + 20^{\circ}\text{C}} \quad (\Omega/^{\circ}\text{C}/\Omega) \quad (3.7)$$

como o *coeficiente de temperatura da resistência* à temperatura de 20 °C e  $R_{20}$  como a resistência da amostra a 20 °C, a resistência  $R$  à temperatura  $t$  é determinada por

$$R = R_{20}[1 + \alpha_{20}(t - 20^{\circ}\text{C})] \quad (3.8)$$

Foram determinados experimentalmente os valores de  $\alpha_{20}$  para muitos materiais. Alguns deles aparecem na Tabela 3.6.

A Eq. (3.8) pode ser escrita na seguinte forma:

$$\alpha_{20} = \frac{\left( \frac{R - R_{20}}{t - 20^{\circ}\text{C}} \right)}{R_{20}} = \frac{\frac{\Delta R}{\Delta T}}{R_{20}}$$

a partir da qual é definida a unidade  $\Omega/^{\circ}\text{C}/\Omega$  para  $\alpha_{20}$ .

Como  $\Delta R/\Delta T$  é a inclinação da curva da Fig. 3.14, podemos concluir que

*quanto maior o coeficiente de temperatura da resistência de um material, mais sensível será o valor de resistência a mudanças de temperatura.*

Observando a Tabela 3.5, notamos que o cobre é mais sensível a variações de temperatura do que a prata, o ouro e o alumínio, embora as diferenças sejam muito pequenas. No caso do constantan, a inclinação, dada por  $\alpha_{20}$ , é tão pequena que a curva de variação de  $R$  com  $t$  é praticamente uma reta horizontal.

Como  $R_{20}$  na Eq. (3.8) é a resistência do condutor a 20 °C e  $t - 20^{\circ}\text{C}$  é a mudança na temperatura a partir de 20 °C, a Eq. (3.8) pode ser escrita na seguinte forma:

$$R = \rho \frac{l}{A} [1 + \alpha_{20} \Delta T] \quad (3.9)$$

que permite calcular a resistência a partir dos parâmetros relevantes.

## PPM/°C

A resistência de qualquer material depende, como vimos, da temperatura. Vamos agora examinar a sensibilidade à temperatura da resistência dos materiais. Essa especificação normalmente é fornecida em partes por milhão por graus Celsius (PPM/°C), o que permite avaliar a sensibilidade do resistor a variações de temperatura. Um valor de 5.000 PPM é, para resistores, considerado alto, enquanto 20 PPM é considerado muito baixo. Um valor de 1.000 PPM/°C significa que uma variação de 1 °C na temperatura resulta em uma mudança no valor da resistência igual a 1.000 PPM ou 1.000/1.000.000 = 1/1.000 de seu valor nominal, uma variação não muito significativa para a maioria das aplicações. Entretanto, uma variação de 10 °C iria resultar numa alteração igual a 1/100 (1%) do valor nominal, o que já começa a se tornar significativo. Logo, não devemos nos preocupar somente com o valor em PPM, mas também com a variação de temperatura esperada.

**Tabela 3.6**  
Coeficiente de temperatura da resistência para  
vários condutores a 20 °C

Material	Coeficiente de Temperatura ( $\alpha_{20}$ )
Prata	0,0038
Cobre	<b>0,00393</b>
Ouro	0,0034
Alumínio	0,00391
Tungstênio	0,005
Níquel	0,006
Ferro	0,0055
Constantan	0,00008
Nicromo	0,00044

Expressa em forma de equação, a variação de resistência é dada por

$$\Delta R = \frac{R_{\text{nominal}}}{10^6} (\text{PPM})(\Delta T) \quad (3.10)$$

onde  $R_{\text{nominal}}$  é o valor nominal do resistor à temperatura ambiente e  $\Delta T$  é a variação de temperatura a partir do valor de referência, 20 °C.

**EXEMPLO 3.12** Para um resistor de carbono de 1 k $\Omega$  cuja PPM é 2500, determine a resistência a 60 °C.

**Solução:**

$$\begin{aligned} \Delta R &= \frac{1000 \, \Omega}{10^6} (2500)(60^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) \\ &= 100 \, \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e \quad R &= R_{\text{nominal}} + \Delta R = 1000 \, \Omega + 100 \, \Omega \\ &= 1.100 \, \Omega \end{aligned}$$

## 3.6 SUPERCONDUTORES

### Introdução

Não há dúvida de que o campo da eletricidade/eletônica tem sido um dos mais empolgantes do século 20. Embora as novidades apareçam quase que semanalmente, a partir de intensas atividades de pesquisa e desenvolvimento, às vezes há alguma descoberta muito especial que leva todos a ficarem na expectativa para saber o que irá acontecer no futuro próximo. É esse nível de agitação e interesse que cerca as pesquisas para desenvolvimento de um material que seja *supercondutor à temperatura ambiente* — um avanço que, se for realizado algum dia, irá rivalizar com a introdução dos dispositivos semicondutores como o transistor (para substituir as válvulas), a comunicação sem fio ou até mesmo a luz elétrica. As implicações dessa descoberta são tão abrangentes que se torna difícil prever o impacto que terá sobre todo o campo da eletricidade e eletrônica.

A intensidade dos esforços de pesquisa em todo o mundo hoje em dia para desenvolver um supercondutor à temperatura ambiente é descrita por alguns pesquisadores como “inacreditável, contagiosa, empolgante e desafiadora”, mas é também uma aventura na qual os cientistas anseiam por uma oportunidade de se envolver. Seus progressos desde 1986 sugerem que o uso de supercondutores em aplicações comerciais irá crescer rapidamente nas próximas décadas. É também esperado que supercondutores à temperatura ambiente se tornem uma realidade por volta do ano 2000.\* Estamos assim vivenciando uma era de antecipação de um grande crescimento tecnológico! Por que esse interesse pelos supercondutores? O que são eles, afinal? Em poucas palavras,

*supercondutores são condutores de eletricidade que, para todos os fins práticos, têm resistência zero.*

### Efeito Cooper

Em um condutor convencional, os elétrons viajam com velocidades médias próximas de 1.600 km/s (eles podem atravessar os Estados Unidos em cerca de 3 segundos). De acordo com a teoria especial da relatividade de Einstein, a velocidade máxima para a transmissão de qualquer efeito é a velocidade da luz no vácuo, cerca de 300.000 km/s. A velocidade relativamente baixa, quando comparada com a da luz, da condução convencional deve-se, entre outras coisas, a colisões com outros átomos no material, forças repulsivas entre os elétrons (cargas de mesmo sinal se repelem, lembra-se?), efeitos de agitação térmica que resultam em trajetórias irregulares devido ao aumento do movimento de átomos próximos e à presença de impurezas no condutor. No estado supercondutor, há um emparelhamento de elétrons, denominado *efeito Cooper*, no qual os elétrons se propagam em pares, “ajudando-se” mutuamente a manter uma velocidade mais alta. De certa maneira, isto é como “aproveitar o vácuo” de outros ciclistas ou corredores. Há uma troca de energia entre parceiros ou mesmo entre “novos” parceiros (conforme a necessidade) para garantir a passagem dos portadores de carga com a maior velocidade possível e com o menor gasto total de energia.

### Cerâmica

Embora o conceito de supercondutividade tenha surgido inicialmente em 1911, apenas a partir de 1986 foi que a possibilidade da supercondutividade à temperatura ambiente se tornou um objetivo da comunidade científica. Durante cerca de 74 anos, a supercondutividade somente podia ser conseguida em temperaturas abaixo de 23 K. (A unidade de temperatura universalmente aceita para estudos de supercondutividade é o Kelvin. Lembre-se de que  $K = 273,15^\circ + ^\circ\text{C}$ , de modo que uma temperatura de 23 K corresponde a  $-250^\circ\text{C}$ .) Em 1986, entretanto, os físicos Alex Muller e George Bednorz do Centro de Pesquisa da IBM em Zurique, encontraram um material cerâmico, óxido de cobre, bário e lantânio, que se tornava supercondutor a 30 K. Embora possa parecer um avanço pequeno, introduziu uma nova direção para as pesquisas e incentivou outros pesquisadores a baterem o novo recorde. Em outubro de 1987, os dois cientistas receberam o Prêmio Nobel por sua contribuição.

\*Esta era a expectativa da comunidade científica quando este livro foi escrito. Atualmente (1997) parece haver um consenso de que esta previsão não se realizará, pois o progresso nesta área tornou-se bem mais lento. (N.T.)

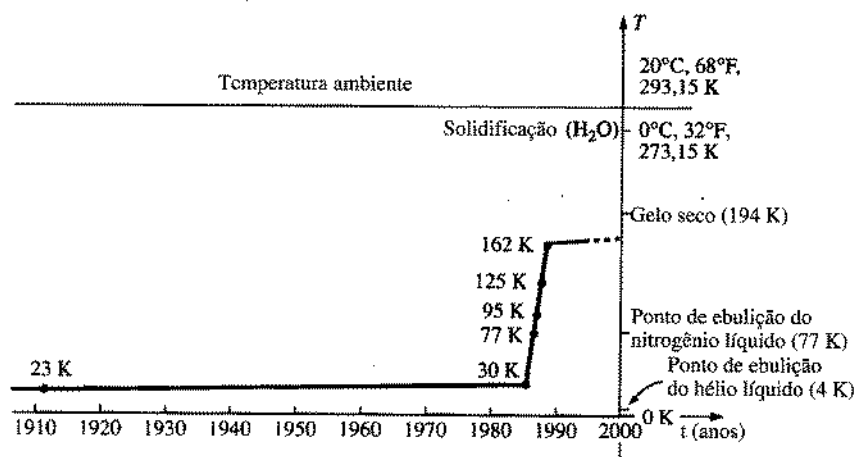


Fig. 3.15 O aumento da temperatura crítica dos supercondutores.

Em apenas alguns meses, os professores Paul Chu, da Universidade de Houston, e Man Kven Wu, da Universidade do Alabama, aumentaram a temperatura para 95 K usando um supercondutor de óxido de cobre, bário e ítrio. O resultado foi um aumento do interesse da comunidade científica que levou as pesquisas na área a um novo patamar de empenho e investimentos. A importância dessa descoberta estava no fato de que o nitrogênio líquido (ponto de ebulição 77 K) poderia ser usado para baixar a temperatura do material até o valor necessário, para que ele se tornasse supercondutor, em vez do hélio líquido, que evapora a 4 K. O resultado é uma grande economia nos custos de resfriamento, pois o hélio líquido é pelo menos dez vezes mais caro que o nitrogênio líquido. Seguindo a mesma linha, alguns sucessos foram obtidos a 125 K e 162 K, utilizando um composto de tálio (infelizmente, o tálio é uma substância extremamente venenosa). A Fig. 3.15 mostra claramente o enorme progresso que ocorreu desde 1911 e também sugere que a supercondutividade à temperatura ambiente em um futuro não muito distante é bastante provável.\* Entretanto, o composto não será provavelmente nenhum dos atualmente utilizados, podendo ser, na verdade, de natureza totalmente diferente. Embora a curva tenha parado temporariamente em 162 K, as pesquisas continuam vigorosamente, tentando identificar outros compostos supercondutores que apresentem este comportamento em altas temperaturas e expandir a aplicação industrial dos materiais já disponíveis.

