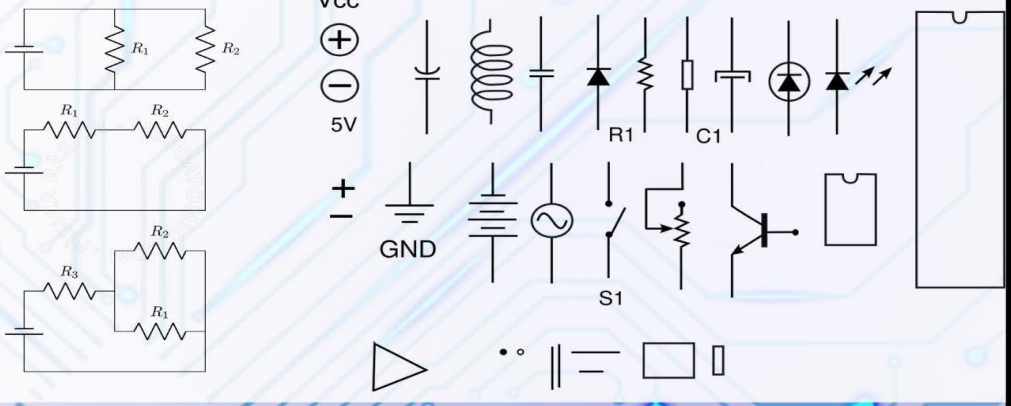
Dominando a Eletrônica



Dominando a Eletrônica

João Paulo Oliveira

Sumário

1 Introdução **1**
1.1 O dia-a-dia do curso . . . 2
1.1.1 O cronograma . . . 2
1.1.2 Os objetivos . . . 2
1.1.3 Técnicos e monitores . . . 3
1.1.4 Aos professores . . . 3
1.1.5 Aos alunos . . . 4

2 A arte de medir bem **5**

3 Primeiro contato com o laboratório **8**
3.1 Resistores . . . 8
3.1.1 A lei de Ohm . . . 9
3.1.2 A resistividade elétrica . . . 9
3.1.2.1 Demonstração: Lâmpadas incandescentes . . . 10
3.1.3 Associação de resistores . . . 11
3.1.4 A potência dissipada nos resistores . . . 11
3.1.5 A linearidade dos resistores . . . 12
3.1.5.1 A resistência dinâmica . . . 13
3.1.6 Resistores especiais . . . 14
3.1.6.1 Termo-resistências e termístores . . . 14
3.1.6.2 Foto-resistências . . . 14
3.1.6.3 Extensômetro elétrico de resistência . . . 15
3.1.6.4 Outros sensores resistivos . . . 15
3.1.6.5 Demonstração: A curva V vs I. . . . 15
3.2 Geradores de energia elétrica . . . 17
3.2.1 Baterias . . . 19
3.2.1.1 Demonstração: A pilha de Coca-Cola . . . 19
3.2.2 Fontes eletrônicas . . . 19
3.2.2.1 As fontes triplas . . . 21
3.2.2.2 Os limitadores de corrente e tensão . . . 22
3.2.3 Fonte de voltagem ou fonte de corrente? . . . 23
3.3 A placa de montagens e os circuitos . . . 24
3.3.1 Algumas convenções gráficas . . . 25
3.3.2 Contatos imediatos com a placa de montagem . . . 26
3.3.2.1 Prática: Sensor de luminosidade . . . 26
3.3.2.2 Prática: Sensor de umidade . . . 27
3.3.2.3 Outras utilidades do símbolo de terra . . . 27
3.4 O osciloscópio . . . 28
3.4.1 O sincronismo do osciloscópio . . . 29
3.4.2 As entradas do osciloscópio . . . 29

I Circuitos elétricos **34**

4 Análise dos circuitos de corrente contínua **35**
4.1 As leis de Kirchhoff . . . 35
4.2 A matemática dos circuitos de corrente contínua . . . 35
4.3 Os teoremas . . . 38
4.3.1 O princípio da superposição . . . 39

O teorema de Thévenin 41
O teorema de Norton 44
O teorema da máxima transferência de potência 45
Prática: Thévenin e transferência de potência 48
Resistência interna de baterias 49
Prática: Resistência interna de baterias 50
Impedância de saída e impedância de entrada 50
Capacitores 51
Associação de capacitores 51
Transientes 52

5 Corrente contínua e aplicações **54**
O divisor de tensão 54
Potenciômetros 55
O efeito da carga em um divisor de tensão 57
Prática: Divisores de tensão 58
A ponte de Wheatstone 59
Solução 1: aplicação direta das leis de Kirchhoff 60
Solução 2: teorema de Thévenin 60
Solução 3: método de Maxwell 61
Solução 4: conversão Δ-Y e Y-Δ 62
A ponte de Wheatstone como detector de nulo 63
Resistência dos resistores vs. temperatura 64
Prática: O detetor de nulo 65
Instrumentos de medida de corrente contínua 66
Galvanômetro d'Ansorval 67
Prática: Resistência interna de galvanômetros 68
O voltímetro 68
Prática: Resistência interna do voltímetro 69
O amperímetro 70
O ohmímetro 71
Projeto prático do ohmímetro 72
Prática: Construção de um ohmímetro 72
Cuidados especiais relativos ao uso do ohmímetro 72
Medida de resistências pelo método de Kelvin (4 pontas) 73
O certo e o errado 75
Prática: Análise de um multímetro analógico comercial 75

6 Corrente Alternada **77**
Sinais senoidais 77
A amplitude 77
Frequência e período 78
A fase 79
O valor RMS 80
A potência 82
Análise dos circuitos de corrente alternada senoidal 83
Circuito RC-série 83
Representação geométrica do circuito RC-série 85
Circuito RC-paralelo 86
Generalização do formalismo: números complexos 88
Um exemplo 91
Outro exemplo 91
Sinais periódicos não-senoidais 92
Análise espectral 94
Prática: Análise espectral através do osciloscópio digital 95
Circuitos diferenciadores 96
Prática 97

II Circuitos eletrônicos analógicos 98

7 Filtros RC passivos 99
7.1 A seletividade dos filtros . . . 100
7.2 Filtro RC passa-baixa . . . 101
7.2.1 Aproximação de Bode . . . 101
7.2.2 Prática: filtro passa-baixa . . . 103
7.2.3 Resposta melhor que 6 dB/oitava? . . . 104
7.2.4 Prática opcional: RC passa-baixa 12 dB/oitava . . . 106
7.3 Filtro RC passa-alta . . . 107
7.3.1 Prática: filtro passa-alta . . . 107
7.3.2 Controle AC-GND-DC dos osciloscópios . . . 107
7.3.3 Prática: Controle AC-GND-DC do osciloscópio . . . 108
7.4 Filtros RC passa-faixa (ou passa-banda) . . . 108
7.4.1 Prática opcional: filtro RC passa-faixa . . . 109
7.5 Acoplamento e desacoplamento de sinais AC e DC . . . 109
7.5.1 Prática: Capacitores de acoplamento . . . 112
7.6 Divisor de tensão compensado . . . 112
7.6.1 Prática: pontas de prova para osciloscópios . . . 114
7.6.1.1 Ponta de prova 1× . . . 114
7.6.1.2 Ponta de prova 10× . . . 115
7.6.1.3 Ponta de prova 10× compensada . . . 115
7.7 A ponte de Wien (e outros filtros passivos) . . . 117

8 Diodos 121
8.1 Os modelos . . . 121
8.1.1 O primeiro modelo . . . 122
8.1.2 O segundo modelo . . . 123
8.1.3 O terceiro modelo . . . 124
8.1.4 Análise matemática de um circuito simples . . . 125
8.1.5 A resistência dinâmica do diodo . . . 126
8.2 Características dos diodos reais . . . 128
8.2.1 Voltagem térmica . . . 128
8.2.2 Potência máxima . . . 129
8.2.3 Dependência com a temperatura . . . 130
8.2.4 Tensão de ruptura . . . 130
8.2.5 Prática: A curva característica do diodo . . . 130
8.3 Aplicações mais comuns dos diodos . . . 131
8.3.1 Prática: Retificador de meia onda . . . 131
8.3.2 Prática: Circuitos limitadores de tensão . . . 131
8.3.3 Prática: Portas lógicas . . . 133
8.3.4 Condicionamento de sinais (*wave shapping*) . . . 134
8.3.5 Chaveamento de cargas indutivas . . . 134
8.3.6 Prática: Filtros para corrente contínua . . . 135
8.3.7 Prática: Circuito grampeador . . . 135
8.3.8 Prática: Retificador duplicador de tensão . . . 136
8.4 O diodo Zener . . . 137
8.4.1 Prática: Referência de tensão . . . 138
8.4.2 Prática: Proteção contra sobre-voltagem . . . 138
8.5 Um diodo “iluminado”: o LED . . . 139
8.5.1 Prática: LED . . . 139
8.5.2 Demonstração: um LED em 220 Vrms . . . 140

9 Retificadores e reguladores de tensão 141
9.1 Retificador de meia onda . . . 141
9.2 Retificador de onda completa . . . 142
9.2.1 Vantagens e desvantagens do retificador em ponte . . . 143
9.2.2 Retificador de onda completa com 2 diodos . . . 144
9.3 Fontes de corrente contínua . . . 145
9.3.1 Prática: fonte de alimentação dc . . . 146
9.3.2 Prática opcional: fonte dc com retificador de meia onda . . . 147
9.3.3 Prática opcional: fonte dc com 2 diodos . . . 147

9.3.4 Prática: Reguladores de tensão ... 148
Regulagem Zener: um exemplo numérico ... 148
Regulador sem carga ... 150
Regulador carregado ... 150
Cálculo prático ... 151
Reguladores de tensão de três terminais ... 152
Prática: Regulador de 3 terminais ... 152
Fontes polifásicas ... 152
Fontes chaveadas ... 152

10 Transistores I **155**
Circuitos elétricos ou eletrônicos? ... 155
Caracterização de um transistor ... 158
Testando o transistor bipolar ... 158
Prática: teste do transistor ... 160
Princípios básicos ... 160
Conseqüências dos postulados básicos ... 162
Prática: Determinação de β ... 164
Regiões de operação de um transistor ... 164
Transistor em corte ... 165
Transistor ativo ... 165
Transistor saturado ... 166
Amplificadores lineares ... 166
Amplificador de emissor comum ... 167
Impedância de entrada do amplificador emissor comum ... 168
Impedância de saída do amplificador emissor comum ... 168
Amplificador seguidor de emissor ... 168
Conclusão ... 169
Circuitos de chaveamento ... 169
Prática: circuitos de chaveamento ... 169
Amplificador com acoplamento capacitivo ... 171
Prática: Amplificador de emissor comum acoplado ac ... 171
Prática: O seguidor de emissor acoplado ac ... 172
Transistor Darlington ... 172
Amplificador diferencial ... 173

11 Transistores II **175**
Foto-transistor ... 175
Prática: detetor de luz ... 175
Acoplador ótico ... 176
Prática: isolador ótico ... 178
Transistores de efeito de campo ... 179
Prática: características básicas do amplificador FET ... 181
Prática: chaves analógicas ... 181

12 Válvulas **183**
O efeito termoiônico ... 185
A lâmpada elétrica ... 185
O diodo ... 187
O triodo ... 188
Outros dispositivos a vácuo ... 191
Prática ... 191
Retificador de onda inteira ... 191
Amplificador linear ... 192

13 DIAC, SCR e TRIAC **194**

14 Amplificador Operacional I **195**
Características básicas de um amplificador operacional ... 196
As fontes de alimentação ... 196
Cuidado! ... 198
A "amplificação" do amplificador operacional ... 198
Comparadores sem realimentação ... 199
Prática: um comparador simples ... 200
Comparador com saída em coletor-aberto ... 200
Prática: Comparador do tipo janela ... 202
Prática: voltímetro de LEDs ... 202
Realimentação Negativa ... 203
Prática: amplificadores não inversores ... 205
Amplificadores inversores ... 206
Um modelo prático para a realimentação negativa ... 207
Prática opcional: amplificadores inversores ... 208
Realimentação Positiva ... 208
Comparadores com realimentação positiva ... 208
Prática: comparador com histerese ... 210
Prática: oscilador de relaxação ... 210

15 Amplificador Operacional II **214**
Oscilações espúrias ... 214
Novas definições para o ganho de um amplificador ... 215
Resposta em freqüência ... 216
Input Offset voltage ... 219
Slew rate ... 220
Prática: o *slew rate* de um amplificador ... 221
Impedância de saída ... 222
Prática: máxima corrente de saida de um 741 ... 222

16 Amplificador Operacional III **224**
Circuitos somadores ... 224
Prática: circuito somador ... 224
Prática: gerador de *offset* ... 225
Conversor digital-analógico ... 225
Conversor corrente-tensão ... 226
Prática 4: conversor corrente-tensão ... 227
Circuitos integradores ... 228
Prática: circuito integrador ... 229
Circuitos diferenciadores ... 229
Prática: circuito diferenciador ... 230
Prática: Ganho controlado por tensão ... 230
Defasadores ... 231
Prática: defasador ... 231
Acoplador ótico linear ... 232
Prática: acoplador ótico linear ... 233
Amplificador logarítmico ... 234
Detector de tensão de pico ... 234
Prática: Detetor de tensão de pico ... 235
Filtros ativos ... 235
Prática: filtro passa-baixa de segunda ordem ... 236
Prática: monitor de pulsação sanguínea ... 237

17 O temporizador 555 **240**
Prática: Oscilador aestável ... 243
Prática: Oscilador monoestável ... 244
Prática: Oscilador controlado por tensão ... 246

18 Eletrônica Digital **247**
Prática: Primeiros contatos ... 250
Prática 2: Lógica combinatória ... 250
Prática: Oscilador de áudio ... 251
Prática: *Flip-flop* R-S ... 252
Flip-flop RS síncrono ... 252
Prática: *Flip-flop* D ... 253

III Circuitos eletrônicos analógicos: Aplicações **254**

19 Amplificador Operacional IV **255**
Realimentação de amplificadores: conceitos gerais ... 255
A instabilidade ... 257
Osciladores com ponte de Wien ... 258
Prática: Oscilador com ponte de Wien sem controle automático de ganho ... 259
Prática: Oscilador com ponte de Wien com controle automático de ganho ... 260