O fato de que os materiais cerâmicos provocaram a recente revolução no campo da supercondutividade é provavelmente uma surpresa quando se considera que eles também constituem, à temperatura ambiente, uma importante classe de isolantes. Entretanto, os materiais cerâmicos que exibem as características de supercondutividade são compostos que incluem cobre, oxigênio e terras raras como o ítrio, o lantânio e o tálio. Também há indícios de que os compostos supercondutores atuais possam estar limitados à temperatura máxima de 200 K (cerca de 100 K abaixo da temperatura ambiente), deixando a porta aberta para iniciativas inovadoras na seleção de compostos. A temperatura na qual um supercondutor retorna às características de um condutor convencional é chamada de *temperatura crítica* e simbolizada por  $T_c$ . Observe na Fig. 3.16 que o valor de resistividade muda abrupta-

mente em  $T_c$ . A largura da região da transição depende da pureza da amostra. Extensas tabelas de temperaturas críticas, determinadas experimentalmente para uma grande variedade de compostos, podem ser encontradas nos manuais de referência normalmente utilizados nas pesquisas de física, química, geologia e campos correlatos. Entre estes manuais, dois dos mais conhecidos são o CRC (The Chemical Rubber Co.) *Handbook of Tables for Applied Engineering Science* e o CRC *Handbook of Chemistry and Physics*.

Embora as temperaturas críticas mais altas tenham sido obtidas com materiais cerâmicos, sua fragilidade e o fato de poderem suportar uma densidade de corrente bastante limitada têm sido motivos de preocupação. Na área de produção de circuitos integrados, os valores desta densidade precisam igualar ou exceder 1 MA/cm<sup>2</sup> ou 1 milhão de amperes passa por uma seção reta de cerca da metade do tamanho de uma moeda. Recentemente, nos laboratórios da IBM, foi conseguido um valor de 4 MA/cm<sup>2</sup> a 77 K, o que já é suficiente para permitir o uso de supercondutores na fabricação de alguns computadores super-rápidos de última geração.

## A Relação TIB

Existem, na verdade, três fatores interdependentes no desenvolvimento de um supercondutor para aplicações práticas à temperatura ambiente: *temperatura, densidade de corrente e intensidade de campo magnético* (Cap. 11). Quando um fator (como a temperatura) é levado ao limite, os outros dois (neste caso, den-

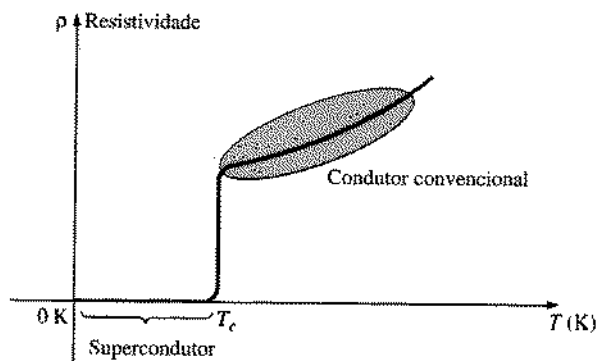


Fig. 3.16 Definição da temperatura crítica  $T_c$ .

\*Veja nota precedente. (N.T.)

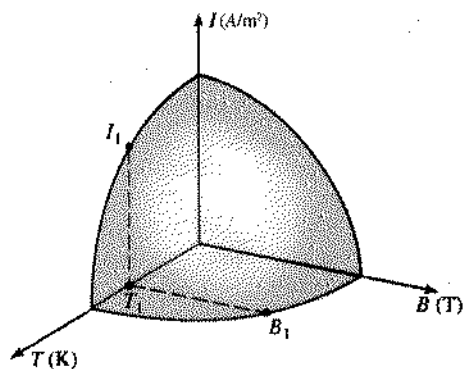


Fig. 3.17 A relação TIB.

sidade de corrente e densidade de fluxo magnético) diminuem abruptamente, como vemos na Fig. 3.17. Note, em particular, a temperatura  $T_c$ , que define uma densidade de corrente e uma intensidade de campo magnético menores que os valores máximos. Vemos na figura que estes dois últimos fatores diminuem rapidamente quando a temperatura aumenta até o valor crítico. Felizmente, a intensidade de campo magnético disponível atualmente nas temperaturas de trabalho dos supercondutores é grande o suficiente (maior que 250 T em baixas temperaturas e 100 T em temperaturas mais altas) para a maioria das aplicações. A maior preocupação para os materiais atuais reside em assegurar suficiente densidade de corrente à temperatura de interesse.

## O Efeito Meissner

Este efeito [Fig. 3.18(a)] fornece uma bela demonstração de que um material se tornou supercondutor. Em temperaturas acima da temperatura crítica, as linhas de força do campo magnético podem penetrar em um condutor, como ilustra a Fig. 3.18(a). Quando a temperatura diminui e o material se torna supercondutor, as linhas de força são expulsas, e isto faz com que o ímã levite (flu-

tue) acima do supercondutor, como mostra a Fig. 3.18(b); a Fig. 3.18(c) mostra uma fotografia do mesmo fenômeno. A impossibilidade das linhas de campo magnético de penetrarem em um material supercondutor possui várias aplicações práticas.

## Aplicações

Embora ainda não tenha sido possível fabricar um material que seja supercondutor à temperatura ambiente, existem numerosas aplicações para alguns dos supercondutores já desenvolvidos. É tudo uma questão de comparar o custo adicional com os resultados obtidos ou averiguar se quaisquer destes resultados poderiam ser obtidos sem o uso deste estado de resistência zero. Algumas áreas de pesquisa necessitam de aceleradores de alta energia ou campos magnéticos extremamente intensos que só podem ser obtidos com o uso de materiais supercondutores. A supercondutividade é atualmente aplicada na fabricação de trens Meglev (levitados magneticamente) capazes de atingir velocidades de até 500 km/h; em poderosos motores e geradores; em sistemas de ressonância magnética nuclear, capazes de fornecer imagens detalhadas do cérebro (e de outras partes do organismo); na fabricação de computadores com velocidades de operação quatro vezes maior que os computadores convencionais e em sistemas avançados de distribuição de energia.

Através do uso do efeito Josephson (cuja descrição deixamos para o estudante como uma atividade de pesquisa), podemos obter detectores de campo magnético conhecidos como SQUIDS (superconducting quantum interference devices, ou seja, dispositivos supercondutores de interferência quântica), que podem medir campos magnéticos centenas de vezes menores que os medidos pelos métodos convencionais. A aplicação de tais aparelhos vai da medicina à geologia. Como o crânio humano distorce os campos elétricos mas não os campos magnéticos, os SQUIDS podem ser usados para detectar campos magnéticos extremamente pequenos que fornecem importantes informações a respeito do paciente. Na geologia, os SQUIDS podem ser usados para detectar campos magnéticos que revelam a presença de minerais específicos ou mesmo de petróleo e água.

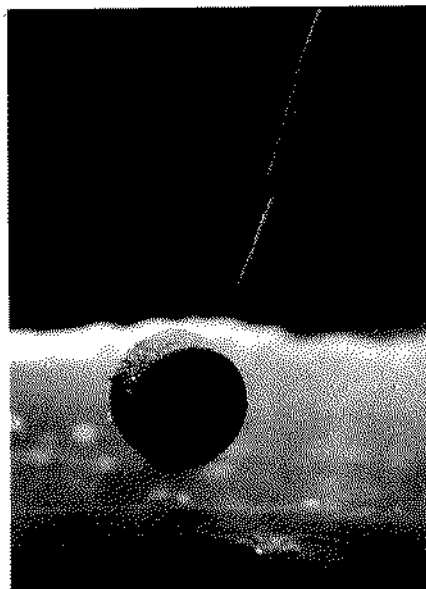
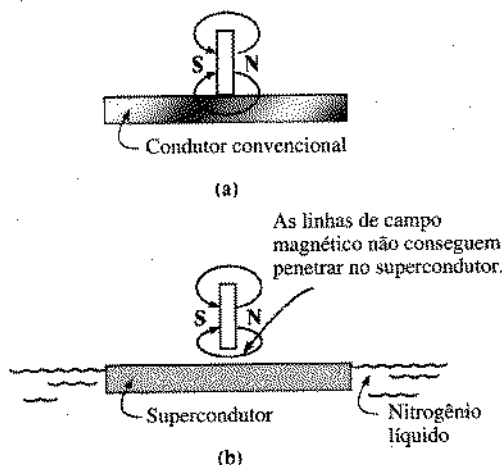


Fig. 3.18 Demonstração de uma consequência do efeito Meissner. (Cortesia da IBM.)

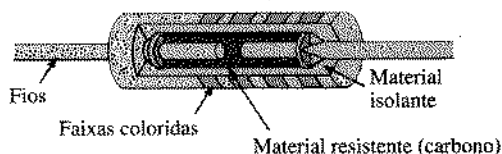


Fig. 3.19 Resistor fixo de carbono.

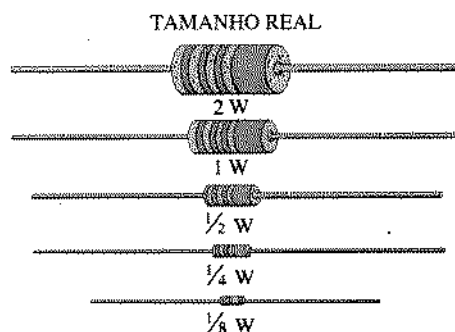


Fig. 3.20 Resistores fixos de carbono de diferentes potências.

A importância que a tecnologia dos supercondutores terá no futuro depende do sucesso que os físicos tiverem em aumentar a temperatura de operação e da forma como utilizarem os resultados obtidos até o momento. Entretanto, parece ser somente uma questão de tempo (o eterno otimista) para que aumente a quantidade de trens que utilizam a levitação magnética, surjam equipamentos médicos de diagnóstico avançados, os computadores operem em velocidades muito maiores, sejam fabricados sistemas de geração e armazenamento de energia de altíssima eficiência e os sistemas de transmissão operem com altos níveis de eficiência, tudo isso graças à pesquisa nesta área de crescente interesse. Somente o tempo poderá revelar o impacto que este novo campo terá na nossa qualidade de vida.

## 3.7 TIPOS DE RESISTORES

### Resistores Fixos

Existem muitos tipos de resistores, mas eles podem ser divididos em dois grupos: fixos e variáveis. O mais comum dos resis-

tores fixos de baixa potência é o resistor de carbono moldado. Sua estrutura básica está ilustrada na Fig. 3.19.

As dimensões relativas de todos os resistores fixos e variáveis variam de acordo com a potência, com maiores dimensões associadas às maiores potências, de modo a permitir valores mais elevados de corrente e portanto de perdas por dissipação. Os tamanhos relativos dos resistores de carbono para diferentes valores de potência são mostrados na Fig. 3.20. Resistores deste tipo estão normalmente disponíveis em valores que vão de  $2,7 \Omega$  até  $22 \text{ M}\Omega$ .

As curvas da resistência em função da temperatura para dois resistores de carbono moldado aparecem na Fig. 3.21. Observe que a variação percentual da resistência é muito pequena na faixa de temperaturas em que esses componentes são normalmente utilizados. Na Fig. 3.22 vemos vários outros tipos de resistores fixos que usam fios de alta resistência ou fitas de metal.

A miniaturização de componentes — usada com frequência nos computadores — requer que resistências de diferentes valores sejam acomodadas em invólucros muito pequenos. Alguns exemplos estão na Fig. 3.23.

Para uso em placas de circuito impresso, conjuntos de resistores fixos em várias configurações são fornecidos em pequenos invólucros como os que aparecem na Fig. 3.24. A figura mostra uma fotografia de três diferentes invólucros e a configuração interna dos resistores para o dispositivo à direita.

### Resistores Variáveis

Os resistores variáveis, como o próprio nome sugere, têm uma resistência que pode ser variada fazendo-se girar um botão, parafuso ou o que for apropriado para a aplicação específica. Eles podem ter dois ou três terminais, mas a maioria possui três. Quando um dispositivo de dois ou três terminais é usado como um resistor variável, em geral nos referimos a ele como um *reostato*. Se o dispositivo de três terminais é usado para controlar a potência, costumamos chamá-lo de *potenciômetro*. Embora um dispositivo de três terminais possa ser usado como reostato ou potenciômetro (dependendo de como ele é conectado), ele é geralmente chamado de *potenciômetro* quando aparece em revistas especializadas ou em listas de componentes para aplicações particulares.

O símbolo de um potenciômetro de três terminais aparece na Fig. 3.25(a). Quando usado como um resistor variável (ou reostato) ele pode ser conectado de duas formas, como vemos nas Figs. 3.25(b) e (c). Na Fig. 3.25(b), os pontos *a* e *b* estão conectados ao circuito e o terminal restante é deixado desligado. A resistência introduzida

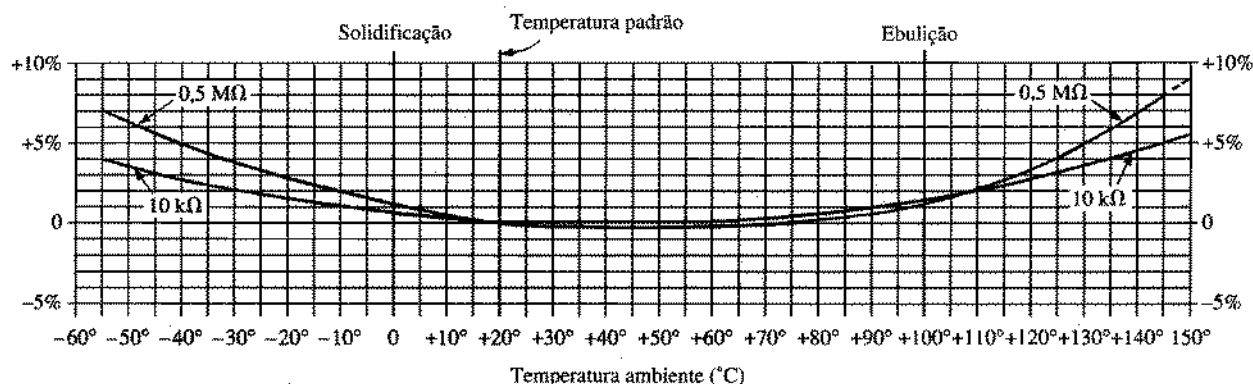
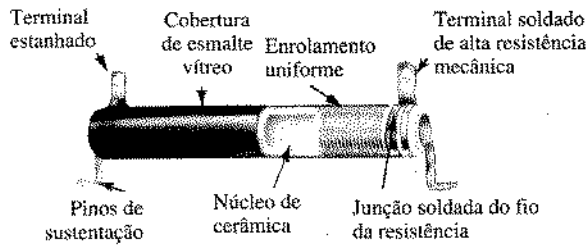
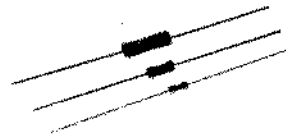


Fig. 3.21 Curvas que mostram a variação percentual do valor de resistências com a temperatura em relação a seus valores a  $20^\circ\text{C}$ . (Cortesia da Allen-Bradley Co.)



(a) Resistor esmaltado de fio. *Aplicação:* Todos os tipos de equipamentos.

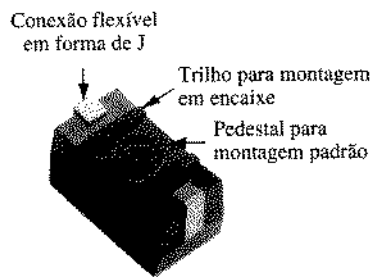


(b) Resistores de filme de cermet para alta tensão (em um corpo de cerâmica de alta qualidade). *Aplicação:* Sistemas que operam com valores elevados de tensão (até 10 kV) e nos quais é necessária grande estabilidade.

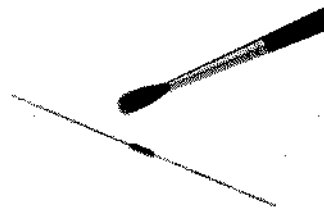


(c) Resistores de precisão de filme metálico. *Aplicação:* Nos casos em que seja necessária grande estabilidade, baixo coeficiente de temperatura e baixo nível de ruído.

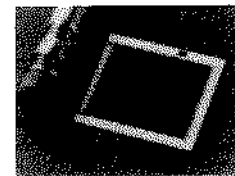
**Fig. 3.22 Resistores fixos.** [Partes (a) e (c) cortesia da Ohmite Manufacturing Co. Parte (b) cortesia da Philips Components Inc.]



(a) Resistor de potência plano, ideal para placas de circuito impresso. Lâminas metálicas flexíveis, em forma de J, patenteadas, eliminam a necessidade de solda. (São encontrados em versões de 0,8 W até 3W, construídos com filme fino, filme fino de potência ou fio.)

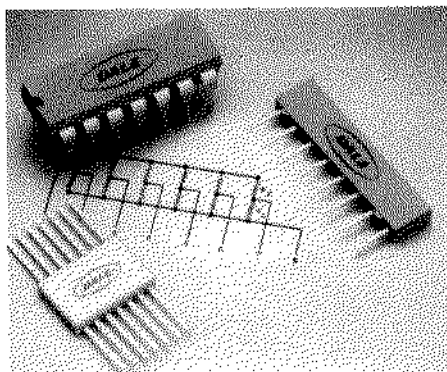


(b) Resistor de precisão de fio, capaz de dissipar alta potência. Pode dissipar até 2 W, e sua tolerância pode ser de até 0,05%. Também são encontrados com coeficientes de temperatura muito pequenos, como 20 ppm/°C.

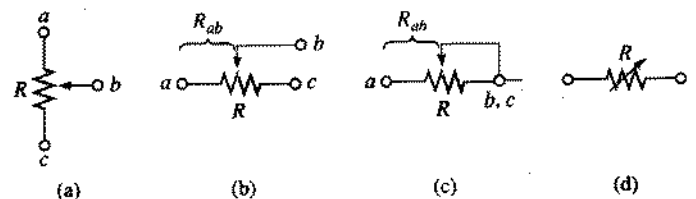


(c) Resistor de filme fino em pastilha, que permite aumentar a flexibilidade do projeto de circuitos híbridos. São encontrados com eletrodos de ouro, prata ou pré-estanhadas. Funciona entre -55 °C e +150 °C.

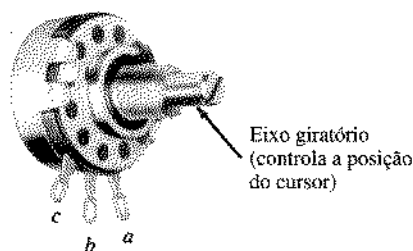
**Fig. 3.23 Resistores fixos tipo miniatura.** [Parte (a) cortesia da Ohmite Manufacturing Co. Partes (b) e (c) cortesia da Date Electronics Inc.]



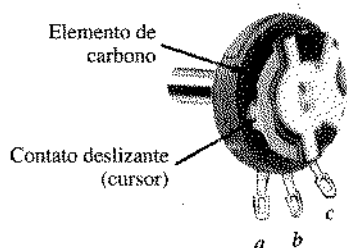
**Fig. 3.24 Circuitos com resistores de filme fino.** (Cortesia da Date Electronics Inc.)



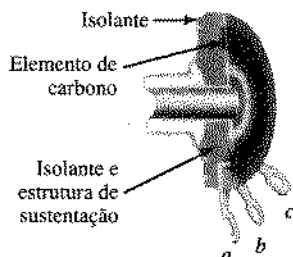
**Fig. 3.25 Potenciômetro:** (a) símbolo; (b) e (c) conexões tipo reostato; (d) símbolo de reostato.



(a) Vista externa



(b) Vista interna



(c) Elemento de carbono

**Fig. 3.26** Potenciômetro com resistor de carbono. (Cortesia da Allen-Bradley Co.)

é determinada pela porção do elemento resistivo entre os pontos *a* e *b*. Na Fig. 3.25(c), a resistência é novamente aquela entre os pontos *a* e *b*, mas agora a resistência restante é “extraída” (seu efeito removido) pela conexão de *b* a *c*. O símbolo universalmente aceito para o reostato aparece na Fig. 3.25(d).

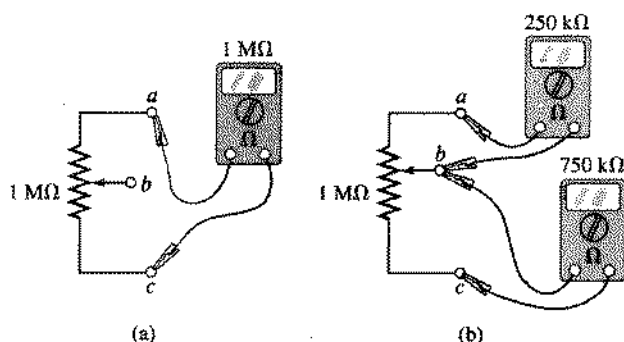
A maioria dos potenciômetros possui os três terminais nas posições relativas mostradas na Fig. 3.26. O botão, chave ou parafuso no centro controla a posição de um contato que pode se mover ao longo do elemento resistivo conectado entre os outros dois terminais. O contato é conectado ao terminal central, estabelecendo uma resistência entre o contato móvel e cada um dos outros terminais.