20 Amplificadores diferencial e instrumental **261**
Amplificador diferencial ... 262
Prática: teste simples do amplificador diferencial ... 263
Precisão dos resistores de ganho ... 263
Impedância de entrada ... 264
Common-mode voltage ... 265
Prática: amplificador diferencial genérico ... 267
O amplificador instrumental ... 268
O eletrocardiógrafo ... 269
Prática: o eletrocardiógrafo ... 269

21 Ruído **274**
Ruido Gaussiano ... 274
A amplitude rms do ruído Gaussiano ... 274
Densidade espectral ... 275
Ruído Branco ... 275
Ruído Rosa ... 275
A unidade $\sqrt{\text{Hz}}$ ... 277
Ruídos em componentes eletrônicos ... 277
Ruido Johnson ... 278
Ruido em excesso ... 279
Ruido *shot* ... 280
Regra da adição de ruídos ... 281

22 Amplificador sensível à fase **282**
A ideia básica ... 283
Prática: uma balança sensível ... 286
A fase da referência ... 288
Demonstração: um *lock-in* analógico comercial ... 289

23 Phase locked loop : PLL **291**

24 Controlador PID **292**

A O efeito Seebeck e os termopares **293**
O efeito Seebeck ... 293
Prática: O efeito Seebeck ... 295
O termopar ... 295
Aferimento de termopares ... 297
Prática: O termopar ... 299
Outros efeitos termoelétricos ... 299

B O código de cores para resistores **301**

C Uma escala de valores para resistores **303**

D Logaritmos **306**

E O decibel **308**

F Atenuadores resistivos **313**
Divisor de tensão ... 313
Atenuadores π e T ... 314
Exercícios ... 316

G Ângulo de fase e figuras de Lissajous **317**

H Relações trigonométricas úteis **322**

I Nomenclatura e equivalência de componentes **323**

J Exercícios **324**
Capítulo 3 ... 324
Capítulo 4 ... 324
Capítulo 5 ... 327
Capítulo 6 ... 328

K Exercícios-2 **329**
Capítulo 10 ... 329
Capítulo 14 ... 329

Capítulo 1

Introdução

A importância da Eletrônica no desenvolvimento da nossa sociedade é evidente e a previsão é que novos e importantes avanços tecnológicos irão continuar influenciando o nosso dia-a-dia durante as próximas décadas. Isto implica que, tanto hoje quanto no futuro, qualquer profissional que desejar usar, entender e modificar o mundo em que vivemos necessitará de um amplo conhecimento das bases operacionais e científicas da nossa tecnologia moderna.

Por isso, é necessário que o estudante atual esteja familiarizado com a grande variedade de técnicas experimentais a fim de aprender a **comprar** e **utilizar** estas novas tecnologias de forma eficiente. Além disso, também é preciso aprender a **projetar** e **construir** equipamentos que não são produzidos comercialmente, mas que frequentemente se tornam indispensáveis para o trabalho científico inovador.

Neste aspecto é importante lembrar que, atualmente, o nosso ambiente de trabalho é tão efêmero que a cada dia os instrumentos, as metodologias e a tecnologia existentes se transformam de inovadoras a obsoletas. Um profissional atuante sente dificuldades em atualizar-se frequentemente e, é claro, somente aqueles com uma boa formação básica é que poderão ter êxito a mais longo prazo.

É neste contexto que este curso básico de Eletrônica está inserido. Entretanto, a área da Eletrônica é muito vasta e impossível de ser ensinada e aprendida em um curso de quatro meses, com quatro horas de aulas semanais. Consciente deste fato minha opção foi projetar um curso que fosse intermediário entre o chamado Física III (Eletricidade e Magnetismo) e os cursos mais avançados de microprocessadores e computadores.

Sendo assim, ênfase será dada à Eletrônica analógica e seus princípios básicos.

Vocês serão alertados oportunamente ao fato de que vários dos dispositivos eletrônicos utilizados neste curso já foram, há décadas, substituídos por outros mais precisos e eficientes. Este é o caso, por exemplo, do famoso e antigo amplificador operacional 741, cuja frequência de corte para ganho unitário é cerca de 1 MHz, enquanto que para outros operacionais mais modernos (como o LT1807 e OPA847) o mesmo parâmetro pode alcançar 1 GHz!

Apesar das vantagens evidentes de um componente classificado como *state of the art*, sua inserção nos circuitos eletrônicos requer projetos especiais, muita experiência e habilidade. Ao contrário, nossa experiência didática demostrou que os experimentos mais simples, com componentes que podem facilmente funcionar bem quando instalados pelo próprio aluno inexperiente em uma placa de montagem barata, são mais eficientes para o aprendizado dos conceitos básicos.

Este será o método que vamos utilizar ao longo do curso, optando sempre por exemplos e circuitos que, apesar de limitados, podem ser montados e analisados rapidamente pelo próprio aluno. Isto dá chances para que ele mesmo descubra as limitações destes pequenos projetos e proponha, com a ajuda do professor, soluções mais abrangentes.

A teoria envolvida na análise dos circuitos é fundamental e fizemos todo o possível para apresentá-la com um conteúdo facilmente digerível, atrelados ao desenrolar dos experimentos. Como consequência, nem toda a teoria será apresentada no quadro negro! Esperamos que os estudantes esforcem-se ao máximo para ler esta apostila com atenção e com antecedência, isto é, antes da respectiva aula prática.

Se houver dúvidas comuns à maioria, daremos explicações adicionais no quadro negro. Os alunos que optarem por solucionar as suas dúvidas diretamente com o professor (ou, monitores e técnicos) sintam-se a vontade para usar e abusar (somos pagos para ensinar!).

Isto também significa que NÃO daremos atenção à teoria física dos dispositivos semicondutores. A maioria dos alunos ainda não cursou disciplinas como “Mecânica Quântica” e “Estado Sólido”, fundamentais para o entendimento da questão; e, de fato, este aprendizado daria pouco suporte aos primeiros passos do aluno na área da Instrumentação Eletrônica, roubando-nos um tempo precioso.

Infelizmente, apesar deste texto já estar extenso, ele está incompleto. Falta elaborar ou, em alguns casos, apenas terminar de revisar vários capítulos adicionais. Alguns deles já podemos citar:

Capítulo 2

A arte da Medição

Em sua longa história, o homem sempre teve curiosidade em relação aos fenômenos naturais que observava ou contemplava. Além disso, em sua luta pela sobrevivência, também sentiu necessidade de entendê-los e tentar controlá-los. A princípio, frente à enorme complexidade do universo, explicações místicas foram criadas, não somente para entender e explicar o mundo que o cercava, como também para justificar os variados comportamentos individuais e sociais dos indivíduos. Deste modo, diversos deuses e heróis eram responsáveis por vários fenômenos naturais, tais como: ventos, inundações, o dia e a noite, o movimento dos astros, etc.

No entanto, à medida que os grupos ou sociedades foram se organizando e, paralelamente, ocorreu a divisão social do trabalho, surgiram novas necessidades e novos problemas, os quais deveriam ser resolvidos em prol da própria sobrevivência dos indivíduos do grupo. Essa tarefa sempre coube, naturalmente, aos indivíduos mais curiosos, irrequietos e inquiridores dos diversos agrupamentos humanos.

Possivelmente, além das necessidades primitivas de controlar rebanhos, cultivar plantios e construir moradias, as sociedades nascentes foram obrigadas a desenvolver as artes medicinais, a linguagem escrita, a astronomia, a geometria, a matemática e conhecimentos rudimentares de física. É provável que a necessidade de **medir** o tempo, **prever** enchentes e inundações, **programar** plantios, colheitas e armazenamento de alimentos para consumo em tempo de estiagem e guerras, **construir** habitações, templos, monumentos e cidades é que constituíram as principais alavancas daquele progresso cultural e científico.

Deste modo, o conceito intuitivo e prático do que seja uma grandeza e sua medida era inerente aos diversos ramos da ciência e da técnica dos diversos povos; e **a arte de medir bem** refletia, de certo modo, o avanço cultural de cada povo.

Assim, por exemplo, no antigo Egito, os agrimensores remarcavam os lotes de terras férteis anualmente inundadas pelo Nilo; seus engenheiros podiam avaliar as enchentes do Nilo, medindo periodicamente o nível de suas águas. Foram capazes de medir, com bastante precisão, distâncias e comprimentos, as superfícies de seus campos, áreas de figuras geométricas simples (triângulos, retângulos, etc.), volumes elementares (inclusive o da pirâmide truncada) e até mesmo chegar ao resultado relativamente exato de 3,16 para o valor de π. As pirâmides eram assentadas com tanta precisão que, apenas por fração de centímetro, suas bases deixavam de ser "quadrados perfeitos". Por exemplo, os terraços que serviam de fundação para a grande pirâmide de Quéops eram tão bem nivelados que peritos atuais (com instrumentos

modernos) constataram que o canto sudeste desta pirâmide está apenas pouco mais de um centímetro mais alto que o canto noroeste - isto para uma base cuja área é de 500.000 m^2 aproximadamente!

A necessidade de medir o tempo esteve sempre presente na vida dos povos. Igualmente importantes eram as comemorações religiosas e outras efemérides cívicas; como consequência, vários tipos de calendários foram criados. Enquanto vários povos mediterrâneos utilizavam calendários lunares, pouco satisfatórios, os egípcios tinham elaborado um calendário exequível, o calendário solar, com período anual de 365 dias e 6 horas, dividido em 12 meses; neste, posteriormente, se baseou o calendário romano e os de outros povos. Uma segunda contribuição dos egípcios foi a divisão do dia e da noite em 12 partes cada, e a medida das horas através de um relógio de água (a clepsidra). O relógio de água, ou variações do mesmo, permaneceu como o mais eficiente marcador de tempo até a invenção do relógio mecânico na Europa medieval.

O advento das grandes navegações durante o século XVIII trouxe grande estímulo à construção de relógios mais precisos em virtude do problema da determinação da longitude. A precisão de um cronômetro marítimo desenvolvido pelo inglês John Harrison em 1765, era da ordem de uma parte em 10^5 (um erro menor que 0.1 segundos por dia, durante 156 dias); essa precisão é comparável à de um moderno "relógio elétrico".

Somente no século passado é que foram desenvolvidos os relógios baseados em osciladores de quartzo (os mais sofisticados possuindo precisão de 1 parte em 10^8), bem como os relógios atômicos que utilizam como frequência padrão a frequência característica associada a uma radiação emitida por átomos de Césio 133. A precisão de um relógio deste tipo pode atingir aproximadamente 1 parte em 10^{12}; ou seja, 1 segundo em 30 000 anos! Com este tipo de relógio tornou-se fácil detectar irregularidades na rotação da Terra (da ordem de 1 parte em 10^8).

As medidas de distâncias ou comprimentos sofreram uma evolução histórica similar. Atualmente o padrão internacional para medidas de comprimento é simples, natural e indestrutível e está associado a uma grandeza física fundamental: o comprimento de onda de uma raia espectral de cor alaranjada do Kr^{86}. Em termos desse novo padrão, o comprimento correspondente a "1 metro" ficou definido como - 1 metro = 1 650 753.73 λ - onde λ é o comprimento de onda correspondente da raia laranja do Kr. Atualmente, com métodos óticos interferométricos, é possível medir-se comprimentos com precisão de 1 parte em 10^9.

De certo modo, pode-se dizer que, somente a partir de Galileu (1564-1642), a arte de medir adquire uma importância maior na formação de leis empíricas e físicas. Por exemplo, no campo da astronomia, Kepler (1571-1630) somente pôde formular suas leis do movimento planetário a partir das observações - altamente precisas na época - feitas por Tycho Brahe (1546-1601). Com essas medidas (por exemplo, ângulos com erro máximo de 4') estabeleceu-se definitivamente a validade do modelo heliocêntrico do sistema planetário. Um outro exemplo consiste na formulação, feita por Newton (1642-1727), das leis gerais do movimento e da teoria da gravitação, pilares fundamentais da mecânica clássica.

As leis básicas da mecânica de Newton ficaram consagradas não somente porque explicavam os dados experimentais obtidos por Brahe e Kepler, mas também porque, através delas, novos fenômenos puderam ser previstos e, posteriormente, comprovados pela experiência (isto é, através de medidas). Foi deste modo que Adams e Leverier, em 1846, constataram a existência do planeta Netuno.

Com o desenvolvimento acelerado do eletromagnetismo e da ótica a partir do século XIX e, mais recentemente, da física moderna, os cientistas e engenheiros se viram frente a um grande número de novas grandezas que deveriam ser medidas, o que lhes exigia novos métodos e, muitas vezes, grande precisão, muita tecnologia e altos custos financeiros.

Assim, desenvolveram-se áreas como a eletrônica, a óptica e diversas tecnologias para vácuo, baixas temperaturas e projetos mecânicos.

De particular interesse neste curso é a área da Eletrônica, cujo nascimento é frequentemente (e corretamente, em minha opinião) associado à invenção das **válvulas** (em inglês: *tubes*, *vacuum tubes* ou *electron tubes*), atribuída a J. A. Fleming em 1895 e Lee De Forest em 1906. As válvulas iniciaram uma nova era para a Eletricidade, através da invenção de uma aplicação revolucionária do conhecido "efeito Edison" descoberto pelo inventor americano Thomas Edison, a quem é creditada a invenção (ou o aperfeiçoamento) da lâmpada incandescente em 1879.

A válvula metabolizou a transição entre "circuitos elétricos" para "circuitos eletrônicos", iniciando-se assim uma nova era para a Ciência e Tecnologia. Foi através das válvulas que descobriu-se novos continentes no mundo da Eletricidade, dando um significado novo para a função de um circuito elétrico - uma maneira de controlar-se o fluxo de elétrons (ou a corrente) em um circuito através de um outro sinal elétrico - o que para nós hoje representa um **circuito eletrônico**.

Anos mais tarde, em meados do século passado, uma nova revolução tecnológica assolou não somente o meio científico como todos os ramos da sociedade gerando grande parte da tecnologia que hoje co-

nhecemos: foi a invenção dos dispositivos do estado sólido ou dispositivos semicondutores. Sem dúvida alguma, o conhecimento científico básico que tornou possível este avanço tecnológico sem precedentes foi o estabelecimento da Física Quântica no início do século passado, a qual fornecia o primeiro modelo teórico bem sucedido para o comportamento do mundo microscópico dos átomos e das moléculas.

Os dispositivos semicondutores, particularmente o **diodo** e o **transistor**, substituíram grande parte das válvulas permitindo a miniaturização da eletrônica e criando produtos como os computadores, equipamentos para diagnósticos e tratamento médicos, telefonia, equipamentos para comunicação em geral, os satélites, as viagens espaciais, etc. Não é necessário exemplificar em demasia pois o dia-a-dia do leitor já o fará.

Capítulo 3

Primeiro contato com o laboratório

Este capítulo está dedicado ao estudo de alguns conceitos, mais práticos do que teóricos, com o objetivo de facilitar o início dos trabalhos laboratoriais.

Assumo que vocês já cursaram outras disciplinas experimentais, em particular, a de Eletricidade Básica (provavelmente denominada de Laboratório de Física III) e portanto já devem estar familiarizados com uma parte dos assuntos que serão abordados aqui.

Nossa intenção não é repetir ou revisar mas sim complementar, e para isso é necessário passar a vocês alguns conhecimentos práticos que os farão sentir-se mais a vontade com os equipamentos utilizados e com as técnicas experimentais que aprenderão durante o curso.

O trabalho experimental envolvido neste capítulo consiste apenas de duas demonstrações a serem apresentadas pelo professor e de uma prática que vocês deverão realizar. Esta prática consiste na montagem de dois circuitos eletrônicos, cujo princípio teórico em que se baseia seu funcionamento não será explicado por enquanto. A intenção é que vocês percebam que **para montar-se um circuito eletrônico não é necessário saber eletrônica**.

Ao longo do curso vocês perceberão que montar um circuito é apenas a primeira fase de um árduo trabalho laboratorial pois, para familiarizar-se com as fases seguintes é necessário trabalhar muito mais (!) e, para isto, só tem um jeito: **começando!**

Resistores

Grande parte dos materiais com os quais temos contato diário são isolantes, pois seus elétrons estão firmemente presos aos átomos e impossibilitados de movimento translacional. Por outro lado, um material condutor é uma substância que possui, no seu interior, portadores de carga elétrica, também chamados de cargas livres, que podem se deslocar quando um campo elétrico é aplicado. Nos condutores metálicos como o cobre, bastante utilizado na fabricação de fios e conectores, as cargas livres são os elétrons (carga negativa).

Mas, não somente os metais são condutores elétricos. Em um material semicondutor, como os utilizados na construção de circuitos integrados, os portadores podem transportar tanto carga elétrica positiva quanto negativa. Em um eletrólito, comumente empregados nas baterias, os portadores são íons, tanto positivos (cátions) como negativos (ânions). Certos gases, sob certas condições, também podem apresentar condução iônica, sendo frequentemente utilizados nas lâmpadas de gás neônio e fluorescentes.

Outro tipo de condutor, que não se compra e não se vende, é denominado por “condutor ideal”.

No curso de Física III vocês devem ter aprendido que o valor do potencial elétrico é o mesmo em todos os pontos de um material condutor (carregado ou não). Em outras palavras, não há diferença de potencial entre dois pontos quaisquer do condutor. Isto é característico da situação de **equilíbrio** em que as cargas encontram-se em repouso. Para que haja movimento de cargas, isto é corrente, o potencial elétrico não pode ser constante, e sua variação espacial dará lugar a um campo elétrico $\vec{E}$, responsável pela força atuante nas cargas.

Uma força elétrica resultante, $\vec{F} = q\vec{E}$, atuando sobre cada carga q acelera-as continuamente. Nesta condição, imagina-se que a velocidade das cargas (e a corrente) aumentaria indefinidamente. Isso, porém, não ocorre normalmente nos condutores reais. Estes oferecem resistência ao movimento das cargas, comportando-se como um meio viscoso (dissipativo), onde a força de atrito viscoso se opõe e cancela a força aplicada às cargas. Dessa forma, para que se tenha uma corrente elétrica constante num segmento de condutor é necessário manter-se uma diferença de potencial constante entre as extremidades do mesmo.

Um condutor real é, na prática, chamado de **resistor**.

A lei de Ohm

A corrente em diversos condutores (ou resistores) reais pode ser proporcional à diferença de potencial aplicada nos seus terminais, denotados por A e B:

$$\Delta V = V_B - V_A = R\, I \tag{3.1}$$

A diferença de potencial mede-se em Volts e a corrente em Amperes. A constante de proporcionalidade, R, é chamada **resistência** do condutor entre os pontos A e B e mede-se em Ohms. A relação 3.1 é conhecida como a **lei de Ohm**.

A resistividade elétrica

Se o condutor é homogêneo e possui o formato de um cilindro de comprimento L e área transversal A, a resistência elétrica entre as duas faces vale:

$$R = \rho \frac{L}{A} \tag{3.2}$$

isto é, a resistência é proporcional ao comprimento do cilindro e à resistividade do material, ρ, mas inversamente proporcional à sua área. A resistividade ρ é característica de cada material; ela não depende das dimensões físicas do material. Por outro lado, dois resistores fabricados com o mesmo material, mas com dimensões diferentes podem ter valores de resistência também diferentes. Portanto, a resistência de um resistor não é somente definida pelo material. A resistividade do material, definida na equação 3.2, varia de um material para outro e esta variação é enorme, ordens de grandeza. A tabela 3.1 registra a resistividade a 20ºC de alguns materiais mais comuns.

Tabela 3.1: Resistividades (Ωm) e coeficientes de temperatura (K^{-1}) a 20ºC.

Material	Resistividade	Coeficientes de temperatura
Prata	1.59×10^{-8}	3.8×10^{-3}
Cobre	1.68×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Alumínio	2.82×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Tungstênio	5.60×10^{-8}	4.5×10^{-3}
Ferro	9.71×10^{-8}	5.0×10^{-3}
Chumbo	2.20×10^{-7}	3.9×10^{-3}
Constantan (Cu+Ni+Mn+Fe)	4.90×10^{-7}	1.0×10^{-5}
Carbono (aço 1010)	1.43×10^{-7}	
Aço inoxidável	6.90×10^{-7}	9.4×10^{-4}
Nichrome (Ni+Cr+Fe)	1.10×10^{-6}	4.0×10^{-4}
Carbono (amorfo)	$5 \times 10^{-4} - 8 \times 10^{-4}$	-5.0×10^{-4}
Germânio	4.40×10^{-1}	-4.8×10^{-2}
Silício	6.40×10^{-1}	-7.5×10^{-2}
Água potável	$2 \times 10^{1} - 2 \times 10^{3}$	
Água deionizada	1.8×10^{5}	
Vidro	$10^{11} - 10^{15}$	
Madeira (seca)	$10^{14} - 10^{16}$	
Teflon	$10^{23} - 10^{25}$	

A **resistividade elétrica** da maioria dos materiais depende da temperatura. Se a temperatura não varia muito em torno de uma dada temperatura de referência, T_o, pode-se fazer uma aproximação linear para expressar a resistividade em torno desta temperatura:

$$\rho(T) = \rho(T_o)\,[1 + \alpha\,(T - T_o)] \tag{3.3}$$

O parâmetro α é chamado de **coeficiente de temperatura** e tem a unidade de K^{-1}. Por causa da aproximação linear, o valor de α é diferente para diferentes regiões de temperatura. Quando a temperatura varia em uma faixa grande, a aproximação linear deixa de ser válida. A tabela 3.1 registra valores de α a 20ºC para alguns materiais. A condutividade do material, σ, é definida como sendo o inverso da resistividade:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \tag{3.4}$$

Toda a fiação elétrica de suas casas, assim como das cidades em geral, é feita através de fios de cobre de diferentes diâmetros. Através do conhecimento da resistividade do cobre (tabela 3.1) você pode calcular a resistência do fio de acordo com o seu diâmetro e comprimento. O diâmetro da área de seção reta do fio é identificado por um número, o **calibre**, sendo que os maiores calibres correspondem aos fios mais finos. Por exemplo, o fio 22 tem um diâmetro de 0.6438 mm enquanto que o calibre 4 tem diâmetro de 5.189 mm, se ambos estiverem a 20ºC. Os manuais registram também a resistência do fio, que normalmente está especificada nas unidades de Ohms/comprimento. A corrente máxima que cada fio pode suportar está especificada pelo fabricante, que deve respeitar as normas vigentes.

Um fator complicante na escolha do fio acontece quando o fio utilizado é muito longo. Neste caso, a sua resistência provoca uma queda na tensão elétrica. Quanto maior for o comprimento do condutor maior será a queda de tensão, isso devido ao aumento de resistência elétrica devido a quantidade maior de material utilizado para fazer maiores condutores. Este efeito é muito comum nas residências antigas, onde foi instalado um chuveiro moderno, por exemplo. Quando se liga o chuveiro a intensidade das lâmpadas diminui como consequência da diminuição da tensão.

Quando a queda de tensão no fio for excessiva, o fio vai se aquecer e, se exceder o seu limite, ele pode potencializar acidentes graves. De fato, esta é uma das causas comuns de incêndios provocados pela parte elétrica da construção. Portanto, o assunto pode se tornar um pouco complicado dependendo do projeto, por isso, para realizar projetos de instalações elétricas em sua casa aconselho você a consultar um especialista no assunto.

3.1.2.1 Demonstração: Lâmpadas incandescentes

Porque as lâmpadas incandescentes se queimam, quase sempre quando acendem?

Uma lâmpada incandescente utiliza como elemento principal um filamento de tungstênio. Este metal é utilizado por possuir uma temperatura de fusão bastante elevada. Por outro lado, a resistividade de um metal é uma função da temperatura. Esta é uma propriedade física dos materiais condutores.

O tungstênio é um condutor elétrico e a sua resistividade aumenta dramaticamente com o aumento da temperatura. Esta propriedade é comum à maioria dos metais a partir dos quais os cabos elétricos são feitos (por exemplo, o cobre).

Ora, sabe-se que, devido ao efeito Joule, a corrente que circula pelo condutor provoca necessariamente a liberação de energia na forma de calor, portanto, o calor liberado provoca a elevação da temperatura do componente e o consequente aumento da relação $R = V/I$. A fim de manter a temperatura constante é sempre possível extrair calor do componente através do emprego de dissipadores térmicos, porém, isto nem sempre é, ou pode ser, realizado.

Em muitos casos, o aumento na resistividade em função da temperatura é suficientemente pequeno e pode ser ignorado, mas, no caso de filamentos metálicos para lâmpadas o efeito não é desprezível. No momento em que a lâmpada é ligada ela ainda está fria e a sua resistência é baixa e, portanto, a corrente é alta. A partir daí, a corrente produz o aquecimento do filamento, o aumento da resistência e, portanto, a corrente diminui e se estabiliza quando a lâmpada entra em operação normal.

Assim, a corrente na lâmpada é maior no momento em que ela ligada do que quando ela entra no seu funcionamento normal. Este é o motivo pelo qual as lâmpadas incandescentes queimam mais frequentemente no momento em que são ligadas.

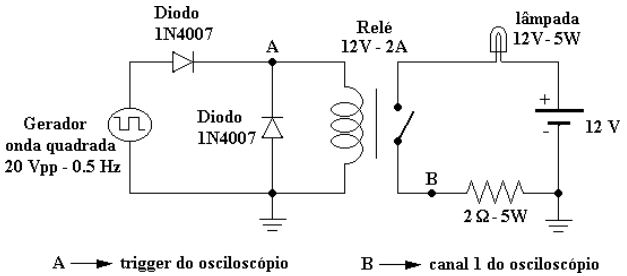


Figura 3.1: Esquema experimental para verificar a dependência da resistência de uma lâmpada incandescente com a temperatura.

O circuito da Figura 3.1 utiliza um oscilador de onda quadrada para chavear a corrente de uma lâmpada incandescente por meio de um relé eletromecânico. A corrente na lâmpada é proporcional

à diferença de potencial V_B nos terminais do resistor de 2 Ω, cuja dependência temporal é observada através de um osciloscópio. Para sincronizar a varredura do osciloscópio é utilizado como sinal de disparo a tensão de controle do relé V_A.

Associação de resistores

Se vários componentes elétricos, como no caso os resistores, são conectados de forma que a corrente seja a mesma em cada um deles, diz-se que eles formam um **circuito série**. Neste caso, a soma das tensões de cada resistor é igual à tensão da fonte, e a resistência equivalente do circuito é definida como:

$$R_s = R_1 + R_2 + \cdots + R_n \qquad \text{resistores em série} \tag{3.5}$$

Por outro lado, quando dois ou mais resistores estão conectados entre si tal que experimentam a mesma diferença de potencial, então dizemos que eles formam um **circuito paralelo**. Neste caso a soma das correntes é igual à corrente da fonte e a resistência equivalente é:

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n} \qquad \text{resistores em paralelo} \tag{3.6}$$

Os resistores serão os componentes mais utilizados neste curso e a maioria deles tem um formato cilíndrico (de 2-5mm de diâmetro e menos de 1cm de comprimento) com dois terminais elétricos, um em cada extremidade. O elemento resistivo, que na maioria dos casos utiliza-se carbono prensado na forma de um cilindro (de menor diâmetro), fica na parte interna do componente, entre os dois contatos, e é envolvido por uma camada de material isolante (vide a Figura B.1).

Outros tipos de resistores, projetados para finalidades especiais, podem ser constituídos por outros materiais resistivos e possuir outros formatos. Por exemplo, o elemento resistivo de resistores projetados para dissipar alta potência pode ser composto por um fio metálico.

Para a maioria dos resistores comuns, o seu valor nominal, assim como a tolerância (ou erro estimado) do seu valor nominal, são indicados por faixas coloridas. Para entender como esta codificação é feita, consulte o Apêndice B.

Um fato interessante e importante é que os valores nominais dos resistores seguem uma escala que, à primeira vista, é muito estranha. O Apêndice C explica esta observação com bastante detalhes.