**A resistência entre os terminais externos *a* e *c* da Fig. 3.27(a) (e Fig. 3.26) é sempre fixa no valor máximo do potenciômetro, qualquer que seja a posição do cursor ligado a *b*.**

Em outras palavras, a resistência entre os terminais *a* e *c* da Fig. 3.27(a) para um potenciômetro de 1 MΩ é sempre 1 MΩ, não importa o quanto giremos o controle, deslocando o contato. Na Fig. 3.27(a), o contato central não está ligado ao circuito.

**A resistência entre o terminal do cursor e um dos terminais externos pode ser variada de um mínimo de 0 Ω até um valor máximo igual ao valor nominal do potenciômetro.**

Na Fig. 3.27(b), o cursor foi colocado a 1/4 da distância entre *a* e *c*. A resistência resultante entre os pontos *a* e *b* é portanto 1/4



**Fig. 3.27** Resistência entre os terminais de um potenciômetro: (a) entre os terminais externos; (b) entre todos os terminais.

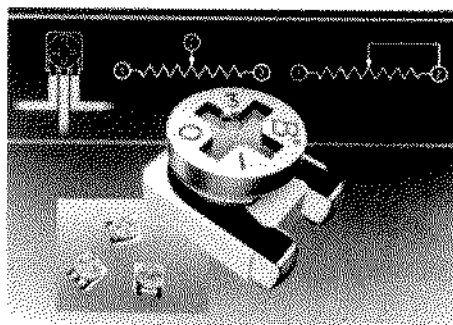
do total ou 250 kΩ (para um potenciômetro de 1 MΩ), e a resistência entre *b* e *c* é 3/4 do total ou 750 kΩ.

**A soma das resistências entre o cursor e os dois terminais externos é igual à resistência total do potenciômetro.**

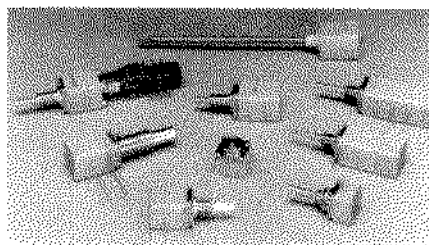
Este fato está ilustrado na Fig. 3.27(b), onde temos 250 kΩ + 750 kΩ = 1 MΩ. No caso geral,

$$R_{ac} = R_{ab} + R_{bc} \quad (3.11)$$

Desse modo, conforme a resistência entre o cursor e um dos contatos externos aumenta, a resistência entre este contato deslizante e o outro terminal externo diminui na mesma proporção. Por exemplo: se  $R_{ab}$  de um potenciômetro de 1 kΩ é 200 Ω, a resistência  $R_{bc}$  deve ser 800 Ω. Se  $R_{ab}$  diminui para 50 Ω,  $R_{bc}$  deve aumentar para 950 Ω e assim por diante.

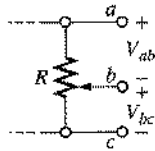


(a)



(b)

**Fig. 3.28** Potenciômetros: (a) Trimmer de 4 mm ( $\approx 5/32$  polegada). (Cortesia da Bourns Inc.); (b) elementos condutores de plástico e cermet. (Cortesia da Clarostat Mfg. Co.)



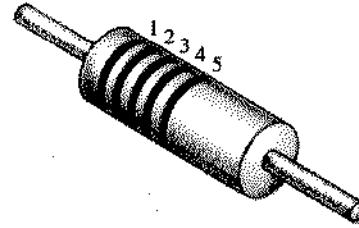
**Fig. 3.29** Controle dos valores de tensão por um potenciômetro.

Os potenciômetros de carbono são geralmente usados em circuitos com pequenas demandas de energia e são encontrados em valores de  $20\ \Omega$  até  $22\ \text{M}\Omega$ . Outros potenciômetros comerciais aparecem na Fig. 3.28.

Quando o dispositivo é usado como um potenciômetro, as conexões ficam como na Fig. 3.29. Neste caso, ele pode ser usado para controlar o valor de  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  ou ambas, dependendo da aplicação. Discussões mais detalhadas da utilização dos potenciômetros em circuitos podem ser encontradas nos próximos capítulos.

### 3.8 CÓDIGO DE CORES E VALORES DOS RESISTORES

Muitos resistores, fixos e variáveis, são grandes o suficiente para ter a resistência escrita, em ohms, em seu invólucro. Há alguns, entretanto, que são muito pequenos para terem números impressos; nesse caso, é usado um código de cores. Para os resistores fixos de carbono, quatro ou cinco cores são impressas em uma extremidade do invólucro, como ilustra a Fig. 3.30. Cada cor tem o valor numérico associado indicado na Tabela 3.7. As faixas coloridas são sempre lidas a partir da que está mais próxima de uma das extremidades, como vemos na Fig. 3.30. A primeira e a segunda faixas representam o primeiro e o segundo dígitos respectivamente. A terceira faixa determina o multiplicador, em potências de 10, dos primeiros dois dígitos (ou seja, o número de zeros que se seguem ao segundo dígito) ou um fator multiplicador, se for dourada ou prateada. A quarta faixa é a tolerância do fabricante, uma indicação da precisão no valor da resistência. Se a quarta faixa é omitida, convencionou-se que a tolerância é  $\pm 20\%$ . A quinta faixa é um fator de segurança, que indica a porcentagem de falhas por 1.000 horas de uso. Por exemplo: uma taxa de falhas de 1% significa que um resistor em cada 100 (ou 10 em cada 1.000) não estará dentro do intervalo de tolerância após 1.000 horas de uso.



**Fig. 3.30** Código de cores — resistor fixo de carbono.

**EXEMPLO 3.13** Encontre o intervalo no qual deve estar o valor de um resistor que tem as faixas coloridas abaixo para satisfazer à tolerância especificada pelo fabricante.

a.	1. <sup>a</sup> faixa	2. <sup>a</sup> faixa	3. <sup>a</sup> faixa	4. <sup>a</sup> faixa	5. <sup>a</sup> faixa
	Cinza	Vermelho	Preto	Dourado	Marrom
	8	2	0	$\pm 5\%$	1%

$82\ \Omega \pm 5\%$  (1% de confiabilidade)

Como 5% de  $82 = 4,10$ , a resistência do resistor precisa estar no intervalo  $82\ \Omega \pm 4,10\ \Omega$ , ou seja, *entre 77,90 e 86,10  $\Omega$* .

b.	1. <sup>a</sup> faixa	2. <sup>a</sup> faixa	3. <sup>a</sup> faixa	4. <sup>a</sup> faixa	5. <sup>a</sup> faixa
	Laranja	Branco	Dourado	Prateado	Nenhuma cor
	3	9	0.1	$\pm 10\%$	

$3,9\ \Omega \pm 10\% = 3,9 \pm 0,39\ \Omega$

O resistor precisa ter uma resistência *entre 3,51 e 4,29  $\Omega$* .

Seria de se esperar que os resistores fossem fabricados com valores como  $10\ \Omega$ ,  $20\ \Omega$ ,  $30\ \Omega$ ,  $40\ \Omega$ ,  $50\ \Omega$  e assim por diante. Entretanto, este não é caso para alguns valores comerciais típicos, como  $27\ \Omega$ ,  $56\ \Omega$  e  $68\ \Omega$ . Isto pode parecer estranho, mas há uma razão para os valores escolhidos, que fica mais bem ilustrada ao se examinar a lista dos valores dos resistores encontrados no comércio, que aparece na Tabela 3.8. Os valores em azul são encontrados com tolerâncias de 5%, 10% e 20%, o que os torna os mais comuns entre os disponíveis comercialmente. Os valores em negrito são encontrados com tolerâncias de 5% e 10% e os outros, em tipo normal, são encontrados somente com tole-

**Tabela 3.7**

*Código de cores para resistores*

Faixas 1-3		Faixa 3	Faixa 4		Faixa 5
0 Preto	0.1	Dourado	5% Ouro	1% Marrom	
1 Marrom	0.01	Prateado	10% Prata	0.1% Vermelho	
2 Vermelho			20% Nenhuma faixa	0.01% Laranja	
3 Laranja				0.001% Amarelo	
4 Amarelo					
5 Verde					
6 Azul					
7 Violeta					
8 Cinza					
9 Branco					

**Tabela 3.8**

Valores padrões dos resistores comerciais

Ohms ( $\Omega$ )					Kilohms (k $\Omega$ )		Megohms (M $\Omega$ )	
0,10	1,0	10	100	1.000	10	100	1,0	10,0
0,11	1,1	11	110	1.100	11	110	1,1	11,0
0,12	1,2	12	120	1.200	12	120	1,2	12,0
0,13	1,3	13	130	1.300	13	130	1,3	13,0
0,15	1,5	15	150	1.500	15	150	1,5	15,0
0,16	1,6	16	160	1.600	16	160	1,6	16,0
0,18	1,8	18	180	1.800	18	180	1,8	18,0
0,20	2,0	20	200	2.000	20	200	2,0	20,0
0,22	2,2	22	220	2.200	22	220	2,2	22,2
0,24	2,4	24	240	2.400	24	240	2,4	
0,27	2,7	27	270	2.700	27	270	2,7	
0,30	3,0	30	300	3.000	30	300	3,0	
0,33	3,3	33	330	3.300	33	330	3,3	
0,36	3,6	36	360	3.600	36	360	3,6	
0,39	3,9	39	390	3.900	39	390	3,9	
0,43	4,3	43	430	4.300	43	430	4,3	
0,47	4,7	47	470	4.700	47	470	4,7	
0,51	5,1	51	510	5.100	51	510	5,1	
0,56	5,6	56	560	5.600	56	560	5,6	
0,62	6,2	62	620	6.200	62	620	6,2	
0,68	6,8	68	680	6.800	68	680	6,8	
0,75	7,5	75	750	7.500	75	750	7,5	
0,82	8,2	82	820	8.200	82	820	8,2	
0,91	9,1	91	910	9.100	91	910	9,1	