A potência dissipada nos resistores

Os resistores comerciais mais utilizados nas diversas aplicações são aqueles com tolerância de±10% e com capacidade para dissipar 1/4 W (ou, 0.25 W = 250 mW) de potência. Os resistores capazes de dissipar uma potência muito maior que esta são normalmente construídos a partir de um fino fio metálico enrolado na forma de um pequeno solenoide envolto pela camada de material isolante.

Em qualquer caso, o importante é que você saiba que a especificação da capacidade para dissipação de potência é um dado que pode NÃO estar marcado no resistor. Quando o resistor é de carbono e projetado para dissipar uma potência maior que 1/4 W (normalmente, no máximo 2 W) ele é fisicamente maior, isto é, continua tendo a forma cilíndrica mas com maior diâmetro e maior comprimento. Então, será pelo tamanho (ou, volume) do resistor que você deverá se guiar para "adivinhar" a sua especificação térmica. Se você permanecer com dúvidas, pergunte a alguém mais experiente na área ou, simplesmente, assuma com uma grande margem de segurança que este dado é 1/4 W.

Vamos agora aproveitar o momento para aprendermos um pouco mais sobre a teoria envolvida. Se vocês ainda não estudaram em outros cursos, fiquem sabendo que a potência dissipada em qualquer componente elétrico pode ser determinada teoricamente através de argumentos fundamentais e resulta que ela não depende explicitamente das características físicas do componente. A potência elétrica dissipada na forma de calor em um componente qualquer de dois terminais vale:

$$P = V I, \tag{3.7}$$

onde V é a diferença de potencial entre os terminais e I é a corrente que flui entre eles.

Não se esqueçam desta equação! Ela é bastante geral e vai ser usada centenas de vezes ao longo deste curso e, provavelmente, milhares de vezes ao longo da sua vida.

Para exemplificar, considere um componente no qual a diferença de potencial (ou voltagem) é 0.5 V e a corrente é 1 mA. A potência dissipada vale $P = 0.5\text{x}1\text{x}10^{-3} = 0.0005$ W = 0.5 mW = 500 μW. Outro exemplo: uma bateria de força eletromotriz de 12 V, que está alimentando o circuito externo com uma corrente de 1 A, fornece uma potência de 12 W.

E tem mais! Uma vez especificada a voltagem e a corrente, a potência é sempre a mesma: não importa qual é o tipo de componente que estamos considerando. Por exemplo, um resistor sujeito a 0.5 V e 1 mA, dissipa a mesma potência que um diodo também sujeito a 0.5 V e 1 mA, isto é, 0.5 mW. Outro exemplo:

um resistor de carbono dissipa a mesma potência que um outro de fio metálico, se ambos estiverem sujeitos ao mesmo produto VI. Outro mais: um resistor que custa R$ 1.00 dissipa a mesma potência que um outro que custa US$ 100,000.00, se ambos estiverem sujeitos à mesma corrente e tensão. Esta definição de potência é bastante democrática, não acham?

Uma vez que o componente dissipa potência, com certeza, ele irá se aquecer. Você poderia perguntar: "Para uma dada potência térmica, qual seria a variação da temperatura do componente?"

Após raciocinar, chego à conclusão de que não é possível responder esta pergunta sem conhecer as características físicas do componente em questão. É conveniente lembrar que já estudamos na matéria "Termodinâmica" o seguinte conceito: a variação da temperatura de um objeto (em graus Kelvin por segundo) é proporcional à potência térmica a ele fornecida (em Watts, ou Joules por segundo), mas é inversamente proporcional à sua massa e ao seu calor específico. Além disso, parte da potência térmica dissipada no componente pode ser transferida ao meio ambiente por contato térmico ou convecção, processos estes que não contribuem para a elevação da sua temperatura. Por este motivo, os resistores fabricados para dissipar potências elevadas, são grandes (maior massa), encapsulados em material de alta capacidade térmica e, alguns, possuem dissipadores térmicos incorporados na sua estrutura.

No caso de **resistores**, nos quais se aplica a lei de Ohm, a Equação 3.7 é normalmente escrita de outras maneiras:

$$P = VI = (RI)I = RI^2 = V\frac{V}{R} = \frac{V^2}{R}, \tag{3.8}$$

A linearidade dos resistores

A lei de Ohm é uma relação matemática simples e muito utilizada no projeto e análise dos circuitos eletrônicos. Portanto, para que ela venha ser aplicada corretamente, é necessário compreender muito bem quais são as suas limitações.

A popularidade da lei de Ohm provém do fato de que ela é aproximadamente válida para vários materiais, ou seja, materiais cuja resistividade não varia (ou varia muito pouco) com a corrente e diferença de potencial aplicadas. Quando a relação $R = V/I$ é constante, dizemos que o resistor "obedece à lei de Ohm".

A expressão aqui utilizada, entre aspas, é muito comum no jargão da Eletrônica, por isso, a seguir vou explicar porque coloquei as aspas.

Quando dizemos que um certo resistor obedece à lei de Ohm fica implícito que estamos insinuando que existem resistores que não obedecem a esta mesma lei. De fato, resistores desobedientes existem aos montes.

Também, deste comentário tem-se a falsa impressão de que existe algo muito errado com os outros resistores que não obedecem a esta lei. Entretanto, fiquem vocês sabendo que um resistor desobediente não deve ser encarado como um componente defeituoso, ou mal projetado, muito menos como um elemento indesejado. Muito pelo contrário, na maioria dos casos eles são fabricados para terem esta propriedade, pois, estranhamente ou não, ela é em parte responsável pela enorme diversidade de circuitos eletrônicos e suas aplicações. Quase sempre, a não linearidade entre V e I é inerente ao material e processos a partir do qual o resistor é construído.

No cenário da Eletrônica os resistores obedientes representam exceções.

Pergunta: sendo que a "lei de Ohm" não é válida para **todos** os resistores porque ela conquistou o direito de assumir o *status* de lei?

Confesso que a minha vontade seria responder a esta pergunta da mesma maneira que o faria um amigo meu que não vou dizer o nome. Ele responderia assim: *"That's a good question! Very interesting! Next question, please ..."*

Sabe-se que no estudo da Física costuma-se testar uma dada teoria exaustivamente e, normalmente, somente após a teoria ter sido testada e verificada através de muitos experimentos (experimentos estes que podem ser **experimentais** ou **teóricos**), ela se transforma em uma lei. A definição do que é uma lei, ou uma teoria, ou até mesmo uma simples regra particular, tem por trás de si um conceito preciso inserido na nomenclatura científica.

Entretanto, estas denominações são quase sempre utilizadas imprecisamente pelos cientistas. Com relação a este fato posso citar alguns exemplos. A lei de Ohm para a eletricidade é verificada somente em algumas situações - para uma classe limitada de materiais - e sob condições ambientais especiais. As leis de Newton para a dinâmica foram corrigidas pela teoria da relatividade, o que aqui demonstra uma outra inconsistência na nomenclatura pois, a teoria de Newton que não é completamente geral é denominada de lei, enquanto que a teoria da relatividade, que foi desenvolvida para ampliar a abrangência das leis de Newton, é denominada de teoria. As leis do eletromagnetismo, que não precisaram ser alteradas depois da descoberta da teoria da relatividade, são chamadas simplesmente de "Equações de Maxwell".

Concluímos um fato óbvio: a tradição histórica (que vai muito além da importância deste curso) prevalece sobre a nomenclatura utilizada na Física.

Bom, vamos mudar o rumo desta prosa! Os materiais que obedecem à lei de Ohm são chamados de "ôhmicos" e, naturalmente, os "não-ôhmicos" são aqueles para os quais a lei de Ohm não é válida. No caso destes últimos, a relação entre a diferença de potencial entre os terminais do componente e a corrente que o atravessa não é linear. Por isso, eles são também chamados de resistores não-lineares.

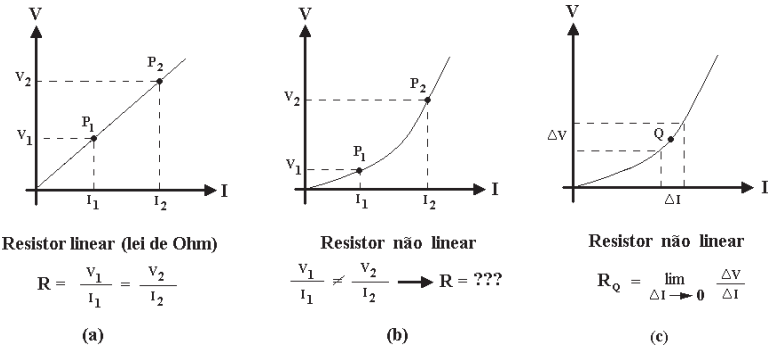


Figura 3.2: Curva *V* vs *I* e o "ponto de operação *Q*".

A Figura 3.2(a) ilustra o conceito de linearidade. No caso (a) a relação *V*/*I* assume valores iguais em qualquer ponto de operação do resistor, seja este ponto coincidente aos assinalados P_1 e P_2, assim como em qualquer outro. De fato, no caso (a) a relação *V*/*I* é constante ao longo de toda a curva *V* vs *I*. Por isso, o parâmetro $R = V/I$ tem um significado prático importante: ele é igual ao coeficiente angular da reta *V* versus *I*.

Na situação esquematizada na Figura 3.2(b) a situação é outra: a relação *V*/*I* não é linear, ou seja, o gráfico *V* versus *I* não é uma reta. Este fato também tem implicações importantes. Sendo que o valor da relação *V*/*I* varia ao longo da curva *V* vs *I*, ela perde o seu significado prático que tinha antes - de representar inequivocamente um coeficiente angular associado à função *V* versus *I*. Assim, esta ambiguidade impede que o resistor seja caracterizado através de um único parâmetro: a sua resistência.

Explicando melhor, imagine que através de um resistor não linear passa uma corrente de 1 A quando a diferença de potencial aplicada entre os seus terminais é de 10 V. Neste caso, logo completaríamos : a relação *V*/*I* seria igual a R=10V/1A = 10 Ω. Bom, em seguida, alteramos o valor da diferença de potencial aplicada para 20 V e a corrente aumenta de fato, mas para somente 1.6 A. Concluímos então, que no ponto de operação V = 20 V a resistência vale R = 20V/1.6A = 12.5 Ω.

Portanto, a resistência deste resistor é algo que muda conforme o valor da voltagem (ou corrente) aplicada é alterada. E daí, qual é a graça? Que utilidade possui um parâmetro como este? A prática diz que a utilidade deste conceito ingênuo da resistência é: quase nenhuma!

A resistência dinâmica

No casos dos dispositivos não lineares a lei de Ohm pode ser **generalizada** através da definição da chamada "resistência dinâmica".

A resistência dinâmica pode possuir um valor diferente em cada ponto da curva *V* vs *I* e é calculada, por exemplo naquele ponto *Q* que está assinalado na Figura 3.2(c), através de um incremento de tensão e corrente em torno deste dado ponto. Verifiquem vocês que este conceito associado a variações diferenciais é bem diferente da definição estática da relação corrente/tensão envolvida na lei de Ohm enunciada anteriormente.

Ao longo deste curso veremos que esta tal denominação - "ponto *Q*" - será utilizada inúmeras vezes. Esta particular letra do alfabeto representa o que grande parte dos livros textos denomina de *Quiescent operating point* (em inglês, é claro!).

Imagine que através de um resistor não linear passa uma corrente de 1 A quando a diferença de potencial aplicada entre os seus terminais é de 10 V. Assim, a relação *V*/*I* seria igual a 10V/1A = 10 Ω. Imagine agora que a voltagem aplicada varie por uma quantidade ΔV = 10 mV em torno do valor estabelecido em 10 V (isto é, a voltagem varia entre 9.995 V a 10.005 V em torno do ponto *Q*) e que isto produza uma variação na corrente correspondente a ΔI = 100 mA (ou seja, a corrente varia entre

0.99995 A a 1.00005 A em torno do ponto Q). Neste caso, a resistência dinâmica no ponto Q valeria $R_Q = \Delta V/\Delta I = 10\text{x}10^{-3}/100\text{x}10^{-6} = 100\ \Omega$.

Então, veja bem! Neste particular ponto de operação, a resistência dinâmica é bem maior que a resistência estática, o que reflete o fato de que a inclinação da curva V vs I (ou, matematicamente falando, a sua derivada) está aumentando com o aumento da tensão. Neste exemplo particular a inclinação aumentou, mas, em outro poderia diminuir. Cada dispositivo eletrônico de dois terminais possui a sua própria curva V vs I. Muitas vezes, o conhecimento desta curva (ou matematicamente falando, a função V vs I) será, feliz ou infelizmente, irrelevante; o que interessará será apenas o valor da sua resistência dinâmica no ponto de operação do dispositivo no circuito. Este é o motivo que justifica a importância deste conceito.

A partir do que discutimos já podemos definir a resistência dinâmica de uma maneira mais precisa:

$$R_Q = \lim_{\Delta I \to 0} \left. \frac{\Delta V}{\Delta I} \right|_Q = \left. \frac{dV}{dI} \right|_Q, \tag{3.9}$$

mas, lembre-se que a derivada deve ser calculada no ponto de operação Q.

Se, do que eu disse, você pouco entendeu, não se preocupe. Até o final deste curso você vai entender, eu prometo!

Resistores especiais

A seguir, vamos enumerar alguns resistores especiais largamente utilizados em eletrônica. Alguns possuem uma relação V/I não-linear e, em geral, apresentam dependência do valor de sua resistência elétrica com parâmetros externos, como, temperatura, luminosidade, pressão, etc. Existem até resistores com resistência dinâmica negativa! Por isso, eles são largamente utilizados como transdutores.

Termo-resistências e termístores

As termo-resistências e os termístores são componentes de dois terminais projetados para exibir uma variação do valor nominal de sua resistência em função da temperatura. A distinção entre termo-resistência e termístor está associada ao tipo de material utilizado na sua construção.

Assim, as termo-resistências, que em língua inglesa se designam por *resistance temperature detectors*, RTD, utilizam materiais condutores como a platina, o cobre ou o níquel. Os termístores (*thermal resistors*) utilizam misturas de cerâmicas de óxidos semicondutores, para produzir resistências com coeficiente de temperatura negativo (*negative temperature coefficient*, NTC), e positivo (*positive temperature coefficient*, PTC).

As termo-resistências e os termístores são amplamente utilizados como sondas de temperatura em aplicações industriais, em aparelhagem médica, em eletrodomésticos, em instrumentação para investigação científica, em telecomunicações, em aplicações militares, etc.

Em algumas aplicações destinam-se a medir valores absolutos de temperaturas não muito elevadas, como é o caso das aplicações médicas, ao passo que noutras, como as aplicações industriais, podem destinar-se a medir temperaturas de vários milhares de kelvin.

Foto-resistências

As foto-resistências são componentes de circuito cujo valor nominal da resistência elétrica é função da intensidade da radiação eletromagnética incidente (em língua inglesa são designadas pela sigla LDR, *light dependent resistors*).

As foto-resistências são geralmente construídas com base em materiais semicondutores, sobretudo silício, germânio, arsênio, telúrio e compostos de cádmio e de chumbo, todos eles materiais para os quais a densidade de portadores livres na banda de condução é uma função, entre outras, da intensidade e do comprimento de onda dos fótons incidentes.

Em materiais como o silício, a incidência de fótons com comprimento de onda $\lambda = 1.1\ \mu$m conduz à geração de pares elétron-buraco, isto é, induz a passagem de elétrons da banda de valência para a banda de condução, deixando atrás de si buracos. Assim, uma vez que a resistividade de um material é uma função decrescente da densidade de portadores livres disponíveis, neste caso função seja da densidade de elétrons livres na banda de condução, seja da densidade de buracos na banda de valência, conclui-se ser negativo o coeficiente de luminosidade deste tipo de resistências.

Por outro lado, materiais como o germânio e o arsenieto de índio apresentam maior sensibilidade à radiação de comprimento de onda $\lambda = 1.85\ \mu$m e $\lambda = 3.54\ \mu$m, respectivamente, sendo as diferenças função apenas da maior ou menor amplitude das respectivas bandas proibidas. Atualmente existem no mercado foto-resistências que cobrem as faixas de radiação eletromagnética infra-vermelha, visível e ultra-violeta.

As foto-resistências são amplamente utilizadas em aplicações industriais, de instrumentação e militares, como indicadores de nível em reservatórios de líquidos, sistemas de alarme e de controle à distância, etc. A variação da resistividade com a intensidade luminosa segue uma lei aproximadamente exponencial, sendo comum encontrar foto-resistências cujo valor nominal da resistência elétrica pode variar por um fator 100 numa faixa de intensidades luminosas compreendidas entre 5 e 104 lux.

Extensômetro elétrico de resistência

O nome em inglês pelo qual este dispositivo é conhecido é *strain-gage*. Ele é extremamente popular para a medida de tensão ou deformação mecânica sob a qual estão submetidos os materiais de uma estrutura mecânica qualquer.

Os *strain-gage* são constituídos por resistores de filme fino colados, ou depositados, na superfície de um material isolante como o papel, material cerâmico ou filmes plásticos. O dispositivo é então fixado na superfície da peça em que vai se medir a deformação, de forma que ambos, resistor e peça tenham a mesma deformação. O princípio de funcionamento baseia-se no princípio de que a uma pequena deformação (ϵ) de um material condutor elétrico provoca uma variação proporcional na sua resistência elétrica: $\Delta R/R \propto \epsilon$.

Mais adiante utilizaremos estes dispositivos em um capítulo especial e, assim, deixaremos para mais tarde uma discussão mais detalhada.

Outros sensores resistivos

Além das aplicações apresentadas anteriormente, a resistividade dos materiais pode ser utilizada para detectar a presença ou a variação de uma ampla quantidade de grandezas, como por exemplo, o campo magnético, a pressão ou aceleração, certos agentes químicos como a umidade, o monóxido de carbono, o fumo de tabaco, etc.

Uma das classes mais importantes de sensores resistivos são as **magneto-resistências**. Estes sensores são componentes de circuito nos quais o valor nominal da resistência elétrica é uma função da intensidade do campo magnético no qual se encontram imersas. As magneto-resistências baseiam o seu princípio de funcionamento na interação existente entre o campo magnético e o fluxo de corrente elétrica, que se manifesta através da força de Lorentz.

As magneto-resistências são utilizadas na construção de cabeças de leitura de fitas e discos magnéticos, para aplicações de áudio e vídeo, memorização de informação em sistemas de computadores, identificação de padrões em cartões magnéticos, instrumentação e equipamento de controle, etc.

Um outro conjunto de sensores resistivos de grande utilidade prática é baseado na **piezo-resistência**. A piezo-resistividade é a propriedade dos materiais que caracteriza a dependência da resistividade elétrica com a deformação mecânica. Esta propriedade tem como causas, entre outras, a variação da mobilidade e da densidade de cargas livres nos materiais, sendo esta última devida em particular à dependência da amplitude da banda proibida com o esforço mecânico.

Apesar da piezo-resistividade ser uma propriedade comum a todos os materiais, ela é mais notória nos semicondutores como o silício e o germânio, em cujo caso o coeficiente de variação da resistência elétrica é, regra geral, negativo.

As piezo-resistências são utilizadas na construção de microfones e de detectores de aceleração, como é o caso dos *airbag* dos automóveis e dos sensores de fluxo em dutos de líquidos ou gases. Devido à compatibilidade tecnológica com a eletrônica de silício, os sensores de pressão são passíveis de integração conjunta com os circuitos eletrônicos de revelação e processamento de sinal, permitindo, assim, realizar numa única pastilha sistemas complexos que incluem as funções dos transdutores, de revelação e de processamento da informação.

Existe ainda um vasto conjunto de sensores resistivos designados por **químio-resistências**. Em todos estes componentes, a resistividade é uma função da concentração de agentes químicos presentes no ambiente em que se encontram imersas. As químio-resistências são utilizadas na medição da umidade relativa do ar, em cujo caso são mais propriamente designadas por higro-resistências, mas também na detecção de gases como o monóxidode carbono, o hidrogênio, o etanol, o metano, o fumo de cigarro, etc.

As químio-resistências são em geral construídas a partir da deposição de um óxido metálico num material inerte - como o óxido de silício, mas também a partir de certos cristais orgânicos ou polímeros condutores. Em geral, estes tipos de resistências apresentam um coeficiente de variação negativo.

Demonstração: A curva V vs I.

A montagem seguinte utiliza-se de um transformador para reduzir a amplitude da tensão alternada da rede de 220 Vrms para 12 Vrms. A saída do transformador é conectada a um circuito série formado por um resistor R e o componente Z que se deseja conhecer a curva V vs I. Um osciloscópio é utilizado para

medir as diferenças de potencial no resistor e no componente Z. Devido à alta resistência das entradas do osciloscópio, a corrente I flui somente através do secundário do transformador e do circuito série R-Z.

Os terminais do resistor R estão conectados no canal 1 do osciloscópio, enquanto que os terminais do dispositivo Z estão conectados no canal 2 do osciloscópio. No modo de operação X-Y o ponto luminoso na tela do osciloscópio executa um movimento cuja coordenada X é proporcional à diferença de potencial na entrada 1 e coordenada Y proporcional à entrada 2. Desta forma, o ponto luminoso descreve uma trajetória que corresponde ao gráfico de V_Z (vertical-Y) versus V_R (horizontal-X). Mas, pela lei de Ohm, a voltagem no resistor R é proporcional à corrente I, portanto, o gráfico resultante pode ser analisado como V_Z versus I.

Esta montagem pode ser utilizada para visualizar a curva V_Z versus I de diversos componentes eletrônicos. Para otimizar o valor da corrente em cada caso, é necessário escolher apropriadamente o valor do resistor R.

Utilizaremos no lugar de Z vários componentes: o velho conhecido resistor, assim como, serão também apresentados outros desconhecidos: termo-resistor, LDR, diodo, LED e o transistor. O objetivo da prática não é entender o princípio de funcionamento de cada um deles, mas sim, apenas ter um primeiro contato com o laboratório, equipamento de medida e os componentes eletrônicos que lhes acompanharão nesta jornada. Espero que entre eles e vocês surja uma relação mística de amizade e companheirismo. Se por acaso pintar um clima de "amor a primeira vista" deixem rolar. Isto poderá lhes garantir uma boa nota no final do curso.

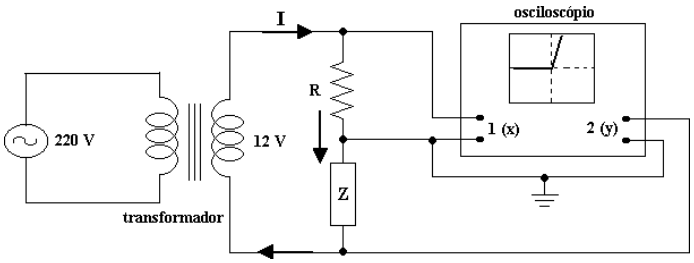


Figura 3.3: Esquema experimental utilizado para observar a curva V vs I de diversos componentes eletrônicos.

1. Resistor

Aqui, utilizaremos um simples resistor de valor 10 kΩ no lugar do componente genérico Z. Utilize também R = 10kΩ. Observe na tela do osciloscópio a dependência linear entre V_Z e I. A configuração do osciloscópio pode ser a seguinte:

modo horizontal X-Y; 5 V/div; CH2 invert; entradas DC.

2. Termo-resistor

No lugar do componente genérico Z, vamos utilizar um resistor termicamente sensível. Antes de conectá-lo no circuito meça a sua resistência na temperatura ambiente utilizando um ohmímetro. Aqueça o resistor e meça novamente a resistência. Este sensor térmico é do tipo NTC ou PTC? Conecte o termo-resistor no circuito e observe que a dependência entre V_Z e I é linear. Aqueça e esfrie o termo-resistor e observe o que ocorre com a inclinação da curva V_Z vs I.

3. LDR

No lugar do componente genérico Z, vamos utilizar um resistor sensível à luz, o LDR. Antes de conectá-lo no circuito meça a sua resistência na presença da luminosidade ambiente, com um ohmímetro. Direcione o sensor para uma lâmpada acesa e depois o cubra com a mão e descreva o que ocorre. Qual os valores de resistência no claro e no escuro? Conecte o termo-resistor no circuito e observe que a dependência entre V_Z e I é linear. Altere a luminosidade incidente e observe o que ocorre.

4. Diodo

Altere o resistor R para 1kΩ e conecte um diodo 1N4007 no lugar de Z. Aumente a sensibilidade do canal Y para 0.2 V/div. Observe que não há corrente quando o diodo está polarizado

reversamente. Com polarização direta o diodo conduz, entretanto a relação entre V_{diodo} e I não é linear. Observe que quando o diodo está conduzindo a diferença de potencial nos seus terminais é cerca de 0.5 V. Verifique se esta tensão varia quando o diodo é aquecido.

Experimente os outros diodos que estão sobre a bancada de trabalho. Eles são diodos especiais do tipo Zener, com tensões de ruptura de 5.1V e 3.3 V. Observe a curva característica destes diodos Zener, muito úteis no projeto de circuitos eletrônicos.

5. Diodo emissor de luz, LED

Quando uma corrente elétrica flui através do LED (*light emitting diode*) ocorre emissão de luz, cuja intensidade está relacionada com a quantidade de corrente. O LED é frequentemente utilizado como um indicador luminoso, sendo bem mais eficiente que as lâmpadas incandescentes.

Com R = 1kΩ, e a sensibilidade do canal Y em 1 V/div, verifique o funcionamento do LED. Observe que não há corrente quando o LED está polarizado reversamente. Com polarização direta o LED conduz, entretanto a relação entre V_{LED} e I não é linear. Observe que quando o LED está conduzindo a diferença de potencial nos seus terminais é de cerca de 2.0 V.

6. Transistor

Você não precisa saber o que é um transistor. A única coisa necessária é saber que o transistor é um dispositivo de 3 terminais (denominados de base, coletor e emissor). Com R = 1 kΩ, e a sensibilidade do canal Y em 1V/div, conecte o transistor através de dois de seus terminais. Observe que a relação entre V_{trans} e I não é linear. Inverta a ordem dos terminais, assim como teste os outros dois pares de terminais.

Geradores de energia elétrica

Os **geradores** de energia elétrica são os responsáveis pela circulação de uma corrente elétrica através de um circuito, seja ela constante ou dependente do tempo. Quando uma corrente atravessa um componente eletrônico qualquer, por exemplo um resistor, um transistor ou um circuito integrado, a energia é dissipada em diversas formas: calor, som, onda eletromagnética, movimento mecânico, etc. Então, se não houver reposição da energia que foi transferida a outros processos, a corrente elétrica tende a diminuir com o tempo.

Então, fica aqui a pergunta: quem é o responsável para zerar a contabilidade: energia produzida vs. trabalho executado?

O dispositivo capaz de repor a energia elétrica dissipada é chamado de **gerador** ou **fonte de alimentação**.

A **força eletromotriz** do gerador, ou a "**fem**", é normalmente designada pelo símbolo ε embora muitas vezes, e por simples abuso de linguagem, utiliza-se também o símbolo genérico V para denotar esta mesma grandeza.

No nosso dia-a-dia utilizamos diversos tipos de geradores; por exemplo, a energia utilizada para acender as lâmpadas elétricas da sua residência é proveniente de geradores de eletricidade - usinas hidroelétricas, nucleares, termoelétricas, etc. Portanto, estas **usinas** são geradores de eletricidade. A parte elétrica do seu automovel é alimentada por uma **bateria**, que também pode ser considerada um gerador de eletricidade. Uma bateria também alimenta o seu *notebook*, enquanto que utiliza-se **pilhas** para gerar eletricidade em brinquedos, controles remotos, na *bios* do seu computador e em muitos outros dispositivos.

Entretanto, observem que muitas residências possuem aquecimento de água a gás e, neste caso, a queima do gás representa um gerador térmico e não elétrico. Outras residências podem aquecer a água através de métodos alternativos, tal como o bastante comum "aquecimento solar", métodos estes que nada têm a ver com a energia elétrica.