**Tabela 3.9**

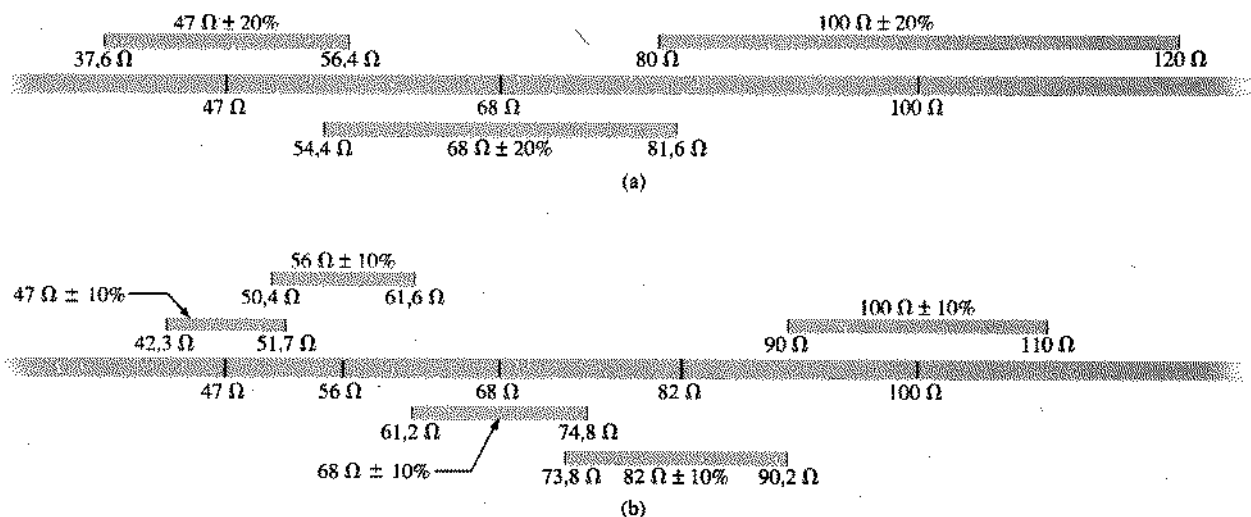
Valores padrões e suas tolerâncias

$\pm 5\%$	$\pm 10\%$	$\pm 20\%$
10	10	10
11		
12	12	
13		
15	15	15
16		
18	18	
20		
22	22	22
24		
27	27	
30		
33	33	33
36		
39	39	
43		
47	47	47
51		
56	56	
62		
68	68	68
75		
82	82	
91		

rância de 5%. Se separarmos os resistores listados por valores de tolerância, teremos a Tabela 3.9, que deixa claro que poucos valores de resistência até 100  $\Omega$  com tolerância de 20% podem ser encontrados comercialmente.

Uma análise do efeito do valor de tolerância irá nos ajudar a explicar a escolha dos valores comerciais. Observe a sequência 47  $\Omega$ -68  $\Omega$ -100  $\Omega$ , todos valores disponíveis com a tolerância de 20%. Na Fig. 3.31(a), as faixas de tolerância para esses valores foram calculadas e representadas graficamente. Note que, dentro desta tolerância (que é tudo que o fabricante garante), o intervalo de valores para as resistências dos resistores vai de 37,6

$\Omega$  a 120  $\Omega$ . Em outras palavras, o fabricante está cobrindo todo o intervalo, usando as tolerâncias para preencher os espaços vazios. Baixando o valor para 10%, aparecem os resistores de 56  $\Omega$  e 82  $\Omega$  para preencher os espaços, como visto na Fig. 3.31(b). Diminuindo a tolerância para 5%, precisaremos de novos valores de resistores para preencher os espaços. Os valores das resistências foram escolhidos portanto de forma a garantir que o intervalo inteiro fosse coberto. Naturalmente, se desejamos utilizar um valor específico e ele não é um dos valores comerciais, podemos usar combinações de valores comerciais e chegar a uma resistência equivalente muito próxima da desejada. Se este mé-



**Fig. 3.31** Garantindo toda a faixa de valores de resistência para uma tolerância dada: (a) 20%; (b) 10%.

todo for satisfatório, pode-se usar um potenciômetro para inserir um valor mais exato de resistência no circuito.

Nos exemplos deste livro, você encontrará muitos valores de resistores que não são comerciais. Isto foi feito para reduzir a complexidade matemática, que poderia obscurecer o procedimento ou a análise técnica apresentada. Nas seções de problemas, entretanto, são usados com frequência os valores comerciais para assegurar que o estudante comece a se familiarizar com esses valores.

### 3.9 CONDUTÂNCIA

Quando calculamos o inverso da resistência de um material, obtemos uma medida da facilidade com que o material conduz eletricidade. Esta grandeza é chamada de *condutância*, seu símbolo é  $G$ , e é medida em *siemens* (S) (veja Fig. 3.32). Em termos matemáticos, a condutância é definida por

$$G = \frac{1}{R} \quad (\text{siemens, S}) \quad (3.12)$$

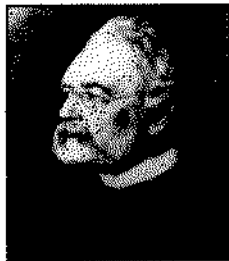
Uma resistência de  $1 \text{ M}\Omega$  é equivalente a uma condutância de  $10^{-6} \text{ S}$ , e uma resistência de  $10 \text{ }\Omega$  é equivalente a uma condutância de  $10^{-1} \text{ S}$ . Quanto maior a condutância, portanto, menor a resistência e maior a condutividade.

Em função das propriedades do material, a condutância é dada por

$$G = \frac{A}{\rho l} \quad (\text{S}) \quad (3.13)$$

o que mostra que ao aumentar a seção reta ou diminuir o comprimento ou a resistividade, estamos aumentando a condutância.

Alemanha (Lenthe, Berlin)  
(1816-1892)  
Engenheiro elétrico  
Fabricante de  
telégrafos;  
Siemens & Halske AG



Arquivos Bettman,  
Foto número 336.19

Desenvolveu um *processo de galvanoplastia* durante uma breve passagem pela prisão por ter sido padrinho em um duelo entre oficiais do exército da Prússia. Inspirado pelo telégrafo eletrônico inventado por Sir Charles Wheatstone em 1817, aperfeiçoou o projeto e começou a instalar, com a ajuda do irmão Carl, cabos através do Mediterrâneo e da Europa para a Índia. Suas invenções incluem o primeiro *gerador auto-excitado*, que utiliza o magnetismo *residual* de seu eletroímã ao invés de um ímã permanente, de baixa eficiência. Em 1888, ascendeu à nobreza e pôde acrescentar o *von* ao nome. A atual firma Siemens AG possui unidades de fabricação em mais de 35 países e escritórios de vendas em cerca de 125 países.

Fig. 3.32 Werner von Siemens.

**EXEMPLO 3.14** Qual a variação relativa da condutividade de um condutor se sua seção reta é reduzida em 30% e seu comprimento aumentado em 40%? A resistividade é mantida constante.

**Solução:** Eq. 3.11:

$$G_i = \frac{A_i}{\rho_i l_i}$$

com o índice  $i$  indicando o valor inicial. Usando o índice  $n$  para o novo valor:

$$G_n = \frac{A_n}{\rho_n l_n} = \frac{0,70 A_i}{\rho_i (1,4 l_i)} = \frac{0,70}{1,4} \frac{A_i}{\rho_i l_i} = \frac{0,70}{1,4} G_i$$

$$e \quad G_n = 0,5 G_i$$

### 3.10 MEDIDORES DE RESISTÊNCIA (OHMÍMETROS)

O *medidor de resistência* é um instrumento que tem, dentre outras, as seguintes funções:

1. medir a resistência de um elemento individual ou de elementos combinados;
2. detectar situações de “circuito aberto” (resistência alta) e de “curto-circuito” (resistência baixa);
3. verificar a continuidade das conexões de um circuito e identificar fios em um cabo múltiplo;
4. testar alguns dispositivos semicondutores (eletrônicos).

Na prática, os medidores de resistência mais usados são as partes para medir resistência dos multímetros analógicos e digitais. Os detalhes dos circuitos internos e os métodos de utilização do aparelho serão deixados para um futuro exercício de laboratório. Em geral, entretanto, a resistência de um resistor pode ser medida simplesmente conectando-se as duas extremidades do medidor às do resistor, como visto na Fig. 3.33. Não é preciso se preocupar com qual fio se conecta a qual extremidade; o resultado será o mesmo em ambos os casos pois os resistores oferecem a mesma resistência ao escoamento de carga (corrente) em qualquer sentido. Se for utilizado um multímetro analógico, o seletor deverá ser colocado na faixa de resistências adequada, e a leitura é feita em uma escala não-linear (normalmente a escala superior do medidor), que deve ser lida apropriadamente para se obter o valor da resistência. O MMD também necessita que se escolha a escala adequada para a resistência a ser medida, mas o resultado aparece como um número no mostrador do aparelho e o ponto decimal aparece automaticamente no local apropriado. Ao medir a resistência de um único resistor, em geral é aconselhável remover a resistência do circuito antes de fazer a medida. Se isto é difícil ou impossível, pelo menos uma extremidade do

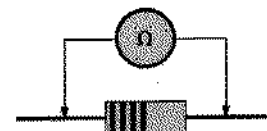


Fig. 3.33 Medindo a resistência de um elemento isolado.

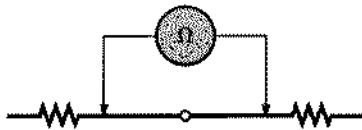


Fig. 3.34 Verificando a continuidade de uma conexão.

resistor deve ser desconectada do circuito para que a leitura não seja influenciada pelos outros componentes.

Se as duas pontas de prova estiverem se tocando com a chave seletora do medidor colocada na posição para medir resistências, a leitura resultante será zero. Uma conexão pode ser testada como vemos na Fig. 3.34 simplesmente ligando o ohmímetro aos dois lados da conexão. Se a resistência for zero, a conexão é segura. Se for diferente de zero, pode ser uma conexão fraca; se a resistência for infinita temos, é óbvio, um circuito aberto.

Se ambas as extremidades de um dos fios de um cabo forem conhecidas, as extremidades de um segundo podem ser identificadas como vemos na Fig. 3.35. Simplesmente conecte uma das extremidades do fio conhecido a uma extremidade de qualquer outro fio. Utilizando o ohmímetro do modo como indica a Fig. 3.35, quando o medidor indicar zero ohms (ou uma resistência muito baixa), a segunda extremidade do outro fio terá sido identificada. Esse procedimento pode ser usado também para identificar as extremidades do primeiro fio simplesmente encostando uma das pontas do medidor em uma extremidade de um fio qualquer e tocando todos os fios do outro extremo do cabo com a outra ponta de prova até que uma leitura de zero ohms seja obtida.

Medidas preliminares das condições de alguns dispositivos eletrônicos, tais como diodos e transistores, podem ser realizadas usando o medidor de resistência. Esse medidor pode ser usado também para identificar os terminais destes mesmos dispositivos.

Uma nota importante sobre o uso de qualquer medidor de resistência:

**Jamais conecte um medidor de resistência a um circuito energizado!**

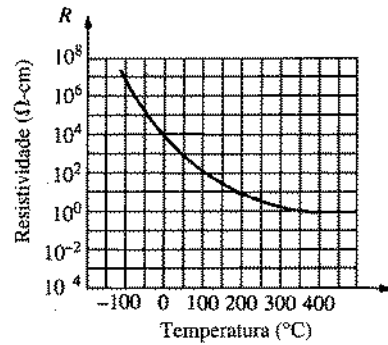
A leitura não fará sentido e você poderá danificar o instrumento. A parte de medição de resistência de qualquer medidor é projetada para fazer passar uma pequena corrente pela resistência a ser medida. Uma grande corrente externa pode danificar o mecanismo responsável pelo movimento do ponteiro e certamente irá prejudicar a calibragem do aparelho. Além disso,

**jamais guarde um multímetro com a chave posicionada para medidas de resistência.**

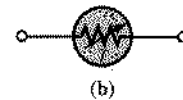
As duas pontas de prova do medidor podem se tocar, e a pequena corrente gerada pode descarregar a pilha do instrumento. Multímetros analógicos devem ser guardados com o seletor na maior escala de tensão; no caso dos multímetros digitais, a chave seletora deve estar na posição OFF (desligado).



Fig. 3.35 Identificando os fios de um cabo.



(a)



(b)

Fig. 3.36 Termistor: (a) característica; (b) símbolo.

### 3.11 TERMISTORES

Um *termistor* é um dispositivo semicondutor de dois terminais cuja resistência, como o nome sugere, é sensível a variações de temperatura. A curva característica típica de um termistor aparece na Fig. 3.36, juntamente com seu símbolo gráfico. Note a não-linearidade da curva e a queda na resistência de cerca de  $5.000 \Omega$  para  $100 \Omega$  quando a temperatura aumenta de  $20^\circ\text{C}$  para  $100^\circ\text{C}$ . A diminuição da resistência com o aumento da temperatura indica um coeficiente de temperatura negativo.

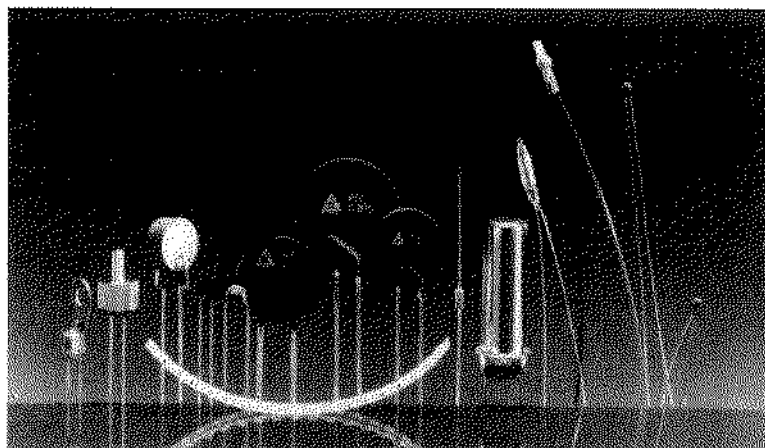
A temperatura do dispositivo pode ser modificada internamente ou externamente. Um aumento da corrente que passa através do dispositivo aumenta sua temperatura, causando queda da sua resistência. Qualquer fonte de calor externa aumenta sua temperatura e faz cair a resistência. Os dois tipos de ação (interna e externa) possibilitam o uso do termistor em sistemas de controle. Vários tipos de termistores são mostrados na Fig. 3.37. Os materiais utilizados na fabricação de termistores incluem óxidos de cobalto, níquel, estrôncio e manganês.

Note o uso de uma escala logarítmica (a ser discutida no Cap. 21) para o eixo vertical da Fig. 3.36. Essa escala permite representar um intervalo maior de valores de resistência específica do que seria possível em uma escala linear, como a do eixo horizontal. Observe que os valores passam de  $0,0001 \Omega\cdot\text{cm}$  para  $100.000.000 \Omega\cdot\text{cm}$  em um intervalo muito curto. A escala logarítmica é usada para os eixos vertical e horizontal na Fig. 3.38.

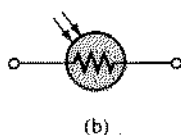
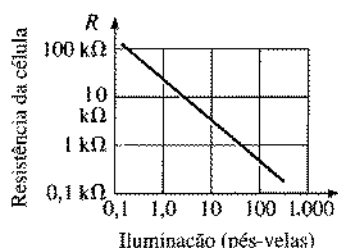
### 3.12 CÉLULA FOTOCONDUTORA

A *célula fotocondutora*\* é um dispositivo semicondutor de dois terminais cuja resistência é determinada pela intensidade da luz incidente em sua superfície. Quando a iluminação aumenta de intensidade, cresce o número de elétrons e átomos da superfície em níveis mais altos de energia, o que acarreta um aumento do número de "portadores livres" e uma correspondente queda na resistência. A curva característica típica de uma célula fotocondutora e sua representação gráfica aparecem na Fig. 3.38. Note o coeficiente de iluminação negativo (quanto maior a intensida-

\*Também conhecida como LDR (Light Detecting Resistance). (N.T.)



**Fig. 3.37** Termistores NTC (Negative Temperature Coefficient — Coeficiente de Temperatura Negativo) e PTC (Positive Temperature Coefficient — Coeficiente de Temperatura Positivo). (Cortesia da Siemens Components, Inc.)



**Fig. 3.38** Célula fotocondutora: (a) característica; (b) símbolo.

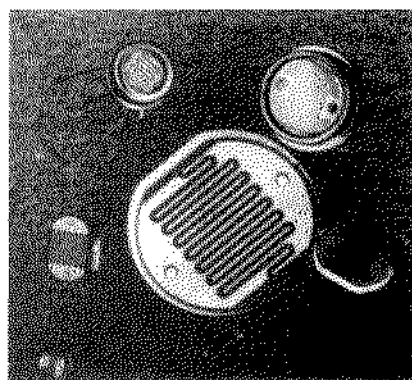
de luminosa, menor a resistência). Algumas células fotocondutoras de sulfeto de cádmio são vistas na Fig. 3.39.

### 3.13 VARISTORES

Varistores são resistores não-lineares cuja resistência depende da tensão aplicada. São usados para suprimir transientes de alta tensão, em outras palavras, suas características fazem com que limitem a tensão que pode aparecer entre os terminais de um dispositivo ou sistema sensível. A curva característica de um varistor típico aparece na Fig. 3.40(a), juntamente com a curva característica de um resistor linear, para fins de comparação. Note que para uma certa “tensão de disparo” a corrente cresce rapidamente mas a tensão é limitada a um valor um pouco abaixo desta tensão de disparo. Em outras palavras, a tensão entre os terminais deste dispositivo não pode exceder o valor definido por suas características. Através de técnicas adequadas de projeto o dispositivo pode, dessa maneira, limitar a tensão aplicada a partes delicadas de um circuito. A corrente é simplesmente limitada pelo circuito à qual está conectada. Alguns varistores comerciais aparecem na Fig. 3.40(b).

### 3.14 ANÁLISE COMPUTACIONAL

A introdução de elementos resistivos nos dá a chance de rever a notação em potências de 10. Praticamente todos os computado-



**Fig. 3.39** Células fotocondutoras. (Cortesia da EG&G VACTEC, Inc.)

res usam a notação em potências de 10, embora alguns especifiquem a notação científica, a vírgula decimal à direita do primeiro número inteiro entre 1 e 10 (como em  $5,67 \times 10^5$ ) e outros a notação de vírgula flutuante (a vírgula em qualquer posição, como em  $0,567 \times 10^6$  ou  $567,0 \times 10^3$ ). O PSpice e o BASIC usam a notação de vírgula flutuante; no C++ e no PASCAL, essa notação é opcional. Assim, você pode encontrar qualquer uma das seguintes formas para o número 1000 (usando a letra maiúscula E para designar a notação em potências de 10):

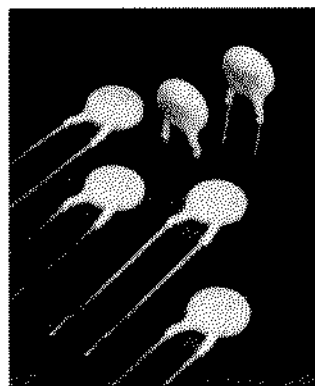
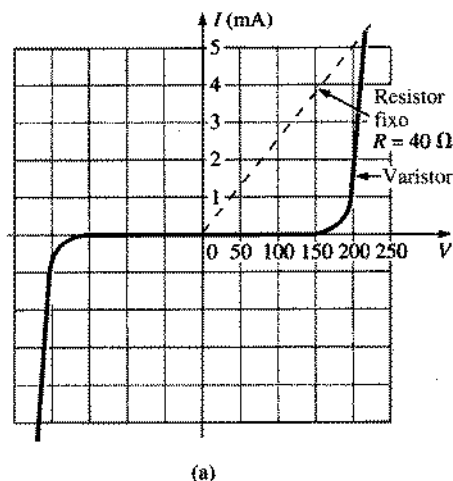
1000 1000,0 1E3 .001E6 0.1E4 10E2

Os números negativos são escritos com um sinal negativo à esquerda do primeiro algarismo.

### PSpice (DOS)

Em PSpice, são utilizados sufixos (letras que se seguem ao número) específicos para as potências de 10 mais utilizadas, como mostrado a seguir. Como estas letras maiúsculas são utilizadas para esta finalidade particular, você deve ter muito cuidado ao utilizá-las em outras aplicações.

F =  $10^{-15}$   
P =  $10^{-12}$   
N =  $10^{-9}$



(b)

Fig. 3.40 Varistores com tensão máxima entre 18 V e 615 V. (Cortesia da Philips Components, Inc.)

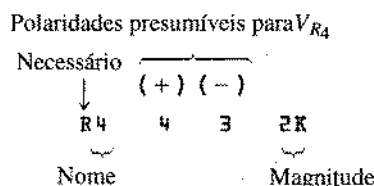
$$\begin{aligned} U &= 10^{-6} \\ M &= 10^{-3} \\ K &= 10^{-3} \\ \text{MEG} &= 10^6 \\ G &= 10^9 \\ T &= 10^{12} \end{aligned}$$

Usando a notação acima, os números seguintes são equivalentes:

2E6 2MEG 2E3K .002G 2000K

Note, em particular, que mili e mega são diferenciados pelo uso da letra maiúscula M para mili e das letras maiúsculas MEG para mega.

O formato para especificar um resistor de 2 k $\Omega$  é o seguinte:



A especificação é muito parecida com a de sua fonte de tensão, exceto pelo fato de que agora a primeira letra é um R maiúsculo. Em seguida vêm o nome do elemento, que pode conter letras e números, e a especificação dos nós entre os quais o resistor está ligado. Embora os resistores não tenham polaridade como as fonte de tensão contínua, a tensão entre os terminais do resistor tem uma certa polaridade. Na maioria dos casos a polaridade não é conhecida no momento em que o circuito é especificado, mas é feita uma suposição, que o resultado dos cálculos pode confirmar ou não. Para o resistor especificado acima supusemos que quando a tensão entre os terminais de R4 for determinada o nó 4 estará a um potencial mais elevado do que o nó 3. Se esta suposição estiver correta, o resultado será fornecido sem nenhum sinal; se a suposição estiver errada, o resultado será precedido por um sinal negativo. Não é necessário se preocupar com a polaridade ao entrar com os valores dos resistores. Faça as hipóteses a respeito das polaridades que lhe parecerem mais razoáveis e deixe que o computador determine se estão corretas.