Você já deve ter notado que em poucos parágrafos eu introduzi vários termos técnicos - fontes de energia, fontes de alimentação, geradores, usinas, baterias e pilhas - todos empregados para significar o mesmo tipo de dispositivo. Eu só estou preocupado com a aparente redundância de termos porque sei que outros mais ainda virão!

Para resumir pergunto: quem é quem e para que serve cada um destes geradores?

Em primeiro lugar, bateria é o mesmo que pilha. Ambas são construídas a partir de uma associação série e paralelo de células eletroquímicas - sua força eletromotriz é constante no sentido que, quando um resistor é conectado entre os terminais de uma pilha ou bateria, a corrente produzida é contínua, isto é, constante ao longo do tempo (desde que, é claro, este "tempo", não seja maior do que a vida útil do dispositivo).

Continuando, o nome "gerador" refere-se normalmente a dispositivos em que a força eletromotriz é dependente do tempo, sendo que os geradores de corrente alternada são os mais comuns. Esta definição

não é geral porque em muitos textos observa-se o emprego do termo "gerador de corrente contínua". Por isso, é sempre melhor especificar o tipo do gerador que está sendo utilizado.

Quando um resistor é conectado entre os terminais de um gerador de corrente alternada, a corrente produzida é alternada. Aprenderemos o significado e implicações da corrente alternada em um capítulo adiante, mas já podemos adiantar que "alternar" significa alterar periodicamente o sentido da corrente.

Muito utilizados em eletrônica são os geradores de corrente alternada senoidal, quadrada e triangular. Estes também recebem na gíria o nome de **geradores de onda** ou **geradores de sinal** do tipo senoidal, quadrado ou triangular.

Neste contexto, a usina hidroelétrica de Itaipu, assim como a termonuclear de Angra dos Reis, são **geradores de onda senoidal de alta potência**.

Entretanto, existem geradores que não são alternados e nem contínuos, ou melhor, são os dois ao mesmo tempo, por exemplo, os **geradores de pulsos**.

Estão vendo? Se não é fácil para explicar, imaginem para entender! Somente a prática vai esclarecer esta confusão. [1]

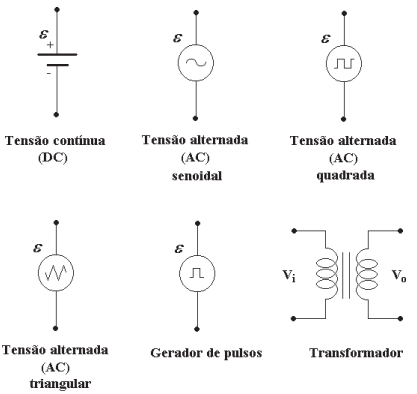


Figura 3.4: Símbolos mais comuns utilizados para representar os dispositivos que produzem ou transformam a energia elétrica.

A grande diversidade de designações recebidas pelos dispositivos que produzem a corrente elétrica deve-se também a outros aspectos. Vou inventar aqui uma definição.

Eu diria que existem os **produtores de energia autônomos** e aqueles que são **transformadores** ou **modificadores** da energia elétrica.

Eu diria que uma bateria é autônoma porque ela não precisa de mais nada pois, por si só, ela é capaz de produzir uma corrente elétrica através de um resistor qualquer conectado entre seus terminais. Assim, as baterias são fontes de energia independentes, ou autônomas.

Com este mesmo raciocínio poderíamos dizer que a usina de Itaipu também é autônoma. É claro que ela depende que a incidência das chuvas mantenha um nível mínimo de água represada mas, imaginando que a barragem já está cheia: ela não precisa de mais nada.

Sobre a sua bancada de trabalho você vai encontrar alguns instrumentos que são **geradores eletrônicos** - estes serão os mais utilizados neste curso mas NÃO são fontes de energia independentes, isto é, eles NÃO produzem energia.

Estes geradores são instrumentos eletrônicos que utilizam a energia proveniente da rede elétrica e a direciona ao circuito que está conectado entre os seus terminais de saída. Não são autônomos pois, se não forem ligados na tomada da rede alternada local (127/220 Volts) eles gerarão absolutamente nada! Sendo instrumentos eletrônicos eles são mais versáteis, podendo transmitir corrente contínua ou alternada em uma vasta faixa de frequências, assim como controlar o fornecimento de energia e, em eventuais acidentes, protegem o circuito externo contra sobre-carga, ou, se protegem contra um curto-circuito na carga.

Um componente que você vai encontrar por aí é chamado simplesmente de **transformador**. O transformador que mais utilizaremos neste curso transforma a tensão alternada das tomadas de força do laboratório (127 Vrms ou 220 Vrms senoidal e frequência de 60 Hz) em tensão também senoidal e de mesma frequência, mas de amplitude menor (6 Vrms ou 12 Vrms senoidal). Ele é um componente pequeno, de baixo custo, constituído por uma bobina enrolada em um núcleo de ferro laminado e com derivações elétricas apropriadamente projetadas.

Em geral, um transformador pode ser utilizado para diversas finalidades. Este assunto vai ser abordado futuramente com maiores detalhes mas podemos adiantar algumas delas: abaixar a tensão (como mencionado no parágrafo anterior), elevar a tensão e "casar" impedâncias.

De particular interesse neste capítulo é o que denominaremos daqui por diante de **fonte de alimentação** ou **fonte de tensão**. As fontes de alimentação são instrumentos que geram **corrente contínua** e as que mais utilizaremos neste curso serão as baterias e as fontes de alimentação eletrônicas. A respeito destas fontes vamos aprofundar um pouco mais a discussão a seguir.

[1] Não me confundam com um amigo meu que, ao discutir religião numa mesa de bar, contra-argumentou com a seguinte explicação esclarecedora: "Os três profetas ... eram ... dois: ... Isaú."

Baterias

Um tipo de célula eletroquímica denominada **célula galvânica** é popularmente chamada de pilha ou bateria. Nelas, a energia é produzida a partir de uma reação química espontânea e, por isso, são fontes de energia independentes que não precisam estar conectadas na rede elétrica a fim de disponibilizar potência.

Atualmente, o desenvolvimento das baterias é um desafio assumido por cientistas de diversas áreas do conhecimento que buscam otimizar suas características visando diversas aplicações.

Na prática, o mais comum é que uma pilha corresponda a uma coleção de várias células conectadas em série (e em paralelo) de tal forma que a força eletromotriz (e corrente) total gerada pela bateria é igual à soma das voltagens (e correntes) individuais de cada uma das células. A partir deste papo dá para entender de onde vem o apelido "pilha"?

Em geral, uma célula galvânica consiste de dois **eletrodos** que são os condutores metálicos que estabelecem o contato elétrico com o **eletrólito**. O eletrólito é um meio condutor iônico constituído de uma solução aquosa de um composto iônico. O processo de oxidação ocorre em um dos eletrodos, ânodo (-), e a espécie oxidada perde elétrons para o eletrodo. A redução ocorre no outro eletrodo, cátodo (+), onde a espécie que sofre redução coleta os elétrons do eletrodo.

Podemos imaginar a reação total como elétrons sendo empurrados para um eletrodo e puxados do outro eletrodo. Este processo de empurra-puxa resulta em um fluxo de elétrons no circuito externo que une os dois eletrodos. Com este arranjo, a energia produzida pela reação espontânea pode ser usada para realizar trabalho ou simplesmente ser dissipada como calor.

Demonstração: A pilha de Coca-Cola

Esta é uma demonstração simples que exige apenas duas placas metálicas, uma de cobre e outra de zinco, um LED e um recipiente com Coca-Cola. No lugar da Coca-Cola, qualquer outro refrigerante ácido (e quase todos o são) poderia ser utilizado.

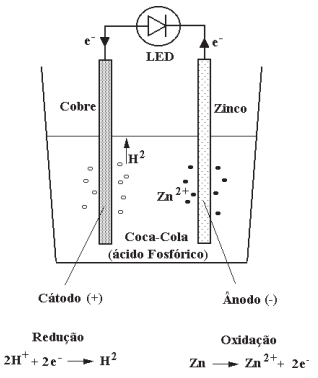


Figura 3.5: A pilha de Coca-Cola.

Para verificar-se a formação de uma bateria, os metais podem conectados a uma lâmpada de 1.5 V e submersos no líquido. A lâmpada deve acender fracamente. Na nossa montagem (vide Figura 3.5) preferimos utilizar um LED no lugar da lâmpada e, como o LED somente acende sob uma diferença de potencial maior (2 V), duas células devem ser conectadas em série.

O ácido fosfórico contido na Coca-Cola faz a função de eletrólito, isto é, de ser quimicamente ativo no processo. Para demonstrações mais analíticas, é comum substituir a Coca-Cola por ácido sulfúrico diluído.

O processo de oxidação do zinco destrói parte do eletrodo e libera elétrons no metal. O cobre e o zinco possuem potenciais-padrão suficientemente diferentes (+0.34V e -0.76V, respectivamente), para produzir uma diferença de potencial de cerca de 1 V entre os eletrodos. Os elétrons liberados no zinco fluem para o eletrodo de cobre entrando no eletrólito, onde se combinam com íons de hidrogênio gerados a partir do ácido fosfórico. A redução associada com esta reação libera gás hidrogênio.

Você também pode montar e experimentar outros tipos de baterias simples que utilizam o mesmo par de eletrodos com diferentes eletrólitos, como por exemplo, baterias que se formam introduzindo os eletrodos em um limão ou em uma batata.

Um pouco mais sofisticada é a chamada **pilha de Daniel**, com a qual vocês também poderão praticar um pouco mais seus conceitos de eletroquímica.

Fontes eletrônicas

Neste curso utilizaremos quase sempre as fontes de alimentação eletrônicas que, de acordo com a nossa definição, são fontes que ligadas na **tomada de força** produzem tensão (ou corrente) contínua de **amplitude variável**.

Embora haja uma grande diversidade de modelos, aquele mostrado na Figura 3.6 representa um tipo simples muito presente nos laboratórios.

No momento, em vez de estudar o princípio de funcionamento destas fontes de alimentação vamos simplesmente discorrer sobre alguns conceitos práticos. Em um capítulo adiante mostraremos mais detalhes a respeito de como elas são construídas e de suas características básicas.



Figura 3.6: Fonte de tensão Tectrol modelo TC 30-02.

Observe que a fonte mostrada na Figura 3.6 possui três conectores assinalados pelos símbolos + (vermelho), – (preto) e ⏚ (verde). Em algumas outras fontes, o símbolo "terra", ⏚, pode vir substituído pela sigla "GND" a qual é proveniente da palavra inglesa *ground*.

Se você se ater em observar a figura por alguns instantes com certeza irá fazer a primeira pergunta do dia: "Professor, se uma bateria qualquer possui dois terminais, porque a fonte de alimentação possui três?"

A pergunta tem um enorme sentido, visto que o símbolo esquemático da fonte eletrônica é o mesmo que o da bateria, isto é, o mesmo símbolo com apenas dois terminais. Esta pergunta será respondida a partir do esquema da Figura 3.7.

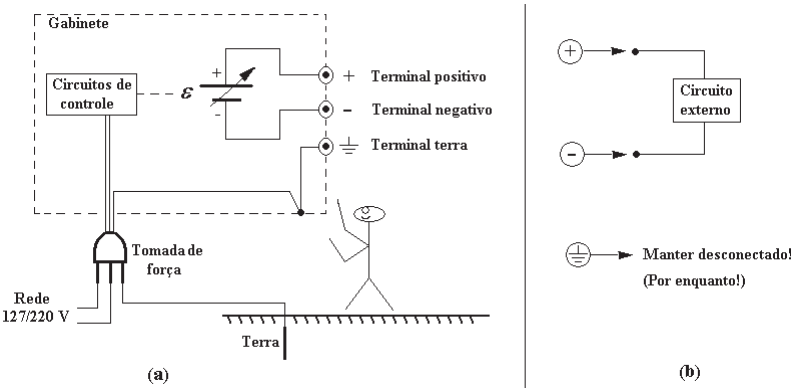


Figura 3.7: (a) Diagrama simplificado de uma fonte eletrônica de tensão DC e (b) Conexões da fonte em um circuito externo.

Você pode imaginar que dentro da fonte existe uma bateria de fem igual a ε e que os seus **dois** terminais estão conectados diretamente aos terminais (+) e (-) apresentados na figura. Uma certa carga externa, seja ela um circuito qualquer, **deve ser** conectado entre estes dois terminais.

A figura também sugere que o terceiro terminal, denominado "**terra**", deve ser, pelo menos por enquanto, **ignorado**. Para que você não pense que estou subestimando a sua inteligência, irei explicar agora mesmo uma das funções deste terceiro terminal mas, a explicação completa eu vou deixar só para mais tarde.

A fonte de alimentação da Figura 3.7 é construída dentro de uma caixa (normalmente) metálica (chamada de gabinete) que, de acordo com as normas vigentes, deve estar isolada eletricamente dos seus circuitos internos e, sobretudo, da tensão da rede. A razão é simples e sempre válida para qualquer instrumento eletrônico: minimizar as chances do usuário tomar um choque ao tocar na parte externa do

instrumento.

Normalmente um instrumento qualquer é sempre construído obedecendo esta norma porém, acidentes podem ocorrer e, assim, cuidados adicionais devem ser tomados.

Um destes cuidados consiste em "**aterrar**" o gabinete, o que significa algo muito parecido com o que o próprio verbo diz: colocar o gabinete no mesmo potencial elétrico do **chão** em que você está pisando. Desta forma, aconteça o que acontecer, não havendo diferença de potencial não haverá corrente elétrica circulando através do seu corpo, isto é: entre o seu pé, que está em contato com o chão e a sua mão que está em contato com o instrumento.

A forma de aterrar o instrumento é através do seu cabo de força, no qual um dos pinos (o terceiro pino!) é conectado diretamente ao terra do laboratório, deixando os outros dois para a alimentação elétrica do instrumento.

O que vem a ser o tal **terra do laboratório** e o tal **terceiro pino** da tomada de força? Vamos discutir este assunto mais tarde com mais detalhes, porem, podemos agora adiantar que o primeiro é simplesmente um conector de cobre enterrado no chão, em um local próximo, e conectado através de fios de grosso calibre ao terceiro pino do conjunto de tomadas de força do laboratório. Assim, tanto o chão como o gabinete do instrumento estão no mesmo potencial elétrico.