## PSpice (Windows)

Quando usamos o PSpice para Windows, o resistor é colocado diretamente no diagrama esquemático e seus parâmetros são modificados clicando-se sobre o nome ou valor. Os resistores estão na biblioteca analog.slb e são chamados através da sequência **Draw-Get New Part-Browse-analog.slb-R-OK**. O resistor irá aparecer na tela e poderá ser movido com o mouse para qualquer local. Um clique no botão esquerdo do mouse fixa o resistor na posição escolhida, mas aparece outro resistor, que também pode ser movido com o mouse. Desta forma podem ser colocados vários resistores; quando todos estão nos seus devidos lugares, um clique no botão direito do mouse é usado para finalizar o processo. O nome e as características de cada um podem ser então modificados. Modificamos o nome dando um duplo clique no nome desejado e digitando o novo nome na janela **Edit Reference Designator**. Digitando R e OK, o novo nome é aplicado no esquema. Um clique adicional apaga os retângulos de definição no esquema. O valor pode ser modificado dando um duplo clique no valor desejado (por exemplo 1 k $\Omega$ ) e digitando o novo valor na janela **Set Attribute Value**. Digitando 2.2K-OK, teremos o resultado que aparece na Fig. 3.41: Se um resistor precisar ser movido, clica-se uma vez no resistor e depois clica-se novamente, mas desta vez mantém-se o botão apertado e “arrasta-se” o resistor até a posição desejada. Ao soltar o botão, o resistor permanecerá em sua nova localização.

## Linguagens de Programação (C++, BASIC, PASCAL etc.)

Como cada linguagem tem seu próprio formato para o elemento resistivo, ele será apresentado dentro do contexto de um programa.

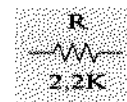


Fig. 3.41 Elemento resistivo no PSpice (Windows).

## PROBLEMAS

### SEÇÃO 3.2 Resistência: Fios Circulares

- Converta para mils:
  - 0,5 polegada
  - 0,01 polegada
  - 0,004 polegada
  - 1 polegada
  - 0,02 pé
  - 0,01 cm
- Calcule a área em mils circulares (CM) de fios com os seguintes diâmetros:
  - 0,050 polegada
  - 0,016 polegada
  - 0,30 polegada
  - 0,1 cm
  - 0,003 pé
  - 0,0042 m
- A área em mils circulares é
  - 1600 CM
  - 900 CM
  - 40.000 CM
  - 625 CM
  - 7,75 CM
  - 81 CM

Qual o diâmetro de cada fio, em polegadas?

- Qual a resistência de um fio de cobre de 200 pés de comprimento e 0,01 polegada de diâmetro ( $T = 20^\circ\text{C}$ )?
- Encontre a resistência de um fio de cobre com 50 jardas de comprimento e 0,0045 polegada de diâmetro ( $T = 20^\circ\text{C}$ ).
- Qual a área em mils circulares de um condutor de alumínio com 80 pés de comprimento e resistência de  $2,5\ \Omega$ ?
  - Qual o seu diâmetro em polegadas?
- Pretende-se fabricar um resistor de  $2,2\ \Omega$  com fio de nicromo. Se o fio disponível tem 1/32 polegada de diâmetro, qual o comprimento de fio necessário?
- Qual a área em mils circulares de um fio de cobre que possui resistência  $2,5\ \Omega$  e tem 300 pés de comprimento ( $T = 20^\circ\text{C}$ )?
  - Sem realizar nenhum cálculo, determine se a área de um fio de alumínio será maior ou menor que a do fio de cobre. Explique.
  - Repita (b) para um fio de prata.
- Na Fig. 3.42 são mostradas três peças feitas de diferentes materiais.
  - Sem realizar nenhum cálculo, determine qual das três peças deverá ter maior resistência. Explique como chegou a essa conclusão.
  - Calcule a resistência de cada peça e compare com o resultado de (a) ( $T = 20^\circ\text{C}$ ).

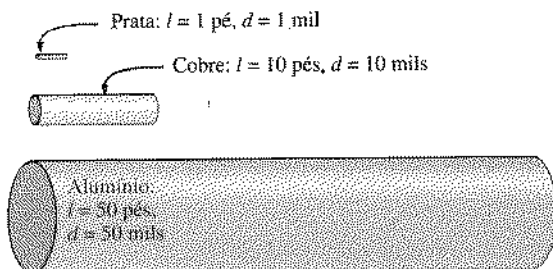


Fig. 3.42 Problema 9.

- Um fio de 1000 pés de comprimento tem uma resistência de  $0,5\ \text{k}\Omega$  e uma área de 94 CM. De que material é feito o fio ( $T = 20^\circ\text{C}$ )?
- Qual a resistência de uma barra de cobre com as dimensões mostradas na Fig. 3.43 ( $T = 20^\circ\text{C}$ )?
  - Repita (a) para o alumínio e compare os resultados.

- Sem realizar nenhum cálculo, determine se a resistência da barra (de alumínio ou cobre) irá aumentar ou diminuir com o aumento em seu comprimento. Explique sua resposta.
- Repita (c) para um aumento da seção reta.

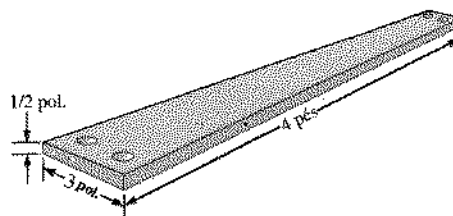


Fig. 3.43 Problema 11.

- Determine a resistência de um condutor de cobre se a sua seção reta é reduzida por um fator 4 e seu comprimento é duplicado. A resistência original era  $0,2\ \Omega$ . A temperatura permanece constante.
- Qual o novo valor de resistência de um fio de cobre se seu comprimento aumenta de 200 pés para 100 jardas, a área muda de 40.000 CM para  $0,04\ \text{pe}^2$  e a resistência original era  $518,5\ \text{m}\Omega$ ?

### SEÇÃO 3.3 Tabelas de Fios

- Usando a Tabela 3.2, encontre a resistência de 450 pés dos fios #11 e #14 AWG.
  - Compare as resistências dos dois fios.
  - Compare as seções retas dos dois fios.
- Usando a Tabela 3.2, encontre a resistência de 1800 pés dos fios #8 e #18 AWG.
  - Compare as resistências dos dois fios.
  - Compare as seções retas dos dois fios.
- Para o sistema da Fig. 3.44, a resistência de cada linha não pode exceder  $0,006\ \Omega$  e a corrente máxima consumida pelo receptor é 110 A. Que fio (AWG) deve ser usado?
  - Repita o item (a) para uma resistência máxima de  $0,003\ \Omega$ ,  $d = 30$  pés e uma corrente máxima de 110 A.

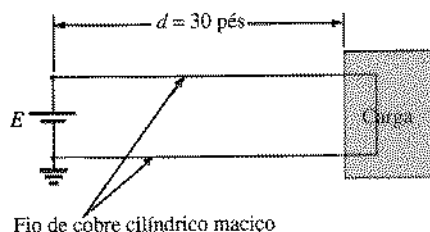


Fig. 3.44 Problema 16.

- A partir da Tabela 3.2, determine a corrente máxima permitida (A/CM) para um fio #0000 AWG.
  - Converta o resultado do item (a) para A/polegada<sup>2</sup>.
  - Usando o resultado do item (b), determine a seção reta necessária para transportar uma corrente de 5000 A.

### SEÇÃO 3.4 Resistência: Unidades Métricas

- Usando unidades métricas, determine o comprimento de um fio de cobre que possui resistência  $0,2\ \Omega$  e diâmetro 1/10 polegada.
- Repita o Problema 11 usando unidades métricas; em outras palavras, converta as dimensões fornecidas para unidades métricas antes de determinar a resistência.
- Se a resistência de uma amostra de óxido de estanho é  $100\ \Omega$ , qual a espessura da camada de óxido?
- Determine a largura de um resistor de carbono com uma resistência laminar igual a  $150\ \Omega$ , se seu comprimento é 1/2 polegada e sua resistência é  $500\ \Omega$ .

- \*22. Deduza o fator de conversão entre  $\rho(\text{CM} \cdot \Omega/\text{pé})$  e  $\rho(\Omega \cdot \text{cm})$
- Obtendo o valor de  $\rho$  para o fio da Fig. 3.45 em  $\text{CM} \cdot \Omega/\text{pé}$ .
  - Obtendo o valor de  $\rho$  para o mesmo fio em  $\Omega \cdot \text{cm}$ , depois de fazer as conversões necessárias.
  - Usando a equação  $\rho_s = k\rho_l$  para determinar o fator de conversão  $k$  se  $\rho_l$  é a solução da parte (a) e  $\rho_s$  é a solução da parte (b).

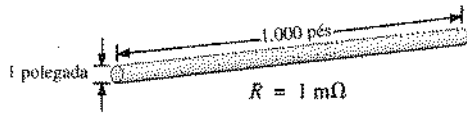


Fig. 3.45 Problema 22.

### SEÇÃO 3.5 Efeitos de Temperatura

- A resistência de um fio de cobre é  $2 \Omega$  a  $10^\circ\text{C}$ . Qual a sua resistência a  $60^\circ\text{C}$ ?
- A resistência de uma barra de alumínio é  $0,02 \Omega$  a  $0^\circ\text{C}$ . Qual a sua resistência a  $100^\circ\text{C}$ ?
- A resistência de um fio de cobre é  $4 \Omega$  a  $70^\circ\text{F}$ . Qual sua resistência a  $32^\circ\text{F}$ ?
- A resistência de fio de cobre é  $0,76 \Omega$  a  $30^\circ\text{C}$ . Qual sua resistência a  $-40^\circ\text{C}$ ?
- Se a resistência de um fio de cobre é  $0,04 \Omega$  a  $-30^\circ\text{C}$ , qual sua resistência a  $0^\circ\text{C}$ ?
- A resistência de um fio de cobre é  $0,002 \Omega$  à temperatura ambiente ( $68^\circ\text{F}$ ). Qual a sua resistência a  $32^\circ\text{F}$  (ponto de solidificação da água) e a  $212^\circ\text{F}$  (ponto de ebulição da água)?
  - Utilizando os dados do item (a), determine a variação da resistência para cada variação de  $10^\circ$  na temperatura, no intervalo entre a temperatura ambiente e  $212^\circ\text{F}$ .
- A resistência de um fio de cobre é  $0,92 \Omega$  a  $4^\circ\text{C}$ . Em que temperatura ( $^\circ\text{C}$ ) ela será de  $1,06 \Omega$ ?
  - Em que temperatura ela será de  $0,15 \Omega$ ?
- Se a resistência de 1000 pés de um fio de cobre é  $10 \Omega$  à temperatura ambiente ( $20^\circ\text{C}$ ), qual será sua resistência a  $50 \text{ K}$  (Kelvins)? Utilize a Eq. 3.6.
  - Repita o item (a) para uma temperatura de  $38,65 \text{ K}$ . Comente os resultados obtidos observando a curva da Fig. 3.14.
  - Qual é a temperatura do zero absoluto em graus Fahrenheit?
- Confirme o valor de  $\alpha_{20}$  para o cobre na Tabela 3.6 substituindo o valor da temperatura absoluta inferida na Eq. 3.7.
  - Usando a Eq. (3.8), encontre a temperatura na qual a resistência de um condutor de cobre será de  $1 \Omega$ , supondo que era de  $0,8 \Omega$  a  $20^\circ\text{C}$ .
- Usando a Eq. (3.8), encontre a resistência de um fio de cobre a  $16^\circ\text{C}$ , sabendo que sua resistência a  $20^\circ\text{C}$  é  $0,4 \Omega$ .
- Determine a resistência de uma mola de 1000 pés feita de fio de cobre #12 colocada no deserto à temperatura de  $115^\circ\text{F}$ .
- Um resistor de fio de  $22 \Omega$  possui um PPM de  $+200$  para o intervalo de  $-10^\circ\text{C}$  a  $+75^\circ\text{C}$ . Determine sua resistência a  $65^\circ\text{C}$ .
- Determine o PPM do resistor de carbono de  $10 \Omega$  da Fig. 3.21 usando o valor de resistência determinado a  $90^\circ\text{C}$ .

### SEÇÃO 3.6 Supercondutores

- Visite uma biblioteca e procure uma tabela com as temperaturas críticas de vários materiais. Encontre pelo menos cinco materiais cujas temperaturas críticas não foram mencionadas neste livro. Escolha alguns materiais com temperaturas críticas relativamente altas.
- Encontre pelo menos um artigo sobre aplicações da supercondutividade no setor comercial e escreva um pequeno resumo, incluindo todos os fatos e números interessantes.
- Usando um valor de densidade de corrente de  $1 \text{ MA}/\text{cm}^2$ , necessário para fabricação de circuitos integrados, qual seria a corrente

em um fio doméstico #12? Compare o resultado com o limite permitido da Tabela 3.2.

- \*39. Faça uma pesquisa sobre o detector de campo magnético SQUID e descreva seu modo básico de operação, além de uma ou duas aplicações.

### SEÇÃO 3.7 Tipos de Resistores

- Qual a diferença aproximada entre as dimensões de um resistor de carbono de  $1 \text{ W}$  e outro de  $2 \text{ W}$ ?
  - Qual é, aproximadamente, a diferença entre as dimensões de um resistor de carbono de  $1/2 \text{ W}$  e outro de  $2 \text{ W}$ ?
- Se o resistor de  $10 \text{ k}\Omega$  da Fig. 3.21 tem uma resistência de exatamente  $10 \text{ k}\Omega$  à temperatura ambiente, qual a sua resistência aproximada a  $-30^\circ\text{C}$  e a  $100^\circ\text{C}$  (ponto de ebulição da água)?
- Repita o Problema 41 para uma temperatura de  $120^\circ\text{F}$ .
- Se a resistência entre os terminais externos de um potenciômetro linear é  $10 \text{ k}\Omega$ , qual a resistência entre o contato deslizante (móvel) e um dos terminais externos, se a resistência entre o contato deslizante e o outro terminal externo é  $3,5 \text{ k}\Omega$ ?
- Se o cursor de um potenciômetro linear se deslocou de um quarto do seu deslocamento máximo, qual a resistência entre o cursor e cada um dos terminais se a resistência total é  $25 \text{ k}\Omega$ ?
- Desenhe as conexões necessárias para estabelecer uma resistência de  $4 \text{ k}\Omega$  entre o contato deslizante e um dos terminais externos de um potenciômetro de  $10 \text{ k}\Omega$ , mantendo ao mesmo tempo zero ohms entre o outro terminal externo e o contato móvel.

### SEÇÃO 3.8 Código de Cores e Valores dos Resistores

46. Determine os valores máximo e mínimo de resistência que os resistores com as faixas coloridas abaixo podem apresentar sem exceder a tolerância especificada pelo fabricante.

	1.ª faixa	2.ª faixa	3.ª faixa	4.ª faixa
a.	verde	azul	laranja	dourado
b.	vermelho	vermelho	marrom	prateado
c.	marrom	preto	preto	—

47. Encontre o código de cores para os seguintes resistores com tolerância de 10%:

- $220 \Omega$
- $4.700 \Omega$
- $68 \text{ k}\Omega$
- $9,1 \text{ M}\Omega$

48. Há uma superposição entre resistores com 20% de tolerância? Para responder a esta pergunta, determine o intervalo de tolerância para um resistor de  $10 \Omega$  de 20% e um resistor de  $20 \Omega$  de 20% e verifique se os dois intervalos de tolerância se superpõem.

49. Repita o Problema 48 para resistores de 10% de tolerância com resistências de  $10 \Omega$  e  $20 \Omega$ .

### SEÇÃO 3.9 Condutância

- Encontre a condutância de cada um dos resistores abaixo:
  - $0,086 \Omega$
  - $4 \text{ k}\Omega$
  - $2,2 \text{ M}\Omega$
- Encontre a condutância de um fio #18 AWG cujo comprimento é 1000 pés, supondo que ele é feito de
  - cobre
  - alumínio
  - ferro
- A condutância de um fio é  $100 \text{ S}$ . Se a seção reta do fio é aumentada em  $2/3$  e seu comprimento reduzido do mesmo fator, encontre a nova condutância do fio, sabendo que a temperatura permaneceu constante.

### SEÇÃO 3.10 Medidores de Resistência

53. Como você pode verificar o estado de um fusível utilizando um medidor de resistência?
54. Como você pode determinar os estados de "ligado" e "desligado" de uma chave usando um medidor de resistência?
55. Como você pode usar um medidor de resistência para verificar o estado de uma lâmpada incandescente?

### SEÇÃO 3.11 Termistores

- \*56. a. Determine a resistência de um termistor com as características da Fig. 3.36 a  $-50^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$  e  $200^{\circ}\text{C}$ . Note que a escala é logarítmica. Se necessário, consulte uma referência onde exista uma escala logarítmica expandida.
- b. O termistor tem um coeficiente de temperatura positivo ou negativo?
- c. O coeficiente é um valor fixo para o intervalo de  $-100^{\circ}\text{C}$  a  $400^{\circ}\text{C}$ ? Por quê?
- d. Qual a taxa de variação aproximada de  $\rho$  com a temperatura a  $100^{\circ}\text{C}$ ?

## GLOSSÁRIO

**Célula fotocondutora** Dispositivo semicondutor de dois terminais cuja resistência depende da intensidade da luz incidente em sua superfície exposta.

**Código de Cores** Sistema que utiliza faixas coloridas para indicar valores de resistência e tolerância dos resistores.

**Coefficiente de temperatura da resistência negativo** Valor que revela que a resistência do material irá diminuir com um aumento na temperatura.

**Condutância (G)** Uma indicação da facilidade com que uma corrente elétrica pode ser estabelecida em um material. É medida em siemens (S).

**Coefficiente de temperatura da resistência positivo** Valor que revela que a resistência do material irá aumentar com um aumento na temperatura.

**Efeito Cooper** O "emparelhamento" de elétrons enquanto se deslocam através de um meio.

**Efeito Meissner** Expulsão das linhas de campo magnético do interior de um material quando este se torna supercondutor.

**Medidor de Resistência (Ohmímetro)** Instrumento usado para medir valores de resistência.

**Mil Circular (CM)** A área da seção reta de um fio com um diâmetro de um mil.

**Ohm ( $\Omega$ )** A unidade de medida de resistência.

**Potenciômetro** Dispositivo de três terminais através do qual podem ser variados os níveis de potencial de modo linear ou não-linear.

**PPM/ $^{\circ}\text{C}$**  Sensibilidade à temperatura de um resistor em partes por milhão por grau Celsius.

### SEÇÃO 3.12 Célula Fotocondutora

- \*57. a. Usando as características da Fig. 3.38, determine a resistência de uma célula fotocondutora a 10 e 100 pés-velas. Como no Problema 56, note que a escala é logarítmica.
- b. A célula tem um coeficiente de iluminação positivo ou negativo?
- c. O coeficiente tem um valor fixo para o intervalo de 0,1 a 1000 pés-velas? Por quê?
- d. Qual a taxa de variação aproximada de  $R$  com a iluminação a 10 pés-velas?

### SEÇÃO 3.13 Varistores

58. a. Observando a Fig. 3.40(a), determine a tensão entre os terminais do dispositivo para correntes de 0,5; 1; 3 e 5 mA.
- b. Qual a variação total da tensão para o intervalo indicado de correntes?
- c. Compare a razão entre os valores de corrente máxima e mínima acima com a razão correspondente dos valores de tensão.

**Reostato** Elemento cuja resistência entre os terminais pode ser variada de modo linear ou não-linear.

**Resistência** Uma medida da oposição à passagem de cargas elétricas através de um material.

**Resistência laminar** Definida por  $\rho/d$ , para filmes finos e projeto de circuitos integrados.

**Resistividade ( $\rho$ )** Constante de proporcionalidade entre a resistência de um material e suas dimensões físicas.

**SQUID** Dispositivo supercondutor de interferência quântica (Superconducting QUantum Interference Device)

**Supercondutor** Condutor de carga elétrica que possui, para efeitos práticos, resistência zero.

**Temperatura absoluta inferida** Temperatura correspondente ao ponto em que uma aproximação linear para a curva de variação da resistência com a temperatura intercepta o eixo das temperaturas.

**Termistor** Dispositivo semicondutor de dois terminais cuja resistência é sensível à temperatura.

**Varistor** Resistor não-linear, com resistência dependente da tensão a ele aplicada, utilizado para suprimir transientes de alta tensão.

**Zero absoluto** Temperatura na qual não há vibração das moléculas:  $-273,15^{\circ}\text{C}$ .\*

\*Supondo válida a teoria cinética clássica. De acordo com a teoria quântica, aceita atualmente, mesmo a esta temperatura existem vibrações, chamadas *vibrações de ponto zero*. A existência destas vibrações causa efeitos mensuráveis. Ver, por exemplo, E. A. Power, *Introductory Quantum Electrodynamics*, Longmans, Londres, 1964, p. 31.(N.T.)