E qual a utilidade daquele terminal da fonte, denominado de "terra", que internamente está ligado à **carcaça** (ou gabinete) do instrumento, que por sua vez (através da conexão feita pelo cabo de força) está no mesmo potencial que o terra do laboratório?

A utilidade deste terceiro terminal é permitir que o potencial de terra possa ser transmitido também aos outros circuitos externos que estão sendo alimentados pela fonte.

Entretanto, como vocês ainda não dominam estas técnicas laboratoriais é melhor que não utilizem o terminal GND por enquanto, porque utilizá-lo mal pode ser muito mais perigoso do que não utilizá-lo! Acreditem em mim!

As fontes triplas

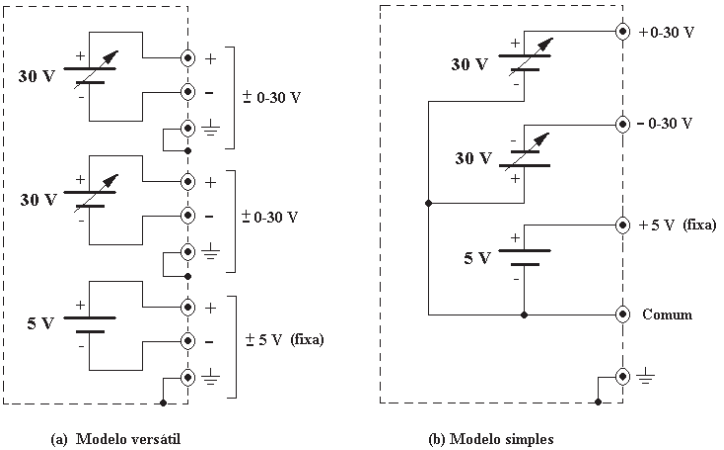


Figura 3.8: Diagrama simplificado de uma fonte de alimentação DC tripla.

A fonte que acabamos de conhecer é do tipo básico, mas, existem outros modelos mais sofisticados como aquele mostrado no diagrama da Figura 3.8, o qual é mais apropriado para o nosso trabalho neste curso. Esta é chamada de fonte tripla, que vocês podem imaginar simplesmente como sendo um instrumento "três-em-um". A Figura 3.8(a) mostra o esquema de uma fonte tripla genérica. Basicamente, ela consiste de três fontes similares à anterior e instaladas em um único gabinete, sendo duas com fem variável (na faixa 0-30 V) e uma outra fixa em 5 V.

Para que serve uma fonte tripla? Em se tratando de fontes de alimentação, com certeza "uma é pouco, duas é melhor mas (neste curso) três **não** vai ser demais". Com o transcorrer do curso ficará evidente que os circuitos que iremos montar requisitarão várias tensões de alimentação. Em particular, amplificadores operacionais serão alimentados, na maior parte das aplicações, por duas fontes simétricas (±15 V), enquanto que uma única fonte de +5 V será suficiente para os circuitos digitais da família TTL

(*Transistor-Transistor-Logic*). Portanto, uma fonte tripla vai otimizar o espaço sobre a sua bancada de trabalho e, além disso, barateia o custo, pois uma fonte tripla custa menos do que três fontes simples.

Para aplicações rotineiras a fonte tripla da Figura 3.8(a) pode vir a ser um exagero. O modelo da Figura 3.8(b) é mais simples e pode ser suficiente para a maioria das aplicações. Esta também possui três fontes, porém ela não lhes dá a liberdade de escolher a polaridade das mesmas. Como você pode notar, ela possui duas fontes de tensão variável (0-30 V), sendo uma de polaridade positiva e uma outra negativa com relação a um terminal comum. A fonte de 5 V também tem polaridade fixa com relação ao terminal comum. Observe que o terminal comum não está ligado ao terminal terra.

Os limitadores de corrente e tensão

Ao observar os controles da fonte mostrada na Figura 3.6 tem-se uma primeira impressão de que é possível ajustar-se independentemente os valores de tensão (V) e corrente (I). De acordo com o fabricante, esta fonte pode fornecer 30 V e 2 A a uma carga. A pergunta é: será que é possível escolher-se os valores de V e I abaixo destes dois limites de forma independente? A resposta é: NÃO. Não é assim que este tipo de fonte funciona!

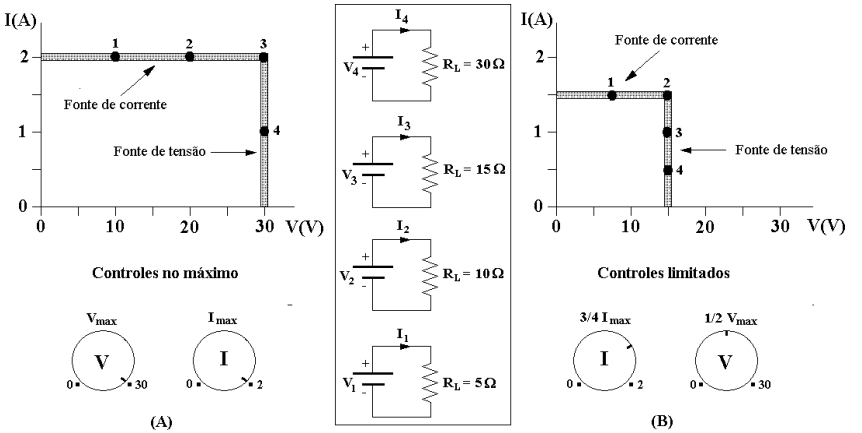


Figura 3.9: O efeito dos controles de corrente e tensão de uma fonte simples é analisado em duas situações; (A) controles no máximo e (B) controles em posições que limitam V e I. Nos gráficos, as linhas horizontais e verticais, onde estão assinalados os pontos 1 a 4, denotam a faixa de operação da fonte. Em cada caso, numerados de 1 a 4, considera-se quatro valores distintos para a resistência de carga; (1) 5 Ω (2) 10 Ω (3) 15 Ω e (4) 30 Ω.

Para que você entenda melhor vou dar um exemplo. Imagine que esta fonte está conectada, entre os terminais (+) e (-), a um resistor de carga de valor 15 Ω. Se os dois controles da fonte estiverem nas suas respectivas **posições máximas**, isto é, se a tensão está limitada em 30 V e a corrente em 2 A; então, o que vai acontecer? Bom, lembre-se que Lei de Ohm tem que valer! Portanto, se $R_L = 15\ \Omega$ e $V = 30$ V então a corrente deveria valer $I = V/R_L = 30/15 = 2$ A. Então, tudo bem, concluímos que: perfeito!

Mas, e se trocássemos o resistor de carga por outro de valor 10 Ω, qual seria o novo valor da corrente? Se a tensão fosse 30 V então a corrente seria $I = V/R_L = 30/10 = 3$ A. Mas, a fonte está limitada em 2 A! Portanto, a corrente vai ficar limitada em 2 A e, como consequência a tensão vai ser $V = R_L I = 10\Omega \times 2A = 20V$, um valor abaixo do limite de 30 V. Neste caso dizemos que a fonte está **limitada por corrente**.

Ainda mais, e se o valor do resistor de carga fosse 30 Ω? Se a corrente fosse de 2 A a tensão teria que valer $V = R_L I = 30\Omega \times 2A = 60V$, o que é impossível porque a fonte está limitada em 30 V. Portanto, neste caso a fonte vai estar **limitada por tensão** e a corrente vai valer $I = V/R = 30/30 = 1$ A, um valor abaixo do valor limite de 2 A.

Com esta análise pudemos concluir que os valores reais da corrente e tensão em um dado resistor de carga dependem dos controles da fonte e também do valor da resistência de carga. O mesmo raciocínio se aplica quando os controles limitadores da tensão e corrente estão abaixo dos seus respectivos valores máximos. Para entender melhor este intrincado raciocínio estude com cuidado os exemplos esquematiza-

dos na Figura 3.9 e, se tiver dúvidas, me pergunte. Em quais casos a fonte está limitada por tensão ou por corrente?

Fonte de voltagem ou fonte de corrente?

Com o aprendizado da seção anterior vocês devem ter notado que uma fonte de tensão simples, como a da Figura 3.6, pode ser mais complicada do que parece. De fato, este tipo de fonte pode operar em dois modos: limitado por tensão ou limitado por corrente. Quem vai definir se uma ou outra situação ocorrerá será o valor da resistência de carga e as posições dos controles da fonte.

Quando a fonte está limitada por tensão dizemos que ela é uma **fonte de tensão** e, alternativamente, quando a fonte está limitada por corrente, dizemos que ela é uma **fonte de corrente**. No caso geral, as chamadas "fontes de alimentação" podem ser de dois tipos: fontes de tensão e fontes de corrente. A Figura 3.10 mostra o esquema equivalente de ambas.

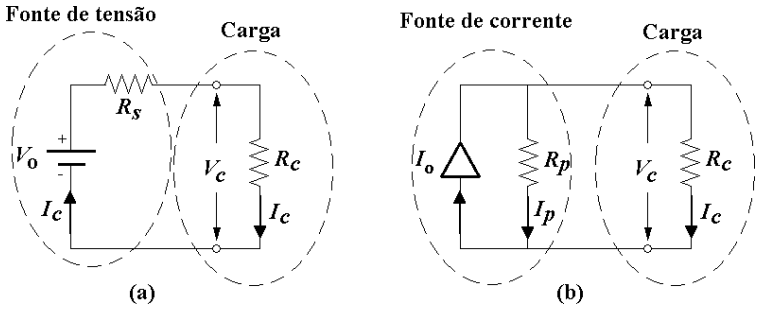


Figura 3.10: Representação esquemática das fontes de tensão (a) e corrente (b).

A fonte de tensão é equivalente a uma força eletromotriz, V_o (também denotada por ε em muitos textos), **em série** a uma resistência R_s. A fonte de corrente é equivalente a um dispositivo que impõe uma corrente I_o **em paralelo** a uma resistência R_p. Estas resistências são denominadas de "resistências internas". A figura mostra a situação em que ambas as fontes estão conectadas a um circuito externo, denominado de "carga", que neste caso consiste apenas de um único resistor de valor R_c.

A resistência interna, R_s, de uma fonte de tensão ideal é nula; isto é, a fonte de tensão ideal é capaz de fornecer (ou absorver) qualquer quantidade de corrente sem alterar a diferença de potencial na carga; isto é, sem alterar V_c. O valor desta corrente depende apenas do valor do resistor de carga R_c. Em outras palavras, para uma fonte de tensão ideal temos $R_s = 0$, $V_c = V_o$ e $I_c = V_o/R_c$. Se esta fonte for ligada a um circuito aberto ($R_c = \infty$) a corrente através da fonte será nula, assim como também será nula a potência fornecida ou absorvida. Se conectada a uma resistência de carga finita, a corrente através da carga será maior quanto menor for o valor da resistência de carga e se aproximará de infinito quando a resistência de carga for nula (isto é, quando $R_c = 0$ a fonte estará em curto-circuito e a corrente será infinita).

Portanto, uma fonte de voltagem (ou tensão) ideal é um dispositivo que mantem uma voltagem fixa, igual a $V_c = V_o$, entre os seus dois terminais, a e b, independentemente da corrente fornecida (ou absorvida).

Como nenhuma fonte de tensão real é ideal, as fontes reais possuem uma resistência interna, R_s, que limita o valor da corrente que ela pode fornecer. A máxima corrente possível acontece quando os terminais a e b estão em curto, resultando $R_c = 0$ e $I_c^{max} = V_o/R_s$. O valor da resistência interna das boas fontes eletrônicas comerciais é muito pequeno, podendo ser considerado nulo em todas as aplicações deste curso. Porem, isto não é verdade para outras fontes comuns, como por exemplo as baterias (veremos um pouco mais sobre isso na seção 4.4.1).

As fontes de tensão reais, como a da Figura 3.6 operando no modo limitado por tensão, possuem uma segunda limitação. Com a finalidade de proteger o circuito interno da fonte contra excesso de corrente na saída, o fabricante especifica qual o valor máximo da corrente na carga quando a fonte opera no modo limitado por tensão. No caso da fonte exemplificada na foto, o valor máximo da corrente quando o controle da corrente está no máximo, é de 2 A. Se o valor da resistência de carga é diminuído, na tentativa de aumentar-se o valor da corrente acima do especificado, a fonte responde diminuindo a tensão de saída a fim de manter a corrente fixa no seu limite máximo de 2 A. Nesta situação, a fonte deixa de ser limitada

por tensão e passa a ser limitada por corrente. Em outras palavras, ela deixa de ser uma fonte de tensão e passa a ser uma fonte de corrente.

Uma fonte de corrente ideal possui resistência interna infinita ($R_p = \infty$) e produz uma corrente, $I_o = I_c$, cujo valor é independente do valor da resistência de carga R_c. Vamos agora estudar quais as consequências desta definição. Primeiro, uma fonte de corrente especificada com corrente nula é equivalente a um circuito aberto. Segundo, se uma resistência de carga é conectada aos terminais de uma fonte de corrente ideal, o valor da voltagem através da fonte aumenta quando o valor da resistência de carga aumenta, a fim de manter-se a corrente constante. Isto significa que, se o valor da resistência de carga se aproxima do infinito (circuito aberto) a voltagem também tende a infinito. Mas, como é que uma fonte de corrente pode fornecer corrente quando os seus terminais estão abertos? Portanto, é claro que tem algo errado e o que está errado é que uma fonte de corrente ideal não existe!

A primeira limitação de uma fonte de corrente real, comparada com a ideal, é que ela possui um valor máximo para a sua tensão de saída, analogamente ao que ocorre com a fonte de tensão real discutida nos parágrafos anteriores. No caso da fonte exemplificada na Figura 3.6 a tensão máxima é de 30 V quando o controle de tensão está no máximo. Quando a resistência da carga é aumentada, com a intensão de aumentar-se a tensão acima do valor especificado, a fonte responde diminuindo a corrente. Nesta situação ela deixa de ser uma fonte de corrente e passa a ser uma fonte de tensão.

A segunda limitação de uma fonte de corrente real é que ela possui uma resistência interna finita, o que limita o valor da tensão na carga. O maior valor de tensão na carga ocorre quando $R_c \to \infty$, resultando $I_c = 0$ e $I_p = I_o$, tal que $V_c^{max} = R_p I_o$. No caso da maioria das fontes eletrônicas comerciais pode-se considerar $R_p = \infty$ e o controle da tensão máxima é implementado eletronicamente.

Retorne agora para a Figura 3.9 e determine por você mesmo quais as situações em que a fonte opera como fonte de tensão ou fonte de corrente? Estudaremos um pouco mais sobre este assunto no capítulo 4.

A placa de montagens e os circuitos

A forma mais prática e corriqueira de montar-se um circuito eletrônico é através de uma placa de montagem (chamada em inglês de *protoboard* ou *breadboard*). Nesta placa, uma grande parte dos componentes eletrônicos; tais como resistores, capacitores, diodos e circuitos integrados podem ser rapidamente conectados sem a necessidade de solda.

A placa de montagens é fantástica no que diz respeito à sua reconhecida praticidade para realização de testes. Qualquer circuito pode ser fácil e rapidamente instalado, testado, modificado e novamente testado em poucos minutos. Além disso, as conexões entre os componentes e placa não são destrutivas, permitindo que os mesmos possam ser posteriormente reutilizados em outras montagens.

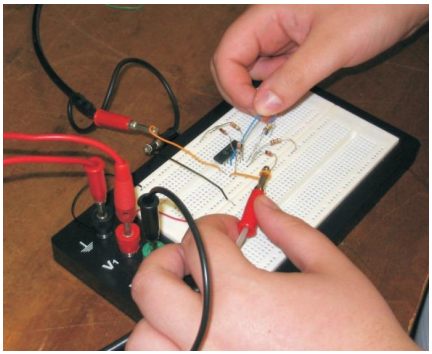


Figura 3.11: Um aluno testando seu circuito na placa de montagens.

Por estes motivos, o primeiro estágio do desenvolvimento de um circuito eletrônico é quase sempre realizado em uma placa de montagens. Somente após estarmos seguros e convencidos de que o circuito desempenha a função desejada é que ele é transferido para uma estrutura mais definitiva (e geralmente irreversível) como, por exemplo, para uma placa de circuito impresso.

Frequentemente, por falta de tempo ou recursos, o circuito teste montado numa placa de montagem é utilizado de forma definitiva durante anos. Isto só é possível porque uma boa placa de montagens é robusta e, se manuseada com cuidado, pode manter intactas as características originais do circuito durante um longo tempo. Um rápido passeio pelos nossos laboratórios de pesquisa lhes mostrará inúmeros exemplos desta natureza.

O trabalho de montagem de um circuito na placa de montagens é artesanal e exige, por parte do experimentador, uma boa dose de "bom senso" e uma outra pitada de dotes artísticos, além, é claro, de conhecimentos técnicos. A forma correta de montar-se um circuito na placa envolve diversos truques que serão aprendidos somente com a prática e, por isso, é difícil enumerá-los e descrevê-los na forma de um manual. Portanto, tenham calma e perseverança. No início suas montagens ficarão parecidas com um "ninho de pombos" mas, com o tempo você vai aprender a aprimorar suas habilidades (vide Figura 3.11).

Bom, o que é uma placa de montagem? Existem modelos diferentes mas, em geral, ela é algo parecido com o esquema mostrado na Figura 3.12. Os terminais dos componentes são inseridos nos orifícios de uma matriz de plástico (pequenos círculos negros no diagrama abaixo), os quais são guarnecidos internamente por soquetes metálicos. Estes soquetes estão interconectados em grupos, denotados na Figura pelas letras A e B.

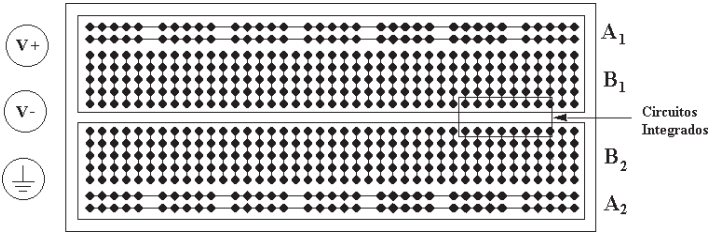


Figura 3.12: Esquema das conexões internas de uma placa de montagem típica.

Os grupos A1 e A2 são idênticos e cada um composto de duas linhas de contatos horizontais. Nos grupos B1 e B2, também idênticos entre si, os contatos se fazem na vertical. Duas colunas verticais quaisquer do grupo B não fazem contatos entre si, assim como, duas horizontais do grupo A.

Os terminais dos componentes (incluindo fios metálicos de diâmetro não maior que o de calibre 22) podem ser inseridos nos orifícios da placa de montagem e se tornam automaticamente conectados ao mesmo conjunto de contatos da sua linha ou coluna correspondente. Circuitos integrados são normalmente conectados ao longo da divisão central da placa, conforme mostra a figura.

Com certeza, vocês encontrarão bastante facilidade em montar circuitos na placa de montagem (a perfeição vem com a prática), porém, chamamos a atenção para alguns cuidados básicos:

1. Normalmente os componentes e fios ficam firmemente presos nos contatos, todavia, é aconselhável manusear a placa com cuidado.

2. A ponta de prova do osciloscópio que for guarnecida de conectores do tipo "jacaré" pode ser conectada diretamente nos terminais dos componentes, no ponto em que eles emergem do contato, porém, é aconselhável conectar um pedaço extra de fio em um dos orifícios do conjunto e conectar a ponta de prova na outra extremidade do fio (vide Figura 3.11) pois isto evita torcer o terminal do componente e deterioração do contato elétrico.

3. Os agrupamentos horizontais longos (do tipo A) são normalmente utilizados como pontos de distribuição de tensões comuns do circuito, como por exemplo, tensões de alimentação e terra.

4. A maioria das placas de montagens possui conectores (do tipo banana) para interligação da fonte de alimentação (tensões V+, V- e terra) com os orifícios da placa.

5. Alguns componentes eletrônicos, tais como capacitores grandes, na faixa de acima de μF ou acima, e diodos de potência, possuem terminais mais resistentes e de grosso calibre (acima de calibre 22). Estes não devem ser inseridos diretamente nos orifícios da placa. Uma sugestão é soldar pedaços de fios de menor calibre nos seus terminais e utilizar a outra ponta do fio para as conexões.

6. Tomando cuidado, os circuitos (bem) montados em placas de montagem podem funcionar perfeitamente durante anos, porém, eles são considerados frágeis e muito suscetíveis a captação de ruído por interferência. Portanto, uma vez testada, a versão final do protótipo deve ser montada em placa de circuito impresso e acondicionado em um gabinete apropriado.

Algumas convenções gráficas

Nos livros textos que você for estudar ou em qualquer texto sobre Eletrônica, os esquemas dos circuitos mostram os fios através de linhas retas que se cruzam para simbolizar uma junção física entre ambos, ou através de linhas retas que no ponto de cruzamento saltam uma sobre a outra, o que é denotado por um meio círculo como mostrado na Figura 3.13, para simbolizar que ambos não estão conectados entre si.

Eu, particularmente, não gosto desta maneira de representar as conexões elétricas e, de fato, os textos mais modernos utilizam uma convenção na qual linhas que se cruzam não fazem contato entre si e, quando o fazem isto é representado por um círculo cheio no ponto de cruzamento.

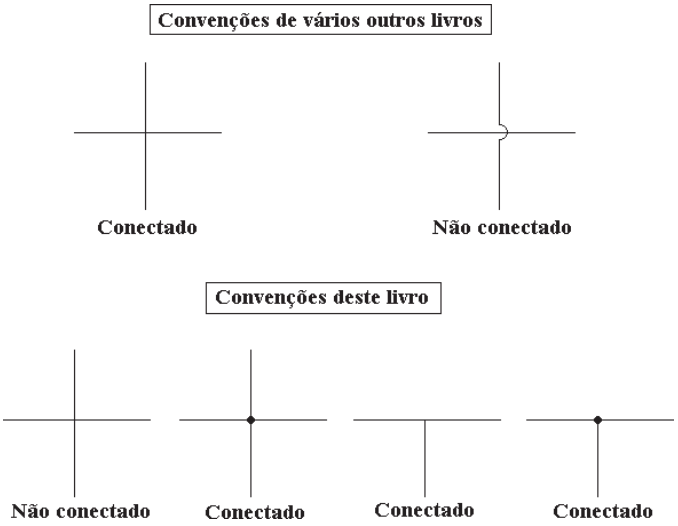


Figura 3.13: Convenções utilizadas para simbolizar as conexões elétricas em um diagrama.

Contatos imediatos com a placa de montagem

Nesta prática implementaremos e observaremos o funcionamento de dois circuitos, do tipo daqueles que você encontraria nas revistas de eletrônica adquiridas em uma banca próxima de sua casa. O objetivo é mostrar que montar um circuito não é uma tarefa impossível, muito menos difícil. Você pode não entender como é que ele funciona mas, com certeza, vai saber reconhecer se ele está funcionando ou não (o que já é um grande aprendizado!).

Alem disso, esta prática vai servir para você praticar as técnicas de manuseio dos componentes e a sua inserção na placa de montagem.

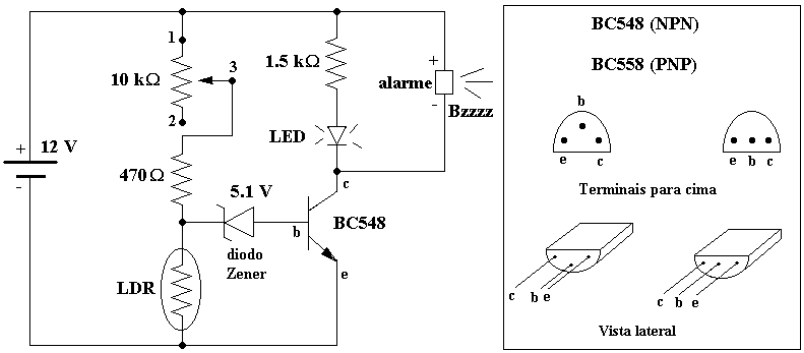


Figura 3.14: Esquema elétrico de um sensor de luminosidade.

Prática: Sensor de luminosidade

As propriedades óticas do LDR possibilitam o seu uso como um ótimo sensor luminoso. O circuito mostrado na Figura 3.14 exemplifica uma aplicação típica, no qual o LDR é utilizado para ativar um

transistor, que por sua vez irá acender uma lâmpada (no caso, um LED) e acionar um alarme sonoro, sempre que escurecer. Monte o circuito e brinque com ele em diversas condições de luminosidade.

Observe que o resistor de 10 kΩ é um potenciômetro. Ele tem três terminais e o terminal 3 é o variável, enquanto que o terminal 2 deve ser deixado desconectado. Pergunte se não entender.

Talvez seja necessário aumentar o valor do potenciômetro para compensar o fato de que o LDR que você está usando é diferente daquele que eu usei quando estabeleci o projeto do circuito (por exemplo, de 470K para 1M ou 100K). Tenha em mente que a voltagem com relação ao emissor do transistor - no ponto que une o potenciômetro, o diodo e o LDR - deve estar na faixa de 2-3 V quando o LED estiver apagado.

Ajuste o potenciômetro de tal forma que o LED esteja apagado, mas no limiar de acender quando na luz ambiente. Faça este ajuste de tal forma que o LED acenda e acione o *buzzer* quando você faz sombra no LDR com a sua mão.

Atenção: O próximo circuito utiliza um alto-falante, em lugar do *buzzer* e ambos devem estar sobre a sua bancada de trabalho. Por isso, não troque um pelo outro senão você vai queimar o alto-falante.

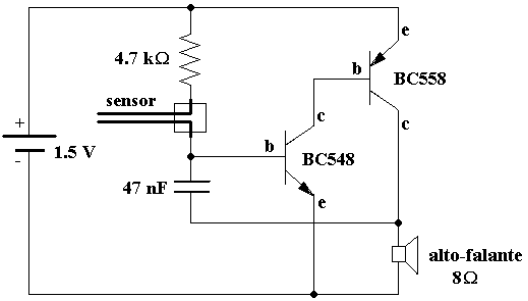


Figura 3.15: Esquema elétrico de um sensor de umidade.

Prática: Sensor de umidade

O seguinte circuito é um detector de umidade. Uma aplicação bastante simples seria a de dar um aviso (sonoro ou visual) quando um vaso de flor estiver necessitando ser regado (um bom presente para sua mãe no Dia das Mães). O sensor utilizado consiste simplesmente de dois fios condutores paralelos e próximos. Quando entre eles existe apenas ar, ou algum material isolante (como a terra seca), a corrente não flui entre eles. Como terra+água é condutor elétrico, a sua presença de água entre os fios diminui a resistência entre eles e a corrente passa a fluir. Quando isso ocorre, o conjunto formado pelos dois transistores é acionado, fazendo com que todo o circuito entre em oscilação produzindo som no alto-falante. O som do alto-falante não é muito alto e a sua frequência deve aumentar quando a resistência do sensor diminui (quando aumenta a umidade).

Brinque com o circuito tocando o sensor com os dedos levemente umedecidos. Não se preocupe, não vai dar choque. Experimente pressionar contra os dois fios do sensor um pedaço de papel seco. Umedeça o papel e repita o experimento.

Outras utilidades do símbolo de terra

Explicamos anteriormente que existe no laboratório pontos que estão fisicamente conectados no solo através de fios condutores (em particular, este é o caso do terceiro pino das tomadas de força). Entretanto, nos esquemas elétricos o símbolo de terra não é utilizado apenas para significar este tipo de aterramento físico.

Na maioria das vezes este símbolo assinalado em algum ponto de um esquema, NÃO quer significar que este dado ponto deva ser conectado ao terra do laboratório, pois quase sempre ele é utilizado com uma segunda intenção.

Vou explicar melhor utilizando a Figura 3.16 na qual os circuitos anteriores foram novamente desenhados segundo um outro critério. Para esta nova maneira de desenhar o circuito nós notamos que os